文章编号:2096-5052(2026)03-0149-08　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.14

侧部重点排烟隧道耐火极限范围及防火保护研究

朱航凯[1,2]

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘要:为确定双层侧部重点排烟盾构隧道的结构防火保护范围,基于德国道路隧道升温曲线(richtlinien für die ausstattung und den betrieb von straßentunneln, RABT)反演确定上层 35 MW、下层 30 MW 的火灾热释放速率,并采用火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator, FDS)建立隧道数值模型,设置 15 MW 常规火灾与标准火灾、排烟有效与失效等多工况,开展火灾温度场与耐火极限区域模拟。结果显示,上层隧道拱顶耐火极限最大面积为 512 m^2,需对拱顶横向 10 m、竖向自顶部向下 2 m范围实施防火保护,侧墙无超温区域;下层隧道顶板最大面积为 498 m^2,侧墙在最不利工况下超温范围自顶板向下延伸 2.5 m,需对顶板横向 10 m 及侧墙竖向 2.5 m 范围实施防火保护。上述结论可为同类双层盾构隧道侧部重点排烟模式下的结构抗火设计提供量化依据。

关键词:双层隧道;侧部重点排烟;耐火极限区域;RABT 升温曲线;防火保护范围
中图分类号:U25;TU457　　**文献标志码**:A

引用格式:朱航凯. 侧部重点排烟隧道耐火极限范围及防火保护研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):149-156. Zhu Hangkai. Study on fire resistance range and fire protection of tunnels with side concentrated smoke exhaust [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):149-156.

Study on fire resistance range and fire protection of tunnels with side concentrated smoke exhaust

Zhu Hangkai[1,2]

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd.,Wuhan 430063, Hubei, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnel Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: The structural fire protection scope for a double-deck shield tunnel with side-focused smoke exhaust was determined.The fire heat release rates corresponding to the temperature-time curve specified in the German Guidelines for the Equipment and Operation of Road Tunnels (richtlinien für die ausstattung und den betrieb von straßentunneln, RABT) were inversely determined as 35 MW for the upper tunnel and 30 MW for the lower tunnel. A numerical tunnel model was established using fire dynamics simulation software (fire dynamics simulator, FDS), and multiple scenarios were simulated, including a 15 MW conventional fire, standard fires, and effective and failed smoke exhaust conditions. The fire-induced temperature fields and zones reaching the fire-resistance limit were investigated.The results showed that the maximum area of the fire-resistance-limit zone at the vault of the upper tunnel was 512 m^2. Fire protection was therefore required over a transverse width of 10 m and a vertical extent of 2 m downward from the vault, whereas no overtemperature zone was observed on the sidewalls. For the lower tunnel, the maximum area of the fire-resistance-limit zone on the roof slab was 498 m^2. Under the most unfavorable condition, the overtemperature zone on the sidewalls extended 2.5 m downward from the roof slab. Accordingly, fire protection was required over a transverse width of 10 m on the roof slab and a vertical extent of 2.5 m on the sidewalls. These findings provided a quantitative basis for the fire-resistant design of similar double-deck shield tunnels employing a side-focused smoke exhaust mode.

Keywords: double layer tunnel; lateral targeted smoke extraction; fire resistance limit range zone; RABT heating

收稿日期:2026-04-13;**修回日期**:2026-07-06;**接受日期**:2026-08-04;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52376130,52476127);中国铁建股份有限公司重点专项资助项目(2023-A03)
作者简介:朱航凯(1996—),男,河南郑州人,工程师,硕士,主要研究方向为地下工程、盾构隧道。E-mail:1805286009@qq.com

curve; fire protection scope
Received: 2026-04-13; **Revised**: 2026-07-06; **Accepted**: 2026-08-04; **Published**: 2026-09-20

0 引言

隧道火灾高温会导致混凝土材料表面爆裂剥落,显著加速结构损伤进程[1]。双层盾构隧道空间结构复杂,火灾风险更高,因此对结构整体耐火性能提出更严苛的要求[2]。

相关学者对此开展研究,资谊等[3]通过数值模拟方法提出盾构隧道结构的防火保护策略,明确防火保护的关键参数。孙浩等[4]提出一种结构隧道耐火试验方案,揭示该类隧道结构在碳氢火灾升温曲线(hydrocarbon, HC)和德国道路隧道升温曲线(richtlinien für die ausstattung und den betrieb von straßentunneln, RABT)作用下的内部热量传递规律。朱合华等[5]系统综述火灾高温下盾构衬砌结构的试验与力学模型,为结构抗火研究提供了理论支撑。郭信君[6]通过试验与数值模拟相结合的方法,对盾构隧道混凝土管片构件在荷载和温度耦合作用下的抗火性能进行试验研究,研究高温下构件的力学行为,获得内部温度场分布情况。肖明清等[7]利用数值模拟分析了 RABT 升温曲线作用下隧道衬砌的劣化演化规律,确定受火 120 min 时混凝土衬砌的最大劣化深度。王恩师等[8]通过数值模拟研究双层隧道顶部单侧与双侧机械排烟效果,明确侧部排烟对烟气蔓延距离的控制作用。王湛等[9]针对双层隧道单侧重点排烟模式,分析火灾烟气的蔓延规律与分布特征,但二者均未将烟气运动与结构耐火极限关联分析。王泽军等[10]针对双层盾构隧道上层排烟场景开展研究,初步明确局部防火保护范围,但未针对侧部重点排烟这一特定场景进行分析。上述研究侧重单一结构抗火性能,或聚焦烟气运动,尚未明确不同火灾规模、排烟工况对耐火极限范围的影响机制,针对双层侧部重点排烟隧道的耐火极限区域及防火保护范围研究仍存在空白。且文献[11]仅规定了 RABT 升温曲线,但未明确其对应的火灾规模参数,导致在开展耐火极限的数值模拟时,需首先根据该升温曲线反推对应的火灾热释放速率。

本研究拟基于 RABT 标准升温曲线,通过反演方法确定其对应的火灾热释放速率,并采用火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator, FDS)建立黄鹤楼隧道双层结构数值模型,研究侧部重点排烟条件下常规火灾与 RABT 标准对应火灾不同强度火灾场景中隧道结构耐火极限区域的演化规律及纵、横、竖向上范围,进而确定隧道结构防火保护范围,以期为黄鹤楼隧道及同类双层隧道的防火设计与消防安全保障提供理论依据。

1 模拟 RABT 升温曲线的火灾热释放速率确定

1.1 隧道模型概述

以黄鹤楼双层盾构隧道为研究对象,采用 FDS 软件建立长 800 m、壁厚 0.25 m 的数值模型。定义 x 轴为隧道纵向(车辆通行方向),y 轴为横断面横向(左右水平方向),z 轴为竖向(上下垂直方向),以下层路面为 $z=0$ 基准。下层隧道 z 坐标范围为 0~5.0 m,顶板底表面位于 $z=5.0$ m(净高 5.0 m);上层隧道 z 坐标范围为 5.25~11.20 m,拱顶底表面位于 $z=11.2$ m(净高 5.95 m)。隧道内部净宽12.0 m。横断面为 y-z 平面。隧道断面示意图见图 1。

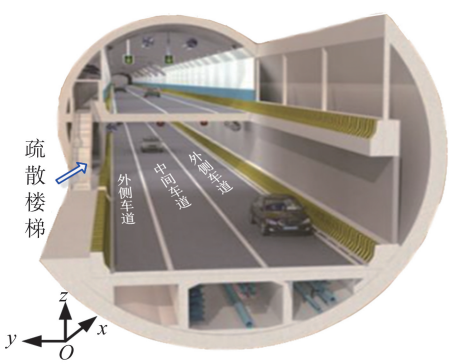


图 1 双层盾构隧道断面示意图
Fig.1 Schematic diagram of the cross-section of a double-deck shield tunnel

1.2 RABT 升温曲线火灾热释放速率确定

本研究依据文献[11],采用适用于全封闭隧道的 RABT 升温曲线,并明确规定受火后混凝土表面温度超 380℃即达耐火极限。其对应的高温区域为耐火极限区域。

确定模拟 RABT 升温曲线所对应火灾热释放速率的方法如下:根据隧道通行车辆类型设定不同火灾热释放速率,模拟其从 0 min 到 5 min 快速由 0 ℃升温至 1 200 ℃并持续。RABT 标准升温曲线在 5 min 时首次达到 1 200 ℃峰值,该时点的时间-温度对应关系由标准唯一确定,适合作数值反演的匹配基准。因此,本研究以“火灾发生 5min 时隧道

拱顶底表面的最高温度达到 1 200 ℃”作为判定标准。获取火灾发生 5 min 时拱顶底表面的最高温度[12]。若某一热释放速率对应的拱顶最高温度与标准 RABT 升温曲线在 5 min 时的温度值(1 200 ℃)吻合,则将该热释放速率认定为模拟所需的火灾规模参数。

不同火灾热释放速率下,火灾发生 5 min 时火源正上方拱顶底表面的最高温度如图 2 所示。通过比较各工况下的温度值与 RABT 标准峰值 1 200 ℃的接近程度,可确定最匹配的热释放速率。模拟升温曲线与标准 RABT 曲线对比如图 3 所示,验证匹配效果。

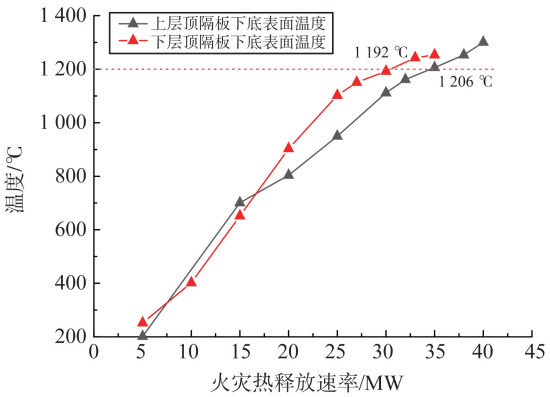


图 2　不同火灾热释放率时顶隔板下底表面最高温度

Fig.2　Maximum temperature on the bottom surface of the top slab under different fire heat release rates

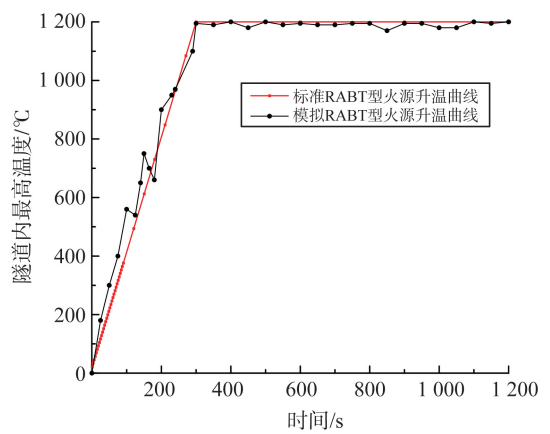


图 3　模拟与标准 RABT 升温曲线对比

Fig.3　Comparison between the simulated and standard RABT temperature-time curves

为确定与 RABT 标准升温曲线相匹配的火灾热释放速率,需进行试算。试算值即为预先设定的一组候选火源功率,通过模拟各候选值下的拱顶温度并与标准峰值 1 200℃比对,取最接近者作为设计火灾规模。因上层净高较大(5.95 m),需较高功率方可令拱顶温度达标,故参考典型隧道重型车火灾规模(30~40 MW),选取 32、35、38 MW 作为试算值;下层净高较小(5.0 m),相同功率下烟气更易积聚、温升更快,所需功率相应偏低,故选取 27、30、33 MW作为试算值。通过比较各工况下 5 min 时拱顶最高温度与 1 200 ℃的接近程度,确定最匹配的热释放速率。

对不同火灾热释放速率下双层隧道在 5 分钟时的纵向温度分布如图 4、5 所示。由图 4、5 分析可知:上层 32、35 及 38 MW 对应的拱顶最高温度分别为 1 160、1 206 和 1 250 ℃,三者与 RABT 标准温度(1 200 ℃)的偏差均在 100 ℃以内,35 MW 工况下的温度值 1 206 ℃最为接近标准,因此最终将上层隧道的设计火灾规模确定为 35 MW;下层 27、30 和 33 MW 热释放速率对应的拱顶底表面最高温度分别为 1 150、1 192 和 1 240 ℃,与 RABT 标准值的偏差同样小于 100 ℃,满足误差要求;通过对比,30 MW对应的 1 192 ℃与目标值偏离最小,因此下层隧道的设计火灾规模最终确定为 30 MW。

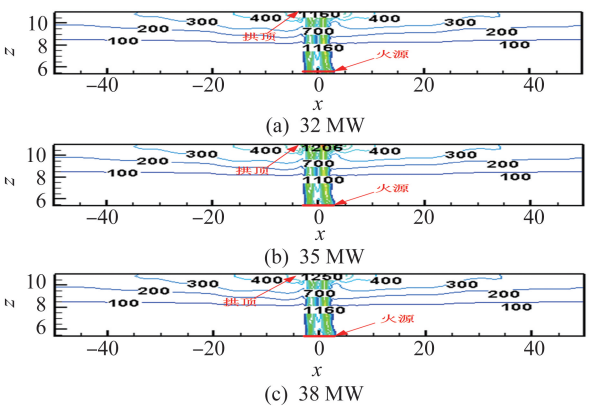


图 4　不同火源功率上层隧道纵向中央纵断面温度云图

Fig.4　Temperature contours of the longitudinal central cross-section of the upper tunnel under different fire source powers

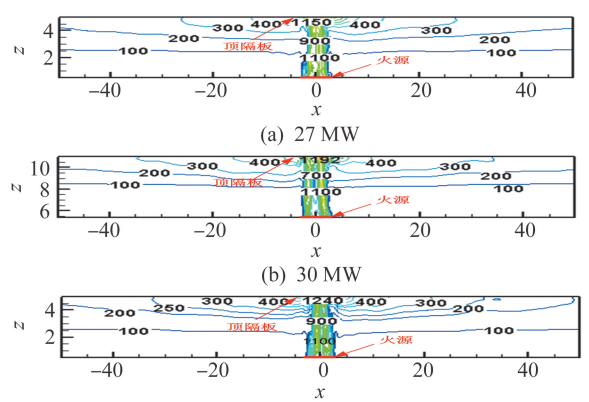


图 5　不同火源功率下层隧道纵向中央纵断面温度云图

Fig.5　Temperature contours of the longitudinal central cross-section of the lower tunnel under different fire source powers

模拟计算过程中对应的火灾热释放速率曲线如图 6 所示。经反演确定的上层隧道火灾热释放速率为 35 MW、下层隧道为 30 MW,该结果用于后续工况的数值模拟。

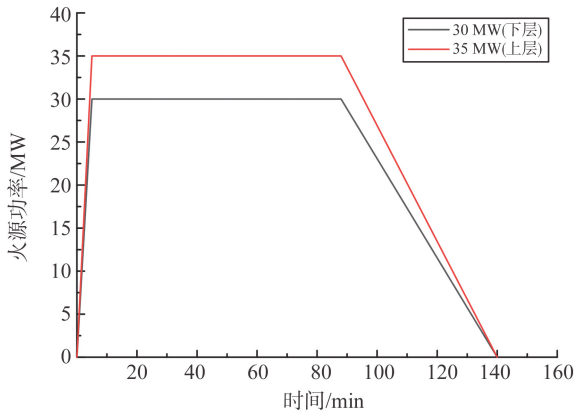


图 6 双层火灾热释放速率曲线

Fig.6 Heat release rate curves for the double-layer fire

2 数值模拟参数设定

2.1 隧道参数

隧道几何参数及坐标系见 1.1 节,设置双向均衡排烟模式,开启 6 个间距 60 m 的排烟口,总排烟量为 100 m^3/s。黄鹤楼双层盾构隧道断面示意图如图 7 所示。

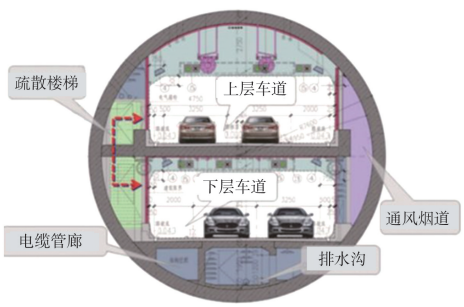


图 7 双层盾构隧道断面示意图

Fig.7 Schematic diagram of the cross-section of a double-deck shield tunnel

上层隧道火源功率设置为 15 MW(常规火灾)及 35 MW(RABT 标准对应火灾),火源位于中间车道(z=5.4m),对应排烟口尺寸为 4.0 m×0.8 m;下层隧道火源功率设置为 15 MW(常规火灾)及 30 MW(RABT 标准对应火灾),火源位于中间车道(z=0.5 m),对应排烟口尺寸为 3.0 m×1.0 m。火源尺寸均设定为 5.5 m×2.0 m,该尺寸对应于隧道内典型重型货车或大型客车的水平投影轮廓,能够准确模拟车辆在燃烧时形成的火灾场景特征。火灾发生具有随机性,火源可能发生在排烟口之间和排烟口下方,隧道上、下层开启 6 个排烟口时,排烟口开启区段长 300 m,上、下层隧道 6 个排烟口的最大尺寸分别为 24、18 m,分别占隧道开启区段长度的 8.0%、6.0%,故上、下层隧道火灾恰好发生在排烟口正下方的概率分别为隧道开启区段的 8.0%、6.0%,位于两排烟口之间的概率占 92.0%、94.0%,而火源在中间车道时烟气对称扩散、拱顶温度最高、结构受热最严重,故本研究主要针对火源位于中间车道并同时位于排烟口中间的最不利工况开展重点排烟关键性参数研究。双层隧道侧部重点排烟模式如图 8 所示。

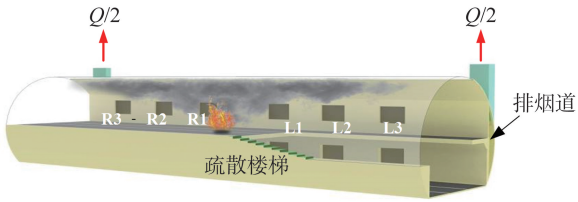


图 8 双层隧道侧部重点排烟模式示意图

Fig.8 Schematic diagram of the lateral key smoke extraction mode in a double-deck tunnel

2.2 网格尺寸

在火灾数值模拟中,网格尺寸的合理性对计算结果精度具有重要影响。根据已有研究成果,当网格尺寸 d 取 $1/16D^*\sim1/4D^*$ 时模拟结果与试验结果非常吻合[13]。D^* 为火灾特征直径,通常表示为

$$D^*=\left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}}, \tag{1}$$

式中:Q 为火灾热释放速率,kW;ρ_0 为环境空气密度,kg/m^3;c_p 为环境空气定压比热容,kJ/(kg·K);T_0 为环境空气温度,K;g 为重力加速度,m/s^2。

本研究涵盖多种火灾工况,包括上层隧道 15 MW 与 35 MW,以及下层隧道 15 MW 与 30 MW,通过对各火灾规模对应的特征直径 D^* 进行计算得出:15 MW 火灾对应的 D^* 约为 1.86 m,推荐网格尺寸范围为 0.116~0.465 m;30 MW 火灾对应的 D^* 约为 2.45 m,推荐网格尺寸范围为 0.153~0.613 m;35 MW 火灾对应的 D^* 约为 2.61 m,推荐网格尺寸范围为 0.163~0.651 m;不同网格大小温度对比图如图 9 所示,网格的大小在 0.3、0.4、0.5、0.6 m变化时,隧道横向上的温度分布基本一致,当网格大小变化至 0.5 m 时,升温曲线更为平滑,仅有少部分曲线出现波动,当网格大小继续缩小时,温度显示更为精确,但与 0.5 m 网格差距不大,且小于 0.3 m的网格尺寸计算模型过大,而 0.6 m 网格已不符合 15 MW 对应 D^* 推荐的网格尺寸范围,因此考虑计算时间与精度等因素选取网格大小为 0.5 m。为兼顾计算效率与精度,本模型采用不规则网格系统,整体网格尺寸设置为 0.5 m(纵向 x 轴)×0.5 m(横向 y 轴)×0.25 m(竖向 z 轴),该尺寸处于各工况推荐网格尺寸的公共区间内,可保证所有模拟结果的准确性与可靠性。

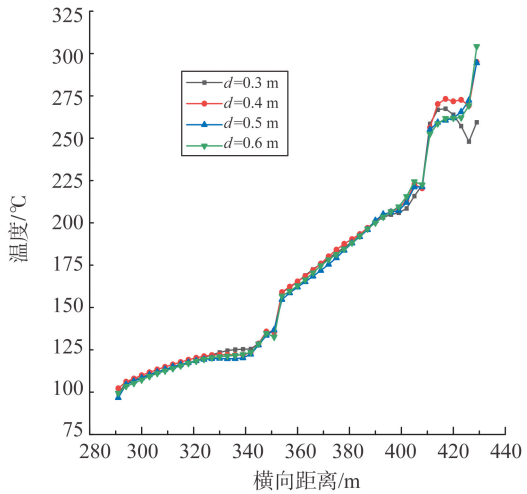


图 9　不同网格大小温度对比图

Fig.9　Comparison of temperatures under different grid sizes

2.3　测点布置

针对火灾热释放率为 15 MW 与 35MW(上层)以及 15 MW 与 30 MW(下层)的火灾场景,沿隧道内侧布置了拱顶下方及侧壁温度测点。测点均距离隧道顶部与侧壁表面 0.2 m,并在−100~100 m 范围内按横向间隔 0.5 m 布置。上层隧道测点沿竖向垂直间隔 1 m 布置,共 19 个测点;下层隧道测点在侧壁按垂直间隔 1 m、顶板下方按水平间隔 1 m 布置,共 13 个测点。双层隧道测点布置如图 10。

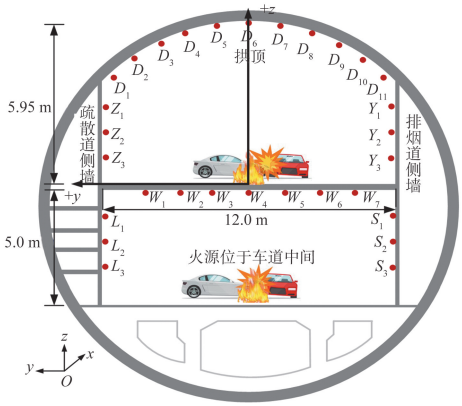


图 10　双层隧道测点布置图

Fig.10　Layout of measuring points in the double-deck tunnel

2.4　工况设置

针对上层隧道 15 MW 和 RABT 标准火灾规模 35 MW,以及下层隧道 15 MW 和 RABT 标准火灾规模 30 MW,分别设置排烟有效与失效两类工况进行研究。双层隧道工况设置如表 1 所示。

表 1　双层隧道工况设置表

Table 1　Case settings for the double-deck tunnel

编号	火灾热释放速率/MW	火源位置	火源尺寸/(长×宽)/(m×m)	排烟状态
A01	15	上层中间车道(z=5.4 m)	5.5×2	(6 个排烟口开启)、排烟道双向均衡排烟模式
A02	15	上层中间车道(z=5.4 m)	5.5×2	(6 个排烟口关闭)排烟失效
B01	35	上层中间车道(z=5.4 m)	5.5×2	(6 个排烟口开启)、排烟道双向均衡排烟模式
B02	35	上层中间车道(z=5.4 m)	5.5×2	(6 个排烟口关闭)排烟失效
C01	15	下层中间车道(z=0.5 m)	5.5×2	(6 个排烟口开启)、排烟道双向均衡排烟模式
C02	15	下层中间车道(z=0.5 m)	5.5×2	(6 个排烟口关闭)排烟失效
D01	30	下层中间车道(z=0.5 m)	5.5×2	(6 个排烟口开启)、排烟道双向均衡排烟模式
D02	30	下层中间车道(z=0.5 m)	5.5×2	(6 个排烟口关闭)排烟失效

3　模拟结果与分析

本章基于数值模拟,重点研究黄鹤楼双层隧道在侧部重点排烟条件下,其上层隧道管片、侧墙、下层隧道顶板及侧墙在常规火灾规模(15 MW)与 RABT 标准火灾规模下的耐火极限区域变化规律及纵、横、竖向上范围,以确定黄鹤楼双层隧道横断面上需进行防火保护的范围。

3.1　上层隧道结构防火保护范围

基于拱顶底表面测点数据,上层隧道管片的温度分布云图与耐火极限区域如图 11、12 所示。

由图 12 可知:上层隧道在 15 MW 常规火灾中,排烟有效时耐火极限区域仅 8.5 m^2,失效时增至15 m^2,整体影响较小;而在 35 MW 标准火灾下,耐火区域显著扩张,排烟有效与失效工况分别达 449 m^2与 512 m^2,火灾规模是控制超温范围的主导因素[14]。排烟有效时,侧部重点排烟可抑制烟气纵向蔓延,但为防止吸穿,排烟速率受限,火源上方仍残留高温烟气层;排烟失效后,烟气无组织扩散、烟气层增厚,热辐射持续增强,使超温范围进一步扩大。综合最不利工况,上层隧道拱顶应在横断面横向 10 m、竖向自顶部向下 2 m 范围内实施防火保护。此外,在各设定火灾工况下,上层隧道侧墙表面的最高温度均未超过 380 ℃的耐火极限。侧部排烟的抽吸作用与烟气的自然浮力效应共同确保了高温烟气集中于拱顶,从而显著降低了侧墙的热辐射[9]。因此,在本研究设定的火灾场景下,上层隧道侧墙无需施加额外的防火保护。

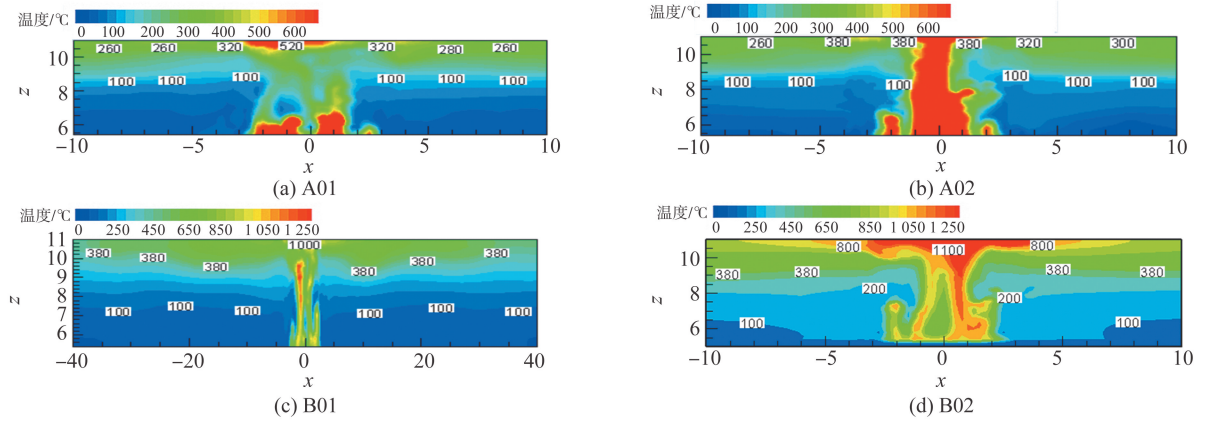


图 11 上层隧道管片表面温度分布云图

Fig.11 Temperature distribution contours on the segment surface of the upper tunnel

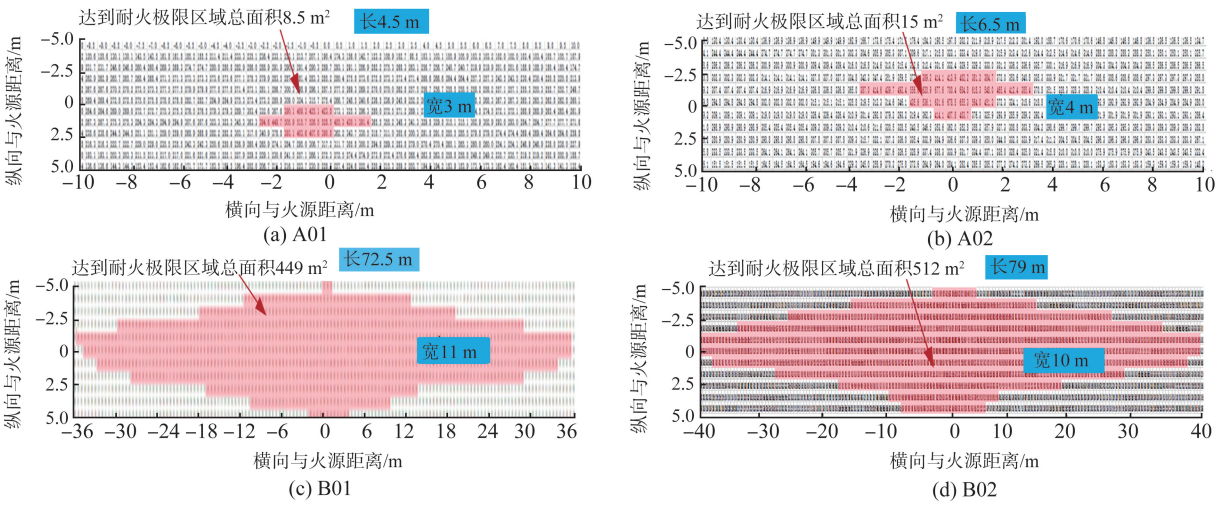


图 12 耐火极限区域面积示意图

Fig.12 Schematic diagram of the fire resistance limit area

3.2 下层隧道顶板防火保护范围

基于顶板底表面测点数据,下层隧道顶板的温度分布云图与耐火极限区域见图 13、14 所示。由图 14 可知:下层隧道在 15 MW 常规火灾中,排烟有效时耐火极限区域为 35 m^2,失效时增至 80.5 m^2;在 30 MW 标准火灾下,耐火区域大幅扩展,排烟有效与失效工况分别达 365 m^2 与 498 m^2,火灾规模对顶板超温范围影响显著[15]。下层为矩形断面,空间约束更强,排烟有效时虽能局部控烟,但烟气层较厚,热冲击依然较强;排烟失效后烟气全域扩散、上下游叠加并全覆盖顶板,热传导与热辐射双重强化,致使受热范围急剧扩大。综合最不利工况,下层隧道顶板需在横断面横向 10 m 范围内进行防火保护。

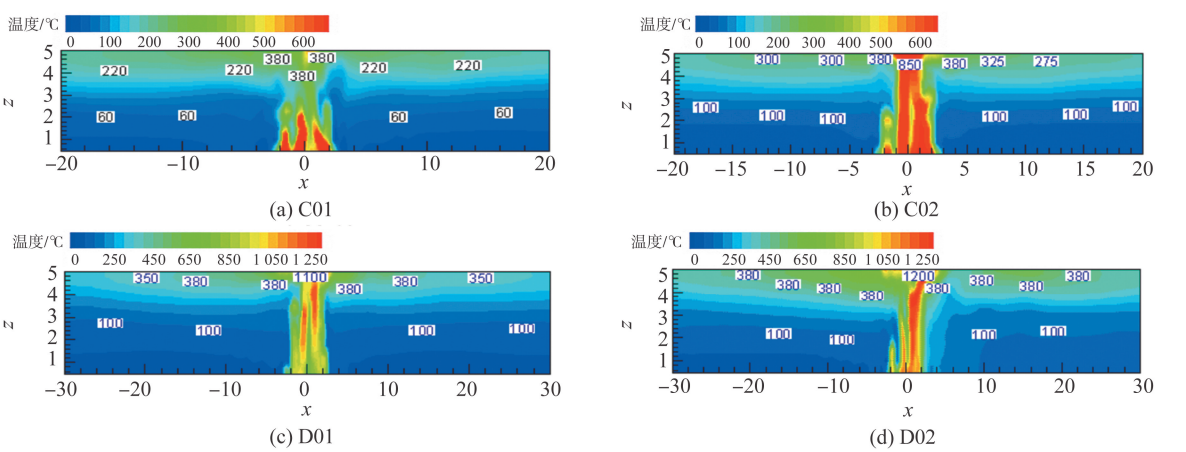


图 13 下层隧道顶板表面温度分布云图

Fig.13 Temperature distribution contours on the roof surface of the lower tunnel

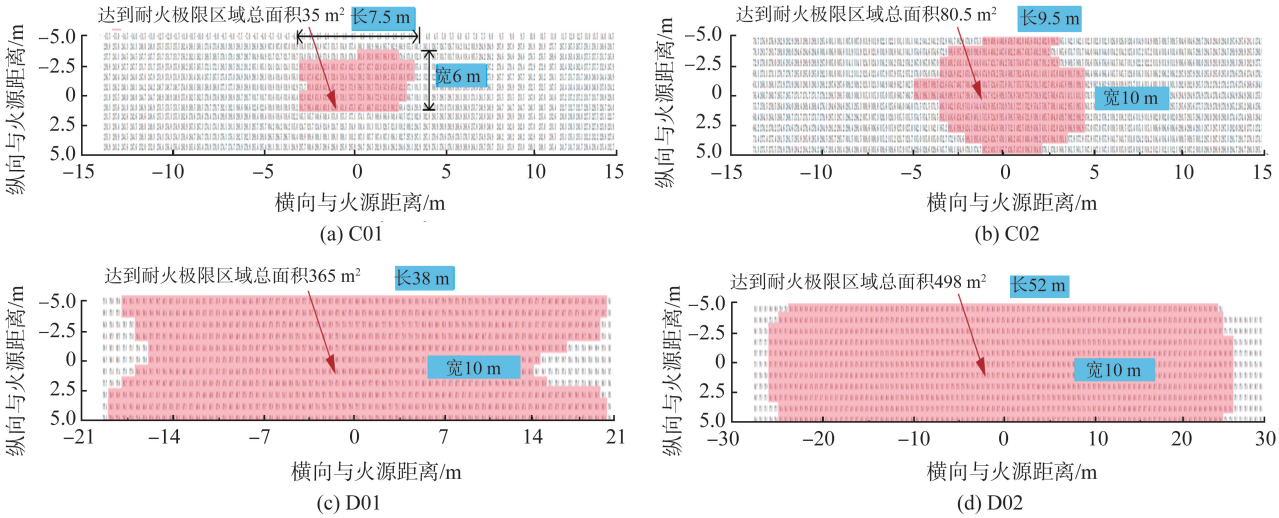


图 14　下耐火极限区域面积示意图

Fig.14　Schematic diagram of the fire resistance limit area

3.3　下层隧道侧墙防火保护范围

基于侧墙表面测点数据，下层隧道侧墙的温度分布云图与耐火极限区域见图 15。

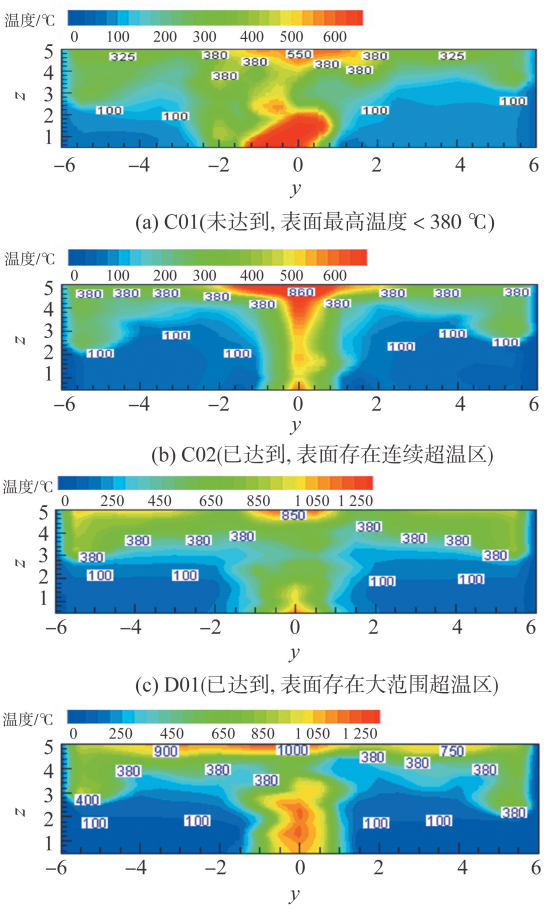


图 15　下层隧道侧墙表面温度分布云图及耐火极限竖向范围

Fig.15　Temperature distribution contours on the side wall surface of the lower tunnel and the vertical range of the fire resistance limit

由图 15 可知：下层隧道侧墙在 15 MW 常规火灾中仅排烟失效时出现局部超温，而在 30 MW 标准火灾下形成明显耐火极限区域，火灾规模与排烟状态共同控制侧墙超温范围[16]。下层隧道净高低，高温烟气层直接接触侧墙上部；排烟有效时侧墙超温范围为顶板向下 5.0～3.0 m，排烟失效后烟气无序扩散、烟气层持续增厚下移，超温范围进一步扩大至 5.0～2.5 m。为覆盖最不利工况，下层隧道侧墙需在顶板向下竖向 2.5 m 范围内实施防火保护。

4　结论

针对双层侧部重点排烟隧道在常规火灾与 RABT 标准火灾规模下的耐火极限区域变化规律及防火保护范围开展研究。明确了双层侧部重点排烟隧道 RABT 升温曲线对应的上下层差异化火灾热释放速率参数。提出的分区域精准防火保护范围，为黄鹤楼及同类双层侧部重点排烟隧道结构防火保护提供了量化依据。

(1) 上层、下层标准 RABT 对应火灾热释放速率分别为 35、30 MW，对比常规火灾 15 MW 的火灾规模，耐火极限区域显著扩大。

(2) 上层隧道在 35 MW 火灾规模且排烟失效情况(B02 工况)下，此时为最危险情况。拱顶管片耐火极限区域面积最大达 512 m²，需对上层隧道拱顶横断面内横向 10 m(y 轴方向)、竖向从顶部往下 2 m(z 轴方向)范围内的管片实施防火保护。侧墙在各工况下温度均未超过 380 ℃，无需设置额外防火保护。

(3) 下层隧道在 30 MW 火灾规模且排烟失效情况(D02 工况)下，此时为最危险情况。顶板耐火极限范围面积最大达 498 m²。侧墙在排烟失效的

最不利情况下,耐火极限竖向范围自顶板向下延伸至 2.5 m。需对下层隧道横断面内横向 10 m(y 轴方向)的顶板、竖向从顶部往下 2.5 m(z 轴方向)范围内的侧墙实施防火保护。

参考文献:

[1] 朱平华, 于树奇, 刘文影, 等. 高性能混凝土抗隧道火灾爆裂剥落研究现状综述[J]. 混凝土, 2018(7): 24-29.
Zhu Pinghua, Yu Shuqi, Liu Wenying, et al. Review of the research status of high performance concrete anti-tunnel fire spalling[J]. Concrete, 2018(7): 24-29.

[2] Li Y Z, Ingason H. Overview of research on fire safety in underground road and railway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 568-589.

[3] 资谊, 鲁志鹏, 薛光桥, 等. 顶部集中排烟盾构隧道结构防火保护及关键参数研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 813-817.
Zi Yi, Lu Zhipeng, Xue Guangqiao, et al. Study on fire protection and key parameters of top centralized smoke exhaust shield tunnel structure[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6): 813-817.

[4] 孙浩, 唐勇, 冯军, 等. 钢壳混凝土结构隧道耐火试验方案研究[J]. 工程与试验, 2025, 65(3): 62-66.
Sun Hao, Tang Yong, Feng Jun, et al. Study on fire resistance test scheme for steel-shell concrete tunnels[J]. Engineering & Test, 2025, 65(3): 62-66.

[5] 朱合华, 周龙, 沈奕, 等. 火灾高温下盾构衬砌结构试验与力学模型综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 15-23.
Zhu Hehua, Zhou Long, Shen Yi, et al. Review of experiments and mechanical models of shield lining structure exposed to high temperature[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 15-23.

[6] 郭信君. 盾构隧道混凝土管片构件抗火性能试验及模拟分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 2.
Guo Xinjun. Experimental study and numerical simulation analysisof fire resistance performance of concrete segment component of shield tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2013: 2.

[7] 肖明清, 杨文倩, 封坤, 等. 火灾下盾构隧道衬砌结构受力与抗火措施模拟分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 199-207.
Xiao Mingqing, Yang Wenqian, Feng Kun, et al. Simulation analysis of the forces on lining structure of shield tunnels and fire resistance measures during fire[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 199-207.

[8] 王恩师, 王湛, 唐智. 双层隧道上层车道顶部单侧与双侧机械排烟的效果研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(9): 1240-1246.
Wang Enshi, Wang Zhan, Tang Zhi. Study on the effectiveness of single-sided and doublesided mechanical smoke exhaust in the upper lane of a double-layer Tunnel [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(9): 1240-1246.

[9] 王湛, 胡佳豪, 方正, 等. 双层隧道单侧重点排烟下火灾烟气蔓延距离研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(9): 3092-3100.
Wang Zhan, Hu Jiahao, Fang Zheng, et al. Research on the smoke spread distance in a double-deck tunnel under single-sided key smoke extraction [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(9): 3092-3100.

[10] 王泽军, 肖亮, 姜学鹏. 双层盾构隧道火灾超 380℃耐火极限范围研究[J]. 火灾科学, 2023, 32(3): 187-194.
Wang Zejun, Xiao Liang, Jiang Xuepeng. Study on fire resistance limit of double layer shield tunnel over 380 ℃ [J]. Fire Safety Science, 2023, 32(3): 187-194.

[11] GB 50016—2014 建筑设计防火规范[S].

[12] GB/T 26784—2011 建筑构件耐火试验可供选择和附加的试验程序[S].

[13] Mawhinney J R, Trelles J. Testing water mist systems against large fires in tunnels: integrating test data with CFD simulations[J]. Fire Technology, 2012, 48(3): 565-594.

[14] Wang Z Y, Ji J, Tan T T, et al. Numerical study on the critical criterion for predicting the plug-holing under lateral mechanical exhaust in tunnel fires: considering the effect of smoke flow in longitudinal direction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128: 104666.

[15] 徐志胜, 刘祎, 刘邱林, 等. 隧道单侧集中排烟模式下烟气蔓延距离研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 2911-2919.
Xu Zhisheng, Liu Yi, Liu Qiulin, et al. Study of smoke spread length in single-side exhaust mode tunnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(8): 2911-2919.

[16] Nilsen A R, Log T. Results from three models compared to full-scale tunnel fires tests[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(1): 33-49.

(编辑:张延欢)