

火灾工况带平导单洞特长隧道通风方案研究

张雨帆 郑晓卿 田 伟

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘 要] 钢筋格栅钢架和工字形型钢架是隧道初期支护常用的两种钢架类型。为了系统分析两类钢架的力学性能,针对三肢格栅钢架、四肢格栅钢架和工字型钢架开展了室内加载试验研究,并引入了钢材利用系数比较不同类型钢架力学性能。研究表明:三肢格栅在选取较优的主筋腹筋直径组合下,所能达到的钢筋利用系数最优,其综合承载性能最优,且随着腹筋直径的提升,三肢格栅的钢筋利用系数提升明显。研究结果有望为隧道工程初期支护钢架选型、设计与施工提供参考。

[关键词] 加载试验;格栅钢架;力学性能;受力分析

0 引言

近年来,我国公路交通发展迅速,公路隧道作为其重要的组成部分,发展亦是突飞猛进。随之而来的是与日俱增的隧道火灾事故。隧道是长条形且相对封闭的构造物,洞内一旦发生火灾,人员逃生和救援均比较困难,后果极为严重。尤其是单洞双向的公路隧道,其内一旦有火灾,因为双向行车的原因,会使得火灾的上、下游都有被困人员和车辆^[1]。如果不能及时控制烟气,就会造成较大的经济损失和人员伤亡。

目前国内已有部分学者针对单洞双向行车隧道火灾通风展开了系统性研究。王飞^[2]基于Fluent对一条3km长的单洞双向行车隧道进行了火灾工况模拟,分析了隧道三处不同位置火灾在不同风速条件下烟气蔓延变化规律及导致的火灾临界危险时间变化;陈汉波^[3]以设平行导洞的巴朗山公路隧道为工程依托,利用CFD软件建立了适用于高海拔低压、低氧条件下的

火灾模型,对火灾的热释放率、烟气浓度、扩散速度及流动形态等特性进行了研究;高原^[4]采用通风网络理论,对某单洞双向公路隧道通风系统进行了研究,提出火灾工况下隧道合理的通风、人员疏散及灭火方案。

在现有研究的基础上,本文以黄泥岗头隧道为工程依托,考虑平行导洞的增压送风,研究主隧道内3种通风方案对隧道火灾烟气在不同时间段蔓延的影响。

1 工程概况

1.1 依托工程

根据《公路隧道设计规范》(JTG3370.1-2018)规定:“单洞双向行车的特长隧道需考虑驾乘人员紧急情况下的临时避难设施,宜设置平行通道,并与主洞通过横通道相连”。在公路隧道的实际应用中,平导的设置多结合隧道长度和通风规模,以隧道长度3000m为界进行考虑^[5]。国内外单洞双向行车特长公路隧道通风及辅助通道设置统计如表1:

表1 国内外单洞双向行车特长公路隧道通风系统及辅助通道统计表

序号	隧道	长度 (m)	通风方式	辅助通道设置
1	挪威莱尔多隧道	24500	全横向通风	避险洞, 间距 500m
2	奥地利阿尔贝格隧道	13972	全横向通风	避难室, 间距 500m

收稿日期: 2022-07-25

作者简介: 张雨帆 (1992-), 男, 助理工程师, 主要从事建筑与土木工程工作。

序号	隧道	长度 (m)	通风方式	辅助通道设置
3	日本惠娜山 1 号隧道	8489	全横向通风	避难室, 间距 500m
4	四川紫荆隧道	6200	横洞压入式纵向通风	设置 6 处横洞
5	广东彩虹岭隧道	5068	全射流纵向通风	贯通车行平行导洞
6	重庆通渝隧道	4279	全射流纵向通风	贯通人行平行导洞
7	浙江王木坑隧道	3785	全射流纵向通风	贯通人行平行导洞
8	济岭隧道	3585	全射流纵向通风	部分人行平行导洞

黄泥岗头隧道为本文依托工程,主隧道全长 3920m,采用二级路 60km/h 的标准。考虑到隧道通风防灾需求,在主隧道一侧建设一条平行导洞,导洞建筑限界净宽 4.5m,净高 3.5m。主隧道与导洞之间用横向人行通道连接,间距 250m。

1.2 通风系统

黄泥岗头隧道主洞通风采用全射流纵向通风,洞顶共设置 17 组 $\Phi 900\text{mm}$ 的射流风机(每组二台)。

平行导洞的通风形式主要有平导送风型和平导排风型^[6],本工程平行导洞作为主隧道发生火灾时的主要逃生通道,采用平导送风型的通风方式:进出口各设置一台轴流风机,于主洞火灾时启用,以保持导洞正压;导洞洞身段设置 16 台风机,平时用于维持导洞内空气质量,火灾时辅助轴流风机加压送风。主洞与导洞通风形式如图 1 所示:

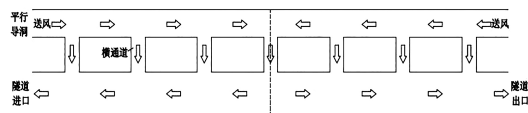


图 1 平行导洞加压送风示意图

2 理论计算

2.1 临界风速计算

隧道发生火灾后,由于火灾产生的浮力效应,会在隧道顶棚形成一层向上下游蔓延的烟气。此时隧道内如果提供充足的通风风量,则所有烟气会向下风口流动,若通风风量不足,则部分烟气会沿着相反与通风风量的方向蔓延,即出现“逆流现象”。为避免隧道火灾情况下产生“逆流现象”,隧道内通风系统所需提供的最小排烟风速即“临界风速”。

影响临界风速的因素很多,包括火灾规模、纵坡坡度、隧道断面形状、火源位置等方面^[7],本文采用 Kennedyetal 临界风速理论计算公式^[8]对黄泥岗头隧道主洞火灾工况下的临界风速进行计算,该公式已在各国铁路、公路、地铁隧道等防灾设计中得到了广泛应用:

$$u_c = K_g k \left(\frac{g Q_c H}{\rho_a c_p T S} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$T = \frac{Q_c}{\rho_a c_p S u_c} + T_a$$

式中: u_c —临界风速 (m/s);

g —重力加速度 (m/s^2);

H —隧道高度 (m);

Q_c —火灾时热释放速率 (W);

ρ_a —空气密度 (kg/m^3);

S —隧道净横断面面积 (m^2);

C_p —空气定压比热 ($\text{J/Kg} \cdot \text{K}$);

T —热空气温度 (K);

T_a —环境空气温度 (K);

k —无量纲常数, $k = 0.61$;

K_g —坡度修正系数, $K_g = 1 + 0.037\alpha^{0.8}$, α 为隧道纵向坡度。

通过上述公式求得火源功率为 20MW 的条件下,黄泥岗头隧道的临界风速约 2.23m/s,与《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014)中 20MW 条件下采用纵向排烟的公路隧道火灾临界风速 (2.0~3.0m/s) 相吻合。

2.2 平行导洞加压送风量计算

为防止隧道主洞发生火灾时烟气侵入平行导洞,本项目通过在平行导洞两端洞口设置轴流风机加压送风以保证导洞内呈正压状态进行防烟,提高人员疏散时的安全性。

目前国内学者对隧道加压送风的研究多集

中在加压需风量、隧道内余压、通风方式和风机布置等。李伟平^[9]等以钱江盾构隧道为依托,建议隧道火灾时,疏散通道内的余压应控制在30~50Pa;刘琪^[10]等在确定隧道集中排烟量和排烟口面积的基础上,用FDS软件对不同排烟口间距下的隧道火灾烟气流动特性进行数值模拟,得出了隧道排烟口的最佳设置间距。由于目前尚没有针对公路隧道纵向疏散通道加压送风量计算的技术标准和规范,本文借鉴《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017)中一般建筑加压送风量的确定办法,对黄泥岗头隧道平行导洞火灾工况下的需风量进行了计算,加压需风量主要分为以下两部分:

(1) 疏散口关闭时,保持疏散通道一定的正压所需的加压送风量:

$$Q_1 = 0.827 A_1 \times 1.25 \Delta p^{1/n} N_1$$

式中: A_1 —每个疏散门的有效漏风面积 (m^2),
疏散门的门缝宽度取 0.002m ~ 0.004m;

Δp —计算漏风量的平均压力差 (Pa);

n —指数 (一般取 2);

N_1 —漏风疏散门的数量。

(2) 疏散口开启时,保持疏散口处风速所需的加压送风量:

$$Q_2 = A_2 v N_2$$

式中: A_2 —每个开启的疏散门面积 (m^2);

v —人行横通道的断面风速 (m/s),通常取 0.7~1.2m/s;

N_2 —开启的疏散门数量。

假定每次火灾时,开启火源前后合计 5 处人通防火门。通过上述公式求得,加压需风量 $Q_1 = 1.72 m^3/s$, $Q_2 = 39.42 m^3/s$,逃生通道的合计加压需风量为 $41.14 m^3/s$ 。从计算结果可以看出,开启的疏散口所需送风量 Q_2 远大于闭合的疏散口所需送风量 Q_1 ,而在人行横通道结构断面不变、横通道内风速变化不大的情况下,开启的人行横通道数量是决定逃生通道加压需风量的主要控制因素。

3 隧道火灾模拟分析及结果

3.1 模型构建

本文以黄泥岗头隧道及其平行导洞为研究对象(隧道主洞与导洞中线间距 26m),研究主隧道内不同风速环境对隧道火灾烟气蔓延的影响。本文选取 1250m 长的隧道进行 FDS 数值模拟,模型主要由主隧道、平行导洞及横通道三部分组成。隧道横断面尺寸及横通道布置位置如图 2、图 3 所示:

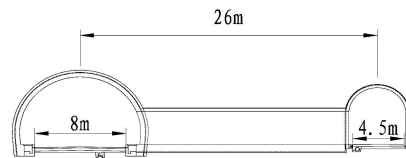


图 2 隧道横断面图

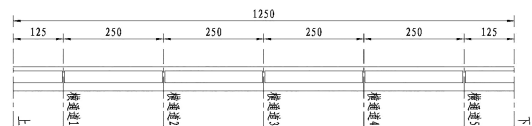


图 3 隧道平面布置图

隧道在 FDS 中的几何模型如图 4、图 5 所示,火源位置按最不利考虑,设置于主隧道中间,如图 6。



图 4 隧道三维几何模型

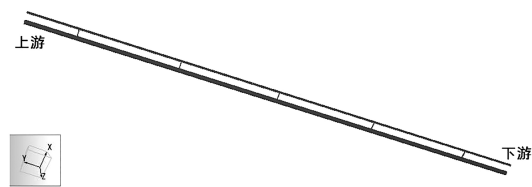


图 5 整体分析模型

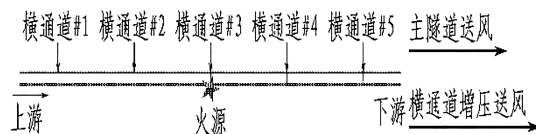


图 6 火源位置示意图

3.2 工况设定

考虑隧道工程位置区域、交通量及组成等

因素，将火源功率设定为 20MW，位置设置于主隧道中间。当火灾发生时，主隧道初始风速为 1.5m/s，方向从上游吹向下游。根据不同时间段，隧道主洞风速、导洞增压送风风速的变化，共设定以下三种工况（表 2）：

表 2 工况设置表

工况	不同时间段主隧道与导洞增压送风风速
工况一	0-360s：主隧道风速从 1.5m/s 增加到 3m/s，方向不变。 60s-360s：平行导洞开始增压送风，横通道 1/2/4/5 内风速从 0 增加到 1.5m/s，方向从导洞吹向主隧道； 360s-660s：横通道均关闭，主隧道内风速保持 3m/s 不变。
工况二	0-60s：主隧道内风速从 1.5m/s 降低到 0m/s； 60s-360s：平行导洞开始增压送风，横通道 1/2/4/5 内风速从 0 增加到 1.5m/s，方向从导洞吹向主隧道； 360s 后，横通道均关闭； 360s-660s，主隧道内风速从 0m/s 开始增加到 3.0m/s，方向从上游吹向下游。
工况三	0-60s：主隧道内风速从 1.5m/s 降低到 0m/s； 60s-360s：平行导洞开始增压送风，横通道 1/2/4/5 内风速从 0 增加到 1.5m/s，方向从导洞吹向主隧道； 360s 后：横通道均关闭； 360s-660s：主隧道内风速从 0m/s 开始增加到 3.0m/s，方向从下游吹向上游。

3.3 结果分析

本文通过对火灾发生后隧道内烟气蔓延情形及横通道内温度的分析，来对比三种工况对隧道内烟气蔓延、温度变化的控制能力。

(1) 主隧道烟气蔓延及逆流情况

工况一：从隧道纵剖面烟气场中可以看出，隧道内烟气仅在火灾早期发生过轻微逆流，逆流距离不足 30m，后续基本不存在逆流现象。这是由于工况一主隧道内初始风速为 1.5m/s，略小于临界风速，因此在火灾早期出现轻微逆流；之后由于风速逐渐提高至 3m/s，满足临界风速要求，因此隧道内烟气不发生逆流。

工况二：由于 0-60s，隧道内风速从 1.5 m/s

降低到 0m/s，小于临界风速，隧道内烟气逆流现象严重；360s 时，烟气向上游蔓延距离达 180m；360s-660s，主隧道内风机重新启动，由于刚启动时风速较小，不满足临界风速要求，烟气继续向上游蔓延，420s 时最大蔓延距离大约 225m，之后风机风速满足临界风速要求，烟气向下游蔓延。

工况三：该工况烟气蔓延情形和工况二类似，但方向相反。360s 烟气向下游蔓延距离约 190m；风机重新启动后，初期阶段烟气继续向下游蔓延，420s 时蔓延距离约 210m；当后续风机风速满足临界风速后，烟气基本向上游蔓延，不存在逆流现象。

表 3 各工况主隧道纵剖面烟气场随时间变化对比

工况	时间	烟气场
工况一	60s	
	180s	
	360s	
	420s	
	540s	
	660s	

工况	时间	烟气场
工况二	60s	
	180s	
	360s	
	420s	
	540s	
	660s	
工况三	60s	
	180s	
	360s	
	420s	
	540s	
	660s	

(2) 隧道内横通道温度变化对比

表 4 各工况 1#横通道处温度等色图对比表

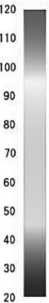
时间	工况一	工况二	工况三	temp (C)
120s				
480s				
555.6s				
660s				

表 5 各工况 2#横通道处温度等色图对比表

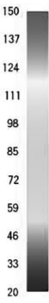
时间	工况一	工况二	工况三	temp (C)
120s				
360s				
409s				
660s				

表6 各工况4#横通道处温度等色图对比表

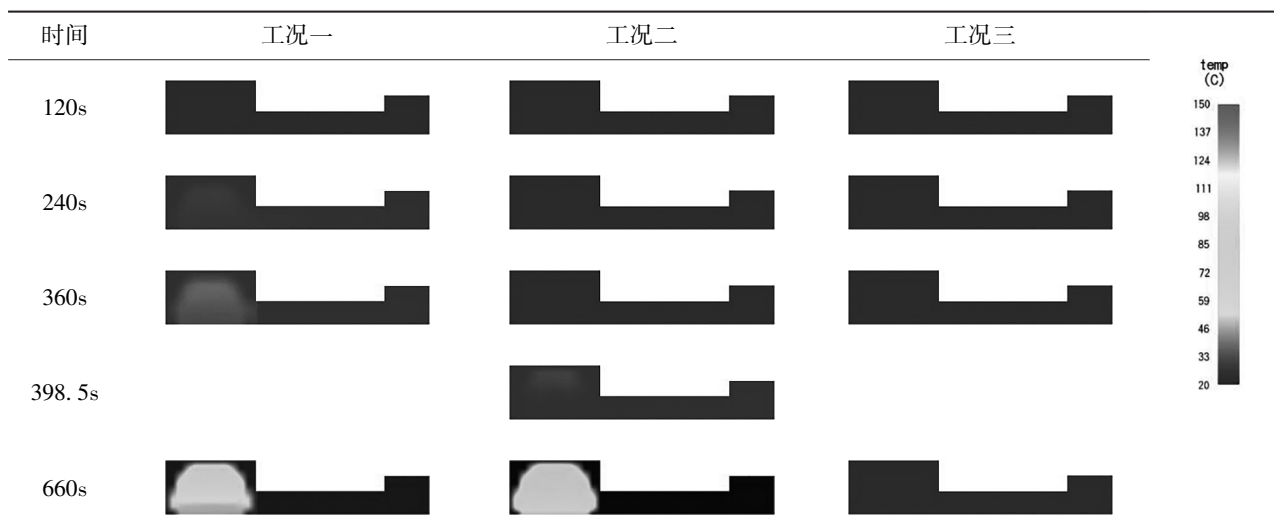
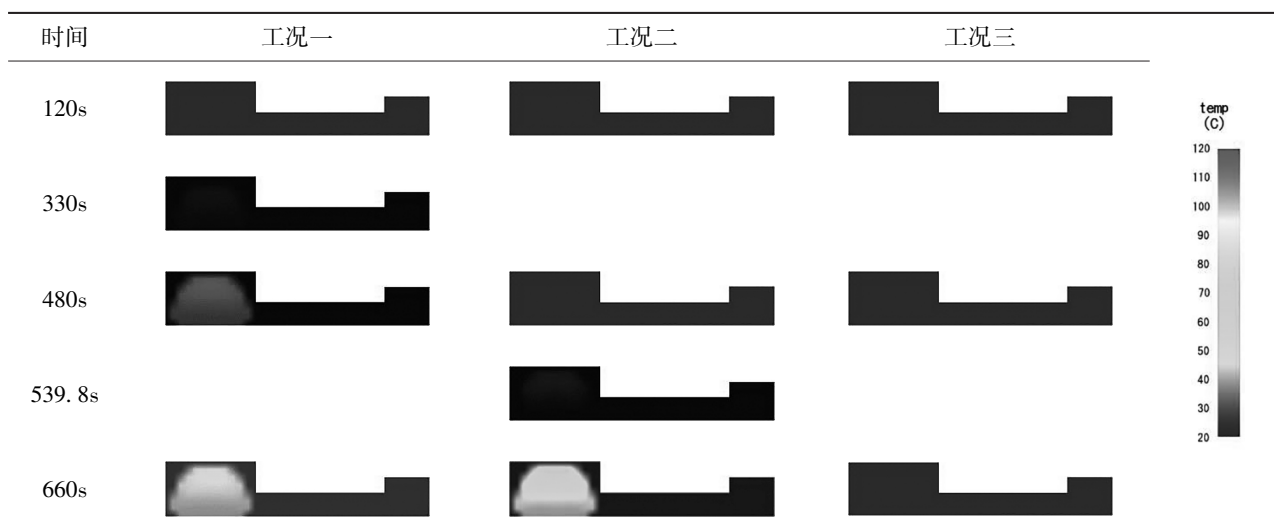


表7 各工况5#横通道处温度等色图对比表



工况一：从表3和表4可以看出，火灾发生后660s内基本没有烟气蔓延至1#和2#横通道处；从表5和表6可以看出，烟气在240s时，已蔓延至4#横通道，此时主隧道4#横通道处温度约70℃；烟气大约在330s时蔓延至5#横通道，此时主隧道5#横通道处平均温度约45℃。该结果说明随着烟气和烟气的蔓延距离越长，烟气温度逐渐降低，同时由于横向通道大量地补充新风进入主隧道，亦对烟气场起到降温作用。

工况二：从表3和表4可以看出，与工况一相同，火灾发生后660s内基本没有烟气蔓延至1#和2#横通道处；表5和表6的结果显示，烟

气大约在398.5s时蔓延至4#横通道，此时主隧道4#横通道处温度约90℃；烟气蔓延至5#横通道的时间大约在539.8s，此时主隧道5#横通道处温度约50℃。从结果来看，工况二由于60s~360s期间关闭了射流风机，因此在烟气蔓延速度上小于工况一。工况二在上游烟气蔓延距离总体可控的前提下，延长了下游烟气蔓延至横通道的时间，为人员逃生提供了更充足的时间。

工况三：从表5和表6可以看出，该工况下火灾发生后660s内基本没有烟气蔓延至4#和5#横通道处；而烟气蔓延至2#横通道和1#横通道的时间分别为409s和555.6s，这两个时刻主隧道在2#和1#横通道处的温度分别为95℃和

70℃。从结果来看,工况三烟气蔓延至横通道的时间要晚于工况二和工况一,但横通道内温度亦大于前两个工况。

(3) 小结

综合对比,可以看出隧道内纵向风速是否达到临界风速是控制烟气逆流的决定性因素,纵向风速大于临界风速时,隧道内基本不存在逆流现象。

各工况下所有时间段横通道内温度基本没有变化,这主要是因为:

(1) 主隧道拱顶的储烟仓空间足够;

(2) 横通道的高度较小,且存在正压送风,烟气主要聚集在拱顶,少量烟气沉降也受正压影响难以进入横通道;

(3) 横通道距离火源位置较远,且横通道在 360s 已经关闭。

从人员疏散安全的角度来看,工况一基本能保证上游人员的安全疏散,但由于烟气向下游蔓延较快,下游人员安全疏散时间较短;工况二和工况三类似,烟气在初始阶段向上下游均有蔓延,不利于人员逃生,但整体蔓延速度和距离基本可控,工况三的安全疏散时间略长于工况二。理论上工况一最有利于人员安全疏散,工况三其次,工况二最差,但考虑到实际运营过程中,隧道发生火灾后难以判断火灾上下游被困人员具体位置,若下游被困人员较多,工况一的通风排烟方案则存在较大风险。因此实际运营中应根据隧道内被困人员位置及数量再确定最优的通风排烟方案。

4 结论

本文以黄泥岗头隧道为工程依托,平行导洞加压送风+主洞纵向通风为主要通风形式,通过理论计算和数值模拟的方式,明确了平行导洞加压送风需风量,并对多种火灾工况下的通风排烟方案进行对比,得到以下结论:

1) 采用 Kennedyetal 临界风速理论计算公式求得了主隧道内纵向通风的临界风速,计算结果与规范规定范围和数值模拟基本吻合。

2) 根据《建筑防烟排烟系统技术标准》,计算求得平行导洞加压需风量为 $41.14 \text{ m}^3/\text{s}$,

该需风量主要由火灾时开启的人行横通道数量决定。因此,隧道的防灾救援方案设计对平行导洞的需风量有着决定性影响,进而影响导洞通风系统的设计。

3) 通过数值模拟可知,三种工况各时间段横通道和平行导洞内温度没有明显变化,说明平行导洞加压送风可有效抑制烟气进入横通道和平行导洞。因此,建议二级公路特长隧道发生火灾时,应及时对平行导洞进行加压送风,为逃生人员预留出一条安全通道。

4) 隧道发生火灾后,从人员安全疏散角度来看,工况一在逃生时间较为充足的情况下,有效控制了烟气蔓延方向,通常情况下是最为合理的通风排烟方案。但考虑到单洞双向行车隧道发生火灾时,上下游均有被困人员和车辆,实际运营时应根据火源上下游人员疏密程度进行更为针对性的通风排烟方案选择。

参考文献

- [1] 蒋琪. 单洞双向公路隧道火灾通风排烟控制研究 [D]. 西南交通大学, 2017.
- [2] 王飞, 蒋琪, 杨小伟. 单洞双向公路隧道火灾通风排烟控制研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13 (07): 250-251.
- [3] 陈汉波. 巴朗山高海拔单洞对向交通公路隧道火灾疏散救援研究 [D]. 西南交通大学, 2014.
- [4] 高原, 王子云, 王松, 潘洁. 某单洞双向公路隧道火灾通风方案研究 [J]. 制冷与空调 (四川), 2016, 30 (03): 325-330.
- [5] 焦卫宁, 王雪霁, 杨帅, 杨瑞鹏. 设疏散平行导洞时超高海拔隧道的临界长度 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36 (11): 31-35.
- [6] 张祉道, 韩斌. 低等级公路特长隧道半横向通风应用与探讨——九寨仙境隧道通风设计 [J]. 现代隧道技术, 2008 (05): 4-11+17.
- [7] 崔喆. 特长公路隧道火灾风险评价及烟雾控制研究 [D]. 长安大学, 2018.
- [8] KENNEDY W D, PARSONS B. Critical Velocity: Past, Present and Future [M] //LOWNDES J F L. Smoke and Critical Velocity in Tunnels: One Day Seminar. London: Independent Technical Conferences Ltd. 1996: 57-68.
- [9] 李伟平, 焦齐柱. 钱江盾构隧道的火灾安全与逃生救援设计 [J]. 公路, 2011 (08): 265-270.
- [10] 刘琪, 姜学鹏, 蔡崇庆. 隧道集中排烟口间距的多目标决策分析 [J]. 安全与环境学报, 2013, 13 (02): 214-218.