

倾斜隧道火灾重点排烟效率数值模拟研究

朱子琳, 王田楠, 邢哲语, 马敏敏, 李兴莉*

太原科技大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年2月28日

摘要

本文采用FDS (6.7.9), 考虑热释放速率(HRR)、排烟量、排烟口宽长比、排烟口间距及排烟口布置方式等因素, 对倾斜重点排烟隧道排烟口的排烟效率进行了研究。研究表明: 水平隧道应注重排烟口设计参数的影响, 排烟口应对称布置, 排烟口的排烟效率随排烟量、排烟口宽长比的增加而增大; 基本不随排烟口间距的变化而变化。倾斜隧道应注重排烟口布局的设计, 1%倾斜隧道“2+”“1+”排烟口布局以及3%、5%倾斜隧道“0+”排烟口布局的排烟效率受排烟量、排烟口宽长比以及间距影响不大, 对其他布局的排烟效率可通过增加排烟量、增大宽长比或减小间距等措施进行提高。

关键词

倾斜隧道, 隧道火灾, 重点排烟, 排烟效率, 设计参数

Numerical Simulation Study on Point Smoke Extraction Efficiency in Inclined Tunnel Fires

Zilin Zhu, Tiannan Wang, Zheyu Xing, Minmin Ma, Xingli Li*

School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: February 2, 2026; accepted: February 23, 2026; published: February 28, 2026

Abstract

In this study, FDS (6.7.9) was adopted to investigate the smoke extraction efficiency of point extraction vents in inclined tunnels, considering factors such as heat release rate (HRR), smoke exhaust

*通讯作者。

文章引用: 朱子琳, 王田楠, 邢哲语, 马敏敏, 李兴莉. 倾斜隧道火灾重点排烟效率数值模拟研究[J]. 安防技术, 2026, 14(1): 22-35. DOI: 10.12677/jsst.2026.141003

rate, exhaust vent width-length ratio, vent interval and vent arrangement on each side of the fire source. The results indicate that for horizontal tunnels, emphasis should be placed on the design parameters of exhaust vents, which should be arranged symmetrically. The smoke extraction efficiency increases with the increase of smoke exhaust rate and width-length ratio of exhaust vents, but remains basically unchanged with the variation of vent interval. For inclined tunnels, priority should be given to the design of vent arrangement; the smoke extraction efficiency of the “2+” and “1+” arrangement in tunnels with 1% slope, as well as the “0+” arrangement in tunnels with 3% and 5% slopes, is less affected by smoke exhaust rate, exhaust vent width-length ratio, vent interval. For other arrangement, the smoke extraction efficiency can be improved by increasing the smoke exhaust rate, increasing the width-length ratio of exhaust vents and reducing the distance.

Keywords

Inclined Tunnel, Tunnel Fire, Point Smoke Exhaust, Smoke Exhaust Efficiency, Design Parameters

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 盾构隧道的数量及规模不断增加, 但由于隧道的狭长特性, 隧道发生火灾后会造成员工疏散困难甚至衬砌结构被破坏, 因此, 合理的排烟系统设计对于保证隧道安全及员工疏散至关重要。重点排烟能够避免对烟气分层的破坏并有效控制烟气流动, 在盾构隧道中应用广泛, 如上海北横隧道[1]、上海虹梅南路隧道[2]等。

针对重点排烟隧道火灾的烟气特性及排烟效率, 国内外学者已经展开了许多研究, 主要针对顶部集中排烟[3]、侧向集中排烟[4]、以及半横向排烟[5]等, 分析了排烟口特性(宽长比[3]、布设高度[4]等)、火源特性(火灾位置[5]、热释放速率[6]等)、排烟量[7]-[9]、纵向通风[10]等设计参数的影响。例如 Xu 等[6]研究了纵向排烟和横向排烟不同排烟方式下的排烟效率, 发现排烟效率取决于热释放速率、排烟量、隧道壁面热损失、排烟装置以及布置方式等因素。付凯等[7]发现侧向排烟系统的排烟效率与隧道宽度和排烟量密切相关, 排烟量越大, 侧向排烟效率越高; 相同排烟量, 排烟效率随隧道宽度呈递减趋势。Chen 等[11]发现纵向通风与集中排烟方式结合时, 排烟效率随纵向风速的增大而减小, 缩短火源距排烟口的距离可以提高排烟效率。上述研究成果是基于水平隧道侧向、横向排烟得出的, 由于倾斜隧道受到烟囱效应影响, 烟气流动特性与水平隧道不同, 现有的研究成果不能直接应用于倾斜隧道重点排烟系统的设计。因此, 需要进一步研究倾斜隧道重点排烟系统的排烟效率, 明确多因素对排烟效率的影响。

基于此, 本文针对倾斜隧道火灾重点排烟系统, 研究了坡度、热释放速率(HRR)、排烟量、排烟口宽长比、间距等对排烟效率的影响, 以期对倾斜隧道重点排烟系统的设计和优化提供指导, 提高隧道火灾防控能力。

2. 数值模拟

2.1. 模型建立

采用 FDS(Fire Dynamics Simulator)火灾模拟软件, 建立宽度 18 m, 高度 11.4 m 的隧道模型, 且考虑

到烟气蔓延距离控制在 300 m 范围要求[12], 选择隧道长度为 700 m, 行车道高度 6.9 m, 如图 1 所示。行车道顶部设置排烟口, 排烟口有效面积为 12 m², 考虑排烟口不同宽长比的影响, 分别为 4:3、6:2、8:1.5。排烟口间距分别为 40 m、60 m、80 m。隧道初始温度为 20℃, 标准大气压, 隧道结构材料选择为混凝土。行车道采用“OPEN”边界, 排烟道两侧采用“EXHAUST”模拟排烟。采用汽油为燃料, 火源的 CO 产率和烟尘产率设置为 0.011 和 0.038。模拟中考虑的隧道坡度为 0%~5%, 通过改变重力的大小和方向实现。排烟口位置及两侧均设置 CO 质量流量切片, 沿隧道纵向中心设置温度切片、速度切片以及 CO 质量流量切片。模拟时长为 1200 s。模拟工况如表 1 所示。

Table 1. Summary of the numerical simulation cases

表 1. 数值计算工况表

工况	HRR (MW)	坡度	间距(m)	排烟量(m ³ /s)	宽 × 长 (m × m)	排烟口布局
1~4	50	0%, 1%, 3%, 5%	None	None	None	None
5~44	50	0%, 1%, 3%, 5%	60	195, 292.5, 390, 487.5, 585	4 × 2, 8 × 1.5	3 + 3
45~104	50	0%, 1%, 3%, 5%	40, 60, 80	195, 292.5, 390, 487.5, 585	6 × 2	3 + 3
105~116	5, 10, 20	0%, 1%, 3%, 5%	60	195	6 × 2	3 + 3
117~120	50	0%	60	243.75, 292.5	6 × 2	2 + 2, 1 + 1
121~186	50	1%/3%/5%	60	292.5, 390/390, 487.5/487.5, 585	6 × 2	2 + 4, 1 + 5, 0 + 6, 2 + 3, 1 + 4, 0 + 5, 1 + 3, 0 + 4, 1 + 2, 0 + 3, 0 + 2
187~252	50	1%/3%/5%	60	390/487.5/585	4 × 3, 8 × 1.5	2 + 4, 1 + 5, 0 + 6, 2 + 3, 1 + 4, 0 + 5, 1 + 3, 0 + 4, 1 + 2, 0 + 3, 0 + 2
253~342	50	1%/3%/5%	40, 60, 80	390/487.5/585	4 × 2	2 + 4, 1 + 5, 0 + 6, 2 + 3, 1 + 4, 0 + 5, 1 + 3, 0 + 4, 1 + 2, 0 + 3, 0 + 2
343~345	5	0%	60	72, 90, 108	6 × 2	3 + 3
346~356	5	1%	60	108	6 × 2	2 + 4, 1 + 5, 0 + 6, 2 + 3, 1 + 4, 0 + 5, 1 + 3, 0 + 4, 1 + 2, 0 + 3, 0 + 2
357~365	5	3%	60	162	6 × 2	1 + 5, 0 + 6, 1 + 4, 0 + 5, 1 + 3, 0 + 4, 1 + 2, 0 + 3, 0 + 2
366~370	5	5%	60	198	6 × 2	0 + 6, 0 + 5, 0 + 4, 0 + 3, 0 + 2

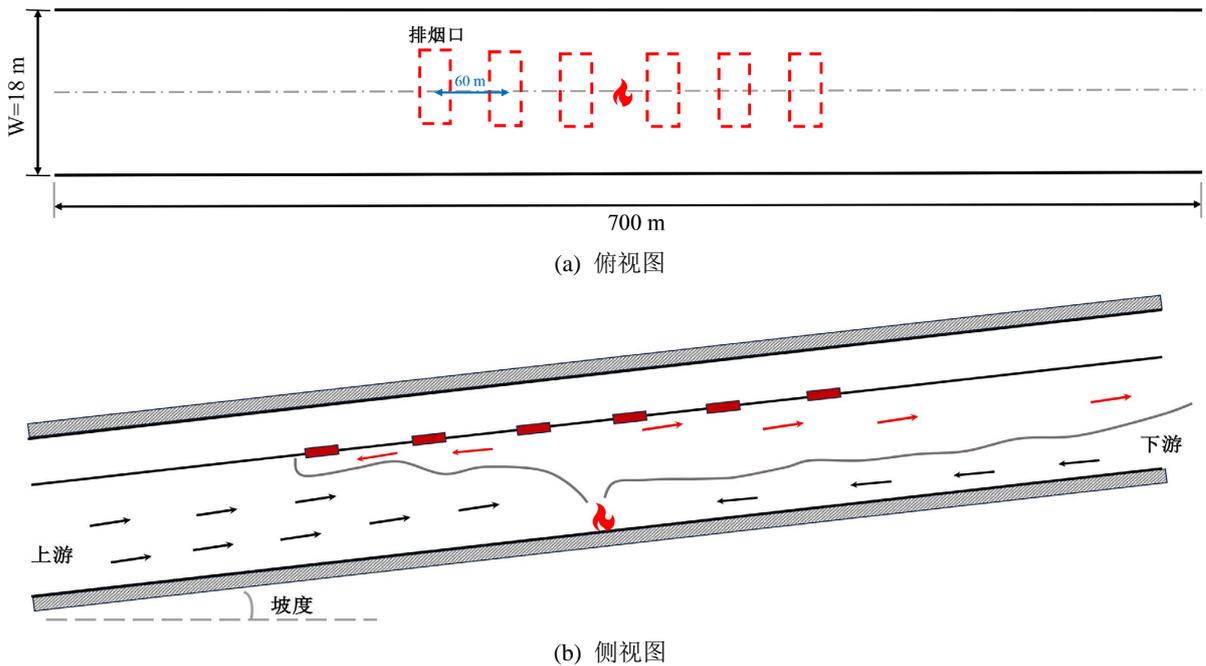


Figure 1. Tunnel model
图 1. 隧道模型

2.2. 网格敏感性分析

数值计算的准确性与网格尺寸密切相关, 网格越小, 计算精度越高, 但计算时间会变长。网格尺寸与火源特征直径 D^* 相关, D^* 可以由式(1)计算得到。式中 Q 为热释放速率(kW), ρ_a 为空气密度(kg/m^3), C_p 为空气比定压热容($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), T_a 为环境温度(K), g 为重力加速度(m/s^2)。网格尺寸在 $D^*/16 \sim D^*/4$ (0.2875 m~1.15 m) 之间时计算结果较为合理。当网格尺寸小于 0.3 m 时, 顶棚最高温升结果差异较小, 故选取网格 $0.3 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, 如图 2 所示。

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_a C_p T_a \sqrt{g}} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

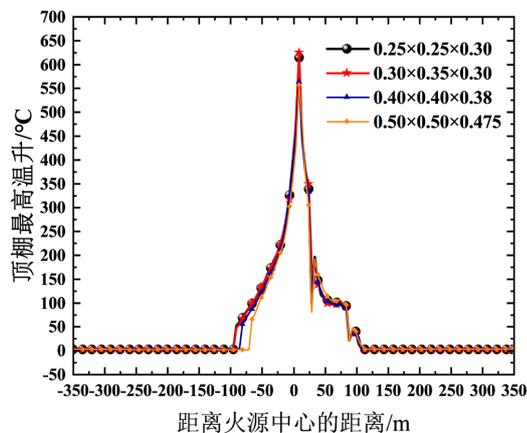


Figure 2. Mesh sensitivity analysis
图 2. 网格敏感性分析

2.3. 模型验证

本文选择与刘英利[13]开展的小尺寸试验数据进行比较。该实体隧道长 10 m、宽 0.6 m、高 0.27 m，外界环境温度为 $28.5^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ，模型隧道的顶部、底部和一侧材质为 30 mm 厚硅酸铝防火板，密度为 300 kg/m^3 ，导热系数为 0.035 W/m/K 。另一侧材质为 8 mm 厚，耐温 1200°C 的防火玻璃，密度为 2200 kg/m^3 ，导热系数为 1.4 W/m/K 。排烟口上方静压箱采用镀锌铁皮制作，外表面包覆 20 mm 厚橡塑保温棉，保温棉导热系数为 0.034 W/m/K 。火源燃料为丙烷，火源功率为 2.8 kW，对数值模拟和缩尺试验中距离火源 1.5 m 处的竖向温度进行对比，发现结果吻合较好，如图 3 所示，表明采用的数值计算方法和模型设置的合理性。

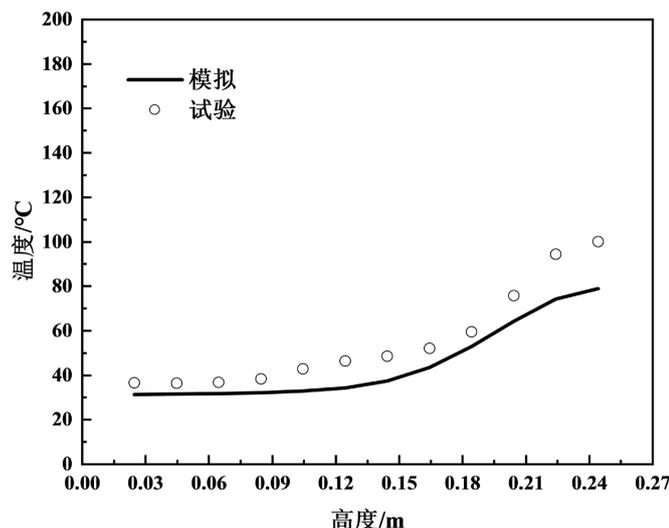


Figure 3. Verification of numerical simulation results
图 3. 数值计算结果验证

3. 结果与分析

数值计算过程中，排烟效率可通过公式(2)进行计算[14]：

$$\varphi = \frac{m_{co,si}}{m_{co}} \quad (2)$$

其中， φ 为排烟口的排烟效率； $m_{co,si}$ 为排烟口烟气的 CO 质量流率，kg/s； m_{co} 为排烟口前方来流烟气中的 CO 质量流率，kg/s。

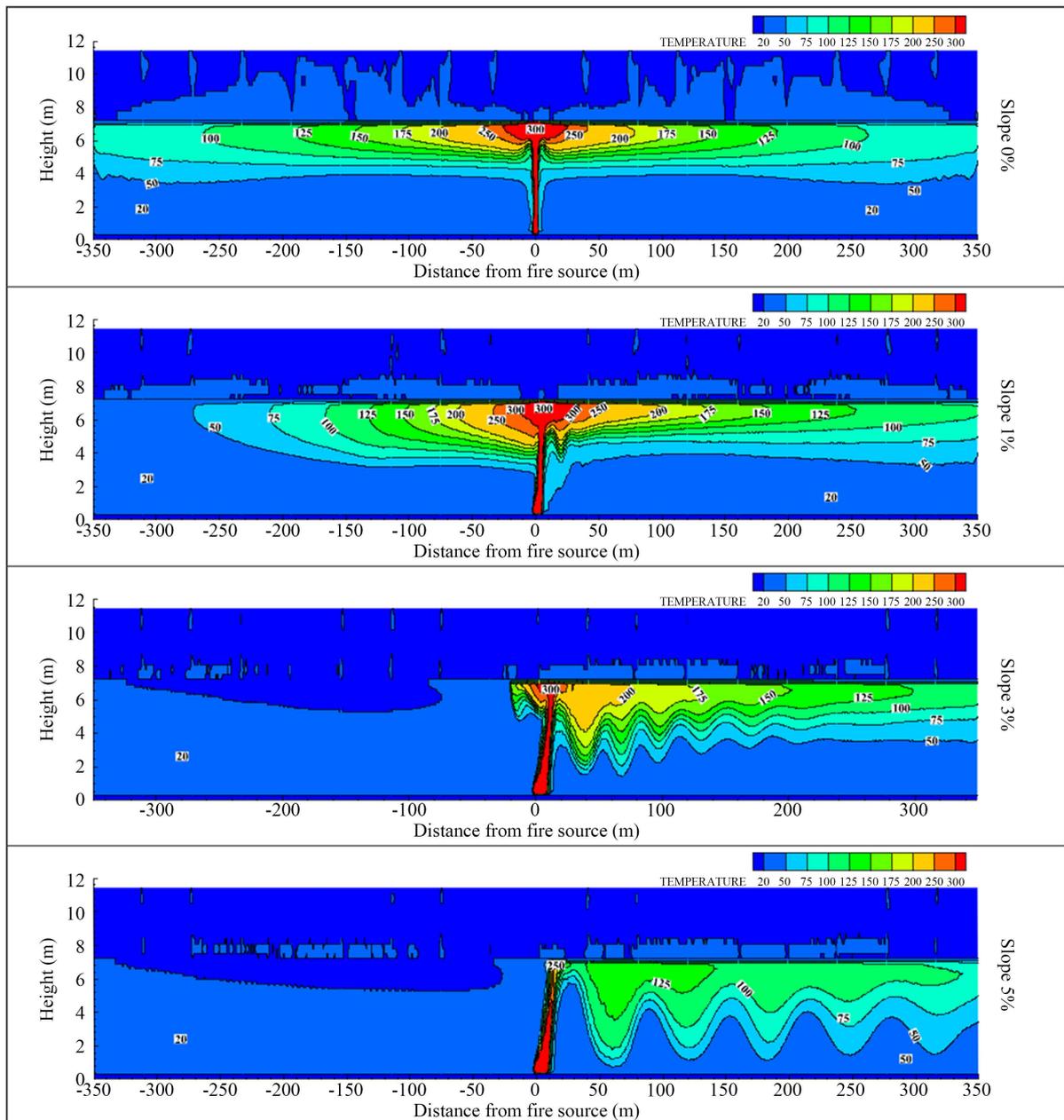
3.1. 流场特征

水平隧道工况下，隧道火灾烟气流动由热浮力主导，温度场与速度场呈现对称分布特征。温度场方面，火源上方形成“T”形分布结构。火羽流在热浮力驱动下垂直上升，撞击隧道顶棚后沿顶棚向左右两侧对称扩散，下游新鲜空气同时沿下层流向火场，形成界限分明的烟气层化结构。高温区域集中在火源正上方及上下游有限范围，温度沿隧道纵向不断衰减。速度场方面，烟气纵向流动速度整体偏低，烟气的蔓延主导动力为热浮力，受到的惯性力极小，流场稳定性高，无明显湍流扰动，烟气流线规整，未出现明显回流或剪切扰动现象。

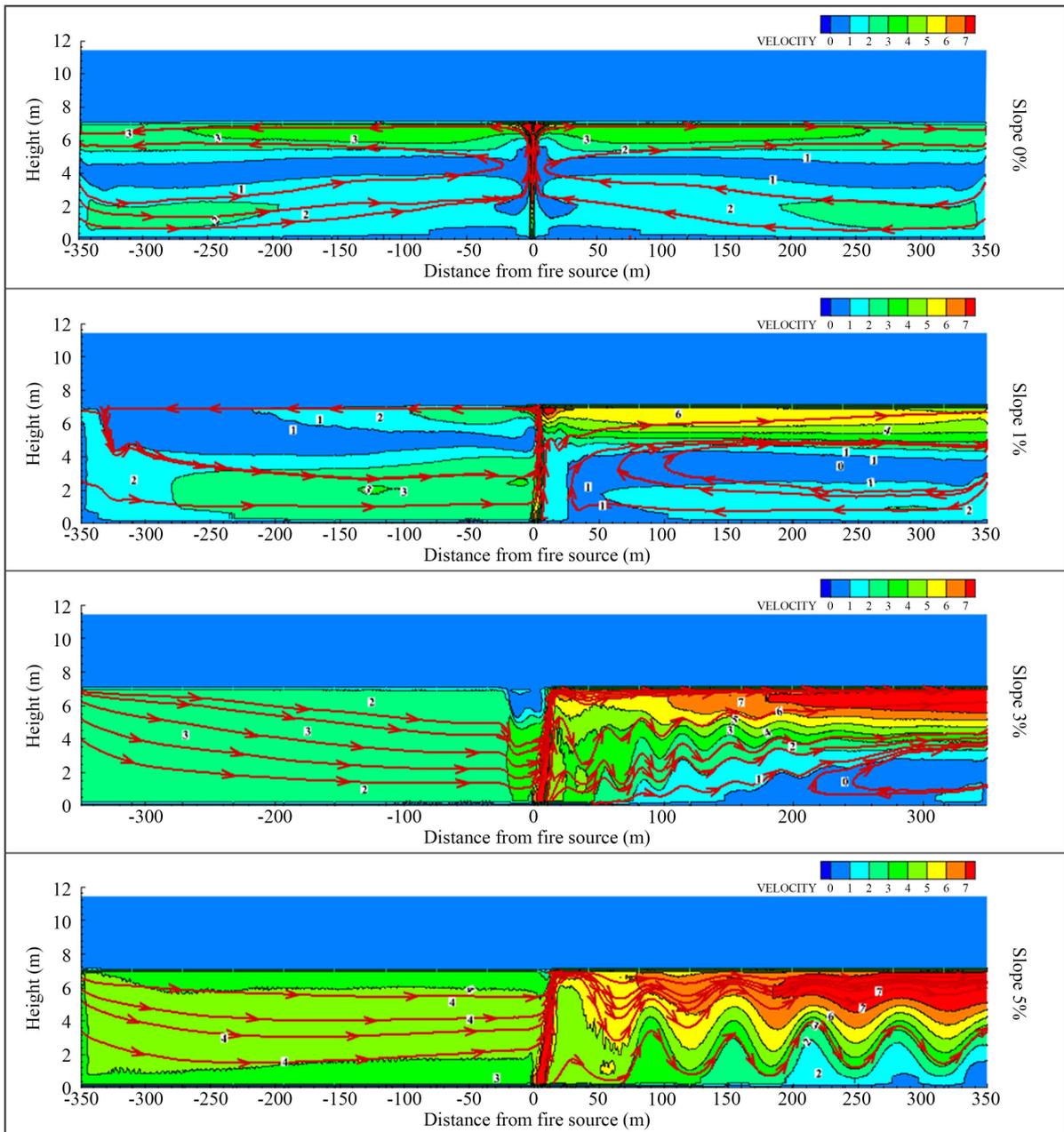
倾斜隧道工况下，热浮力与烟囱效应形成耦合作用，随着隧道坡度的增加，烟囱效应增强，增强了

上游诱导气流的速度，烟气逆流长度变短。同时增强的烟囱效应加剧了下游烟气的对流换热，上层烟气与下层冷空气混合更强，进而导致下游烟气层厚度增加[15]，尤其是对于5%倾斜隧道，彻底破坏流场对称性。高温烟气在烟囱效应的驱动下，呈现明显的上坡方向偏转趋势，火源上游侧几乎无有效烟气。速度场方面，下游侧烟气流速较0%坡度工况显著增强，且远高于上游侧，下游侧出现明显的波浪状流速起伏，如图4所示。

与纵向通风隧道临界风速控制策略相比，重点排烟系统的优势在于排出高温烟气并形成诱导气流。在倾斜隧道中，诱导气流速度进一步增加，即使在纵向通风速度未达到临界风速的情况下，诱导气流仍可实现对烟气的有效控制，将火灾烟气控制在一定的范围内。



(a) 无排烟温度场



(b) 无排烟速度场

Figure 4. Distribution of temperature and velocity field under the condition of no smoke exhaust

图 4. 无排烟条件下的温度场和速度场分布

3.2. 热释放速率对排烟效率的影响

图 5 为不同热释放速率、不同坡度下排烟口对称布置的排烟效率，排烟口面积为 $6\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，排烟口间距为 60 m ，排烟量为 $195\text{ m}^3/\text{s}$ ，排烟口布置为“3+3”，结果表明：水平隧道的各排烟口排烟效率在火源两侧对称分布，且距离火源中心越远，排烟口排烟效率越低。水平隧道排烟口的排烟效率随热释放速率的增大先稳定后降低，这是因为选择的排烟量较大，排烟口风速大，导致隧道两侧诱导气流较高，烟气被控制在较短范围，总排烟效率高并趋于稳定。而随着热释放速率持续增加，烟气产生量增加，烟

气蔓延速度加快，同时 50 MW 时烟气流层较厚，排烟系统排烟能力有限，排烟口并不会排出更多的烟气，导致总排烟效率有降低的趋势。随着坡度的增加，总排烟效率不断降低，且热释放速率越大，下降趋势越明显，这是因为倾斜隧道受烟囱效应的影响，坡度越大，烟囱效应越强，诱导气流会阻碍烟气向上游移动，加速烟气向下游方向移动，导致上游排烟口利用率降低甚至失效；而热释放速率越大，烟气产生量越多，燃烧越剧烈，热浮力作用越强，内外热压差变大，加速烟气向下游蔓延，而下游排烟口排烟能力有限，大量烟气在隧道下游积聚，无法有效排出，两者共同导致排烟效率降低。如图 5(b)所示，当坡度为 3%、5% 时，上游排烟口的排烟效率几乎为 0，排烟口“失效”，故不建议倾斜隧道排烟口对称布置。

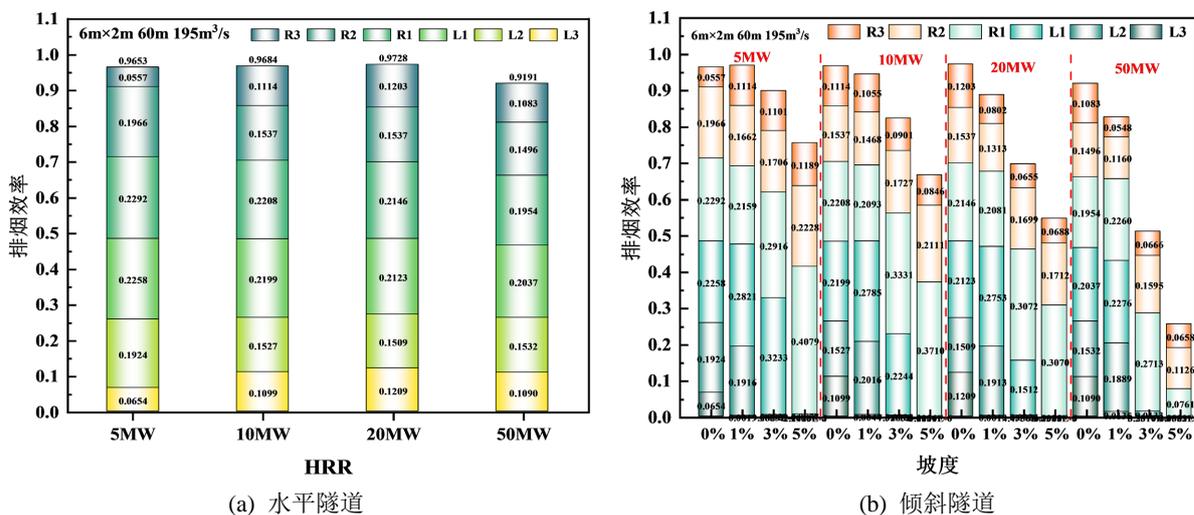


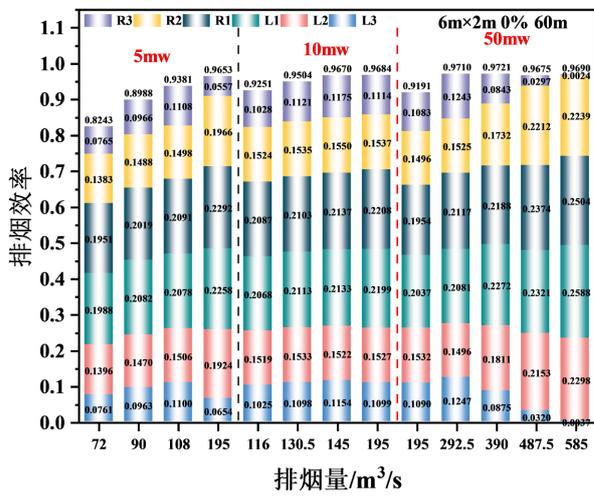
Figure 5. Smoke exhaust efficiency under different heat release rates (HRR)

图 5. 不同热释放速率下的排烟效率

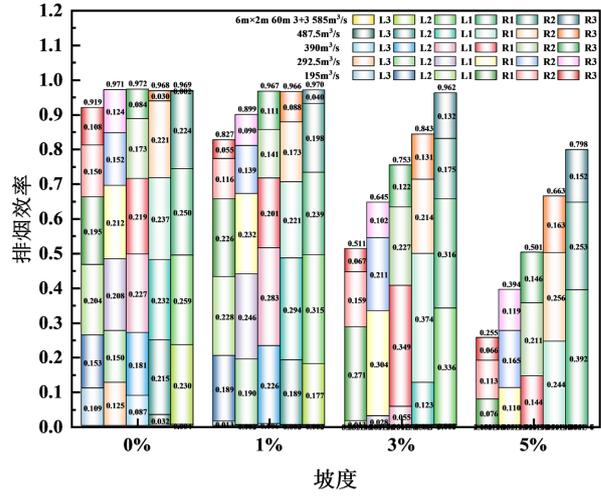
3.3. 排烟量对排烟效率的影响

图 6(a)~(c)为不同排烟量、不同坡度下排烟口对称布置的排烟效率。水平隧道，随着排烟量的增加，排烟效率有升高的趋势，但持续增大排烟量，并没有对排烟口的排烟效率有很好的改善。这是因为排烟量的增大，排烟道内负压增加，提高了排烟口的排烟能力，总排烟效率增加。而对于单个排烟口，排烟量增加，排烟口能力变强，排出的烟气多，同时诱导气流增强，烟气被控制在较短范围内，距离火源最远处的排烟口“失效”，即排烟效率为 0。对于排烟口对称布置的倾斜隧道，随着排烟量逐渐增大，排烟总效率逐渐升高。这是因为受烟囱效应的影响，烟气集中在火源下游，坡度分别为 1%、3%、5% 时对应的排烟口 L3、L3 与 L2、L3，L2 与 L1 的排烟效率已趋近于临界失效状态，只能卷吸空气，加快烟气向下游蔓延，火源附近的排烟口的排烟效率随排烟量的增大而增大，上游排烟口失效造成了排烟口资源的浪费，即使排烟量有所增加，但烟气并不能及时排出隧道，因此，合理地选择排烟量十分重要，既可以降低隧道的运营成本，也可以实现资源利用最大化，建议 1%、3%、5% 倾斜隧道双向排烟时，隧道上游布置 2 个、1 个、0 个排烟口。

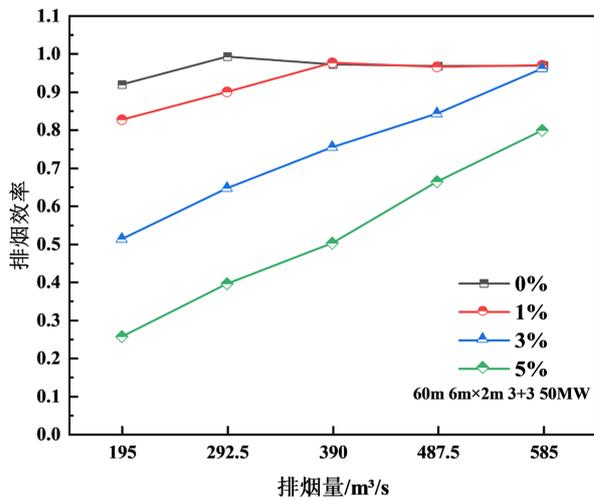
图 6(d)~(f)为倾斜隧道排烟口非对称布置时的排烟效率。结果表明，随着排烟量的增加，坡度较小时 (<3%) 时，对于“2+”、“1+”排烟口布局的排烟总效率变化不大，而坡度较大时 ($\geq 3%$) 时，“2+”“1+”排烟口布局下的排烟总效率逐渐升高，坡度越大，该现象越明显。这是因为坡度较小时，烟气分层相对稳定，排烟口利用效率高；坡度较大时，烟囱效应变强，烟气集中在隧道下游，随着排烟量的增加，下游排烟口能够卷吸更多烟气，从而使排烟总效率逐渐升高。



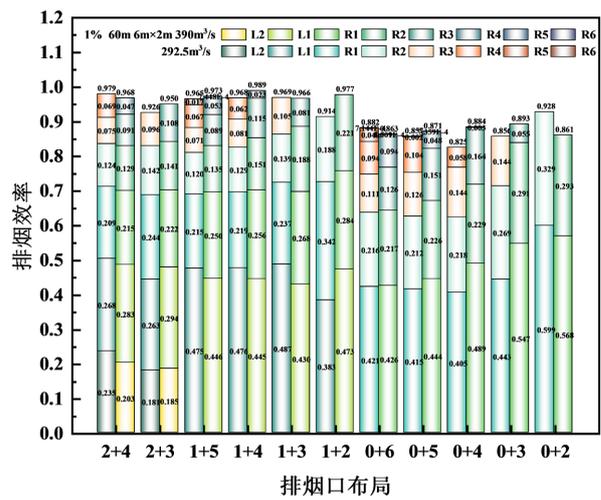
(a) 不同 HRR 水平隧道排烟口对称布置



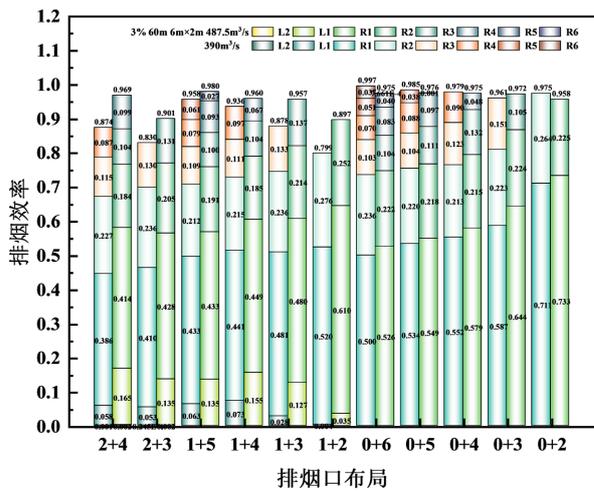
(b) 50 MW 倾斜隧道排烟口对称布置



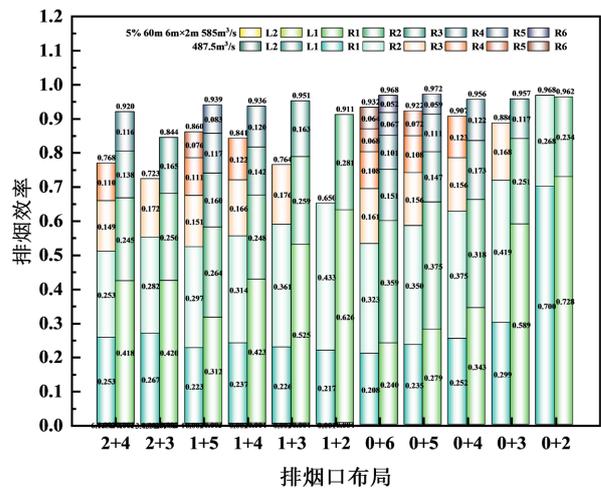
(c) 50 MW 倾斜隧道排烟口对称布置



(d) 1% 倾斜隧道排烟口非对称布置



(e) 3% 倾斜隧道排烟口非对称布置



(f) 5% 倾斜隧道排烟口非对称布置

Figure 6. Smoke exhaust efficiency under different smoke exhaust rates
图 6. 不同排烟量下的排烟效率

3.4. 排烟口宽长比对排烟效率的影响

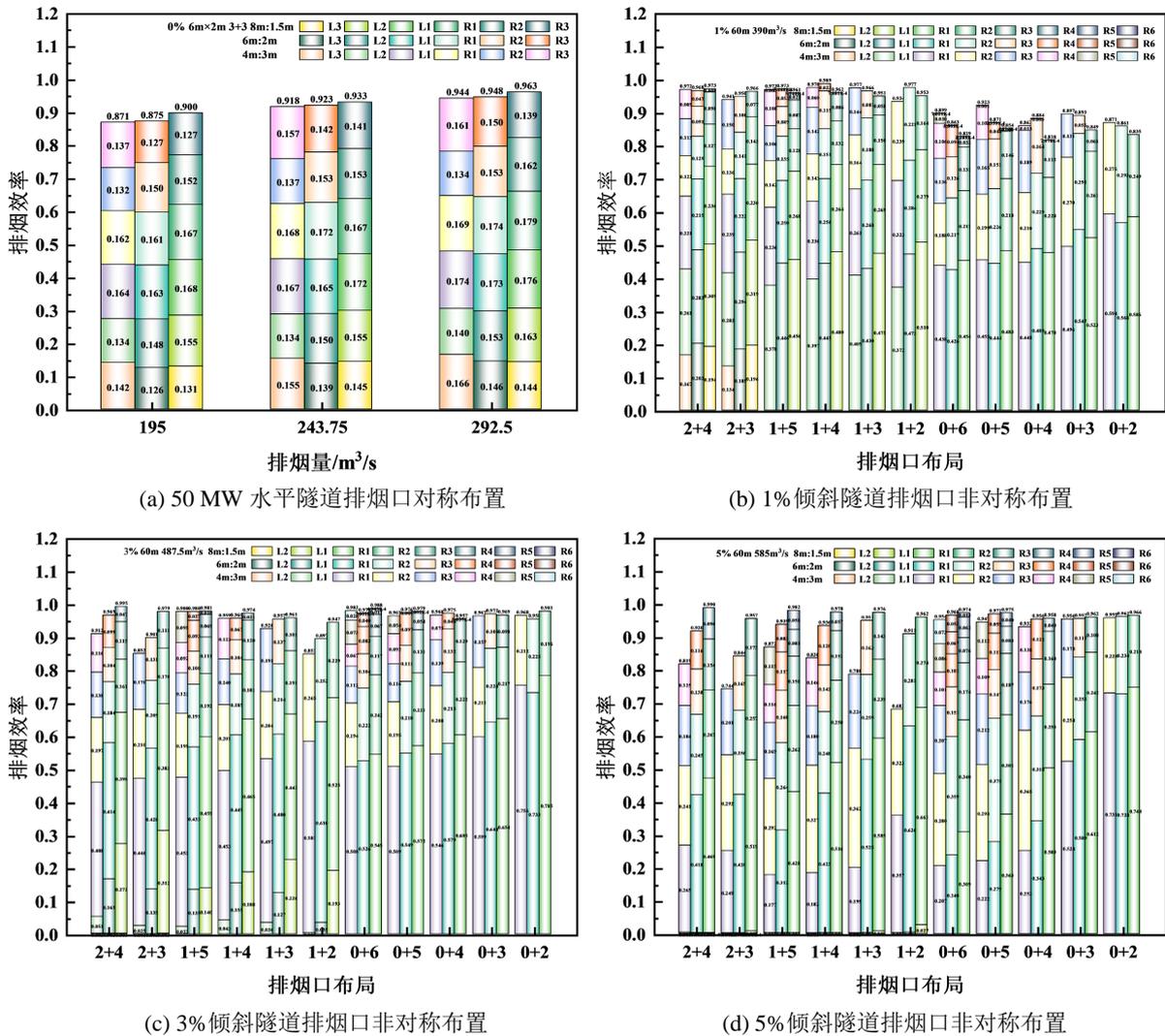


Figure 7. Smoke exhaust efficiency under different width-to-length ratios of smoke exhaust vents
图 7. 不同排烟口宽长比下的排烟效率

图 7 为不同排烟口宽长比下的排烟效率。排烟口对称布置的水平隧道，随着宽长比的增加，排烟效率呈上升趋势。这是因为排烟口宽长比增大时，更多的烟气直接沿排烟口上游侧排出，排烟口越宽，排出的烟气量越多，从而提高总排烟效率。对于排烟口非对称布置的倾斜隧道，宽长比的增加对 1% 倾斜隧道“2+”“1+”布局、3% 及 5% 倾斜隧道“0+”排烟口布局的总排烟效率影响不大，对于 1% 倾斜隧道“0+”排烟口布局的总排烟效率呈现下降趋势，3%、5% 倾斜隧道“2+”“1+”排烟口布局总排烟效率呈现上升趋势。1% 倾斜隧道烟囱效应较弱，上游也会蔓延大量烟气，排烟口宽长比越大，更多的烟气会直接沿隧道上游侧排出，导致上游排烟口利用率升高，上游不布置排烟口会导致上游烟气无法有效排出，同时烟气温度较高，加速烟气向上游蔓延，导致下游离火源最远的排烟口排烟效率降低；而 3%、5% 倾斜隧道，烟囱效应占据主导地位，坡度越大，烟囱效应越强，上游烟气蔓延范围越短。1% 坡度，L2、L1 排烟口的排烟效率随宽长比的增加而增加；3% 坡度，L2 几乎不排烟，L1 排烟口的排烟效率随宽长比的增大而逐

渐升高；5%坡度，烟气基本集中在火源下游侧，L2、L1几乎不排烟，R1排烟口的排烟效率随宽长比的增大而逐渐升高，且在上述情况下，距离火源越远的排烟口排烟效率随宽长比的增加而降低。

3.5. 排烟口间距对排烟效率的影响

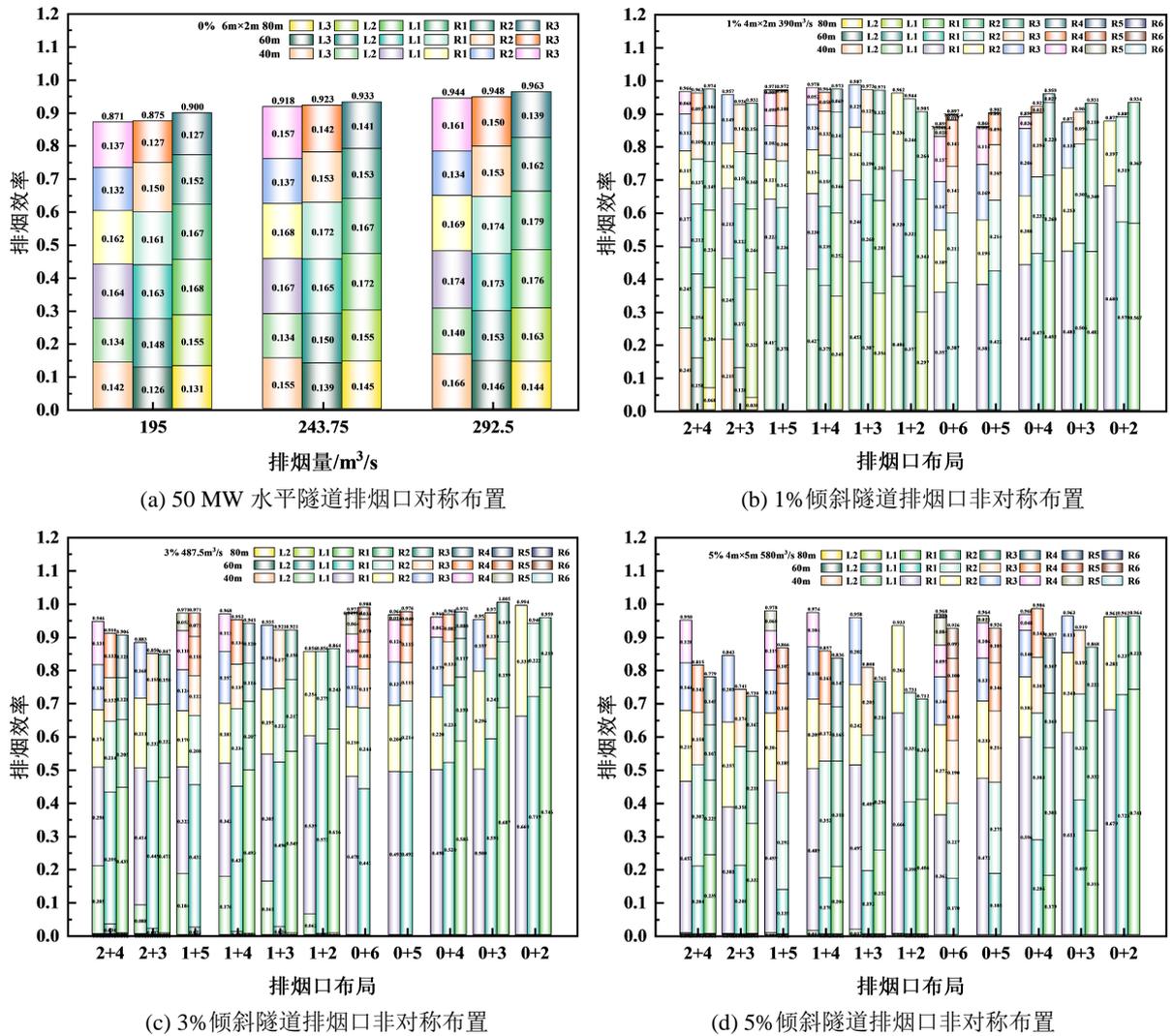


Figure 8. Smoke exhaust efficiency under different interval of smoke exhaust vents
图 8. 不同排烟口间距下的排烟效率

图 8 为不同排烟口间距下的排烟效率。排烟口间距的变化对水平隧道总排烟效率的影响不明显。研究结果与申哲玮[16]的研究保持一致。而对于排烟口非对称布置的倾斜隧道，随着排烟口间距的增大，坡度为 1% 时，排烟口布置方式为“2+”、“1+”的总排烟效率变化不大，“0+”的总排烟效率有升高的趋势；坡度为 3% 和 5% 时，“0+”的总排烟效率变化不大，“2+”、“1+”的总排烟效率有降低趋势。这是因为烟气在水平隧道中蔓延路径相对简单，受重力分力影响较小，当排烟口间距发生变化时，对烟气分层破坏较小，同时风流相对稳定，只要排烟口间距布置合理，就能将烟气有效排出，因此间距的改变对排烟效率影响较小。对于倾斜隧道，受烟囱效应的影响，坡度较大时，烟气沿隧道坡度方向集中在火源下游，排烟口间距大，烟气在蔓延过程中卷吸下层冷空气，使得烟气量增加，排烟口间距变大，烟气

无法及时排出隧道，导致烟气继续向前蔓延，有效排烟量减少，排烟口的排烟效率降低。坡度越大，排烟口间距越小，排烟效率的增长速度越快。

3.6. 排烟口布局对排烟效率的影响

排烟口布置数量过多，排烟效率并没有显著提升，这是因为过多的排烟口会对各个排烟口的排烟量重新分配，在合理的排烟口布局下，减少下游排烟口的数量不会显著影响整体排烟效率。一方面，在合理的布局情况下，烟气能够有效排出，烟气被限制在一定范围内；另一方面，减少排烟口数量可以降低排烟系统的复杂性。因此，合理的排烟口设计和布局可以弥补排烟口数量减少对排烟效率的影响，维持排烟系统高效排烟，从而将烟气限制在一定范围内。

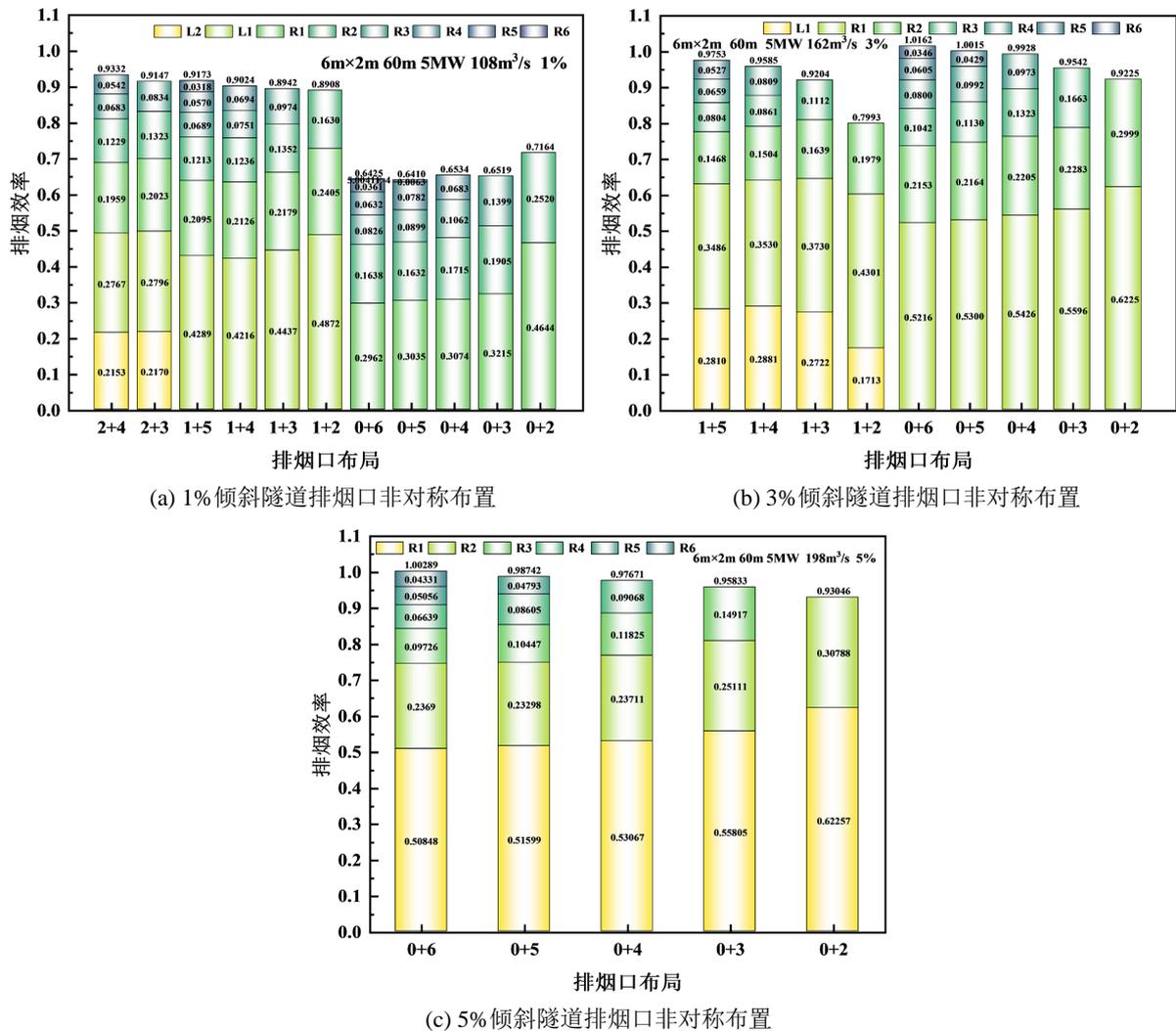


Figure 9. Smoke exhaust efficiency under different arrangement of smoke exhaust vents
图 9. 不同排烟口布局下的排烟效率

对于倾斜隧道，排烟效率受排烟口布局的影响较大。1%倾斜隧道，排烟口组数相同时，随着排烟口向下游方向布置，排烟效率呈下降趋势，当排烟口上游布置个数相同时，下游排烟口减少对于排烟效率的影响不大。对于3%、5%倾斜隧道，排烟口组数相同时，随着排烟口向下游方向布置，排烟效率逐渐升

高,当排烟口上游布置个数相同时,下游排烟口减少对于烟气控制在 300 m 范围的排烟口组合的排烟效率影响不大,如图 7~9 所示。而在同一排烟量、各排烟方式组合作用下,随着坡度的增加,排烟效率逐渐降低,如图 6(d)~(f)所示。

图 9 为 5 MW 火源功率下的排烟效率,结合图 5、图 6 和图 7,0%坡度,上 1、下 1 排烟效率最高;1%坡度,排烟口“2+”“1+”上 1 排烟效率最高,“0+”下 1 排烟效率最高;3%、5%坡度,各排烟口布置下,下 1 排烟口排烟效率最高,但 5%坡度“0+4”除外。

1%倾斜隧道排烟口布置为“2+”“1+”的排烟效率较“0+”的高,而 3%、5%倾斜隧道则相反。主要是因为,坡度 <3%时,烟气受烟囱效应较小,烟气层较稳定,上游烟气蔓延距离相对较长,上下游排烟口分散布置可以覆盖更长距离的烟气,从而捕获更多的烟气;而坡度 $\geq 3\%$ 时,受热浮力和烟囱效应影响,烟气可以快速集中在火源下游,上游烟气蔓延距离短,上游排烟口“失效”。例如:在各种排烟口布置情况下,1%倾斜隧道,对 R5、R6 排烟口的利用率不高,排烟效率近似为 0;3%倾斜隧道,对 L2、L1 排烟口的利用率不高,排烟效率近似为 0。因此,建议 1%倾斜隧道,排烟口上下游非对称布置,且下游排烟口个数不宜超过 4 个,3%、5%倾斜隧道,排烟口布置在火源下游,且下游排烟口个数不宜超过 4 个。

4. 结论

本文利用数值计算方法,分析了热释放速率、排烟量、排烟口间距、排烟口宽长比、排烟口布局对倾斜重点排烟隧道的排烟效率的影响,研究结论如下:

(1) 隧道采用双向重点排烟时,排烟口对称布置能够很好地满足水平隧道排烟需求,水平隧道排烟口的排烟效率随热释放速率的增加先稳定后减小,排烟口的排烟效率上下游对称,距离火源越远排烟效率越低。增加排烟量、增加排烟口宽长比都可以提高水平隧道排烟效率;排烟口间距对排烟效率的影响不明显。在多因素耦合作用下,排烟量影响最显著。

(2) 排烟口对称布置的倾斜隧道,随着火源释放速率的增加,总排烟效率逐渐降低;随着隧道坡度的增加,各个热释放速率的排烟总效率呈下降趋势。

(3) 建议倾斜隧道排烟口非对称布置。排烟口布局对倾斜隧道总排烟效率影响显著。1%倾斜隧道,“2+”“1+”排烟口布置时,总排烟效率高,而 3%、5%倾斜隧道,“0+”排烟口布置时,总排烟效率高。建议坡度 <3%时,上下游分散布置排烟口,下游排烟口个数不宜超过 4 个;坡度 $\geq 3\%$ 时,排烟口布置在火源下游,排烟口个数不宜超过 4 个。

(4) 增加排烟量、增大宽长比、减小排烟口间距对 1%倾斜隧道“2+”“1+”排烟口布局以及 3%、5%倾斜隧道“0+”排烟口布局的排烟效率影响不大,对其他排烟口布局的排烟效率有增加趋势。

基金项目

山西省回国留学人员科研资助项目(2023-149、2022-159)资助。

参考文献

- [1] 侯剑锋. 长大双层隧道重点排烟系统可靠性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 180-184+122.
- [2] 郭清超, 沈奕, 闫治国. 重点排烟大断面隧道火灾烟气控制的 CFD 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S1): 1615-1620.
- [3] 李钰轩, 单春阳, 程骏柯, 等. 水下隧道火灾集中排烟及双喷式空气幕挡烟效果研究[J]. 公路, 2023, 68(10): 335-343.
- [4] 朱代强, 徐湃, 蒋树屏, 等. 考虑边界层分离的隧道侧向集中排烟有效空间及效率研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 817-828.

-
- [5] Zhou, Y.L., Bi, H.Q., Wang, H.L., *et al.* (2024) A Prediction Model for Smoke Exhaust Efficiency of Rescue Stations in Railway Tunnels with Semi-Transverse Ventilation. *Computers & Fluids*, **269**, Article 106107. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2023.106107>
- [6] Xu, Q.Q., Yi, L., Xu, Z.S., *et al.* (2013) Preliminary Study on Exhaust Efficiency of Smoke Management System in Tunnel Fires. *Procedia Engineering*, **52**, 514-519. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.177>
- [7] 付凯, 甄雅星, 谢宝超, 等. 隧道宽度对侧向排烟系统排烟效果的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(3): 731-739.
- [8] Xu, P., Zhu, D.Q., Xing, R.J., *et al.* (2022) Study on Smoke Exhaust Performance in Tunnel Fires Based on Heat and Smoke Exhaust Efficiency under the Lateral Centralized Mode. *Case Studies in Thermal Engineering*, **34**, Article 102002. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102002>
- [9] Tan, T.T., Yu, L.X., Ding, L., *et al.* (2021) Numerical Investigation on the Effect of Ambient Pressure on Mechanical Smoke Extraction Efficiency in Tunnel Fires. *Fire Safety Journal*, **120**, Article 103136. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103136>
- [10] Li, L.J., Qiu, Q.Z., Zhang, X.F., *et al.* (2021) Assessment of Different Ventilation Strategies on Ventilation Performance in Immersed Tunnels. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 31838-31849. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12818-9>
- [11] Chen, S.Y., Jiang, X.P. and Jiang, A.Z. (2025) Study on the Length of Smoke Overflow from Tunnel Fire under the Combination of Longitudinal Ventilation and Centralized Smoke Exhaust Mode. *Applied Thermal Engineering*, **261**, Article 124980. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124980>
- [12] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风设计细则[EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/glj/202006/t20200623_3312179.html, 2014-07-30
- [13] 刘英利. 集中排烟模式下公路隧道火灾烟气流动特性及高效控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [14] 郭庆华, 朱合华, 闫治国. 顶部开口自然通风隧道火灾竖井排烟效率研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 661-664.
- [15] Chen, X.F., Li, J.D., Ni, Y.L., *et al.* (2025) Study on Induced Flow Patterns and Inlet Velocity in Inclined Tunnel Fire with Natural Ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **155**, Article 106188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106188>
- [16] 申哲玮, 郭庆华, 李兴莉. 隧道火灾重点排烟系统烟气控制效果及排烟效率研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(2): 189-196.