

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.012

# 隧道火灾下气凝胶复合混凝土强度经时变化

陈春红, 朱平华, 陈世洲

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**为了分析气凝胶砂浆对隧道混凝土的防火隔热效果,研究了隧道火灾下气凝胶复合混凝土强度随时间退化的规律。首先在气凝胶体积掺量为骨料体积的 60% 条件下制备出具有防火涂层潜力的砂浆,涂覆在自密实高性能混凝土试件上制成气凝胶复合混凝土,按 Eurocodes HC 曲线升温(10 min 达到 800 °C, 30 min 达到 1 200 °C)对试件进行受火试验,选取 8 个受火时间和两种冷却方式。结果表明:受火不超过 2 h,气凝胶砂浆对试件的保护效果较好,受火 2 h 后气凝胶砂浆对试件的防火隔热效果开始减弱。自然冷却方式下,相同受火时间时复合试件比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.07 倍;喷淋冷却下,相同受火时间时复合试件比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.89 倍。冷却方式对试件受火后的强度退化也有明显影响。受火时间相同时,自然冷却后的剩余强度比喷淋冷却后的高,受火 2 h 时高了约 75%。

**关键词:**隧道火灾;气凝胶砂浆涂层;自密实混凝土;强度退化;冷却方式

中图分类号:TU 502

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)03-0086-07

## Study on Strength Variation of Aerogel Composite Concrete Exposed to Tunnel Fire

CHEN Chunhong, ZHU Pinghua, CHEN Shizhou

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of aerogel mortar on fire insulation of tunnel concrete, the law of strength degradation of aerogel composite concrete with duration time in tunnel fire was studied. Firstly, a mortar having the potential of fireproof coating was prepared, and the aerogel volume was 60% of the aggregate volume. The mortar was used as insulation layer and coated on the surface of self-compacting concrete. Thus aerogel composite concrete was made. According to Eurocodes HC curve(800 °C in 10 min, 1 200 °C in 30 min), the specimens were subjected to fire test. 8 fire duration and two cooling modes were selected in this test. The results show that when exposed to fire for less than 2 hours, the protective effect of aerogel mortar on specimens was obvious, and it began to weak-

收稿日期:2019-10-15。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678080, 51678081)。

作者简介:陈春红(1983—),女,江西吉安人,硕士,讲师。E-mail:chench@cczu.edu.cn

引用本文:陈春红,朱平华,陈世洲. 隧道火灾下气凝胶复合混凝土强度经时变化[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 86-92.

en after 2 hours. Under natural cooling, the residual strength of specimen coated aerogel mortar at the same duration time was 2.07 times higher than that of uncoated specimen. Under spray cooling, the residual strength of specimen coated aerogel mortar could reach 2.89 times higher than that of uncoated specimen. The cooling mode also had an obvious effect on the strength degradation of the specimen. Residual strength of specimen with natural cooling was about 75% higher than that with spray cooling at the same duration time.

**Key words:** tunnel fire; aerogel mortar coating; self-compacting concrete; compressive strength degradation; cooling method

近年来,中国城市轨道交通快速发展,隧道的修建量日益增多,而隧道火灾发生的数量也随之增加。隧道结构特殊,火灾具有随机性大、烟雾浓、温度高、类型多样化等特点<sup>[1-3]</sup>。隧道空间较小,发生火灾时能量集中,火势蔓延快,温度变化剧烈,在 10 min 左右其温度能够达到 1 000 ℃,能导致大量的人员伤亡与巨大的经济损失。因此隧道防火已成为一个亟需解决的难题。

隧道结构一般采用自密实高性能混凝土内衬,发生火灾时混凝土会发生高温爆裂剥落与性能退化。自密实高性能混凝土本身防火性能较差,其渗透性能低,水化物水解瞬间产生的水蒸气压无法释放,加之高温产生的热应力,更易发生爆裂,使隧道结构失效坍塌<sup>[4-6]</sup>。目前,在隧道防火措施中,较为成熟且优势较为明显的是防火涂层,其防火效果好,机械涂抹或者手工涂抹均可行,施工效率高,不会对隧道建设工期产生压力,本身密度小,不增加额外荷载,易于维护,也不会占用过多空间<sup>[7-8]</sup>。

气凝胶具有超轻质、高孔隙率、超绝热性、易于功能化等性能,是很好的隔热防火材料。部分研究者已将其应用制备气凝胶保温砂浆,具有良好的热工性能和力学性能,但把气凝胶应用于隧道防火涂层的研究报道较为少见<sup>[9-11]</sup>。鉴于隧道结构特点,将气凝胶砂浆涂覆在自密实高性能混凝土表面形成气凝胶复合高性能混凝土,研究其在不同的受火时间和冷却方式下的爆裂剥落和强度退化规律,为隧道防火研究提供参考。

1 试 验

1.1 试验材料

自密实高性能混凝土的胶凝材料选用 P.O 52.5R 普通硅酸盐水泥。粗骨料选用粒径 4.75~20 mm 的石灰石碎石;细骨料选用粒径 0.35~0.50 mm 及细度模数  $M_x=2.86$  的河砂。矿物掺合料有粉煤灰、矿渣和硅灰;采用减水率为 30% 的聚羧酸高性能减水剂和含气量为 4% 的引气剂。

气凝胶砂浆选用 P.O 42.5R 普通硅酸盐水泥。细骨料选用上述相同规格的河砂。商用气凝胶的基本性能,见表 1。同时采用分散乳胶粉和羟乙基甲基纤维素醚作为分散剂和增稠剂;选用  $\text{TiO}_2$  和聚丙烯纤维作为高温红外抑制剂和增强剂。

表 1  $\text{SiO}_2$  气凝胶基本性能

Table 1 Basic properties of  $\text{SiO}_2$  aerogel

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粒径/mm	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	孔隙率	孔径/nm	导热系数/( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )
100	0~4	500~650	>90%	20~100	0.020

1.2 配合比

自密实高性能混凝土设计目标强度为 C60,配合比设计选用 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》提出的“绝对体积法”,流动性指标选用第二等级,坍落扩展度范围为 660~755 mm, $V_g$  为  $0.33\text{ m}^3$ ,具体配合比见表 2。

气凝胶砂浆配合比设计选用 GB/T 20473—2006《建筑保温砂浆》提出的“体积法”,骨料(气凝胶+砂)体积取 60%,气凝胶体积取骨料体积的 60%,具体配合比见表 3。

表 2 自密实高性能混凝土配合比

Table 2 Proportion of self-compacting high performance concrete kg

水泥	水	粗骨料	砂	粉煤灰	矿渣	硅灰	减水剂	引气剂
322.6	161.3	884.0	803.3	107.5	53.8	53.8	10.8	0.43

表 3 气凝胶砂浆配合比

Table 3 Proportion of aerogel mortar kg

气凝胶	砂	水泥	硅灰	矿渣	水	减水剂	引气剂	甲基	分散剂	纤维	TiO <sub>2</sub>
54	958	574.4	63.8	159.6	319	2.4	6.4	4.8	16.0	2.4	79.8

1.3 试块制备及试验方法

气凝胶砂浆用 JJ-5 水泥胶砂搅拌机搅拌 3 min 成型。试件在温度  $(20\pm3)^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $60\%\pm5\%$  条件下标准养护 24 h 后拆模。再放入温度为  $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ 、湿度 90% 的砂浆养护箱中标准养护 28 d。按照 GB/T 50081—2016《建筑砂浆基本性能试验方法标准》的规定进行 50 次冻融试验。设置冻融循环温度为  $-(18\pm2)\sim(6\pm2)^{\circ}\text{C}$ , 单次循环时间为 3~4 h。循环冻融后气凝胶砂浆的抗压强度、抗折强度、黏结强度、干密度、吸水率、耐水性、抗冻性、耐火性等性能根据 GB 8375—2012《混凝土结构防火涂料》进行测试,导热系数采用热线法进行测试<sup>[12]</sup>。

自密实高性能混凝土采用二次搅拌工艺,减水剂在搅拌过程中加入。试件尺寸长×宽×高为  $150\text{ mm}\times150\text{ mm}\times150\text{ mm}$ 。试验选取 8 个受火时间,分别为 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 h,每个受火时间制备 3 个试件,试件成型后先标准养护 21 d。再将制备好的气凝胶砂浆人工均匀涂覆在混凝土试件其中一个表面,形成气凝胶复合高性能混凝土,再标准养护 7 d 后,取出养护箱,静置于环境温度为  $(20\pm3)^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 70% 的室内 40 d。课题组在文献[11]中已经研究了气凝胶砂浆涂层厚度与气凝胶复合混凝土耐火能力的关系,综合考虑研究结果和经济性,选择了气凝胶砂浆涂敷厚度为 6 mm。为了对比研究,同时制备了 8 组相同尺寸的自密实混凝土试件,试件表面未涂敷涂层,直接标准养护至龄期 28 d。自密实混凝土的立方体抗压强度和工作性能分别依据 GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》和 JGJ/T 83—2012《自密实混凝土应用技术规程》进行测试。

混凝土隧道火灾试验装置采用 RTD-45-13 型台车式电阻炉,最高工作温度为  $1\,300^{\circ}\text{C}$ ,炉内温度由温度控制器控制,达到设定温度后自动保持恒温。升温机制采用 Eurocodes HC 升温曲线(10 min 达到  $850^{\circ}\text{C}$ ,30 min 升温到  $1\,200^{\circ}\text{C}$ )<sup>[13-14]</sup>。模拟隧道火灾结构单面受火,所有试件均单面受火,非受火面用含锆纤维毯包裹后再用耐高温黏结剂密封空隙。气凝胶复合混凝土试件将涂覆有气凝胶砂浆的一面进行耐火试验。试验采用自然冷却和喷淋冷却两种方式。升温结束后,自然冷却的试件,按照  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

降温至室温;喷淋冷却的试件,持续喷淋试块表面 10 min,再置于室温条件下冷却至室温。

2 结果与讨论

2.1 气凝胶砂浆的基本性能

气凝胶砂浆的性能测试结果见表 4。由表 4 可知,气凝胶砂浆的导热系数达到 GB/T 0473—2006《建筑保温砂浆》的要求( $\leq 0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ );气凝胶砂浆的耐火极限满足 GB 8375—2012《混凝土结构防火涂料》中隧道防火涂料的要求( $\geq 2\text{ h}$ ),冻融 50 次后的抗压强度、抗折强度、黏结强度、干密度、吸水率、软化系数等均能达到上述规范隧道防火涂料的相关要求。

表 4 气凝胶砂浆性能  
Table 4 Performance of aerogel mortar

冻融循环后抗压强度/MPa	冻融循环后抗折强度/MPa	冻融循环后黏结强度/MPa	导热系数/ (W/(m·K))	干密度/ (kg/m³)	吸水率/ %	软化系数	耐火性/ h
6.3	2.7	0.38	0.294	686	18	0.81	>2.5

2.2 自密实高性能混凝土的抗压强度

自密实高性能混凝土 28 d 立方体抗压强度最大值为 66.1 MPa,最小值为 62.6 MPa,算术平均值为 65.3 MPa,其抗压强度达到了设计目标要求。

2.2.1 高性能混凝土耐火试验工况分析

图 1 和图 2 为两种冷却方式下两类试件在受火规定时间后的试件受火表面情况。

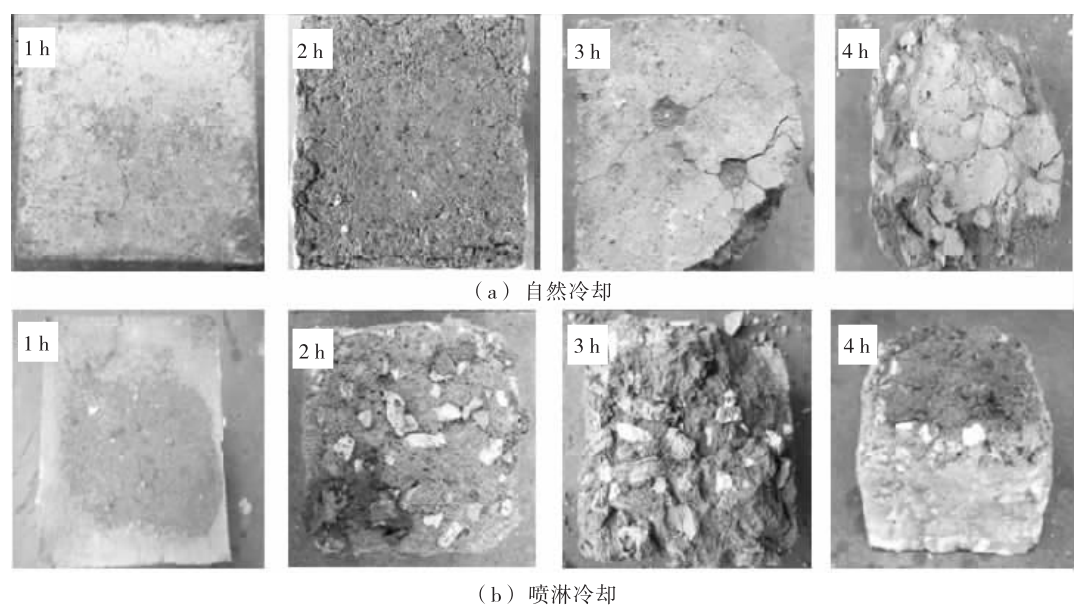


图 1 不同受火时间未涂敷涂层的试件  
Fig.1 Uncoated specimens at different duration of fire

如图 1 所示,未涂敷涂层且自然冷却的试件,受火时间不超过 2 h 时,试件表面完整性较好,但是表层部分发生剥落,边缘有轻微损坏;受火时间超过 2 h 后,试件受火面裂纹明显,边角爆裂剥落,断面骨料呈灰白。未涂敷涂层且喷淋冷却的试件,受火 1 h 后,试件表面裂纹明显且密布,试件顶角有损坏;受火超过 2 h 后,试件在喷淋过程中,有明显的爆裂声,表面大部分爆裂剥落,骨料外露,试件侧面裂缝明显。

如图 2 所示,气凝胶复合混凝土自然冷却的试件,受火时间不超过 2 h,试件表面完整性较好,略有细小裂缝,气凝胶砂浆轻微剥落,边缘略微烧焦;受火时间超过 2 h,试件表面气凝胶砂浆开始剥落,裂纹明显,表面骨料可见。喷淋冷却的气凝胶复合混凝土试件,受火 1 h 后,试件砂浆表面有明显裂缝,表面砂浆有轻微剥落;受火 2 h 后,试件在喷淋过程有较大的爆裂声,表面砂浆明显剥落,表面开裂,边缘爆裂剥落;受火 4 h 后,试件边缘发生爆裂剥落,侧面裂缝发展明显,表面裂纹交错,可见内部骨料。

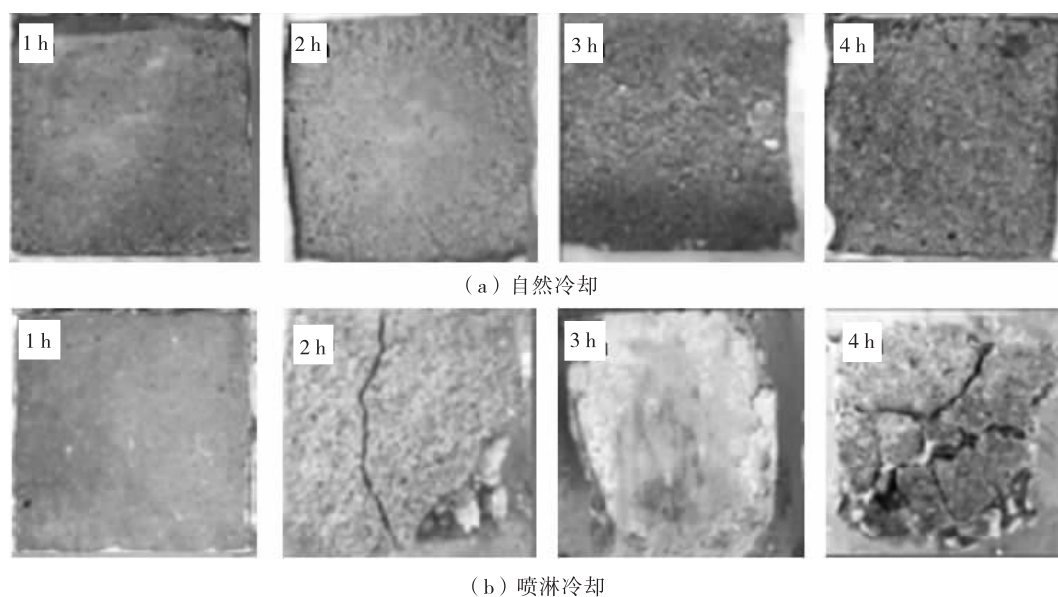


图 2 不同受火时间气凝胶复合混凝土试件

Fig.2 Aerogel composite concrete specimens at different duration of fire

从图 1 和图 2 可知,受火时间越长,试件表面完整性越差,混凝土爆裂剥落现象越明显;在相同受火时间时,自然冷却试件的表面比喷淋冷却试件完整性好;相同冷却方式下气凝胶复合混凝土比未涂敷涂层的试件表面完整性好。未涂敷涂层的试件受火时间 2 h 时,试件表面已经有明显的爆裂剥落现象,而气凝胶复合混凝土受火时间 2 h 时,自然冷却下试件表面完整性较好。

### 2.2.2 高性能混凝土隧道火灾后强度退化

为便于比较分析火灾后混凝土剩余抗压强度,定义混凝土抗压强度折减系数  $K_c$  为

$$K_c = f_{cu,e} / f_{cu} \quad (1)$$

式中: $K_c$  为混凝土抗压强度折减系数; $f_{cu,e}$  为混凝土受火规定时间后剩余强度值,取冷却至室温时的强度值,MPa; $f_{cu}$  为自密实高性能混凝土 28 d 抗压强度平均值,MPa。

两种冷却方式下,两类高性能混凝土试件在隧道火灾后抗压强度折减系数与受火时间的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可见,两类试件的剩余抗压强度都随着时间的增长而减小,但是相同受火时间时,两种冷却方式下气凝胶复合混凝土试件剩余抗压强度均比未涂敷涂层的试件高。气凝胶复合混凝土试件剩余抗压强度下降速率基本保持不变,未涂覆气凝胶砂浆试件在受火时间为 0.5~2 h 范围内强度损失速度最快,2.5 h 后抗压强度损失速度减缓。采用自然冷却,相同受火时间的气凝胶复合混凝土试件

比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.07 倍;采用喷淋冷却,相同受火时间的气凝胶复合混凝土试件比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.89 倍,这说明气凝胶砂浆涂层对火灾高温后自密实混凝土的强度退化具有良好的抑制效果,且气凝胶砂浆可以减轻喷淋冷却对试件剩余抗压强度带来的不利影响。受火时间低于 2 h,气凝胶砂浆对试件的保护效果较为明显,受火 2 h 后气凝胶砂浆对试件的隔热保护效果开始减弱,相同冷却方式的两类试件抗压强度折减系数差距不断减小。结合图 1 和图 2 可知,涂敷涂层的试件在受火 2 h 后表面气凝胶砂浆均出现剥落现象,影响了涂层对试件的隔热保护效果。

相同受火时间下的气凝胶复合混凝土试件,采用自然冷却试件的剩余强度比喷淋冷却最多提高了 75%;相同受火时间下的未涂敷涂层的试件,采用自然冷却试件的剩余强度比喷淋冷却最多提高了 76%,这说明自然冷却方式对混凝土的强度损失较小。这是因为喷淋冷却的降温速率更快,在混凝土内产生更大的温度梯度,加之喷淋产生的水蒸气形成蒸气压力,加剧了混凝土的损伤。

2.3 高性能混凝土的抗压强度

将两种冷却方式下高性能混凝土高温受火下抗压强度折减系数  $y$  与受火时间  $t$  进行拟合,得到式(2)~式(5)。

气凝胶复合混凝土试件为:

自然冷却

$$y=0.016t^2-0.256t+1.147, R^2=0.994 \tag{2}$$

喷淋冷却

$$y=0.021t^2-0.302t+1.133, R^2=0.990 \tag{3}$$

未涂敷涂层的混凝土试件为:

自然冷却

$$y=0.003t^2-0.138t+1.101, R^2=0.998 \tag{4}$$

喷淋冷却

$$y=0.007t^2-0.178t+1.086, R^2=0.997 \tag{5}$$

原铁道部重点项目“隧道衬砌结构火灾损伤评定和修复加固措施”公布的隧道混凝土衬砌结构火灾损伤评定方法,采用抗压强度折减系数作为评价指标,隧道衬砌结构火灾鉴定标准等级中有关剩余抗压强度比指标,见表 5<sup>[15]</sup>。

表 5 混凝土结构损伤程度与剩余抗压强度关系

Table 5 Relationship between damage degree of concrete structure and residual compressive strength

损伤程度	轻度损伤(I)	中度损伤(II)	严重损伤(III)	极度损伤(IV)	破坏(V)
抗压强度折减系数	>0.7	0.5~0.7	0.36~0.5	0.2~0.36	<0.2

考虑实际工程火灾后修复价值,以中度损伤作为强度退化剥落极限状态判定标准,若取抗压强度折减系数为 0.5,则根据式(2)~式(5)可以得出达到强度退化剥落极限状态的受火时间分别为:未涂敷涂

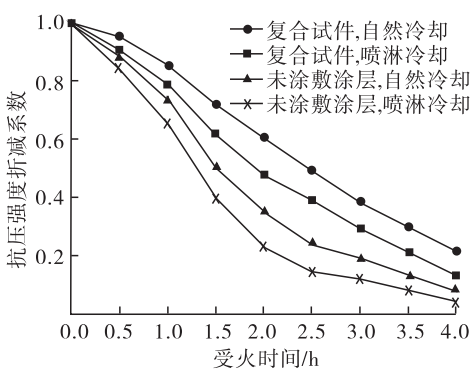


图 3 试件抗压强度折减系数与受火时间的关系曲线

Fig.3 Relationship between reduction coefficient of compressive strength and duration of fire

层的试件,自然冷却下为 1.5 h,喷淋冷却下为 1.28 h;气凝胶复合混凝土试件,自然冷却下为 2.48 h,喷淋冷却下为 1.88 h。自然冷却和喷淋冷却下,气凝胶复合混凝土比未涂敷涂层的混凝土耐火时间分别增加了近 1 h 和 0.6 h。由此可见,气凝胶砂浆涂层可以极大提高隧道的防火性能。

### 3 结 论

试验对比研究了气凝胶复合混凝土与未涂敷涂层的混凝土隧道火灾强度退化与受火时间的关系,得到如下结论:

1)混凝土抗压强度折减系数随着受火时间增长总体呈下降趋势。气凝胶复合混凝土试件剩余抗压强度下降速率基本保持不变;未涂覆气凝胶砂浆试件受火时间 0.5~2.5 h,剩余抗压强度下降较快,2.5 h 之后剩余抗压强度下降速率较小。

2)受火时间相同时喷淋冷却的试件剩余抗压强度均小于自然冷却。相同受火时间下的气凝胶复合混凝土试件,采用自然冷却试件的剩余强度比喷淋冷却最多提高了 75%;同样,采用自然冷却的未涂敷涂层的试件其剩余强度比喷淋冷却最多提高了 76%。

3)气凝胶砂浆涂层对试件的防火隔热效果明显。采用自然冷却,相同受火时间的气凝胶复合混凝土试件比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.07 倍;采用喷淋冷却,相同受火时间的气凝胶复合混凝土试件比未涂敷涂层的试件的剩余强度最高可达 2.89 倍。

4)自然冷却和喷淋冷却下,气凝胶复合混凝土比未涂敷涂层的混凝土耐火时间分别增加了近 1 h 和 0.6 h。

### 参考文献:

- [1]《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [2]SHY B. Overview of traffic safety aspects and design road tunnels[J]. IATSS Research, 2016, 40(1): 35-46.
- [3]蒋树屏. 中国公路隧道数据统计[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 643-644.
- [4]公伟, 胡克旭. 自密实混凝土结构抗火研究进展[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 1-9.
- [5]李海艳, 刘刚. 高强混凝土高温性能研究进展[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2016, 29(1): 48-54.
- [6]王明年, 田源, 于丽, 等. 火灾下隧道混凝土高温损伤现场试验研究[J]. 消防科学与技术, 2019(8): 1070-1074.
- [7]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.
- [8]孙厚超, 刘晶, 杨建明. 隧道防火涂料研究综述[J]. 安徽建筑, 2019(10): 196-197.
- [9]郭晓煜, 张光磊, 赵霄. 气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2): 444-449.
- [10]张志华, 王文琴, 祖国庆, 等.  $\text{SiO}_2$  气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J]. 航空材料学报, 2015, 35(1): 87-96.
- [11]夏群, 徐晓岩, 朱平华. 气凝胶复合 SCC 隧道火灾剥落与强度退化研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(6): 63-68, 96.
- [12]徐海珣. 硅基复合气凝胶的制备及其应用基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [13]朱合华, 闫治国, 梁利, 等. 不同火灾升温曲线下隧道内温度场分布规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012(1): 1595-1600.
- [14]白振鹏, 李炎锋, 张鹏, 等. 隧道火灾温度分布的多元回归预测分析[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(10): 1304-1306, 1323.
- [15]张士兵, 王心刚, 宋占辉. 运营隧道衬砌结构火灾损伤技术状况检测与评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(7): 50-54.

(责任编辑:李艳)