

文章编号:2095-0411(2017)06-0063-06

气凝胶复合 SCC 隧道火灾剥落与强度退化研究

夏 群,徐晓岩,朱平华

(常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:开发了硅气凝胶砂浆,用以保护和防止自密实混凝土(SCC)在模拟隧道火灾条件下(1 200℃)发生爆裂剥落。首先在气凝胶体积掺量为骨料(气凝胶+砂)体积的 60%条件下制备出具有防火涂层潜力的砂浆,然后采用 Eurocodes HC 火灾升温曲线(目标温度1 200℃)和喷淋与自然冷却 2 种灭火方式,对 C40 复合(涂层厚度为 1~15mm)与非复合自密实混凝土(未涂层)火灾爆裂剥落与强度退化性能进行对比研究,建立了爆裂剥落时长、强度折减系数与气凝胶涂层厚度之间的关系。结果表明,隧道火灾下,非复合自密实混凝土爆裂剥落时长为 107min,而复合自密实混凝土爆裂剥落时长均延长 13~93min,爆裂剥落时长与气凝胶涂层厚度呈二次抛物线关系;自然冷却与喷淋冷却灭火方式下,非复合自密实混凝土强度折减系数为 47.7%与 29.3%,当涂层厚度为 15mm 时,复合自密实混凝土强度折减系数为 96.5%与 82.6%,随涂层厚度增大,强度折减系数分别呈二次抛物线与线性增长。

关键词:隧道火灾;气凝胶砂浆涂层;气凝胶复合自密实混凝土;爆裂剥落;强度退化

中图分类号:TU 502

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2017.06.009

Spalling and Strength Degradation of Aerogel Mortar Protected Self-Compacting Concrete Exposed to Tunnel Fire

XIA Qun, XU Xiaoyan, ZHU Pinghua

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

Abstract: Silica aerogel based mortar was developed with a purpose to protect self-compacting concrete (SCC) from an explosion to high temperature atmosphere (1 200℃), which was experimentally simulated to a tunnel fire condition. With a protection of such silica aerogel mortar, the explosive spalling and strength degradation of self-compacting concrete (SCC) were systematically evaluated. For the preparation of aerogel mortar, the granular silica aerogel was regarded as one portion of aggregates, which is about 60% of the total aggregate volume (aerogel + sand), the mortar was then used as insulation layer and decorated on the surface of C40 self-compacting concrete with the thickness of 1—15mm. The specimens with or without aerogel mortar protection were heated up to 1 200℃ following

收稿日期:2017-06-12。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678080,51678081)。

作者简介:夏群(1970—),女,江苏常州人,硕士,高级工程师,主要从事混凝土材料研究。

the Eurocodes HC time-temperature curve until an explosively spalling occurred, and then the samples were cooled down in following 2 routes: natural cooling and spray cooling. The results show that the spalling happened at 107min for SCC specimen without any protection. In contrast, with an aerogel mortar protection, the spalling was extended by 13 to 93min, the thickness of the mortar and the spalling time follows a quadratic parabolic equation. Cooling under natural or spray forced conditions, the compressive strength reduction coefficients of the non-composite SCC specimen are 47.7% and 29.3% while the one with 15mm mortar protection are 96.5% and 82.6%. With an increase of coating thickness, the compressive strength reduction coefficients of the SCC specimen under natural cooling and spray forced cooling follow quadratic parabola and linear relations respectively.

Key words: tunnel fire; aerogel mortar coating; self-compacting concrete coated with aerogel mortar; spalling; compressive strength degradation

中国已成为世界上隧道工程建设规模最大、数量最多、发展最快、难度最高的国家^[1-3]。然而,我国对隧道结构的防火保护工作起步较晚,20 世纪 80 年代中期才开始,而限于当时的技术、经济状况,仅仅在极少数隧道喷涂了防火涂料,而绝大多数隧道未采取任何防火保护措施^[4]。可见,我国隧道混凝土结构的防火保护任务十分艰巨。隧道火灾多由汽车撞击引起,在未采取任何防火措施的隧道中,火灾强度高达 100MW 以上,是一般建筑火灾强度的 10 倍,在 10min 左右,火灾温度能够迅速达到 1 000℃,最高温度可达 1 200℃,属于典型的烃类火灾^[5]。而隧道结构由不耐高温的钢筋混凝土构成,当火灾持续时间在 90min 以上时,隧道混凝土就会发生高温剥落,表现为受火初期的爆裂剥落^[6]与受火后期的强度退化剥落^[7],导致隧道大面积坍塌。尤其是自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)因其自密实性与高耐久性等优异性能而越来越广泛应用于隧道结构,由于其低渗透性,导致水化物水解瞬间产生的水蒸汽压无法渗透释放,加之高温产生的热应力,使得 SCC 结构更易发生导致早期结构爆裂性的崩塌,引起大量人员伤亡。消除或减轻 SCC 在火灾高温下的剥落是隧道混凝土结构抗火性能研究的热点与难点。

在各种消除或减轻隧道混凝土结构火灾作用下剥落问题的对策中,对隧道混凝土表面涂层以形成复合混凝土因防火效果相对较好,施工方便,适用于新建与在役隧道等多方面的优势而备受青睐。气凝胶本身具有的超轻质($0.001\sim 0.500\text{g}/\text{cm}^3$)、高孔隙率($95.0\%\sim 99.8\%$)、超绝热性(25°C , 1atm 条件下, $0.005\sim 0.018\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)^[8],易于功能化(添加相应的高温红外辐射抑制剂石墨、 TiO_2 等)使得这种材料在保温绝热防火方面颇具潜力^[9]。Kim 等^[10]将质量分数为 2% 的气凝胶加入水泥中,发现其导热系数较普通水泥最大可降低 75%。Gao 等^[11]试验研究了气凝胶体积掺量对砂浆性能的影响,当气凝胶体积掺量为 60% 时,实测气凝胶砂浆的抗压强度为 8.3MPa,密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$,导热系数为 $0.26\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。Ng 等^[12-13]系统研究了气凝胶掺量对砂浆性能的影响,结果表明气凝胶体积占气凝胶砂浆样品总体积的 60% 时,制备出的气凝胶砂浆具有良好的热性能和力学性能,其抗压强度高达 19MPa,相应的导热系数为 $0.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。郭金涛^[14]采用气凝胶及玻化微珠为骨料制备保温砂浆,发现其保温性能优于其他砂浆。

正是由于气凝胶砂浆具有良好的绝热性能与适宜的力学性能,将其涂覆于 SCC 表面形成复合自密实混凝土,有利于消除或减轻 SCC 隧道火灾高温爆裂剥落,延长安全撤离时间,但相关研究鲜见报道。本文试验探讨了不同气凝胶砂浆涂层厚度下, C40 自密实混凝土在隧道火灾作用下的爆裂剥落与强度退化规律,可为气凝胶砂浆防火涂层研究提供参考。

1 试 验

1.1 试验材料

水泥为 P.O 42.5R 普通硅酸盐水泥,表观密度为 $3\ 100\text{kg}/\text{m}^3$;粗骨料为粒径 $4.75\sim 20\text{mm}$ 的石灰石碎石;细骨料为细度模数 $M_x=2.86$ 的河砂;矿物掺合料包括硅灰、粉煤灰与矿渣;采用减水率为 30% 的聚羧酸高性能减水剂与含气量为 4% 的引气剂;选用商用 SiO_2 气凝胶,其基本性能见表 1;分散剂和增稠剂分别选用可再分散乳胶粉和羟乙基甲基纤维素醚;高温红外抑制剂选用 TiO_2 ;聚丙烯纤维被用作增强剂以增强砂浆抗裂性能^[15]。

表 1 气凝胶基本性能

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

1.2 配合比

参照 Gao 等^[11]、Ng 等^[12-13] 的试验成果,同时依据 GB/T 20473—2006《建筑保温砂浆》中的体积法设计气凝胶砂浆配合比,其中骨料(气凝胶+砂)体积固定为 60%,气凝胶体积取骨料体积的 60%,具体配合比见表 2。自密实混凝土目标强度取 C40,目标坍落扩展度取 SF1 级($550\sim 655\text{mm}$)。配合比依据 JGJT283—2012《自密实混凝土应用技术规程》计算,具体配合比见表 3。

表 2 SiO_2 气凝胶砂浆配合比(长×宽×高为 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$)

g

气凝胶	水泥	水	砂	硅灰	矿渣	减水剂	引气剂	TiO_2	甲基	分散剂	纤维
9.22	98.04	54.47	163.32	10.89	27.23	0.41	1.09	13.62	0.82	2.72	0.41

表 3 C40 自密实混凝土配合比

kg

水泥	粗骨料	细骨料	粉煤灰	矿渣	硅灰	减水剂	水	水泥
335.01	858.00	814.00	111.67	55.84	55.84	1.68	4.48	173.09

1.3 试块制备

气凝胶砂浆用 JJ-5 水泥胶砂搅拌机搅拌 3min 后成型,放入温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度 90% 的水泥试块养护箱中养护 28d。自密实混凝土采用两次搅拌工艺^[16],减水剂在搅拌过程中加入。试块成型后标准养护(温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 以上)28d,然后在试块表面涂覆气凝胶砂浆,涂层厚度取 0,1,3,5,7,9,11,13,15mm,共 9 个厚度。涂层厚度在 5mm 及以下者一次性涂覆;厚度为 7mm 与 9mm 的分两次涂覆,先在混凝土表面涂覆 5mm 气凝胶砂浆,然后在砂浆表面涂刷一层粘结剂,最后进行剩余气凝胶砂浆厚度的涂覆;厚度为 11,13,15mm 的分 3 次涂覆,先在混凝土表面涂覆 5mm 气凝胶砂浆后,涂刷一层粘结剂,铺上 5mm 气凝胶砂浆,再涂刷一层粘结剂后进行剩余厚度气凝胶砂浆的涂覆。当气凝胶砂浆进行多层涂覆时,在前一层砂浆达到六七成干后(约 24h)再进行后一层砂浆的涂覆。将涂层试块标准养护 14d 后,置于环境温度为 $(20\pm 3)^\circ\text{C}$ 、湿度为 70% 的室内静置 40d。所有试块的湿含量控制在 35%,处于易于发生高温爆裂的界限湿含量范围^[17],以便充分探明气凝胶砂浆的涂层效果。

1.4 试验方法

气凝胶砂浆的抗压强度、干密度、粘结强度、耐水性、耐湿热性、抗冻性、耐火性按 GB 28375—2012《混凝土结构防火涂料》进行测试,导热系数采用热线法^[18]进行测试。自密实混凝土立方体抗压强度根据 GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行测试,工作性依据 JGJ/T 283—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 型台车式燃烧炉,该电炉的额定功率为 65kW,电压为 50~360V,最高工作温度为 1 300℃,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。按照 Eurocodes HC 曲线^[19] 30min 升温至 1 200℃后恒温燃烧直至爆裂剥落。所有试块均单面受火,非受火面先用含铅纤维毯包裹后再用耐高温粘结剂密封空隙。升温结束后,对采用自然冷却灭火方式的试块,按照 10℃/min 降温至室温;对采用喷淋冷却方式灭火的试块,喷淋至混凝土表面不再红热后置于室温条件下冷却至室温。

2 试验结果与讨论

2.1 气凝胶砂浆基本性能

气凝胶砂浆的性能测试结果如表 4 所示。由表 4 可见,气凝胶砂浆的导热系数为 0.294W/(m·K),达到 GB/T 20473—2006《建筑保温砂浆》的相关要求(≤ 0.3 W/(m·K)),这与 Gao 等^[11]、Ng 等^[13]的试验结果基本一致。气凝胶砂浆涂层厚度为 1~15mm 时,其耐火极限均超过 2.5h,满足 GB 28375—2012《混凝土结构防火涂料》中隧道防火涂料 ≥ 2 h 的要求。气凝胶砂浆试件冻融循环 50 次后的抗压强度及粘结强度、干密度、耐水性、耐湿热性、抗冻性及耐火性能达到上述规范隧道防火涂料的相关要求。所有的指标测试结果均证实了气凝胶砂浆作为防火涂层的潜力。

表 4 气凝胶砂浆性能

经受冻融循环后的 抗压强度/MPa	导热系数/ (W/(m·K))	干密度/ (kg·m ⁻³)	经受冻融循环后的 粘结强度/MPa	耐水性/d	耐湿性/d	抗冻循环次数	耐火性/h
5.38	0.294	686	0.35	36	35	50	>2.5

2.2 自密实混凝土拌合物工作性能及抗压强度

自密实混凝土坍落扩展度的坍落扩展度为 650mm,J 环扩展度为 617mm、间隙通过性为 33mm,离析率为 18%均达到预期目标要求。28d 立方体抗压强度最大值为 44.01MPa,中间值为 43.62MPa,最小值为 41.57MPa,算术平均值为 43.07MPa,其抗压强度达到了设计目标要求。

2.3 自密实混凝土隧道火灾下爆裂剥落时长

隧道火灾下自密实混凝土试块燃烧爆裂时长与气凝胶砂浆涂层厚度关系的测试结果如图 1 所示。

由图 1 可见,非复合自密实混凝土(对应于涂层厚度为 0)燃烧至爆裂剥落所需时长为 107min,而复合自密实混凝土在涂层厚度分别为 1,3,5,7,9,11,13,15mm 时,爆裂剥落时长分别延长了 32,42,46,58,70,76,82,92min;涂层厚度平均增加 1mm,爆裂剥落时长平均延长 6.8min。随着涂层厚度的增加剥落时间增长速度逐渐平缓,由 8.363 4(min/mm)降至 3.188 4(min/mm),但依然具有较高的增长速度,这表明气凝胶复合自密实混凝土具有良好的隧道防火性能,气凝胶砂浆涂层发挥了极好的隔热

功能。

将自密实混凝土燃烧爆裂时长 y 与气凝胶砂浆厚度 x 进行拟合,得到式(1)(拟合曲线见图1)。

$$\begin{cases} y = -0.2175x^2 + 8.3634x + 119.3 \\ R^2 = 0.9454 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表明自密实混凝土燃烧爆裂时长随气凝胶砂浆厚度的增加而呈二次抛物线增加。这可以从以下两个方面予以解释。一方面,气凝胶砂浆涂层厚度越厚,火灾温度场热流渗透到混凝土表面所需时间越长,对绝热性能产生正效应;另一方面,涂层厚度增加导致砂浆层的温度梯度也增大,在自密实混凝土内产生的热应力也越大,对绝热性能产生负效应。正负效应叠加的结果,使得涂层厚度增大,复合自密实混凝土抗火性能呈二次抛物线上升。

2.4 自密实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残余抗压强度,定义混凝土抗压强度折减系数 K_c 为

$$K_c = f_{cu,e} \times 100 / f_{cu} \quad (2)$$

式中: K_c 为混凝土抗压强度折减系数,%; $f_{cu,e}$ 为混凝土燃烧爆裂后残余强度值,取冷却至室温时的强度值,MPa; f_{cu} 为混凝土28d抗压强度标准值,MPa。

两种冷却灭火方式下,自密实混凝土抗压强度折减系数与气凝胶砂浆涂层厚度之间的关系曲线如图2所示。

从图2可以看出,自然冷却与喷淋冷却2种灭火方式下,非复合自密实混凝土的抗压强度折减系数分别为47.4%与29.3%,而复合自密实混凝土抗压强度折减系数均高于非复合自密实混凝土;涂层厚度增加,抗压强度折减系数亦增大,这表明气凝胶砂浆涂层对于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。自然冷却灭火方式下,当涂层厚度为1~15mm时,相应的抗

压强度折减系数分别为59.5%,67.7%,75.6%,85.1%,87.9%,93.3%,94.7%,96.5%;涂层厚度平均增加1mm,抗压强度折减系数平均提高4.4%。而在喷淋冷却灭火方式下,对应的抗压强度折减系数分别为43.3%,49.8%,54.9%,64.0%,67.2%,69.1%,74.7%,82.6%,对应的抗压强度折减系数平均提高4.2%。这表明,在相同的涂层厚度下,采用自然冷却灭火方式的复合自密实混凝土抗压强度高,这是因为后者的降温速率更快,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汽压力,加剧了混凝土的损伤。

从图2也可以看出,自然冷却灭火方式下,复合自密实混凝土抗压强度折减系数随气凝胶砂浆涂层厚度增大而增大,在涂层厚度 ≤ 7 mm时增长较快,超过7mm后增长趋于平缓。而在浇水冷却灭火方式下,复合自密实混凝土抗压强度折减系数随气凝胶砂浆涂层厚度增大而线性增大。

对试验数据进行拟合,得到两种冷却方式下的抗压强度折减系数 y 与涂层厚度 x 之间的关系表达

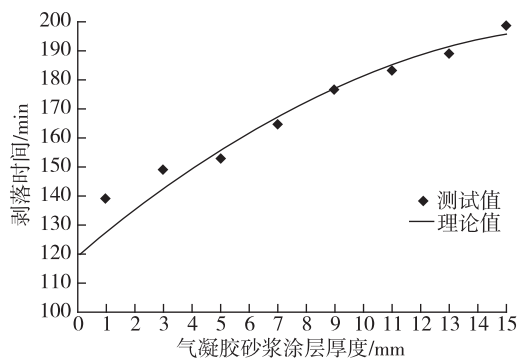


图1 爆裂剥落时间与气凝胶砂浆涂层厚度的关系

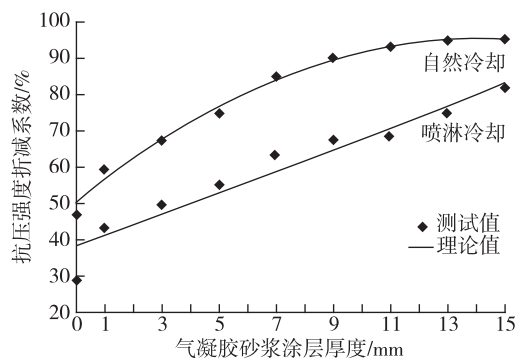


图2 抗压强度折减系数与气凝胶砂浆涂层厚度的关系

式,分别见式(3)与式(4)。

$$\text{自然冷却,有} \quad \begin{cases} y = -0.002\,2x^2 + 0.063\,2x + 0.502\,7 \\ R^2 = 0.989\,9 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{喷淋冷却,有} \quad \begin{cases} y = 0.030\,5x + 0.377\,1 \\ R^2 = 0.941\,5 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)与式(4)表明,自然冷却与喷淋冷却 2 种灭火方式下,自密实混凝土抗压强度折减系数与气凝胶砂浆涂层厚度分别呈二次抛物线与线性关系。

3 结 论

试验对比研究了气凝胶砂浆复合与非复合自密实混凝土隧道火灾爆裂剥落与强度退化性能,得到如下结论:

1)在气凝胶体积掺量取骨料(气凝胶+砂)体积 60%条件下,气凝胶砂浆导热系数达到保温砂浆的要求,抗压强度、粘结强度、干密度、耐水性、耐湿热性、抗冻性及耐火性能达到隧道防火涂料的相关要求,具有作为防火涂层的潜力。

2)气凝胶砂浆涂层可有效抑制自密实混凝土隧道火灾爆裂剥落,在涂层厚度为 1~15mm 条件下,爆裂剥落时长从未涂层的 107min 延长至 139~199min,满足隧道防火要求。爆裂剥落时长与气凝胶砂浆涂层厚度呈二次抛物线增长关系。

3)气凝胶砂浆涂层可有效抑制自密实混凝土隧道火灾后的强度衰减,喷淋冷却灭火方式的复合自密实混凝土强度退化高于自然冷却灭火方式。

4)采用自然冷却与喷淋冷却 2 种灭火方式冷却至室温时,随气凝胶砂浆涂层厚度增加,自密实混凝土强度折减系数分别呈二次抛物线与线性关系增长。

参考文献:

- [1]王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
- [2]《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.
- [3]SHY B. Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels[J]. IATSS Research, 2016, 40(1): 35-46.
- [4]向青松. 复合型隧道防火涂料及性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [5]VLADIMÍR J, TOMÁŠ M, JIŘÍ K, et al. Fire-resistant structures for tunnels using light concrete II[J]. Solid State Phenomena, 2016, 4251(249): 33-40.
- [6]MITSUO O, SHINYA U, TOSHIRO K, et al. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(3): 621-628.
- [7]ARABI N S A Q, SLEIMAN M A. Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2012, 26: 33-39.
- [8]FIDALGO A, FARINHA J P S, MARTINHO J M G, et al. Flexible hybrid aerogels prepared under subcritical conditions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(39): 12044-12052.
- [9]AEGERTER M A, LEVENTIS N, KOEBEL M M. Aerogels handbook[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2014.

- [2]CLAUSEN D, SIGURDSSON S, CHERNOFF D F. Black hole-neutron star mergers in globular clusters[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 428(4):3618-3629.
- [3]MANDUSHEV G, STANEVA A, SPASOVA N. Dynamical masses for galactic globular clusters[J]. Astronomy & Astrophysics, 1991, 252:94-99.
- [4]HARRIS W E. A catalog of parameters for globular clusters in the milky way[J]. Astronomical Journal, 1996, 112(4):1487-1488.
- [5]LARSEN S S, BRODIE J P, SARAJEDINI A, et al. Structural parameters and dynamical masses for globular clusters in M33[J]. Astronomical Journal, 2002, 124(5):2615-2624.
- [6]GELLER A M, LATHAM D W, MATHIEU R D. Stellar radial velocities in the old open cluster M67 (NGC 2682) I. Memberships, Binaries, and Kinematics[J]. Astronomical Journal, 2015, 150(3):97.
- [7]MALAVOLTA L, PIOTTO G, BEDIN L R, et al. The M4 core project with HST - IV internal kinematics from accurate radial velocities of 2771 cluster members[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 454(3): 2621-2635.
- [8]张学工. 模式识别[M]. 3 版.北京:清华大学出版社, 2010:56-57.
- [9]MCNAMARA B J, HARRISON T E, MCARTHUR B E, et al. The internal proper motions of stars in the open cluster M35[J]. Astronomical Journal, 2011, 142(2):53.
- [10]HENDRICKS B, STETSON P B, VANDENBERG D A, et al. A new reddening law for M4[J]. Astronomical Journal, 2012, 144(1):2966-2976.
- [11]HEGGIE D C, GIERSZ M. Monte carlo simulations of star clusters-V the globular cluster M4[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 389(4):1858-1870.
- [12]高新华,徐守坤. 利用位力定理估算球状星团的质量[J]. 大学物理, 2017, 36(1): 33-36.

(责任编辑:李艳)

【上接第 68 页】

- [10]KIM S, SEO J, CHA J. Chemical retreating for gel-typed agrogel and insulation performance of cement containing aerogel[J]. Construction and Building Materials, 2013(40): 501-505.
- [11]GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-incorporated concrete; an experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52(2): 130-136.
- [12]NG S, JELLE B P, ZHEN Y P, et al. Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 640-649.
- [13]NG S, SANDBERG L I C, JELLE B P. Insulating and strength properties of an aerogel-incorporated mortar based on UHPC formulations[J]. Key Engineering Materials, 2015, 629/630: 43-48.
- [14]郭金涛. 硅气凝胶/玻化微珠复合保温砂浆研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [15]范树景,王培铭. 聚丙烯纤维增强玻化微珠保温砂浆的干缩开裂性能[J]. 建筑材料学报, 2017(1):118-123.
- [16]孙铭. 面向 PC 板生产线的混凝土搅拌特性分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2014.
- [17]朋改非,杨娟,石云兴,等. 超高性能混凝土抗高温爆裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):229-233, 238.
- [18]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.
- [19]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.

(责任编辑:李艳)