

Artículo

Estudio sobre las características del movimiento del humo del fuego y sus Impacto en la evacuación personal en túneles de autopistas con curvas

Yuang Cui y Zhiqiang Liu *

Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Lanzhou Jiaotong, Lanzhou 730070, China; 11220166@stu.lzjtu.edu.cn *
Correspondencia: lzqiang@mail.lzjtu.cn

Aplicación destacada: Aplicación destacada: Simulador de dinámica de fuego Pyrosim.

Resumen: En las investigaciones existentes sobre incendios en túneles, los investigadores se centran principalmente en túneles rectos, ignorando el impacto de las paredes laterales curvas en túneles curvos. Con base en la teoría de la difusión de humo, se realizó una serie de simulaciones numéricas CFD utilizando el Simulador de dinámica de incendios para investigar las características de la distribución de humo en un túnel de carretera curvo. Los resultados indicaron que se observaron distintas características de distribución del humo cuando se produjo un incendio en un túnel curvo. en comparación con los observados en túneles rectos, con diferencias significativas particularmente evidentes para el radio de curvatura del túnel por debajo de 1000 m. Al comparar las características de distribución del humo de varias ubicaciones de fuentes de incendio, se determinaron las ubicaciones de fuentes de incendio más desfavorables dentro de un túnel curvo. El humo del incendio de alta temperatura se limita entre las paredes interior y exterior del túnel, lo que lleva a la formación de múltiples zonas de alta temperatura cerca de la fuente del incendio, en lugar de difundirse directamente hacia la salida en un túnel lineal. Además, basándose en un análisis de temperatura, visibilidad y concentración de CO en alturas características, se dedujeron ubicaciones adecuadas para cruces de peatones dentro del túnel y se propuso una estrategia de evacuación para personas dentro del área central del incendio. Los resultados pueden proporcionar una referencia para las estrategias de evacuación personal en escenarios de incendio en túneles de carreteras curvas y el diseño de un túnel para las personas que pasan por dichos túneles.

Palabras clave: túnel carretero curvo; fuego; distribución de humo; evacuación personal



Cita: Cui, Y.; Liu, Z. Estudio sobre el fuego
Características del movimiento del humo y

Su impacto en la evacuación personal en túneles
de carreteras curvas. *Aplica.*

Ciencia. 2024, 14, 6339. <https://doi.org/10.3390/app14146339>

Editor académico: Cheng-Yu Ku

Recibido: 22 de junio de 2024

Revisado: 15 de julio de 2024

Aceptado: 18 de julio de 2024

Publicado: 20 de julio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.
Licenciario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/curvos> basadas en los de los incendios en túneles rectos. Wang Feng construyó modelos numéricos sobre las características del movimiento del humo del fuego de un túnel curvo con un radio de

1. Introducción

Con el avance de la tecnología de excavación de túneles, ha habido un aumento gradual en la proporción de túneles curvos dentro de los sistemas de carreteras. La estructura única de un túnel curvo introduce una mayor complejidad en el flujo de humo y las variaciones de temperatura durante los incidentes de incendio, dependiendo del radio de giro del túnel [1–3]. Investigaciones anteriores han delineado los patrones de movimiento del humo de los incendios en túneles lineales y han proporcionado fórmulas para calcular la longitud de la capa posterior de humo, la velocidad crítica del viento y la temperatura máxima. Sin embargo, la difusión del humo está sujeta a diversos factores que influyen, como la altitud, la pendiente del túnel y la curvatura del túnel. La curvatura del túnel constituye el foco de esta investigación.

Investigaciones anteriores han demostrado que los túneles curvos y los túneles rectos exhiben características distintas. Kashef et al. Estudió la estrategia de control de humo en las zonas rectas y curvas de un túnel mediante experimentos y simulaciones numéricas. Sus resultados señalaron que cuando la fuente de fuego estaba en el área curva, la temperatura cerca de la fuente de fuego era significativamente más baja que en el área recta y la longitud de la capa posterior de humo aumentaba [4].

Mientras tanto, se han propuesto fórmulas de corrección para indicadores clave de incendios en túneles curvos basadas en los de los incendios en túneles rectos. Wang Feng construyó modelos numéricos sobre las características del movimiento del humo del fuego de un túnel curvo con un radio de

600 my propuso un método de cálculo de la resistencia a lo largo del túnel curvo para aclarar la ley de la influencia del túnel curvo en el flujo de fluido [5-7]. Caliendo et al. utilizaron simulación numérica CFD para estudiar la influencia de la ventilación longitudinal en la capa de humo en un túnel curvo de dos carriles y predijeron la ubicación de la temperatura máxima del techo [8]. Wu et al. estudiaron las características de transporte de humo de fuego del túnel de la autopista curva Qianhaizi para obtener la velocidad crítica del viento del túnel [9]. Wang realizó simulaciones numéricas de un incendio en un túnel de carretera curvo utilizando Fluent para comparar la velocidad crítica del viento en las ubicaciones convexas y cóncavas de la fuente del incendio. También analizaron la longitud de la capa posterior de humo y concluyeron que la velocidad crítica en la ubicación convexa era mayor [10]. Zhong et al. estudiaron la ley de propagación del humo durante incendios en túneles inclinados y curvos mediante simulaciones numéricas y experimentos y descubrieron que la ubicación con la mayor diferencia en las tasas de transferencia de calor era el techo del túnel en diferentes condiciones de trabajo [11]. Zhang et al. combinó la simulación numérica con el análisis teórico para determinar un modelo de incendio adecuado para túneles curvos y estudió la longitud de la capa de humo y la velocidad crítica de ventilación de los túneles curvos [12]. Pan et al. Estudió el efecto de una pared lateral curva sobre la forma del fuego y la temperatura máxima debajo de la línea central del techo y estableció fórmulas para predecir la temperatura máxima debajo de la línea central del techo [13]. Lu investigó la distribución de temperatura en túneles curvos a través de un método de simulación numérica y propuso un nuevo modelo de decaimiento exponencial para predicciones de temperatura longitudinal bajo diversas condiciones de curvatura de túneles [14].

Xu et al. Realizó experimentos y simulaciones numéricas para analizar la velocidad crítica de un túnel curvo en diferentes escenarios de incendio [15].

Sin embargo, queda poca investigación que investigue directamente el impacto del fuego en túneles curvos en la evacuación de personas. Muhasilovic et al. estudiaron la influencia del radio de curvatura (>2500 m) sobre la radiación térmica y la distribución del humo en un túnel mediante simulación numérica [16]. Lu estableció un modelo numérico por FDS para comparar la difusión del humo y la distribución de temperatura de un incendio en un túnel en la sección recta y en la sección curva. Descubrieron que el reflujo de humo era más grave y la temperatura aumentaba más significativamente cuando el incendio se producía en la sección curva [17].

Zhao y cols. utilizaron FDS para realizar una simulación numérica de un incendio en un túnel con un radio de curvatura pequeño y descubrieron que el radio de curvatura conduciría a un gran gradiente de temperatura cerca de la fuente del incendio [18]. Li simuló el flujo de humo de fuego en un túnel de curvatura única mediante Fluent para obtener el cambio en la concentración de CO en diferentes entornos de curvatura y ventilación [19]. Liu y cols. evaluaron factores como la curvatura del túnel, el tiempo de operación de la ventilación longitudinal y la velocidad de la ventilación para investigar la influencia de los parámetros de ventilación longitudinal en el efecto de extinción de incendios de la niebla de agua en un túnel curvo [20].

Además, no se han realizado las características de la difusión del humo a la altura característica del ojo humano y la variación de factores como la temperatura, la visibilidad y la concentración de CO en incendios de túneles curvos que afectan la evacuación personal. Incluso los códigos existentes carecen de directrices específicas para el control de incendios en túneles curvos [21,22]. Por tanto, este artículo determina las características de la difusión de humo que presentan los túneles curvos de las carreteras con diferentes curvaturas y evalúa el impacto en la evacuación de personas. También se proporcionan las estrategias de evacuación recomendadas y el diseño de un túnel para personas. La atención se centra en el patrón distintivo de difusión del humo y las estrategias para abordar su impacto en las eva

2. Materiales y métodos

2.1. Simulador de dinámica de fuego

El Fire Dynamics Simulator (FDS) [23,24] es un código desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE. UU. que ha sido ampliamente adoptado por muchos investigadores para estudiar los campos de temperatura y velocidad en incendios luego de la maduración de la dinámica de fluidos computacional (CFD). y el desarrollo de la capacidad informática [25]. La validez de este código ha sido ampliamente verificada por muchos trabajos de investigación sobre incendios. El FDS está diseñado para la simulación de grandes remolinos (LES) de flujos impulsados térmicamente y de baja velocidad.

donde p_a es la densidad ambiental; C_p es la capacidad calorífica; g es la aceleración gravitacional, H es la altura del túnel; L_b es la longitud de la capa posterior, donde $L_b = 0$ define la velocidad crítica; t_a es la temperatura ambiente del gas; u es la velocidad longitudinal; y W es el ancho del túnel.

Como se muestra en la ecuación (1), la densidad ambiental, la temperatura ambiente del gas y la capacidad calorífica cambian a medida que aumenta la altitud. Como resultado, se elige la velocidad crítica máxima de 3,56 m/s. para diseñar las simulaciones.

Según los datos del período de operación del túnel existente [31,32], la velocidad del viento de control de ventilación longitudinal del túnel varía de 2,0 m/s (el máximo natural longitudinal velocidad de ventilación) a 8,0 m/s (la velocidad de ventilación longitudinal de control máxima). Cuando ocurre un incendio, la velocidad del viento en el túnel debe ser un poco mayor que el viento crítico. velocidad. Según el código nacional, el radio de curvatura de las simulaciones era elegido como radio de giro mínimo a diferente velocidad [33].

Los estudios existentes [6,7,15,34,35] muestran que la curvatura de un túnel afectará el punto crítico Velocidad del incendio de un túnel. Por lo tanto, se seleccionó 4 m/s como velocidad crítica en este papel. Los resultados de simulaciones posteriores también muestran que la curvatura del túnel tiene un efecto en la velocidad crítica.

Un grupo de velocidad general (la velocidad de ventilación longitudinal es de 2 m/s; pruebas 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 y 17) y un grupo de velocidad crítica (la velocidad de ventilación longitudinal es 4 m/s; Las pruebas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18) se establecieron para estudiar el movimiento del humo del fuego. características bajo velocidad de ventilación longitudinal natural y control longitudinal Velocidad de ventilación en caso de incendio. Excepto ventilación longitudinal, ningún otro mecanismo En la simulación se tuvieron en cuenta las medidas de ventilación. Se muestran todas las pruebas. en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de todas las pruebas.

No.	Radio de curvatura, m	Velocidad de ventilación longitudinal, m/s
1, 2	∞	2, 4
3, 4	250	2, 4
5, 6	400	2, 4
7, 8	600	2, 4
9, 10	800	2, 4
11, 12	1000	2, 4
13, 14	1200	2, 4
15, 16	1500	2, 4
17, 18	2000	2, 4

2.4. Tamaño de la cuadrícula

Los estudios existentes han demostrado que el tamaño de la cuadrícula tiene una gran influencia en la precisión de Los resultados de la simulación y el tamaño de la malla tienen una fuerte relación con las características del fuego. diámetro D . Cuando el diámetro característico del fuego D está entre 4 y 16 veces la rejilla tamaño, los resultados de la simulación pueden reflejar la situación real con mayor precisión [24] El cálculo El método de D es el siguiente:

$$D = \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\rho^\infty c_p T^\infty g}}$$

(2)

donde D es el diámetro característico del fuego, Q es la HRR, ρ^∞ es la densidad del aire, c_p es la capacidad calorífica específica del aire, T^∞ es la temperatura ambiente y g es la aceleración de la gravedad. Como se muestra en la Ecuación (1), el diámetro característico del fuego aumentará cuando la temperatura ambiente la presión disminuye.

Como resultado, el tamaño de red adecuado para el actual incendio de 30 MW osciló entre 0,233 m y 0,94m. Los resultados de la simulación para el caso de radio de curvatura de 800 m y con Se comparó una ventilación de 2 m/s (igual que en la prueba 9) a 150 s utilizando cinco rejillas diferentes. tamaños de 0,25 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m y 0,9 m, como se muestra en la Figura 2. Se ve que A medida que el tamaño de la cuadrícula disminuye, la discrepancia de temperatura se vuelve insignificante. Excepto por los tamaños de viga de 0,6 m y 0,9 m, las temperaturas verticales cerca del techo del túnel desde otros tamaños de cuadrícula fueron similares. Cuando el tamaño de la cuadrícula no era superior a 0,5 m, la precisión de las simulaciones con tamaños de cuadrícula más pequeños no mejoraron significativamente pero requirieron más

Los resultados experimentales para la distribución longitudinal de la temperatura máxima. El aumento del humo de un incendio en un túnel a 120 s desde [36] se compara con los resultados numéricos, como como se muestra en la Figura 3. En cada punto de datos, los resultados de la simulación de FDS fueron buenos en general. concordancia con los valores experimentales, típicamente dentro de una desviación del 5%. Sin embargo, un error Se observó un margen del 8% a una distancia de 5 m del foco del incendio. Estas discrepancias se vuelven insignificantes lejos de la fuente del incendio debido a la compleja turbulencia y transferencia de calor. Fenómenos que ocurren cerca del foco del incendio. Estas diferencias se deben principalmente a que el viento

turbulencia y transferencia de calor que ocurren cerca de la fuente del incendio. Estas diferencias se deben principalmente a que la velocidad del viento en el modelo FDS se estableció como 0, que continuamente var- velocidad en el modelo FDS durante el experimento de 0, que var- continuamente durante el experimento de Pan. En general, los resultados comparativos demuestran que las predicciones de la FDS en general los resultados comparativos demuestran que las predicciones de la FDS coinciden bien con los resultados experimentales.

2.6. Determinación de la ubicación de la fuente de incendio más peligrosa 2.6. Determinación de la ubicación de la fuente de incendio más peligrosa

En un único túnel para tráfico restringido, ignorando la franja de estacionamiento urgente, el humo En un único túnel para tráfico restringido, ignorando la franja de estacionamiento urgente, el humo

La distribución causada por un vehículo fuente de incendio ubicado en el carril interior o exterior será la distribución causada por un vehículo fuente de fuego ubicado en el carril interior o exterior.

presentan variaciones. Un modelo con un radio de curvatura de 400 m y la velocidad del viento de ventilación presenta variaciones. Un modelo con un radio de curvatura de 400 m y velocidad del viento de ventilación.

Para su verificación se estableció una velocidad de 4 m/s. Cuando el foco de incendio se encuentre en el carril exterior o se estableció para verificación la velocidad de 4 m/s. Cuando la fuente de fuego está en el carril exterior o en el carril interior, la distribución de temperatura en el techo, la pared interior, la pared exterior y carril interior, la distribución de temperatura en el techo, la pared interior, la pared exterior y

4. La línea media a la altura característica de 2 m del túnel a 300 s se muestra en la Figura 4.

4. La línea media a la altura característica de 2 m del túnel a 300 s se muestra en la Figura 4.

4. Independientemente de la ubicación de la fuente de incendio, la distribución de temperatura en el túnel. Independientemente de la ubicación de la fuente de incendio, la distribución de temperatura en el túnel.

el techo se mantiene constante. Sin embargo, cuando la fuente de fuego se coloca en el lado interior del techo, se mantiene constante. Sin embargo, cuando la fuente de fuego está situada en el lado interior

de la curva del túnel, hay una gama ampliada de zonas de alta temperatura (más de 60 °C)

Altura característica del ojo humano en comparación con cuando se sitúa en el lado exterior. Con- altura característica del ojo humano en comparación con cuando se sitúa en el lado exterior.

En consecuencia, se puede concluir que colocar el vehículo fuente de fuego en el túnel interior. En consecuencia, se puede concluir que colocar el vehículo fuente de fuego en el túnel interior.

El carril representa el peor de los casos. La ubicación constante del foco de incendio en este carril del túnel representa el peor de los casos. La ubicación constante del foco de incendio en este carril del túnel representa

ubicación en todos los cálculos posteriores. esta

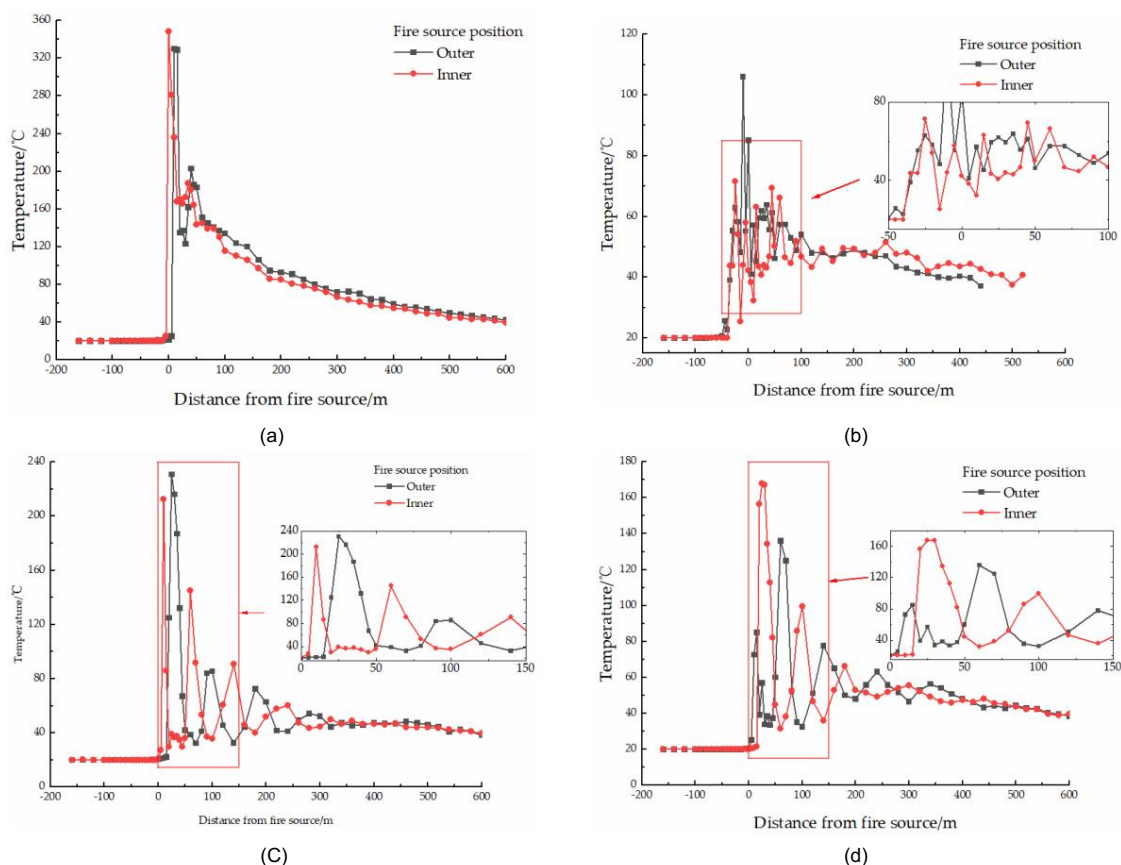


Figura 4. Comparación de la temperatura del techo y la altura característica de diferentes fuentes de fuego posiciones. (a) Temperatura en el techo del túnel; b) Temperatura de la línea central a 2 m de altura; c) Temperatura del lado interior a 2 m de altura; (d) Temperatura del lado exterior a 2 m de altura.

3. Resultados

3.1. Estándar de seguridad

Para investigar las características de distribución del humo del incendio y su impacto. En materia de evacuación personal, este estudio se centra en la propagación unidimensional del humo en el Altura característica de los ojos humanos. La norma de seguridad para la temperatura del humo en el

La altura característica se fijó en 60 °C, de acuerdo con los códigos nacionales [37]. De manera similar, un Se estableció como estándar de visibilidad una visibilidad de 10 m y una concentración de CO de 400 ppm y concentración de CO. La altura característica se definió en este estudio como 2 m.

3.2. Comparación de la distribución del humo en diferentes lados del túnel

Para analizar más a fondo las características de la distribución del humo en el túnel, el Las simulaciones se clasificaron en dos grupos de la siguiente manera: Grupo A y Grupo B. Grupo A comprendió cuatro simulaciones diferentes con radios de curvatura de 250 m, 400 m, 600 m y 800 m, mientras que el grupo B constaba de cuatro simulaciones con radios de curvatura de 1000 m, 1200 m, 1500 m y 2000 m. Tanto el Grupo A como el Grupo B fueron comparados con túneles rectos. para evaluar el impacto de la curvatura del túnel. Las características de distribución unidimensional. En este artículo se analizan las emisiones de humo de fuego a la altura característica a 360 s.

3.2.1. Temperatura

En estudios anteriores, se suponía predominantemente que la ubicación de la fuente del incendio era estar en la línea central del túnel, lo que resulta en simetría horizontal y longitudinal. distribuciones de temperatura. Sin embargo, considerando escenarios reales, cuando un vehículo se incendia En un túnel, es más probable que el vehículo fuente de fuego esté ubicado en un lado del el tunel.

Aplica. Ciencia. 2024, 14, x PARA REVISIÓN

8 de 18

POR PARES La Figura 5 muestra la distribución longitudinal de la temperatura a la altura característica para el grupo de velocidad crítica a 360 s. En este escenario, el rápido aumento de la temperatura dentro El área de origen del incendio se atribuye a la generación de llamas y humo de alta temperatura. 1500 m y 2000 m, la distribución de temperaturas y las temperaturas máximas son relativamente Este fenómeno está representado por el pico inicial en la figura de distribución de temperaturas. mismas que las observadas en el túnel recto, en el lado inferior del túnel. Posteriormente, impulsado por una ventilación longitudinal, el Sin embargo, cuando la velocidad de ventilación del túnel está por debajo de la velocidad crítica, el humo de alta temperatura se propaga hacia adelante. Sin embargo, debido a la flexión del La distribución longitudinal de la temperatura exhibe distintas variaciones, como se muestra en la Figura 6. Al no ser un túnel, choca con la pared exterior y rebota en ella, lo que da como resultado una región de pico distinta en superficie. En tales circunstancias, la fuerza impulsora de la ventilación longitudinal para la alta temperatura de su superficie. La variación en la curvatura del túnel provoca la diferencia en la ubicación, el humo dentro del túnel se vuelve insuficiente, lo que resulta en su distribución predominante del pico de temperatura del lado exterior. En consecuencia, se observan múltiples picos a lo largo de la ventilación longitudinal del túnel. Sin embargo, la pared curva todavía ejerce la temperatura que el humo interactúa repetidamente entre los lados interior y exterior, mientras uno se mueve cierto efecto inhibidor sobre la propagación del humo. Esto se manifiesta principalmente por una constante alejamiento de la fuente de fuego, las fluctuaciones de temperatura en la línea central del túnel. La distribución de temperatura a lo largo de la línea central del túnel en diferentes simulaciones se vuelve más pequeña y gradualmente desciende. La ubicación y altura del pico de temperatura diferencias significativas observadas. La distinción principal entre el interior y el exterior del Grupo A (pruebas 4, 6, 8 y 10) difiere significativamente de las observadas en el grupo recto. lados del túnel reside en la temperatura máxima dentro del área central del foco de incendio. túnel (prueba 2). Esta discrepancia se puede atribuir a la influencia del túnel curvo en (Sin embargo, más allá de esta área central, el humo entra en una propagación longitudinal unidimensional. La posición de impacto inicial del flujo de humo de alta temperatura bajo ventilación longitudinal gación. condiciones, lo que resulta en variaciones en las distribuciones de temperatura posteriores.

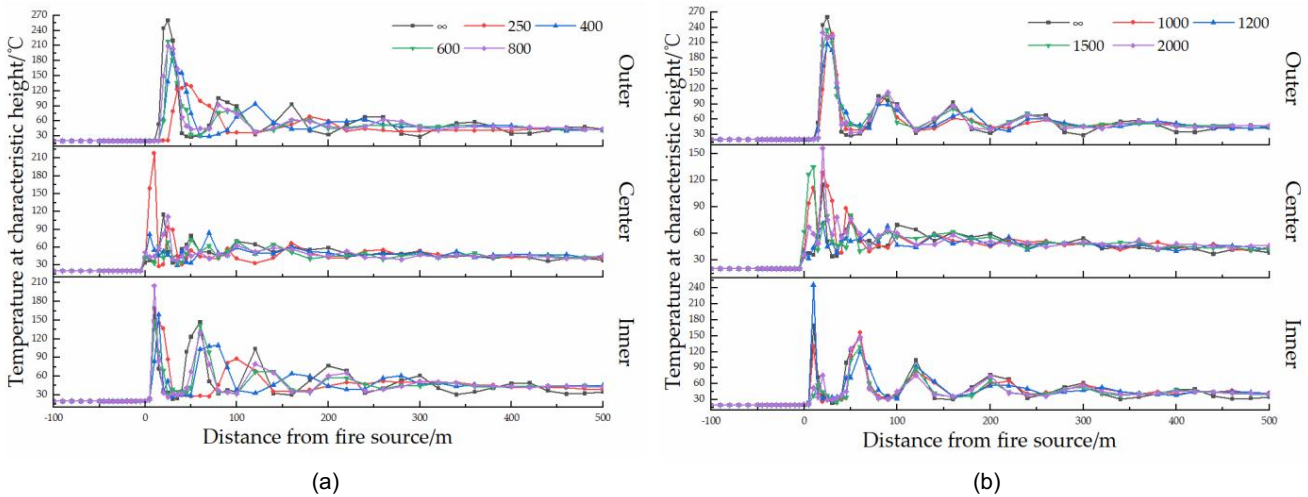


Figura 5. Variación de la temperatura longitudinal a la altura característica de la velocidad crítica Figura 5. Variación de la temperatura longitudinal a la altura característica de la velocidad crítica grupo. (a) Comparación de temperaturas en diferentes lados del túnel para el Grupo A. (b) Comparación de temperatura en diferentes lados del túnel para el Grupo B. de temperatura en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

Distribución de temperatura a lo largo de la línea central del túnel en diferentes simulaciones sin que se observen diferencias significativas. La principal distinción entre los lados interior y exterior del túnel radica en la temperatura máxima dentro del área central del foco de incendio. Sin embargo, más allá de esta área central, el humo entra en una etapa de propagación longitudinal unidimensional.

Para el Grupo B (pruebas 12, 14, 16 y 18), la distribución longitudinal de temperatura en el El lado interior, el lado exterior y la línea central del túnel se parecen mucho a los del túnel recto. (prueba 2). Sin embargo, surgen disparidades notables en términos de valores máximos de temperatura entre el lado interior y el lado exterior del túnel a la distancia correspondiente del incendio fuente. Las comparaciones numéricas revelan diferencias significativas tanto en la temperatura distribución y temperaturas máximas entre el radio de curvatura del túnel de 1000 m y 1200 m con túnel recto. Por el contrario, cuando el radio de curvatura del túnel se establece en 1500 m y 2000 m, la distribución de temperatura y las temperaturas máximas son relativamente las mismas que los observados en el túnel recto.

Sin embargo, cuando la velocidad de ventilación del túnel está por debajo de la velocidad crítica, la distribución longitudinal de la temperatura exhibe distintas variaciones, como se muestra en la Figura 6. Bajo tales circunstancias, la fuerza impulsora de la ventilación longitudinal para humo a alta temperatura dentro del túnel se vuelve insuficiente, lo que resulta en su distribución predominante a lo largo del Ventilación longitudinal del túnel. Sin embargo, la pared curva todavía ejerce una cierta efecto inhibidor sobre la propagación del humo. Esto se manifiesta principalmente por una temperatura constante. distribución a lo largo de la línea central del túnel en diferentes simulaciones sin diferencias significativas

Figura 6. Variación de la temperatura longitudinal a la altura característica del grupo de velocidad crítica. (a) Comparación de temperaturas en diferentes lados del túnel para el Grupo A. (b) Comparación de temperatura en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

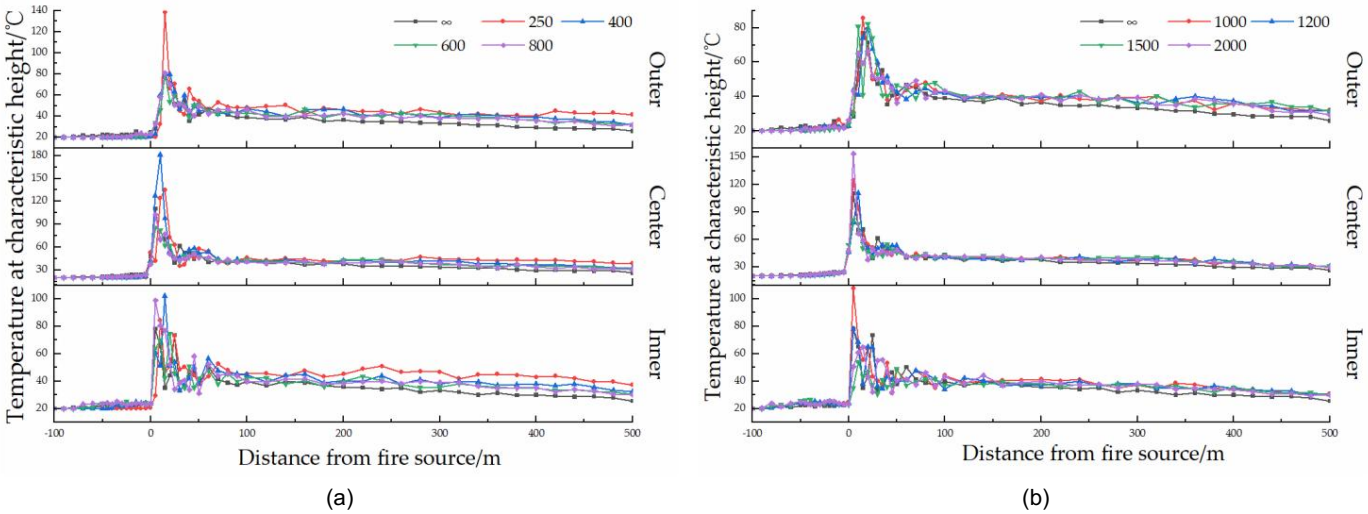


Figura 6. Variación de la temperatura longitudinal a la altura característica de la velocidad general Figura 6. Variación de la temperatura longitudinal a la altura característica de la velocidad general. (a) Comparación de temperaturas en diferentes lados del túnel para el Grupo A. (b) Comparación de temperaturas en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

3.2.2. Visibilidad

La Figura 7 muestra la variación longitudinal en la visibilidad del grupo de velocidad crítica. a la altura característica a 360 s. Inicialmente, durante las primeras etapas del incendio, el humo Se acumula principalmente en el techo del túnel debido al calor generado por la fuente de fuego. Esta acumulación tiene un impacto mínimo en la visibilidad a la altura característica, ya que hay No se observan alteraciones significativas en la temperatura ni en la concentración de humos. Sin embargo, como el A medida que avanza el fuego, el humo se difunde longitudinalmente por todo el túnel. La distribución de La visibilidad humana corresponde a la distribución longitudinal de la temperatura y refleja zonas alternas de humo de fuego causadas por el humo de alta temperatura y las llamas entre los lados interior y exterior del túnel.

altura. Sin embargo, la visibilidad humana permanece dentro de límites seguros en el lado exterior del túnel; Esto también es válido para el Grupo B. Aunque las pruebas 16 y 18 muestran patrones similares de distribución de humo y temperatura a los observados en un túnel recto dentro del Grupo B, todavía existen diferencias notables en la visibilidad aguas arriba de la fuente del incendio y en la línea central.

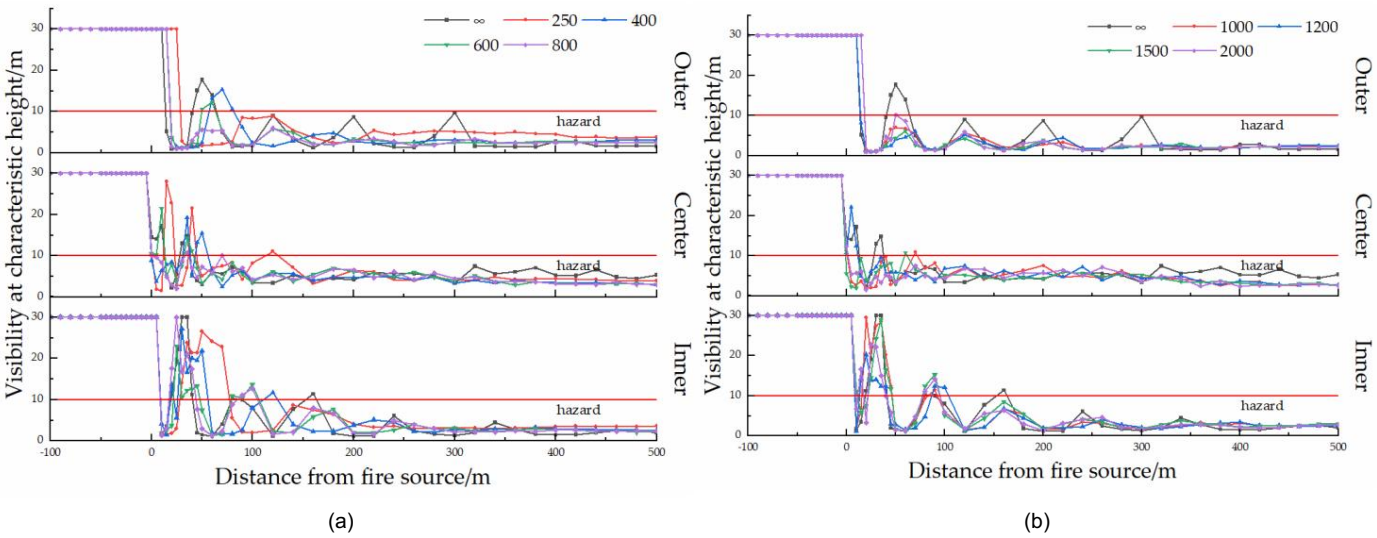


Figura 7: Variación de la visibilidad longitudinal a la altura característica del grupo de velocidad general. (a) Comparación de visibilidad en diferentes lados del túnel para el Grupo A. (b) Comparación de visibilidad en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

El grupo B (pruebas 12, 14, 16 y 18) muestra una tendencia similar en la distribución de la visibilidad, comparado con el observado en un túnel recto (prueba 2). La principal diferencia es que el la visibilidad a 50 m del foco de incendio del túnel recto se mantuvo en el rango seguro, mientras que el grupo B está en el pico de visibilidad pero aún dentro del rango peligroso. Para grupo A (pruebas 4, 6, 8 y 10), la posición máxima y la altura máxima de su visibilidad son significativamente diferentes a los del túnel recto. Sin embargo, cuando la distancia desde el fuego fuente supera los 150 m, la visibilidad es inferior a 10 m en todas las simulaciones, lo que significa no queda ninguna diferencia en la evacuación personal. Sin embargo, cuando la ventilación del túnel velocidad está por debajo de la velocidad crítica, como se muestra en la Figura 8, existe una disparidad significativa en la distribución de visibilidad longitudinal dentro del grupo de velocidad general. Longitudinal La ventilación es insuficiente para expulsar el humo de alta temperatura en el túnel bajo tal simulaciones. Más allá de una distancia de 50 m del foco del incendio, la visibilidad humana para Todas las simulaciones caen dentro del rango peligroso. Se produce una notable formación de capas de humo. En el Grupo A, las variaciones en la curvatura del túnel influyen en gran medida en el impacto de la longitud de la capa de humo en la visibilidad humana aguas arriba de la fuente del incendio. Debido a la obstrucción por En la pared lateral interior del túnel, la temperatura del humo disminuye más rápidamente en comparación con el del lado exterior, lo que resulta en una rápida disminución de la visibilidad en el punto característico altura. Sin embargo, la visibilidad humana permanece dentro de límites seguros en el lado exterior del túnel; Esto también es válido para el Grupo B. Aunque las pruebas 16 y 18 muestran resultados similares Patrones de distribución de humo y temperatura como los observados en un túnel recto. Dentro del Grupo B, todavía existen diferencias notables en la visibilidad aguas arriba del foco del incendio. y en la línea central.



Aplica. Ciencia. 2024. 14. x PARA REVISIÓN POR PARES

11 de 18

Sin embargo, cuando la velocidad de ventilación longitudinal está por debajo de la velocidad crítica, el patrón de distribución longitudinal de la concentración de CO en túneles curvos difiere significativamente del observado en túneles rectos, como se muestra en la Figura 10. La concentración de CO en túneles curvos con diferentes radios de la curvatura en el lado exterior y la línea central de (a) el túnel aguas arriba de la fuente del incendio permanece consistente con la de los túneles rectos, lo que indica un nivel bajo. Sin embargo, debido a la curvatura estructural en los puentes de ventilación de la Figura 9, la variación de la concentración longitudinal de CO en la altura característica de la velocidad crítica (Figura 9) es considerablemente mayor que la de los túneles rectos. En consecuencia, se observó una concentración de CO más alta en el lado exterior del túnel para el Grupo A. En comparación de la concentración de CO en diferentes lados del túnel para el Grupo A y el Grupo B, la comparación de la concentración de CO en diferentes lados del túnel para el Grupo B generalmente es comparable con la de los túneles rectos. Sin embargo, dentro de un rango de 100 a 350 m de distancia de la fuente del incendio, tanto el lado interior como el exterior exhiben concentraciones de CO más altas en comparación con las encontradas en túneles rectos. Sin embargo, los niveles de concentración de CO siguen siendo similares a los observados a lo largo de la línea central en túneles rectos. Más allá de 350 m desde la fuente del incendio, hay un aumento significativo en la concentración de CO a lo largo de la línea central de los túneles curvos en relación

(a)

(b)

Figura 9. Variación de la concentración de CO longitudinal a la altura característica del grupo de velocidad crítica.

Aplica. Ciencia. 2024, 14, 6339

11 de 18

Comparación de la concentración de CO en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

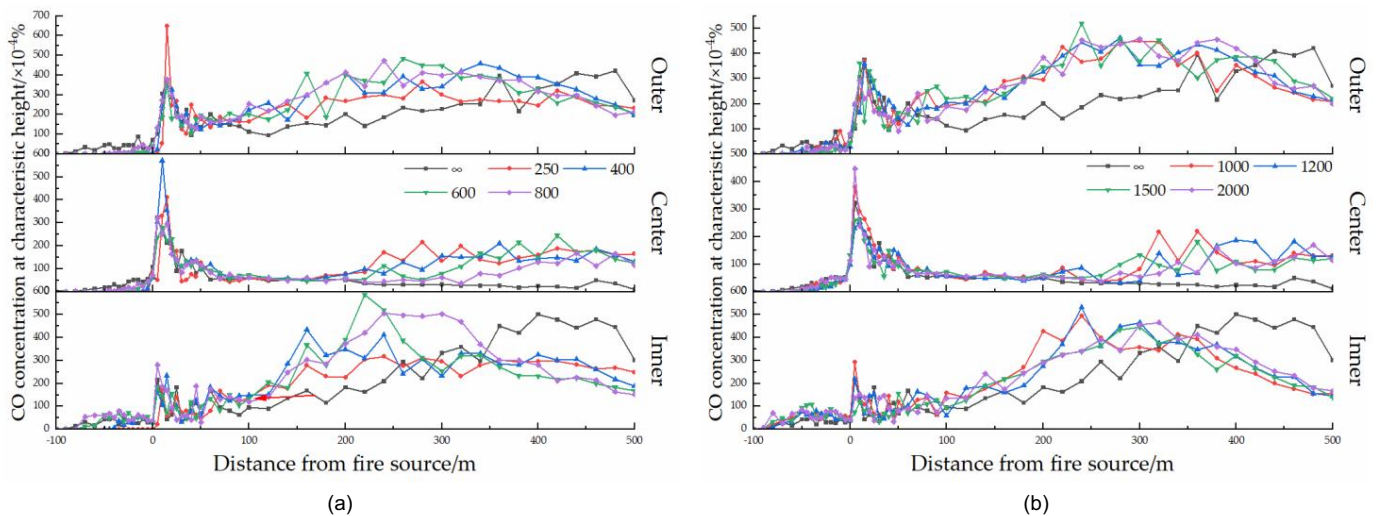


Figura 10. Variación de la concentración longitudinal de CO a la altura característica de la velocidad crítica.

(a) Comparación de la concentración de CO en diferentes lados del túnel para el Grupo A. (b) Comparación de la concentración de CO en diferentes lados del túnel para el Grupo B.

3.3. Análisis integral del efecto de la altitud y la ventilación longitudinal Como se muestra en la Figura 9, la ventilación longitudinal en el grupo de velocidad crítica efectiva. Los patrones de distribución longitudinal de temperatura, visibilidad y CO suprimen concentradamente la acumulación de humo. Sin embargo, el humo de alta temperatura no se dispersa directamente hacia afuera a lo largo del túnel, sino que transporta el viento por los lados laterales. La difusión longitudinal de CO es generalmente constante durante la ventilación crítica. Excepto por el flujo central por la fuente del fuego de CO, la propagación de CO se propaga rápidamente a lo largo de la línea central y por debajo de los niveles de ventilación. Sin embargo, sin embargo, este tipo de propagación no se ajusta perfectamente con la dirección de ventilación longitudinal, pero su línea central experimenta menores concentraciones de CO. Además, el longitudinal

La distribución de la concentración de CO en los lados exterior e interior se acerca gradualmente a esa observado en túneles rectos. Sin embargo, persisten concentraciones más altas de CO en la línea central en comparación con los encontrados en túneles rectos.

Sin embargo, cuando la velocidad de ventilación longitudinal está por debajo de la velocidad crítica, la El patrón de distribución longitudinal de la concentración de CO en túneles curvos difiere significativamente de lo observado en túneles rectos, como se muestra en la Figura 10. La concentración de CO en túneles curvos con diferentes radios de curvatura en el lado exterior y la línea central de el túnel aguas arriba de la fuente del incendio sigue siendo consistente con el de los túneles rectos, indicando un nivel bajo. Sin embargo, debido a influencias estructurales en los patrones de flujo de aire, existen En el interior de los túneles curvos se observa una concentración de CO notablemente mayor. En términos de núcleo áreas cercanas a la fuente del incendio, las concentraciones de CO son generalmente comparables entre curvas y túneles rectos. Sin embargo, dentro de un rango de 100 a 350 m de distancia del foco del incendio, tanto Los lados interior y exterior exhiben concentraciones de CO más altas en comparación con las encontradas en túneles rectos. Sin embargo, los niveles de concentración de CO siguen siendo similares a los observados a lo largo la línea central en túneles rectos. Más allá de 350 m del foco del incendio, existe una importante aumento en la concentración de CO a lo largo de la línea central de túneles curvos en relación con lo observado en túneles rectos. La tendencia a la baja observada en las concentraciones de CO tanto en Los lados interior y exterior hacen que gradualmente se vuelvan más bajos que los medidos dentro túneles rectos.

El túnel establecido en las simulaciones comprende un techo arqueado, a través del cual se libera CO. transportado junto con los gases de combustión. Posteriormente, el CO asciende al techo del túnel antes de descendiendo hacia ambos lados. Se considera que la distribución espacial del CO está influenciada por el radio de curvatura del túnel.

3.3. Análisis integral del efecto de la altitud y la ventilación longitudinal

Los patrones de distribución longitudinal de temperatura, visibilidad y concentración de CO. reflejan colectivamente las características de distribución del humo del incendio en el túnel. Específicamente,

Cuando la velocidad de ventilación longitudinal en el túnel excede la velocidad crítica, las llamas de alta temperatura y el humo generados por la fuente de fuego desplazada se propagan rápidamente a lo largo de la dirección del túnel bajo la influencia de la ventilación longitudinal. Sin embargo, esta propagación no se adapta perfectamente a la dirección longitudinal de la ventilación, sino que presenta una cierta desviación. Posteriormente, el humo a alta temperatura impacta y rebota en la pared exterior del túnel. Este fenómeno se manifiesta como el primer pico de temperatura y concentración de CO, así como una zona de baja visibilidad en el lado interior del túnel. Después, se produce un proceso alternativo de reflexión y enfriamiento entre las paredes interior y exterior para el humo a alta temperatura. La principal distinción observada en túneles con diferentes curvaturas radica en las posiciones y valores de los picos numéricos. Sin embargo, en comparación con los túneles rectos, si la velocidad de ventilación longitudinal cae por debajo de la velocidad crítica dentro de un túnel curvo, la temperatura, la visibilidad y la concentración de CO exhiben patrones similares aguas abajo de 0 m a 100 m en relación con los emitidos por la fuente del incendio. La temperatura, la visibilidad y la concentración de CO disminuyen al aumentar la distancia desde dicha fuente. Sin embargo, la región aguas arriba experimenta diferencias significativas debido a la acumulación de humo causada por los efectos de la curvatura del túnel. Además, la curvatura del túnel contribuye significativamente al aumento de la concentración de CO en las regiones ubicadas entre 100 y 350 m aguas abajo de la fuente del incendio.

3.4. Impacto en la Evacuación Personal

3.4.1. Impacto en el tiempo disponible de salida segura

Con base en la distribución de la temperatura, la visibilidad y la concentración de CO, se determinó el tiempo de salida segura disponible (ASET) cuando cualquier factor alcanzaba un nivel peligroso. En el caso de un incendio en un túnel, la seguridad personal se ve amenazada principalmente por los tres factores siguientes: el aumento de temperatura en la zona del incendio, la disminución de la visibilidad debido a la difusión del humo y la dispersión de gases tóxicos. Estos tres factores se combinan gradualmente hasta alcanzar el rango peligroso. Un análisis comparativo revela que la temperatura es el factor peligroso clave que contribuye al desastre en el área central de un incendio en un túnel. Aproximadamente a los 120 s, las temperaturas entran en niveles peligrosos dentro del área central. Cuando ocurre un incendio en un túnel de carretera, la velocidad del viento longitudinal se aceleraría por encima de 10 m/s. Por lo tanto, el siguiente análisis se basa en los resultados del grupo de velocidad crítica.

Como se analizó anteriormente, cuando ocurre un incendio en un túnel curvo, la distribución del humo de alta temperatura en los lados interior y exterior del túnel presenta una cierta diferencia.

La Figura 11 muestra las diferencias entre el ASET en el interior y exterior del túnel.

De izquierda a derecha y de arriba a abajo, los radios de curvatura correspondientes de cada túnel son 250 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1000 m, 1200 m, 1500 m y 2000 m.

Como se muestra en la Figura 11, independientemente del radio de curvatura, el lado interior del túnel tiene más tiempo de salida segura disponible que el lado exterior dentro del área central del incendio y un área de distancia de 150 m desde la fuente del incendio. Dentro de un rango de distancia de 75 a 150 m desde la fuente del incendio, como se mencionó anteriormente, cuando el humo de alta temperatura impacta la pared exterior del túnel y se refleja hacia la pared interior, da lugar a una zona débil localizada de humo de alta temperatura a través de sucesivas reflexiones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la región débil de la distribución de temperatura cerca de la zona central de la fuente del incendio, como se muestra en la Sección 3.2.1, cuando el humo de alta temperatura impacta el lado opuesto del túnel, aún pasará a la zona peligrosa. rango de visibilidad humana en una etapa temprana.

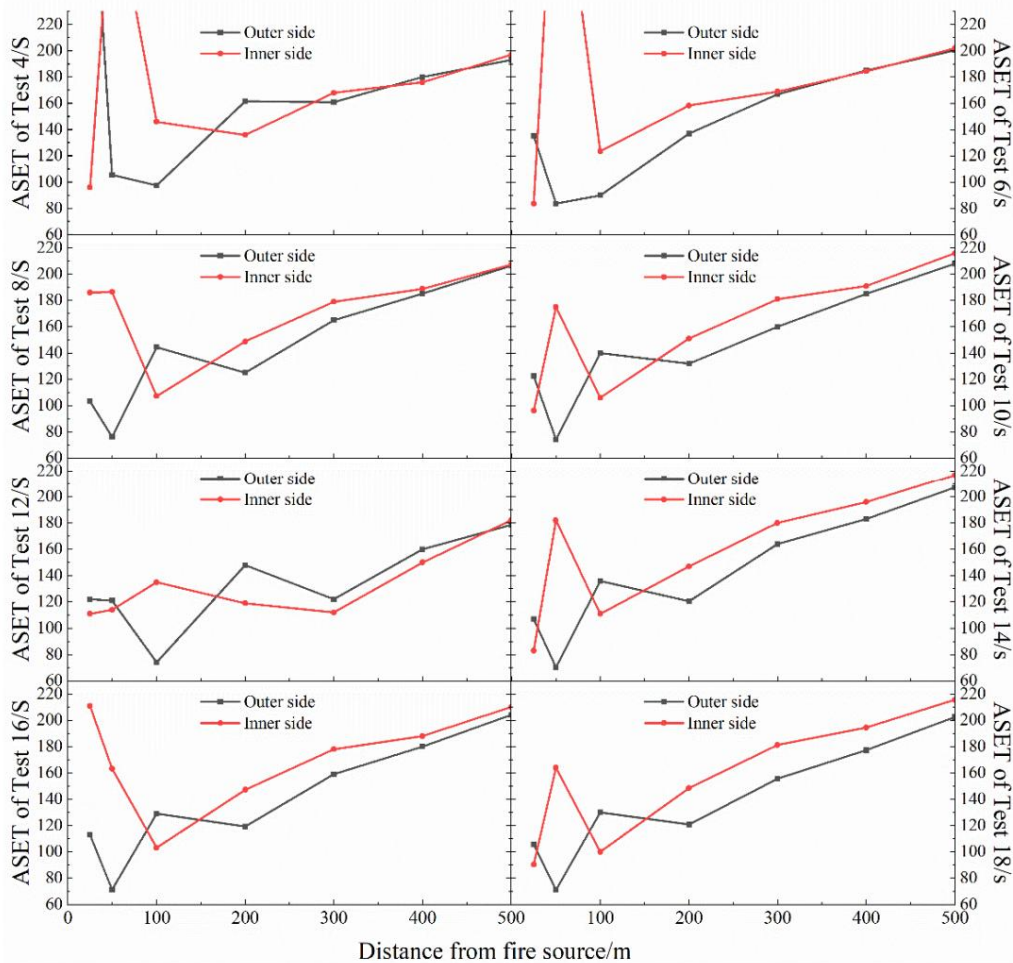


Figura 11. ASET de túneles con diferentes radios de curvatura a diferentes distancias del foco de incendio.
fuente.

3.4.2. Posición de un paso para las personas que pasan

Con base en los resultados anteriores, al diseñar rutas de escape personales para túneles curvos, se recomienda colocar estratégicamente un paso de paso de personas en el lado interior de los túneles, para maximizar el tiempo de salida segura disponible. En los túneles, se recomienda colocar estratégicamente un túnel para las personas que pasan en el lado interior del túnel para maximizar el tiempo disponible de salida segura.

3.4.3. Posición del paso de paso para personas

Las investigaciones y análisis existentes sugieren que la respuesta a un incendio puede generar tres etapas principales de la siguiente manera: detección de incendios, confirmación de incendios y acciones de evacuación [38]. Para garantizar la evacuación segura de todas las personas, generalmente se puede clasificar en tres etapas principales de la siguiente manera: detección de incendios, confirmación de incendios y acciones de evacuación [38]. Para garantizar la evacuación segura de todas las personas, especialmente en situaciones peligrosas, es imperativo establecer un espaciamiento adecuado entre las áreas de acceso a la fuente del incendio. La distancia máxima permitida debe definirse como la distancia que las personas puedan evacuar de manera segura dentro del tiempo de salida seguro requerido (RSET). El RSET es

que las personas puedan evacuar de manera segura dentro del tiempo de salida seguro requerido (RSET). RSET es donde T_d es la hora de alarma; T_{pre} es el tiempo previo a la mudanza para la evacuación personal; y T_t es el tiempo de evacuación personal.

Los detectores de humo utilizados en la ingeniería actual pueden detectar incendios de 100 kW. El fuego es el tiempo de evacuación personal. La ley de desarrollo de los incendios en la etapa inicial es la siguiente:

Los detectores de humo utilizados en la ingeniería actual pueden detectar incendios de 100 kW. El modelo La hora de inicio de la alarma se calcula en función de la Q_f de incendio en esta investigación. Normalmente, Q_f La ley de desarrollo de los incendios en la etapa inicial es la siguiente:

donde t es el momento en que ocurrió el incendio; Q_f es HRR, que se establece en 100 kW en el cálculo. de la hora de alarma; y α es el coeficiente de crecimiento del fuego, que en este estudio se establece en 0,187 kW/s². Por tanto, el tiempo de alarma del sistema de detección de incendios se puede determinar de la siguiente manera:

$$T_d = \sqrt{Q_f / \alpha} = \sqrt{100 / 0,187} \approx 23,1 \text{ s} \tag{5}$$

El intervalo de tiempo entre la recepción de la alarma de incendio y el inicio de la evacuación. medidas, conocidas como tiempo previo a la acción o tiempo de respuesta de evacuación personal, son cruciales en emergencias de incendio. La determinación del tiempo previo a la acción depende principalmente de factores como Tipo de edificio y características asociadas con la seguridad de los ocupantes. La investigación existente Los datos [39-42] muestran que el tiempo previo al movimiento para la evacuación personal varía de 30 s a 210 s. En este estudio, se observó un tiempo previo a la acción de 90 s.

Actualmente, ningún estudio ha indicado ninguna influencia del radio de curvatura en la personalidad. velocidad de evacuación o sus elecciones en un túnel curvo. Por lo tanto, la evacuación personal Se supone que el tiempo T_t es consistente entre túneles curvos y rectos. Este problema no es discutido más detalladamente en este documento.

La Figura 12 muestra la distribución de temperatura en el túnel con un radio de curvatura de 400 m a 200 m del foco del incendio. De izquierda a derecha, las distribuciones de temperatura. están a 83,1 s, 113,1 s, 143,1 s y 173,1 s. Basado en el tiempo de alarma establecido de 23,1 s y el tiempo previo al movimiento para una evacuación personal de 90 s, las personas comenzarán a evacuar a los 113,1 s, y la distribución de temperatura en el túnel en este momento se muestra en la Figura 12b.

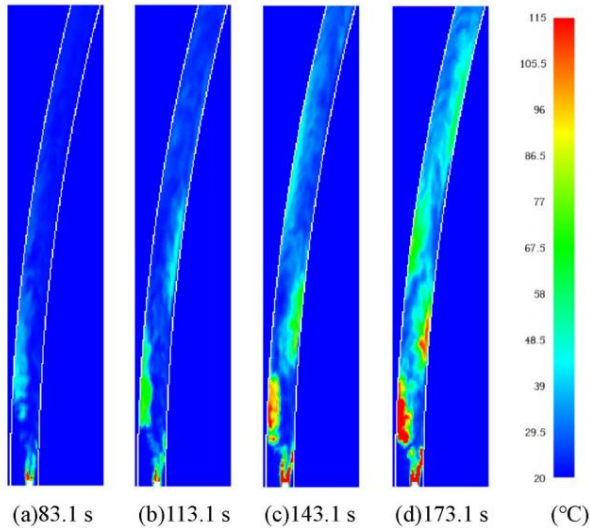


Figura 12: Distribución de temperatura del túnel a 210 m del foco del incendio en diferentes momentos. veces.

En este momento, como se mencionó anteriormente, el humo de alta temperatura golpea la pared exterior del túnel. En la primera vez sobre el túnel que conduce a la zona verde en el lado exterior. El verde área significa que la temperatura dentro de esta área se acerca a los 60 °C, lo cual no es adecuado para las personas que pueden pasar por ellos. En general, durante los procedimientos de evacuación, las personas deben seguir los patrones de características del fuego a la altura del ojo humano. En comparación con los túneles rectos, se dispersan a lo largo del carril peatonal a ambos lados de los carriles de circulación. Sin embargo, los peligrosos El movimiento del humo en túneles curvos muestra diferentes patrones. La zona de propagación del fuego se formó en el lado interior del túnel. En este momento, el humo se puede clasificar en las siguientes etapas: la etapa de desarrollo del incendio y el lado interior del túnel. la etapa de extensión longitudinal unidimensional [46]. Durante la etapa de desarrollo del incendio, como se muestra en la Figura 12c, el segundo golpe de humo de alta temperatura apareció en el lado exterior del túnel. El humo de alta temperatura generado directamente por la fuente del fuego sufre colisiones repetidas 143,1 s. La presencia de una segunda zona de alta temperatura dentro del túnel hace que el movimiento del humo sea más complejo. En consecuencia, este proceso vuelve a tener el lado interior inadecuado para la evacuación, siendo necesario redirigir la ruta de evacuación. Resulta en múltiples zonas de alta temperatura entre los lados interior y exterior. Además, a lo largo del lado exterior del túnel, el humo de alta temperatura persiste, lo que afecta significativamente la evacuación personal debido a la combustión incompleta. Sin embargo, la evacuación de la fuente del incendio, también exhibe picos alternos entre los lados interior y exterior, ya que los lados exteriores del túnel están comprometidos para las personas atrapadas en un incendio. Se propaga con humo a alta temperatura. Sin embargo, la posterior difusión del humo parece Por tanto, en el caso de incendios que se produzcan en túneles curvos, se recomienda que

Esto permite que en un túnel recto donde la visibilidad esté menos influenciada por la temperatura del humo debido a que las personas ubicadas en el área central de la fuente de incendio evacúen rápidamente a lo largo de la línea central del túnel. a las características de transmisión pero más afectado por la concentración de humo. Tras el inicio de la difusión longitudinal unidimensional del humo, no hay variaciones perceptibles en la temperatura o la visibilidad en los diferentes lugares dentro del túnel. Sin embargo, la distribución de CO no se alinea del todo con la difusión del humo. Dentro del humo de alta temperatura, persisten zonas distintas de picos alternos de concentración de CO tanto en el interior como en el exterior.

el túnel. Una vez que hayan superado una distancia de 100 m desde el foco del incendio, deberán continuar su evacuación a lo largo de la pared interior del túnel y salir por un túnel para el paso de personas.

Mientras tanto, la comparación que se muestra en la Figura 12 también sugiere que si el tiempo previo al movimiento para la evacuación personal se puede reducir a 60 s, la investigación existente sobre la velocidad de evacuación personal [21,43–45] indica que los individuos serán capaces de evacuar desde el área central de la fuente de incendio antes de que se forme una zona de alta temperatura. Más allá del área central de la fuente del incendio, el principal índice de peligro de la evacuación personal pasa de la temperatura a la visibilidad.

4. Discusión

Esta investigación sobre la difusión de humo en incendios de túneles curvos de carreteras reveló distintos patrones de características del fuego a la altura del ojo humano. En comparación con los túneles rectos, el movimiento del humo en los túneles curvos presenta patrones diferentes. La propagación del humo del fuego se puede clasificar en las dos etapas siguientes: la etapa de desarrollo del fuego y la etapa de propagación longitudinal unidimensional [46]. Durante la etapa de desarrollo del incendio, el humo de alta temperatura generado directamente por la fuente del incendio sufre repetidas colisiones entre las paredes laterales interior y exterior del túnel. En consecuencia, este proceso da como resultado múltiples zonas de alta temperatura entre los lados interior y exterior. Además, el CO, que afecta significativamente la evacuación personal debido a la combustión incompleta de la fuente del incendio, también presenta picos alternos entre los lados interior y exterior a medida que se propaga con el humo de alta temperatura. Sin embargo, la difusión posterior del humo se asemeja a la de un túnel recto donde la visibilidad está menos influenciada por la temperatura del humo debido a las características de transmisión, pero más afectada por la concentración del humo. Tras el inicio de la difusión longitudinal unidimensional del humo, no hay variaciones perceptibles en la temperatura o la visibilidad en los diferentes lugares dentro del túnel. Sin embargo, la distribución de CO no se alinea del todo con la difusión del humo. Dentro del humo de alta temperatura, persisten zonas distintas de picos alternos de concentración de CO en las paredes laterales internas y externas durante la fase de propagación unidimensional.

Los resultados sobre la distribución de la temperatura concuerdan bien con estudios previos [4,14,18]. Sin embargo, cabe señalar que consideramos además dos indicadores críticos, es decir, la concentración de CO y la agudeza visual humana, al comparar nuestros resultados con los de estudios anteriores. Además, la selección del radio de curvatura del túnel no estaba limitada a un valor mínimo de 2500 m [16]. Basándose en la ingeniería práctica, se introdujo la velocidad de ventilación longitudinal en las simulaciones para considerar el patrón de propagación del humo en el escenario de incendio real. Los resultados se extendieron más allá del alcance de las medidas de control de humo para abarcar consideraciones para la selección de estrategias de evacuación personal.

Se deben reconocer las limitaciones de nuestro estudio al interpretar estos hallazgos. En primer lugar, es importante enfatizar que los resultados de la distribución de temperatura han sido validados mediante suficientes experimentos [11,15], lo que garantiza la precisión de nuestros hallazgos. También se ha fundamentado rigurosamente la distribución de la visibilidad humana. No obstante, sigue siendo necesario realizar una verificación experimental del patrón de distribución de la concentración de CO en túneles curvos de carreteras. En las simulaciones numéricas actuales, se supone sistemáticamente que la tasa de liberación de calor de la fuente del incendio es un incendio súper rápido. Sin embargo, la tasa de liberación de calor de la fuente de fuego muestra una tendencia discernible de aumento gradual. Además, nuestra selección de simulaciones tiene limitaciones. Como en la ingeniería actual no hay túneles completamente planos que no se vean afectados por la altitud, nuestro estudio sigue siendo limitado. Las variaciones en la densidad del aire, la humedad y el contenido de oxígeno de la ubicación del túnel también afectarán los resultados. A pesar de su carácter preliminar, nuestro estudio indica claramente la influencia de los diferentes radios de curvatura del túnel en la dispersión del humo del incendio y la evacuación de personas.

Una dirección futura importante es explorar los efectos combinados de múltiples factores influyentes. Por ejemplo, investigar el impacto de los efectos de la altitud y los efectos de las chimeneas en el patrón de difusión del humo de un incendio en un túnel curvo puede ayudar a dilucidar su potencial para mejorar o suprimir la distribución del humo. Otro futuro importante

La dirección es una sección curva de transición entre el área recta y el área curva. También merece la pena explorar más a fondo la influencia del radio de curvatura en constante cambio en la distribución del humo .

De nuestros hallazgos se puede derivar una nueva estrategia de evacuación personal para túneles de carreteras curvas . En los túneles rectos, la evacuación se produce a lo largo de las aceras a ambos lados del túnel, lo que conduce a un túnel para las personas que pasan. Sin embargo, en túneles curvos, para minimizar el daño y garantizar una evacuación segura, recomendamos que las personas cercanas a la fuente del incendio evacue inicialmente a lo largo de la línea central del túnel durante una distancia específica antes de pasar a los cruces peatonales laterales.

5. Conclusiones

Para investigar las características de temperatura, concentración de CO y visibilidad del ojo humano en alturas características, se realizaron una serie de simulaciones numéricas considerando el radio de curvatura y la velocidad de ventilación longitudinal. En base a los resultados se diseñó el impacto en la evacuación personal . Las principales conclusiones son las siguientes:

Bajo la influencia de la ventilación longitudinal, el humo del incendio en los túneles curvos no se dispersa directamente hacia la salida del túnel. En cambio, el humo se refleja entre las paredes laterales interior y exterior del túnel. En consecuencia, se forman múltiples zonas de alta temperatura a ambos lados del túnel cerca del origen del incendio. La ubicación de las zonas de alta temperatura cambia con las variaciones en el radio de curvatura del túnel, lo que da como resultado diferentes características de distribución del humo dentro del túnel.

Cuando el radio de curvatura del túnel es inferior a 1000 m, existe una disparidad más pronunciada en las características de distribución del humo entre los túneles curvos y rectos . A medida que el radio de curvatura del túnel supera los 1000 m, la distribución del humo dentro de los túneles curvos se alinea gradualmente con la de los túneles rectos.

Debido a las características distintivas de distribución de humo en los túneles curvos, una comparación de las ubicaciones de las fuentes de incendio revela que cuando el vehículo fuente de incendios se coloca en el carril interior del túnel, representa un mayor riesgo para la evacuación personal. En consecuencia, mediante un análisis y comparación de la distribución de temperatura, visibilidad y concentración de CO en las paredes laterales interior y exterior a través de diferentes radios de curvatura de las curvas del túnel, se determina que el paso de personas debe ubicarse en el lado interior del túnel. túnel.

Para la evacuación personal dentro del área central de la fuente del incendio, considerando el impacto de las características de distribución de humo de alta temperatura resultantes de la ventilación longitudinal en túneles curvos, recomendamos realizar inicialmente evacuaciones a lo largo de la línea central del túnel. Posteriormente, las personas deben ser guiadas por el carril peatonal interior hacia el acceso para personas que pasan fuera del área central del foco de incendio.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, YC y ZL; metodología, YC; software, YC; validación, YC; análisis formal, YC; investigación, ZL; recursos, ZL; curación de datos, YC; redacción: preparación del borrador original, YC; redacción: revisión y edición, ZL; visualización, YC; supervisión, ZL; administración de proyectos, ZL; adquisición de financiación, ZL Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China, subvención número 41461016 y subvención número 41761015.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de disponibilidad de datos: las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse al autor correspondiente.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Du, T.; Li, P.; Wang, Y.; Xue, X. Decaimiento longitudinal de la temperatura del humo y velocidad frontal en incendios de túneles. Seguridad de China. Ciencia. J. 2023, 33, 140-145. [\[Referencia cruzada\]](#)

2. Jiang, X.P.-.; Chen, X.-G.; Guo, K. Estudio sobre la velocidad crítica del incendio de un túnel de extracción de humo en un punto lateral. Seguridad de China. Ciencia. J. 2021, 31, 105-111. [\[Referencia cruzada\]](#)

3. Zhao, Q.; Li, J.-M.; Xie, X.; Liu, W. Estudio numérico sobre la difusión y el control del humo en un túnel curvo subterráneo urbano. J. Física. Conf. Ser. 2023, 2445, 012003. [\[Referencia cruzada\]](#)

4. Kashef, A.; Sable, HH; Gao, L. Optimización de estrategias de ventilación de emergencia en un túnel de carretera. Tecnología contra incendios. 2016, 47, 1019-1046. [\[Referencia cruzada\]](#)

5. Wang, F. Investigación sobre parámetros clave de operación de ventilación de túneles de carreteras curvas. Doctor. Tesis, suroeste de Jiaotong Universidad, Chengdu, China, 2010. [\[CrossRef\]](#)

6. Wang, F.; Dong, G.-H.; Wang, M. Estudio sobre la velocidad crítica del aire para el control del humo de incendios en un túnel curvo. Modificación. Tunn. Tecnología. 2015, 52, 84–89. [\[Referencia cruzada\]](#)

7. Wang, F.; Wang, M.; Carvel, R.; Wang, Y. Estudio numérico sobre el movimiento y control del humo de incendios en túneles de carreteras con curvas. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2017, 67, 1–7. [\[Referencia cruzada\]](#)

8. Caliendo, C.; Ciambelli, P.; De Guglielmo, ML; Meo, MG; Russo, P. Simulación numérica de diferentes escenarios de incendio de vehículos pesados en túneles de carretera curvos bidireccionales y evaluación de seguridad. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2012, 3133, 50. [\[Referencia cruzada\]](#)

9. Wu, C.; El, J.; Ni, T. Investigación sobre el movimiento del humo en incendios de túneles curvilíneos de pequeño radio. Ciencia del fuego. Tecnología. 2014, 33, 37–40. [\[Referencia cruzada\]](#)

10. Wang, F.; Wang, M.-N. Un estudio computacional sobre los efectos de la ubicación del incendio en el movimiento del humo en un túnel de carretera. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2016, 51, 405–413. [\[Referencia cruzada\]](#)

11. Zhong, MH; Shi, CL; El, L.; Shi, J.; Liu, C.; Tian, X. Desarrollo de humo en incendios de túneles curvos grandes y largos inclinados a gran escala bajo ventilación natural. Aplica. Termia. Ing. 2016, 108, 857–865. [\[Referencia cruzada\]](#)

12. Zhang, S.; Yang, H.; Yao, Y.; Zhu, K.; Zhou, Y.; Shi, L.; Cheng, X. Investigación numérica de la longitud de las capas posteriores y la velocidad crítica en túneles de metro curvos con diferentes radios de giro. Tecnología contra incendios. 2017, 53, 1765–1793. [\[Referencia cruzada\]](#)

13. Pan, R.-L.; Zhu, G.-Q.; Liang, Z.-H.; Zhang, G.; Liu, H.; Zhou, X. Estudio experimental sobre la forma del fuego y la temperatura máxima debajo de la línea central del techo en un túnel de servicios públicos bajo el efecto de una pared lateral curva. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2020, 99, 103304. [\[Referencia cruzada\]](#)

14. Lu, K.-X.; Xia, K.-H.; Shi, C.; Yang, M.; Wang, J.; Ding, Y. Investigación sobre el efecto de curvatura del túnel en el techo Temperatura de los incendios de túneles: una simulación numérica. Tecnología contra incendios. 2021, 57, 2839–2858. [\[Referencia cruzada\]](#)

15. Xu, Z.-S.; Zhou, D.-M.; Tao, H.; Zhang, X.; Hu, W. Investigación de la velocidad crítica en un túnel curvo bajo los efectos de diferentes ubicaciones de incendio y radios de giro. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2022, 126, 104553. [\[Referencia cruzada\]](#)

16. Muhasevic, M.; Deville, MO Influencia de la curvatura del túnel en la propagación de las consecuencias de un incendio accidental a gran escala: una investigación CFD. Turco. J. Ing. Reinar. Ciencia. 2013, 31, 391–402. [\[Referencia cruzada\]](#)

17. Lu, F. Investigación de simulación sobre el control del humo de incendios en un túnel de carretera curva. Doctor. Tesis, Instituto de Tecnología de Harbin, Harbin, China, 2017. [\[CrossRef\]](#)

18. Zhao, W.-F.; Lv, S.-J.; Xu, H. Características del movimiento del humo del fuego en un túnel de pequeño radio de curvatura. Ciencia del fuego. Tecnología. 2019, 38, 77–81. [\[Referencia cruzada\]](#)

19. Lin, L.; Jian, G.; Xiong, X.-P. Análisis numérico del flujo de humo en incendios de túneles con curvatura única. Universidad J. Nanchang Hangkong. (Nat. Sci. Ed.) 2019, 33, 66–67, 88. [\[CrossRef\]](#)

20. Liu, Z.; Chen, C.; Liu, M.; Wang, S.; Liu, Y. Simulaciones numéricas sobre el efecto extintor del sistema de agua nebulizada con diferentes Parámetros de Ventilación Longitudinal en Incendio en Túneles Curvos. Adv. Civilización. Ing. 2021, 5, 1–13. [\[Referencia cruzada\]](#)

21. JTG/T D70/2-02-2014; Directrices para el diseño de ventilación de túneles de carreteras. Prensa de comunicaciones del pueblo: Beijing, China, 2014.

22. NFPA 502; Estándar para túneles de carreteras, puentes y otras carreteras de acceso limitado. Asociación Nacional de Protección contra el Fuego: Quincy, MA, EE. UU., 2020.

23. McGrattan, K.; McDermott, R.; Floyd, J.; Hostikka, S.; Forney, G.; Baum, H. Modelado computacional de dinámica de fluidos del fuego. En t. J. Computación. Dinámico fluido. 2012, 26, 349–361. [\[Referencia cruzada\]](#)

24. McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, K. Guía del usuario del simulador de dinámica de incendios, 6.ª ed.; Publicación especial (NIST SP)–1019; Instituto Nacional de Estándares y Tecnología: Gaithersburg, MD, EE. UU., 2013. [\[CrossRef\]](#)

25. Fan, C.; Chen, J.; Zhou, Y.; Liu, X. Efectos de la ubicación del incendio en la capacidad de extracción de humo de los conductos de ventilación naturales en zonas urbanas. túneles. Mate de fuego. 2018, 42, 974–984. [\[Referencia cruzada\]](#)

26. McGrattan, KB; McDermott, RJ; Weinschenk, CG; Forney, GP Guía de referencia técnica del simulador de dinámica de incendios Volumen 1: Modelo matemático; Publicación especial del NIST; Instituto Nacional de Estándares y Tecnología: Gaithersburg, MD, EE. UU., 2013. [\[Referencia cruzada\]](#)

27. Ji, J.; Gao, ZH; Ventilador, CG; Sun, JH Large Eddy Simulación del efecto de chimenea sobre el efecto natural de expulsión de humo en vías urbanas incendios de túneles. En t. J. Transcripción de masa térmica. 2013, 66, 531–542. [\[Referencia cruzada\]](#)

28. Zhang, X.-L.; Lin, Y.-J.; Shi, C.; Zhang, J. Simulación numérica de la temperatura máxima y la longitud de la capa posterior de humo en Un túnel inclinado bajo ventilación natural. Tunn. Subgradoado. Tecnología espacial. 2021, 107, 103661. [\[Referencia cruzada\]](#)

29. Bai, Y.; Zhang, X.-F.; Yan, X.; Zeng, Y. Estudio sobre el control de la velocidad bajo fuego en túneles de carretera bidireccionales a gran altitud. *Mentón. J. Undergr. Ing. espacial*. 2019, 15, 269–276.
30. Asociación Mundial de la Carretera (PIARC). *El Manual de Túneles de Carreteras*; Asociación Mundial de la Carretera: Parejas, Francia, 2016.
31. Zheng, B.; Colmillo, L.; Guo, R. Análisis de la ley de distribución longitudinal de la temperatura y factores que influyen en las grandes altitudes Túnel bajo Ventilación Unidireccional. *Modificación. Tunn. Tecnología*. 2021, 58, 349–358. [\[Referencia cruzada\]](#)
32. Liu, B.; Mao, J.; Xi, Y.; Hu, J. Efectos de la altitud sobre la velocidad del movimiento del humo y la distribución longitudinal de la temperatura en el túnel incendios. *Tunn. Subgraduado. Tecnología espacial*. 2021, 112, 103850. [\[Referencia cruzada\]](#)
33. JTG D70/2-2014; Especificaciones para el Diseño de Túneles de Carreteras. Sección 2 Ingeniería de Tráfico e Instalaciones Afiliadas. Porcelana Prensa de comunicaciones: Beijing, China, 2014.
34. Jafari, S.; Farhanieh, B.; Afshin, H. Investigación numérica de la velocidad crítica en túneles curvos: estudio paramétrico y establecimiento. *ment del nuevo modelo. Tunn. Subgraduado. Tecnología espacial*. 2023, 135, 105021. [\[Referencia cruzada\]](#)
35. Jafari, S.; Farhanieh, B.; Afshin, H. Efectos de los parámetros del fuego sobre la velocidad crítica en túneles curvos: un estudio numérico y Análisis de superficie de respuesta. *Tecnología contra incendios*. 2024, 60, 1769–1802. [\[Referencia cruzada\]](#)
36. Pan, R.-L.; Wang, YN; Yue, S.-Y.; Ran, C.-H.; Cheng, H.-H.; Zhong, M.-H. Estudio experimental a gran escala sobre las características del campo de flujo de humo longitudinal en túneles ferroviarios de alta velocidad. *Universidad J. Tsinghua. (Ciencia tecnológica)* 2024, 1–12. [\[Referencia cruzada\]](#)
37. Administración Nacional de Ferrocarriles de la República Popular China. Código de Diseño de Ingeniería de Evacuación para Prevención de Desastres y Salvamento de Túneles Ferroviarios; Administración Nacional de Ferrocarriles de la República Popular China: Beijing, China, 2017.
38. Leslie, J.; Millenson, J. *Principios del análisis del comportamiento*; Prentice Hall: Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU., 1967.
39. Comité Técnico de PIARC Carretera. *Control de Incendios y Humo en Túneles de Carreteras*; Comité Técnico de PIARC Carretera: La Défense, Francia, 1999.
40. Asociación Nacional de Protección contra Incendios. NFPA 72 Código Nacional de Señalización y Alarmas de Incendios Edición 2019; Asociación Nacional de Protección contra Incendios : Boston, MA, EE. UU., 2019.
41. Caliendo, C.; Ciambelli, P.; De Guglielmo, ML; Meo, MG; Russo, P. Simulación de evacuación de personas en caso de incendio en un túnel de carretera. *Procedia: social y conductual. Ciencias* 2012, 53, 178–188. [\[Referencia cruzada\]](#)
42. Wang, G.-H.; Yan, Z.-G. Estudio de simulación del tiempo de evacuación en cruces peatonales largos y empinados de túnel de autopista. *Modificación. Tunn. Tecnología*. 2019, s2, 132-137. [\[Referencia cruzada\]](#)
43. GB 1589-2016; Límites de dimensiones, carga por eje y masas para vehículos de motor, remolques y vehículos combinados. Administración General de Supervisión de Calidad, Inspección y Cuarentena de la República Popular China: Beijing, China, 2016.
44. Wang, X.; Qu, J.-R.; Xia, Y.; Wang, L.; Zhen, Y. Estudio sobre evacuación y rescate de personal de bomberos en un túnel de carretera de dos vías y un solo orificio . *J. Undergr. Ing. espacial*. 2020, 16, 944–954.
45. Zhang, TR; Li, W.; Yan, Z.-G. Investigación sobre el desempeño de la estrategia longitudinal de extracción de humo y evacuación de personal en Túnel de carretera. *Modificación. Tunn. Tecnología*. 2020, 57, 651–661. [\[Referencia cruzada\]](#)
46. Jones, WW Estado del arte en modelado zonal de incendios. *La Vereinigung zur Forderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (VFDB)*. En *Actas del 9º Seminario Internacional de Protección contra Incendios, Métodos de ingeniería para la seguridad contra incendios*, Munich, Alemania, 25 y 26 de mayo de 2001; págs. 89-126.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.