文章编号：1671-6612（2026）05-654-08

列车阻塞作用下大坡度山岭隧道火灾临界风速研究

凌卢慰[1]　季文慧[1]　姚　庆[1]　李雯颖[1]　张发勇[1,2]

（1.西南交通大学　成都　610031；
2.中铁二院工程集团有限责任公司　成都　610031）

【摘　要】　通过缩尺实验研究了纵向通风模式下隧道不同阻塞比（0%至 50%）以及上行与下行两种通风方向时不同坡度（-25%至 25%）对临界风速的影响。结论显示临界风速与无量纲火源功率的 1/3 次方成正比，并与隧道阻塞率以及坡度均呈现线性关系。通过量纲分析与实验数据拟合提出一个同时包含阻塞率和坡度的理论模型并与前人研究结论进行了对比与分析。

【关键词】　隧道火灾；缩尺实验；阻塞比；隧道坡度；临界风速

中图分类号　U458.1　　文献标志码　A

Experimental Investigation on Critical Velocity in Large-Slope Tunnel Considering Blockage Effect

Ling Luwei[1]　Ji Wenhui[1]　Yao Qing[1]　Li Wenying[1]　Zhang Fayong[1,2]

（1.Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;
2.China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031）

【Abstract】　This study investigates the influence of different blockage ratios (0% to 50%) and slopes (-25% to 25%) on the critical velocity in a longitudinally ventilated tunnel through scale model experiments, considering both upstream and downstream ventilation directions. The results demonstrate that the critical velocity is proportional to the one-third power of the dimensionless heat release rate and exhibits a linear relationship with both the tunnel blockage ratio and the slope. A theoretical model incorporating both blockage ratio and slope is proposed based on dimensional analysis and experimental data fitting, and comparisons and analysis are made with results of previous studies.

【Keywords】　Tunnel fire; Scale experiment; Blockage ratio; Tunnel slope; Critical velocity

0　引言

大坡度山岭隧道为山区提供了高效、可靠的运输解决方案，显著改善了山区对外连通性与内部物资流动效率，为山区旅游资源的开发提供了重要载体[1]。然而，由于大坡度山岭隧道需要穿越地质条件复杂的山体，断面相对狭窄，一旦发生火灾，特殊的地形约束与复杂的工程条件将对人员安全疏散与外部救援行动构成极其严峻的挑战[2]：一方面，受限的隧道空间及可能发生的列车阻塞会严重压缩可用疏散路径，影响人员快速撤离；另一方面，显著的大坡度所引起的烟囱效应，将显著改变火灾烟气的蔓延速度与分层规律，从而极大地增加火灾扑救与人员搜救的难度。因此，研究在列车阻塞及大坡度耦合条件下的大坡度山岭隧道火灾临界风

基金项目：国家自然科学基金（52478106）；四川省自然科学基金（2025ZNSFSC1307）
作者简介：凌卢慰（1999-），男，硕士研究生在读，E-mail：1925874230@qq.com
通讯作者：季文慧（1990-），女，博士，副教授，E-mail：wenhuiji@swjtu.edu.cn
收稿日期：2026-01-16

速规律，对于隧道火灾探测、优化隧道防排烟设计、制定应急救援预案以及保障运营安全具有至关重要的参考价值与工程现实意义。

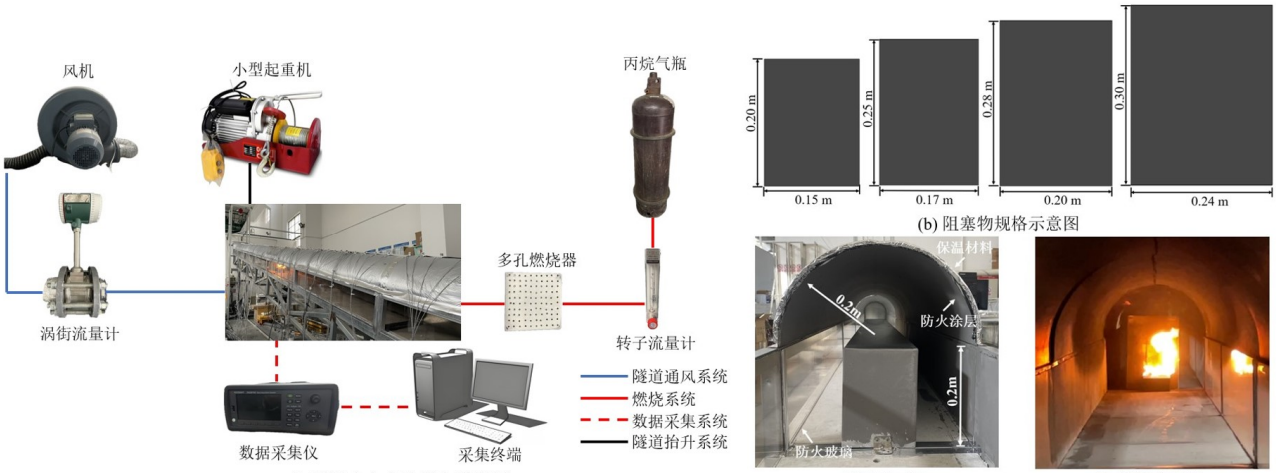
针对阻塞比对临界风速的影响，Lee 等人[3]得出公路隧道火灾场景下，车辆的阻碍作用使所需的临界风速显著减小，且风速的减小比例近似等于车辆的阻塞比。Zhang 等人[4]则同时考虑了隧道宽高比与隧道阻塞比的影响，并对现有临界风速理论模型进行了修正。Zhang 等人[5]通过引入虚拟火源来量化地铁列车阻塞的影响，并得出阻塞的存在将大幅减少烟气的热损失。

针对坡度对临界风速的影响，Chow 等人[6]研究结论显示无量纲临界风速与隧道坡度基本呈现线性关系，并将其结论与 Atkinson 等人[7]结论进行对比，指出隧道模型的高度、火源功率的设定范围、火源燃料类型的差异等关键参数的不同，均可能影响临界风速的最终实验值与理论预测结果。Su 等人[8]探究了火源位于车厢内部时，隧道坡度对临界风速的影响，并得出在考虑列车所造成热损失的前提下，临界风速与坡度之间依然保持线性正相关关系。

以往的研究通常仅考虑阻塞比或坡度并将其作为单一因素进行研究，而在大坡度山岭隧道真实运营环境中，高阻塞比与大坡度是同时存在且耦合的客观条件，故在二者同时存在时对于火灾特性与烟气控制的共同影响目前仍值得探索。因此，本实验拟开展阻塞比和坡度对大坡度山岭隧道火灾烟气临界控制风速耦合影响的研究。

1　实验设置

基于 Froude 相似性理论建立了缩尺比为 1:15 的大坡度山岭隧道火灾实验台。实验平台主要分为五个部分，分别为隧道及阻塞物模型、燃烧系统、隧道通风系统、隧道抬升系统以及数据采集系统，如图 1（a）所示。



(a) 隧道火灾实验平台系统图　(b) 阻塞物规格示意图　(c) 隧道截面图　(d) 燃烧实景图

图 1　大坡度山岭隧道火灾实验平台

Fig.1　Large slope tunnel fire experimental platform

1.1　隧道与阻塞物模型

参考相关实际隧道尺寸，建立隧道模型。模型长度为 10m，横截面分为两个部分，其中上半部为直径为 0.40m 的半圆，下半部分为宽 0.40m、高 0.20m 的矩形。隧道模型拱顶与一侧壁面由 2mm 厚的镀锌钢板制成，钢板内表面覆盖一层防火涂料防止隧道被烧穿以及受热变形。另一侧壁面采用宽 0.5cm，高 20cm 的防火耐高温玻璃，便于观察隧道内部环境与火源的燃烧情况，隧道截面如图 1(c) 所示。为保证隧道模型的密封性，隧道缝隙处均使用防火密封胶进行封堵。钢板外表面覆盖一层保温隔热材料，底面铺设 10mm 厚的硅酸盐防火板。其中隧道拱顶、防火玻璃和防火板均可拆卸，以便于对隧道内部的热电偶、阻塞物等进行安装。为模拟列车在隧道中发生火灾的情况，本文设置了阻塞比分别为 20%、30%、40%、50%的四个金属长方体，阻塞体居中放置于隧道模型底部，并紧贴燃烧器。阻塞物规格大小如图 1（b）所示。

1.2　燃烧系统

综合实验条件与前人相关研究，选取丙烷气体作为火源燃料，并制作多孔燃烧器用于缓冲软管连接液化丙烷气瓶到达燃烧器出口的丙烷气体，从而形成能够覆盖燃烧器表面的均匀火焰并使丙烷气体充分燃烧，燃烧实景图如图 1（d）所示。燃烧器的长宽高分别为 10cm，10cm，5cm，放置于隧道底部，其表面每隔 0.8cm 钻出一个小孔，一共设置 100 个小孔，燃烧表面距离隧道地面 5cm。转子流量计选择双环 LZB-6WB 型号，气体量程为 1.5L/min−15L/min，精度误差为 2.5%。

根据文献调研，各国采用的列车火灾规模在 5MW 至 31.1MW 之间[9]。根据 EURAKA 全尺寸火灾的实验结果，列车发生火灾时其最大火源功率在 13MW 与 19MW 之间[9]。在保证实验环境安全性以及实验数据有效性的基础上，本实验选择的全尺寸列车火源功率为 5MW、10MW、15MW。依据 Froude 相似性原理[10]，通过式（1）可得缩尺实验的火源功率为 5.74kW、11.48kW、17.21kW。其中 Q_m 和 l_m 表示缩尺火源功率和长度；Q_f 和 l_f 表示全尺寸火源功率和长度。同时查阅 SFPE Handbook[11] 可得丙烷的燃烧热为 46.45MJ/kg，气体密度为 1.83kg/m³，因此可以计算出气体流量为 4.05L/min、8.10L/min、12.15L/min。

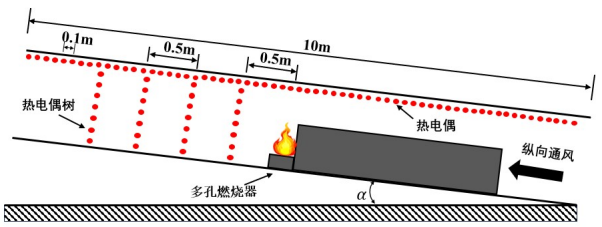
$$\frac{Q_m}{Q_f}=\left(\frac{l_m}{l_f}\right)^{\frac{5}{2}} \tag{1}$$

1.3　隧道通风系统

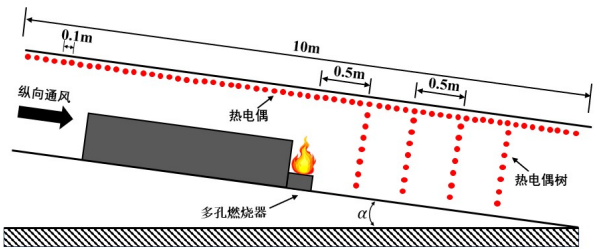
隧道中采用纵向通风模式，风机使用茗豪机电科技有限公司生产的 cx-150 风机，并通过变频器调节风速。变频器的型号为 MH-D5M-3.7T4，调节精度为 0.01Hz，并连接涡街流量计，风机通风量由涡街流量计测量，涡街流量计的量程为 0−800m³/h，精度误差为 1.5%。由于风机出风口管径较小，直径约为 10cm，无法直接与隧道模型进行连接，因此本实验在风管与隧道模型之间设置了静压箱。静压箱通过扩大流通截面积，显著降低流体动能，使动压向静压高效转化，从而形成均匀的静压分布场，用于稳定气流并均匀分配风量，从而实现隧道端入口条件的均匀化与动态稳定性。

1.4　隧道抬升系统

为探究坡度所造成的烟囱效应对隧道火灾特性及烟气控制的影响，本文设置了从-25%至 25%范围内 4 个不同大小的隧道坡度。为使隧道模型能安全有效地调节大范围的坡度，实验台一端安装了一个铁质高架，高架顶部安装一台小型卷扬机，其通过钢丝绳连接隧道的底座进而抬升整个隧道，从而实现不同的隧道坡度。为了更充分考虑火灾发生时的现实情况，实验同时设计了上行与下行两种纵向通风方向，具体示意图如图 2 所示。



（a）上行通风方向



（b）下行通风方向

图 2　上行与下行通风方向示意图

Fig.2　Schematic diagram of uphill/downhill ventilation of experimental platform

1.5　数据采集系统

本实验采用接触式测量的方法来测量隧道温度，所采用的元件为 K 型铠装热电偶。在火灾实验中，参考中科大柏跃领[12]、万华仙等[13]实验工况设置，结合热电偶量程、实验成本、使用寿命和测量误差等综合因素，选择直径为 1mm 的 K 型铠装热电偶，测温范围为 0−1100℃，测量精度为±2.5℃。热电偶与数据采集仪相连，温度数据通过 Keysight DAQ970A 型数据采集仪采集，数据采集仪通过与电脑连接，通过数据采集程序将实验过程中得到的电信号转换成温度数据，可监测并记录隧道内各个测点的温度。

2　临界风速理论分析方法

2.1　临界风速量纲分析

现有研究表明，隧道内临界风速会受到多种因素的影响，对本实验而言，影响因素包括火源功率

（Q）、隧道坡度（α）、隧道阻塞率（ϕ）、环境空气温度（T_a）、环境空气比热容（C_p）、环境空气密度（ρ_a）、重力加速度（g）以及隧道高度（H）。故临界风速可以表示为以上影响因素的函数，如式（2）所示。

$$V_c = f\left(Q,V,\alpha,\phi,\rho_a,C_p,T_a,g,H\right) \tag{2}$$

参考李颖臻[14]对临界风速的量纲分析，对式（2）进行分析，可以得到 6 个无量纲项，如式（3）所示。

$$\pi_1 = \frac{Q}{\rho_a V^3 H^2},\pi_2 = \frac{C_p T_a}{V^2},\pi_3 = \frac{gH}{V^2},$$
$$\pi_4 = \frac{L}{H},\pi_5 = \alpha,\pi_6 = \phi \tag{3}$$

对式（1）无量纲化，即可得到式（4）：

$$\frac{V_c}{\sqrt{gH}} = f\left(\frac{Q}{\rho_a V^3 H^2},\frac{C_p T_a}{V^2},\frac{gh}{V^2},\alpha,\phi\right) \tag{4}$$

定义无量纲临界风速如式（5）所示：

$$V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \tag{5}$$

同时无量纲火源功率可表示如式（6）所示：

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a T_a C_p g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}}} \tag{6}$$

则式（4）可简化如式（7）所示：

$$V_c^* = f\left(\frac{Q}{\rho_a T_a C_p g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}}},\alpha,\phi\right) = f\left(Q^*,\alpha,\phi\right) \tag{7}$$

由式（7）可见，无量纲临界风速V_c^*是无量纲火源功率Q^*、隧道坡度α以及隧道阻塞率ϕ的函数。

2.2　临界风速计算方法

对于临界风速的计算，一般有直接观测与通过回流长度-速度曲线拟合两种方式[15]。直接观测法指的是通过不断调节纵向通风速度，观察烟气的前锋位置。随着纵向通风速度的不断增大，烟气前锋逐渐向下游移动，当纵向通风速度达到一定值时，烟气前锋达到火源正上方位置，此时可认为烟气的回流长度为 0，而此时的纵向通风速度即为临界风速。而通过回流长度-速度曲线进行拟合则指的是通过测量同一火源功率下，不同纵向通风速度时的烟气回流长度，将这些数据点绘制成一条曲线，即烟气回流长度-纵向通风速度曲线，并进行拟合，通过拟合曲线延伸至回流长度值为 0 时，即可得到该火源功率下的临界风速。

本文采取通过回流长度-速度曲线拟合的方式来获得临界风速。如图 3 所示，以阻塞率ϕ=30%，坡度为α=5%时的工况为例，绘制无量纲烟气回流长度L^*与无量纲纵向通风速度V^*关系图，通过拟合当L^*=0 时即可得到无量纲临界风速V_c^*。

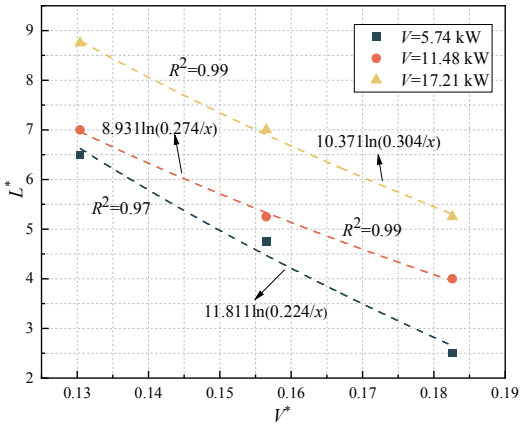


图 3　无量纲烟气回流长度与无量纲纵向通风速度关系图

Fig.3　Relationship between the dimensionless back-layering length and the dimensionless longitudinal ventilation velocity

3　阻塞对临界风速的影响

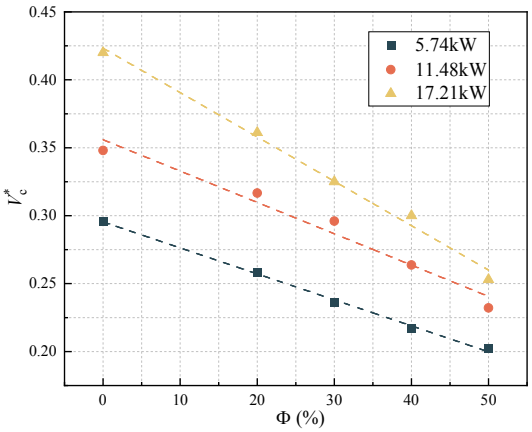


图 4　无量纲临界风速与隧道阻塞率关系图

Fig.4　Variation of the dimensionless critical velocity with blockage ratio

图 4 为隧道坡度为 0%的情况下，无量纲临界风速 V_c^* 与隧道阻塞率 ϕ 的关系图。可以观察到隧道中存在阻塞时的临界风速均小于隧道中无阻塞的情况，且随着阻塞率的增大，无量纲临界风速 V_c^* 呈现下降趋势。当气流通过阻塞物时，狭窄区域流速增大使得气体动能增加，同时使静压相应降低。这种压力差会驱动更多气流从阻塞物上游的高压区向阻塞物下游的低压区加速流动，从而增大火源附近的局部风速。同时，局部风速的增加使纵向通风抑制烟气回流长度的能力增强，因此临界风速随着阻塞率的增加而逐渐降低。此外，由图 4 也可以看出无量纲临界风速 V_c^* 随阻塞率 ϕ 的变化趋势基本呈现线性关系。

李颖臻[14]采用分段函数来描述隧道内无阻塞且坡度为 0%时无量纲临界风速 V_c^*，如式（8）所示：

$$V_c^*\begin{cases}0.81Q^{*\frac{1}{3}}, & Q^*\le 0.15\\ 0.43, & Q^*>0.15\end{cases} \tag{8}$$

对于本实验而言，所设置的无量纲火源功率均不超过 0.15（分别为 0.05、0.10、0.15），因此 V_c^* 与 Q^* 的 1/3 次方成正比。

定义阻塞修正系数量化阻塞效应对于临界风速的影响，如式（9）所示。

$$V_{c_1}^*=\varepsilon_1 V_c^* \tag{9}$$

式中：$V_{c_1}^*$ 为隧道中存在阻塞时的无量纲阻塞临界风速。

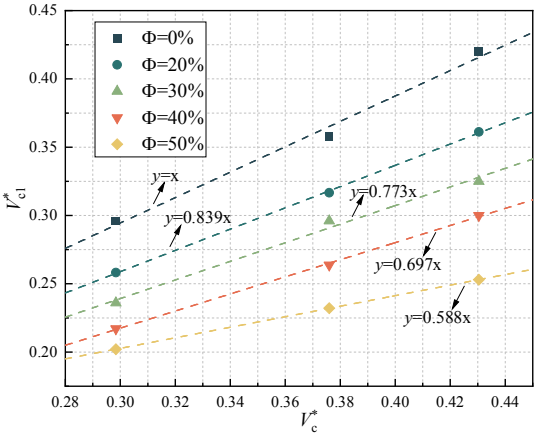


图 5　无量纲阻塞临界风速与无量纲临界风速关系图

Fig.5　Relationship between the dimensionless critical velocity under blockage conditions and the dimensionless critical velocity

绘制无量纲阻塞临界风速 $V_{c_1}^*$ 与无量纲临界风速 V_c^* 关系图，如图 5 所示。从图中可得当隧道内无阻塞时，$\varepsilon_1=1$，说明此时的无量纲临界风速符合李颖臻[14]的理论模型。而当隧道内阻塞率 ϕ 分别从 20%增加至 50%的过程中，ε_1 值分别为 0.839、0.773、0.697、0.588，明显小于隧道阻塞率为 0%时式（8）理论模型计算值。

为得到阻塞率 ϕ 对于无量纲阻塞临界风速为 $V_{c_1}^*$ 影响的理论模型，可绘制阻塞修正系数 ε_1 与阻塞率 ϕ 的关系图如图 6 所示。可以观察到（$1-\varepsilon_1$）与 ϕ 能够较好地拟合为线性关系，经拟合可得两者关系如式（10）所示。

$$1-\varepsilon_1=0.788\phi \tag{10}$$

因此，列车阻塞效应对于临界风速影响的理论模型可表示如式（11）所示。

$$V_{c_1}^*=0.81(1-0.788\phi)\,Q^{*\frac{1}{3}} \tag{11}$$

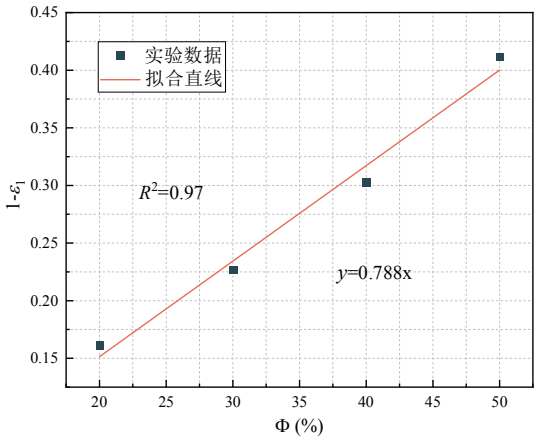


图 6　阻塞修正系数与阻塞率关系图

Fig.6　Variation of the blockage correction coefficient with blockage ratio

将拟合后的隧道临界风速随阻塞率变化理论模型与前人预测模型进行对比，绘制 V_{c1}/V_c 与 ϕ 的关系图，如图 7 所示。由图 7 中可以观察到随着隧道阻塞率的增加，V_{c1}/V_c 的值均呈现下降趋势，且呈线性关系。本文所得理论模型位于 Li 等人[16]与 Jiang 等人[17]理论模型之间。由于不同学者进行实验的条件与工况设置的不同，所得到的理论模型也存在差异。Li 等人[16]所进行的实验为模拟公路隧道中车辆着火的场景。在此场景中，车辆应处于排队状态或是车辆由于道路堵塞必须停在发生火

灾车辆后方，因此其火源与阻塞物距离设置为0.5m，而本文实验场景为铁路隧道火灾，火源设置于紧靠阻塞物一侧，用于模拟列车头部/尾部发生火灾的场景。此外，Li 等人[16]在实验过程中通过不同数量的长方体互相叠加，从而实现 10%−40%的阻塞率，因此阻塞物附近的气流组织形态也与本文有所差异。Jiang 等人[17]以地铁隧道火灾作为实验背景，其火源与阻塞物相对位置与本文类似，但是其使用的燃料为甲醇，且仅设置了 2.80kW、5.88kW 两种火源功率，相比于 Li 等人[16]理论模型差异更大。

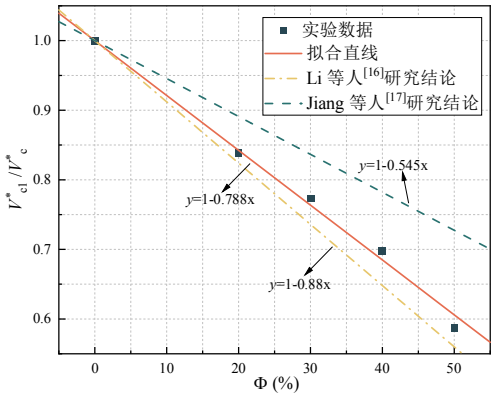
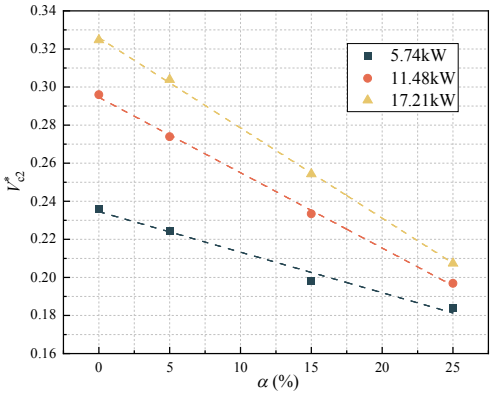


图 7　阻塞临界风速理论模型与前人研究结论对比图

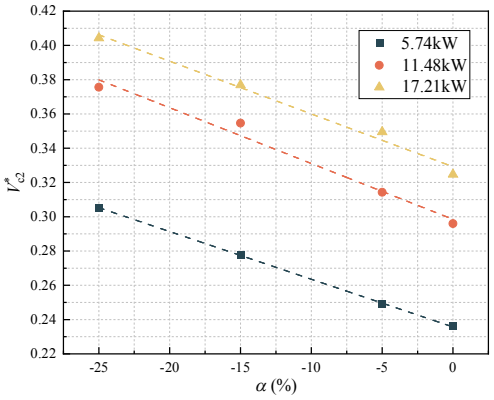
Fig.7　Comparison of the proposed theoretical model for blockage-critical velocity with previous research results

4　坡度对临界风速的影响

以阻塞率ϕ=30%工况条件为例，分别绘制不同隧道阻塞率ϕ时，上行与下行通风方向时隧道坡度影响的无量纲临界风速$V_{c_2}^*$与隧道坡度α的关系图，如图 8 所示。由图 8 可见，在上行通风方向时，随着坡度的增大，无量纲阻塞临界风速逐渐减小；而下行通风方向时，趋势则相反，无量纲临界风速随着坡度的变大而逐渐变大。产生这一现象的原因为：在上行通风时，由隧道坡度导致的烟囱效应使烟气更易于向着上游高海拔端移动，而此时的纵向通风速度方向也是从低海拔端向着高海拔端，与烟囱效应产生的浮升力方向相同，此时烟气更易于排出隧道外，因此坡度的增加能够使无量纲临界风速减小。而下行通风时，纵向通风方向为从隧道高海拔端向低海拔端，而烟囱效应仍使隧道内烟气向着上游高海拔端运动，二者方向相反，从而使隧道内烟气更难以排出隧道。因此无量纲临界风速随坡度的增加而增大。同时，无量纲临界风速随坡度变化基本呈现线性关系。



（a）0%<α≤25%，ϕ=30%



（b）-25%<α≤0%，ϕ=30%

图 8　无量纲坡度临界风速与隧道坡度关系图

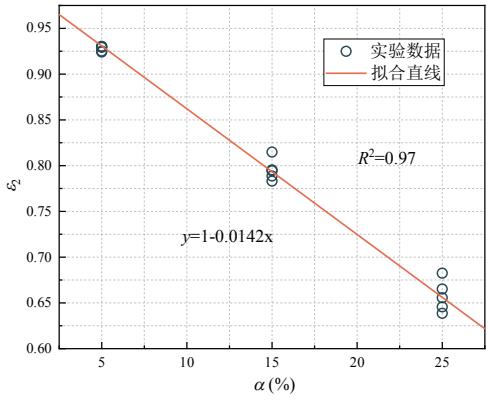
Fig.8　Variation of the dimensionless slope-critical velocity with tunnel slope

定义坡度修正系数ε_2进一步量化隧道坡度对于临界风速的影响，可得无量纲临界风速$V_{c_2}^*$如式（12）所示。

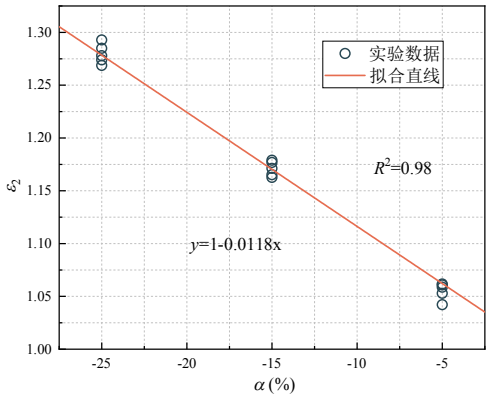
$$V_{c_2}^* = \varepsilon_2 V_{c_1}^* = \varepsilon_2 0.81(1-0.788\phi)Q^{*\frac{1}{3}} \quad (12)$$

分别绘制上行与下行通风方向坡度修正系数ε_2与隧道坡度α的关系图，如图 9 所示，可得上行通风方向时$\varepsilon_2 = 1-0.0142\alpha$，而下行通风方向时$\varepsilon_2 = 1-0.0118\alpha$。上行通风方向$\varepsilon_2$与$\alpha$函数的斜率大于下行方向，可认为上行通风方向时坡度对临界风速的影响大于下行通风方向。最终可得列车阻塞效应作用下大坡度山岭隧道临界风速修正公式如式（13）所示：

$$V_{c_2}^* = \begin{cases} 0.81(1-0.0142\alpha)(1-0.788\phi)Q^{*\frac{1}{3}}, 0\% < \alpha \le 25\% \\ 0.81(1-0.0118\alpha)(1-0.788\phi)Q^{*\frac{1}{3}}, -25\% < \alpha \le 0\% \end{cases} \quad (13)$$



（a）0%<α≤25%

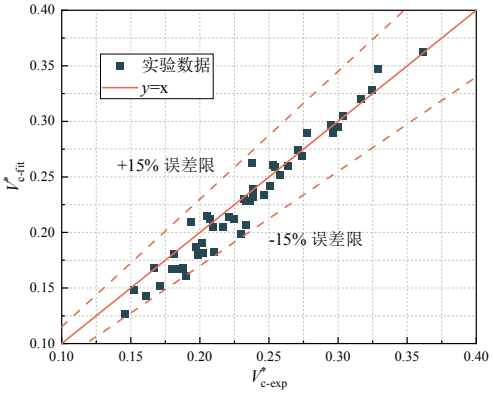


（b）-25%<α≤0%

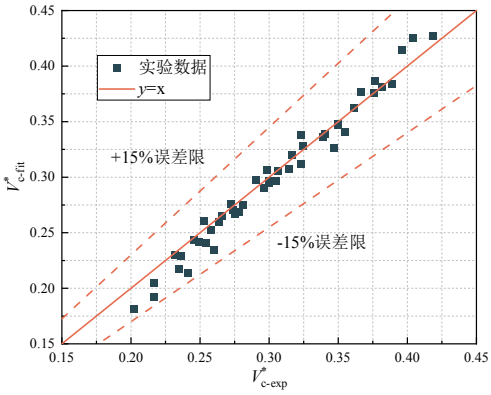
图 9　上行与下行通风方向坡度修正系数与隧道坡度的关系图

Fig.9　Relationship between the slope correction coefficient for uphill and downhill ventilation directions and the tunnel slope

将式（13）的计算值与所有的实验实测值进行比较，并绘制误差对比图（见图 10），可以观察到绝大多数实验数据落在 15%误差限之内，可见该理论模型能够较好地预测大坡度山岭隧道上行与下行两种通风方向的临界风速。



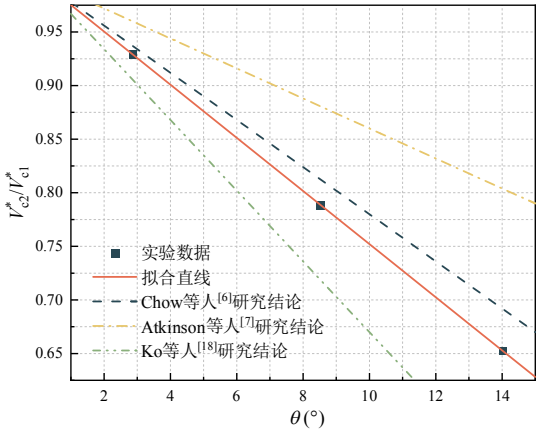
（a）0%<α≤25%



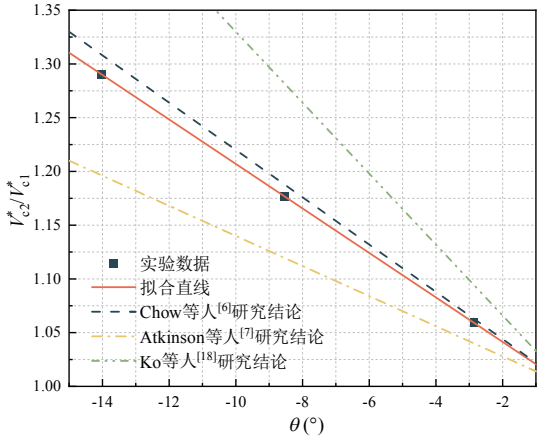
（b）-25%<α≤0%

图 10　上行与下行通风方向临界风速实验值与拟合值对比图

Fig.10　Comparison of experimental data and fitted values for critical velocity under uphill and downhill ventilation directions



（a）0%<α≤25%



（b）-25%<α≤0%

图 11　隧道坡度对临界风速影响理论模型与前人模型对比图

Fig.11　Comparison of the proposed theoretical model for slope influence on critical velocity with previous results

将不同学者建立的隧道坡度对临界风速影响的理论模型（即$V_{c_2}^*/V_{c_1}^*$）与本文所提出的理论模型进行对比，如图 11 所示。由图 11 可得，本文理论模型介于 Chow 等人[6]、Atkinson 等人[7]与 Ko 等人[18]研究结论之间。这一差异主要源于不同学者在研究中所采用的隧道横截面形状、所设置的坡度范围等因素的不同。且对于油池火而言，不同的隧道高度会导致火源功率的改变，进而影响临界风速数值。因此，各研究得出的坡度对临界风速影响规律存在一定差异。

5　结论

本文通过缩尺实验，探究了隧道阻塞率和坡度对大坡度山岭隧道火灾临界风速的影响，并提出了包含阻塞率和坡度耦合作用下的修正公式，主要结论如下：

（1）由临界风速量纲分析可得，无量纲临界风速V_c^*是无量纲火源功率Q^*、隧道坡度α以及隧道阻塞率ϕ的函数。在实际工程中，设计纵向通风速度应考虑坡度与阻塞率的耦合影响。

（2）列车阻塞效应导致临界风速相对于无阻塞情况减小，并随隧道阻塞率呈现线性变化。

（3）上行通风方向时，临界风速随着坡度的增大逐渐减小；而下行通风方向时，趋势则相反。临界风速随坡度的变化呈现线性关系。在工程应用中，可根据隧道坡度方向分别制定通风控制策略。

参考文献：

[1] 沈健.山地齿轨旅游交通系统技术及应用研究[J].机械工程与自动化,2020,(4):222-224.

[2] 袁中原,雷波,袁艳平,等.隧道火灾自然排烟理论基础及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.

[3] Lee Y, Tsai K. Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2012,53:35-42.

[4] Zhang X, Zhang Z, Tao H. A numerical study on critical velocity and back-layering length with trains' blockage in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,116:104093.

[5] Zhang S, Cheng X, Yao Y, et al. An experimental investigation on blockage effect of metro train on the smoke back-layering in subway tunnel fires[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,99:214-223.

[6] Chow W K, Gao Y, Zhao J H, et al. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2015,75:14-22.

[7] Atkinson G T, Wu Y. Smoke control in sloping tunnels[J]. Fire Safety Journal, 1996,27(4):335-341.

[8] Su Z, Li Y, Zhong H, et al. Evaluating the impact of tunnel slope on critical velocity and confinement velocity in metro tunnel carriage fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024,154:106141.

[9] 倪天晓.高速铁路隧道列车火灾烟气蔓延规律及控制特性研究[D].长沙:中南大学,2013.

[10] Quintiere J G. Scaling applications in fire research[J]. Fire Safety Journal, 1989,15(1):3-29.

[11] Hurley M J, Gottuk D, Hall J R, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. New York, NY: Springer New York, 2016.

[12] 柏跃领.外立面作用下的水平湍流浮力射流火焰特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.

[13] 万华仙.不同受限条件下双方形对称火源相互作用燃烧行为研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.

[14] 李颖臻.含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D].成都:西南交通大学,2010.

[15] 佘朝文.山地齿轨大坡度隧道火灾烟气蔓延特征及临界风速研究[D].成都:西南交通大学,2023.

[16] Li Y Z, Ingason H. Influence of upstream blockage on smoke control in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2024,147:104197.

[17] Jiang X, Zhang H, Jing A. Effect of blockage ratio on critical velocity in tunnel model fire tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,82:584-591.

[18] Ko G H, Kim S R, Ryou H S. An Experimental Study on the Effect of Slope on the Critical Velocity in Tunnel Fires[J]. Journal of Fire Sciences, 2009,28(1):27-47.