

文章编号:1671-6833(2024)04-0111-06

灭火剂对高温混凝土抗压强度和劈拉强度的影响

匡一达¹, 姚志敏², 边会婷¹, 赵军¹, 李新喆¹, 张丽娟¹

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州科技学院 机械工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要: 为了研究不同灭火剂对高温混凝土力学性能的影响, 以 5 °C/min 和 10 °C/min 升温速率将不同龄期的混凝土在高温炉里进行加热, 分别在 200、400、600、800 °C 下维持恒温 1 h, 测试了不同龄期和不同加热温度下试件的质量损失率。随后将混凝土试块放置于钢化玻璃箱体中, 分别使用水、二氧化碳、哈龙 1211、七氟丙烷作为灭火剂进行冷却, 冷却至室温后, 测试不同灭火剂处理后混凝土试块的抗压强度和劈拉强度。结果表明: 龄期对烧失率的影响主要体现在 400 °C 加热条件下, 7 d 和 14 d 养护龄期试块的烧失率大于 28 d 养护龄期试块的烧失率; 常温下灭火剂不影响试块的抗压强度, 400 °C 和 600 °C 时水、哈龙 1211 和七氟丙烷会使试块抗压强度降低; 对于养护龄期为 7 d 和 14 d 的试块, 水冷处理在 600 °C 条件下会使试块抗压强度升高, 分别升高了 9.14% 和 9.18%, 龄期并不影响哈龙 1211 和七氟丙烷的试验结果; 加热温度为 800 °C 时, 试块高温后抗压强度较低, 不能体现不同处理方式对试块抗压强度的影响; 400 °C 下水、哈龙 1211 和七氟丙烷会使混凝土劈拉强度降低; 二氧化碳对高温混凝土抗压强度和劈拉强度的影响可以忽略。

关键词: 混凝土; 高温; 灭火剂; 抗压强度; 劈拉强度; 龄期; 烧失率

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.04.007

建筑火灾发生后, 混凝土结构的表面温度可在短时间内达到近千摄氏度的高温, 高温导致混凝土表面出现开裂剥落等现象, 火灾进一步发展则会使混凝土内部出现骨料膨胀、脱水等一系列变化, 这些变化会对混凝土的抗压强度等力学性能产生不利的影响, 从而导致混凝土结构建筑的安全性降低^[1-3]。不仅高温会影响混凝土的力学性能, 火灾的扑救方式也会影响混凝土的抗压性能, 徐彧等^[4]研究了高温后不同冷却方式对混凝土试块抗压强度的影响, 研究表明, 喷水冷却的方式会更明显地降低试块的抗压强度。贾福萍等^[5]研究发现, 混凝土试块加热至 250~450 °C, 相比于自然冷却的方式, 采用喷水冷却的试块残余强度更低; 但加热温度维持在 450~650 °C 时, 采用自然冷却方式的混凝土试块残余强度更高。Arioz 等^[6]研究发现, 高温会使混凝土内部氢氧化钙分解为生石灰, 水冷处理则使一部分生石灰重新转化为氢氧化钙, 从而恢复混凝土的一部分残余强度。

由于建筑结构的使用功能具有多样性和复杂性, 火灾荷载的类型和数量也大不一样, 因此建筑火灾的发生通常由以下起火原因引发: 电器设备使用不当、电路老化短路、化学危险品失控等。由于火灾的引发类型不同, 火灾扑救的过程中需要不同种类的灭火剂, 例如: 水、干粉灭火剂、二氧化碳灭火剂、七氟丙烷灭火剂和哈龙 1211 灭火剂等。当前的研究主要集中在用水冷却高温加热后的混凝土, 但其他几类灭火剂对高温混凝土的力学性能影响研究较少。Mubarak 等^[7]采用水和干粉灭火剂处理高温混凝土, 研究发现水冷方式对混凝土试块抗压强度变化的影响较小, 干粉灭火剂不会影响高温混凝土的抗压性能。七氟丙烷是一种应用较为广泛的哈龙替代灭火剂, 其灭火原理与哈龙灭火剂相似, 高温条件下会发生热解反应生成·CF₃灭火基团, 进而与火焰中的 H 自由基结合生成氟化氢气体^[8-9]。氟化氢气体遇水会形成酸性溶液, 故其对混凝土力学性能的影响值得深入研究。为了探究上述灭火剂在建筑火

收稿日期: 2024-01-02; 修订日期: 2024-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51906227); 河南省科技攻关项目(222102320049)

通信作者: 边会婷(1991—), 女, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事生物物质复合材料混凝土的力学与火灾安全性研究, E-mail: bianht@zzu.edu.cn。

引用本文: 匡一达, 姚志敏, 边会婷, 等. 灭火剂对高温混凝土抗压强度和劈拉强度的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 111-116, 124. (KUANG Y D, YAO Z M, BIAN H T, et al. Effect of fire extinguishing agents on compressive strength and splitting tensile strength of concretes exposed to high temperatures[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 111-116, 124.)

灾扑救时是否会影响高温下混凝土的力学性能,本文用对混凝土试块的高温加热试验模拟真实火灾场景,将高温试块放置于特制钢化玻璃框架中使用多种进行冷却处理,研究水、七氟丙烷、哈龙 1211 和二氧化碳处理对不同龄期和温度下混凝土抗压强度和劈拉强度的影响。

1 试验概况

1.1 试验原材料

本文的试验原料采用的是满足 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》^[10]要求的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,细度模数为 2.8 的天然河砂和粒径分别为 5~10 mm、10~20 mm 的碎石粗骨料。其中,不同直径粗骨料混合比例为 1:1。按照 GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》^[11]和 GB/T 14684—2022《建设用砂》^[12]测试了碎石、天然河砂的性能,如表 1 所示。

表 1 骨料性能				
Table 1 Aggregate performance				
原料	表观密度/ (kg·m ⁻³)	含水 率/%	吸水 率/%	压碎指 标/%
砂	2 649	1.2	1.70	
碎石(5~10 mm)	2 683		0.45	
碎石(10~20 mm)	2 690		0.50	8.1

试验用水为实验室自来水,灭火剂分别为浙安牌手提式七氟丙烷灭火器、玉龙牌手提式二氧化碳灭火器和河南蓝匠消防装备有限公司的手提式 1211 灭火器。

1.2 配合比及试件制备

本文试验选用强度为 C30 的混凝土试块,混凝土的抗压强度和劈拉强度试验均采用 100 mm×100 mm×100 mm 的试块。根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》^[13],按照水胶比 0.47 计算了各组分掺量和配合比,如表 2 所示。制作试块时,先将水泥与砂干拌 1 min,加入实验室用水后再拌合 1 min,最后加入粗骨料搅拌至分散均匀,倒入 100 mm×100 mm×100 mm 模具中浇注成型,室温下静置 24 h 后拆模,将试块分为 4 组,分别在标准养护室中养护 7 d、14 d、28 d 和 56 d。不同龄期的混凝土试块养护完成之后,将分成两部分分别在常温 and 高温处理后做单轴抗压试验和劈拉试验。

1.3 试验方法

1.3.1 高温试验

将不同龄期的混凝土试块放置在烘干炉,设置温度为 60 ℃,烘干时间为 3 h,将试件表面的水分烘

表 2 C30 混凝土配合比				
Table 2 Mix proportion of concrete C30 kg/m ³				
水	水泥	砂	碎石 (5~10 mm)	碎石 (10~20 mm)
185	394	616	570.5	570.5

干,将烘干的试块转至箱式电阻高温炉,设置升温曲线加热至 200 ℃、400 ℃、600 ℃和 800 ℃。为防止过快或过高的温度导致混凝土试块炸裂,在温度小于 400 ℃时,采用 10 ℃/min 的升温速率;温度大于 400 ℃时,采用 5 ℃/min 的升温速率,温度达到预定温度后恒温维持 1 h,确保混凝土试块温度分布均匀。

1.3.2 冷却处理

为了更好地冷却高温处理后的混凝土试块,自行设计加工了正方体的玻璃框架,如图 1 所示。玻璃采用钢化玻璃以防止混凝土试块冷却过程中炸裂,钢化玻璃上的圆形缺口便于灭火剂的喷入。试块从高温炉中取出后立即放入玻璃框架内,每组混凝土试块均使用 1 kg 灭火剂进行冷却处理。灭火剂喷入之后,使用塑料薄膜封闭圆形缺口,静置至试块冷却。

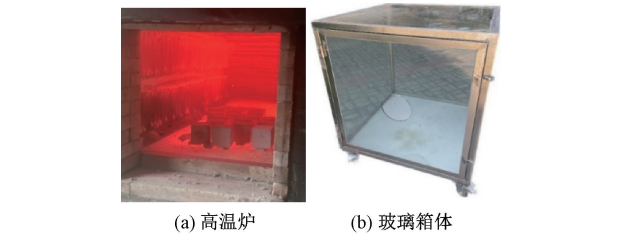


图 1 试验用高温炉和冷却箱体
Figure 1 Experimental furnace and cooling box

1.3.3 力学性能测试

抗压强度和劈拉强度试验使用数显压力试验机完成,抗压强度试验加载速度为 0.3~0.5 MPa/s,劈拉强度试验的加载速度为 0.08 MPa/s,由于采用的立方体试块为非标准抗压试块,实际抗压强度需要按照式(1)计算,劈拉强度按照式(2)计算,每次力学性能测试试验均采用 3 个试块,结果取平均值。

$$f_{cu} = 0.95 \frac{F}{A}; \tag{1}$$

$$f_{ts} = 0.85 \times 0.637 \frac{F}{A}. \tag{2}$$

式中: f_{cu} 为混凝土轴心抗压强度,MPa; f_{ts} 为混凝土劈拉强度,MPa; F 为试件破坏时荷载,kN; A 为试件承受压力面积,mm²;0.95 和 0.85 均为尺寸换算系数。

2 结果与讨论

2.1 混凝土试块表面颜色变化

混凝土试块在高温炉中加热会发生一系列的变化,最直观地表现在其表面颜色的变化。如图 2 所示,常温下混凝土表面为青灰色;温度升高至 200 ℃时,混凝土表面颜色未出现明显变化;温度升

高至 400 ℃时,混凝土表面颜色呈现淡红色并出现细微裂缝;600 ℃时,混凝土整体颜色退化至米黄色,表面裂缝数量变多且缝隙变大;800 ℃时,试块整体呈现灰白色,在加热过程中伴随剥落现象,表面剥落的混凝土试块可直接观察到其内部骨料,剥落现象产生的主要原因是试块在受热情况下内外应力不均匀^[14]。

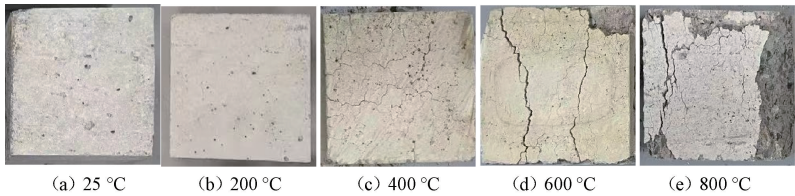


图 2 不同温度下混凝土试块外表面颜色

Figure 2 Surface changes of the specimens at different temperature

2.2 烧失率变化

为了得到混凝土试块受热之后的烧失率,本文分别称量并记录了试块加热前后的质量,如图 3 所示。可以看出,随着温度的升高,试块烧失率整体呈现上升的趋势,当加热至 200 ℃时,质量的损失主要是混凝土内部的自由水;加热至 400 ℃时,混凝土试块中的结合水开始受热逸出,氢氧化钙晶体开始脱水分解^[15]。当加热温度为 200 ℃和 400 ℃时,7 d 和 14 d 龄期混凝土试块的烧失率变化最为明显,这是由于混凝土内部水化反应不完全导致混凝土内部结合水比较容易失去。温度升高至 600 ℃时,骨料中的碳酸钙、碳酸镁等成分开始分解;继续升高温度至 800 ℃,试块烧失率将进一步增加,但此温度下不同龄期的混凝土试块烧失率差异较小,平均烧失率达到 9.6%。另外,加热温度为 600 ℃和 800 ℃时烧失率较高,这主要是因为温度较高时,混凝土表面出现剥落现象。

温度为 200 ℃时,冷却方式的不同并不影响混凝土试块的抗压强度;随着温度升高至 400 ℃时,试块的抗压强度明显受到了冷却方式的影响,采用喷水冷却的 7 d 和 14 d 龄期的混凝土试块的抗压强度分别降低了 20.31%和 13.56%;然而,当温度升至 600 ℃时,喷水冷却方式却使 7 d 和 14 d 龄期试块的抗压强度分别增加了 9.14%和 9.18%。但这种现象并未出现在较长龄期的混凝土试块上。由图 4(c)、4(d)可知,在 400 ℃和 600 ℃下,28 d 和 56 d 龄期的混凝土试块在喷水冷却的处理下有更低的抗压强度。由此可见,冷却方式和混凝土试块本身的养护龄期会共同对其高温后的抗压强度产生影响。以上试验现象表明,对于低龄期的 C30 混凝土试块,高温加热使其内部的自由水和结合水大量蒸发;当温度高于 600 ℃时,大部分水化硅酸钙凝胶开始分解,这会对混凝土承载能力产生负面影响。但在此条件下,喷水冷却则会使混凝土重新生成一部分水化硅酸钙凝胶。同时,低龄期的混凝土试块在受高温之后内部温度很难短时间内降至室温,再遇水会促进其内部水化反应,使其抗压强度升高^[16]。对于龄期较高的混凝土试块,其内部水化反应在养护阶段进行得较为完全,由于混凝土热传导系数较小,高温受热后喷水冷却则会增加其内外温度差,当由此产生的热应力大于混凝土试块的抗拉强度时,便会出现开裂现象使其强度降低。当温度升到 800 ℃时,混凝土内部碳酸钙完全脱水变成氧化钙,骨料与砂浆结合处裂缝变大^[17],混凝土试块的残余强度大幅降低。综上所述,混凝土试块的加热温度会很大程度上改变混凝土的内部物理化学变化,由此改变其抗压性能,水冷处理也对其抗压性能产生一定的影响。

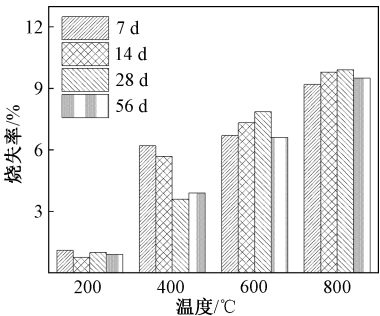


图 3 不同龄期混凝土试块在不同温度条件下的烧失率

Figure 3 Mass loss rate of specimens in different curing age and temperature

2.3 灭火剂对高温混凝土试块抗压强度的影响

图 4 为采用自然冷却和喷水冷却方式处理的混凝土试块的抗压强度。由图 4(a)、4(b)可以看出,

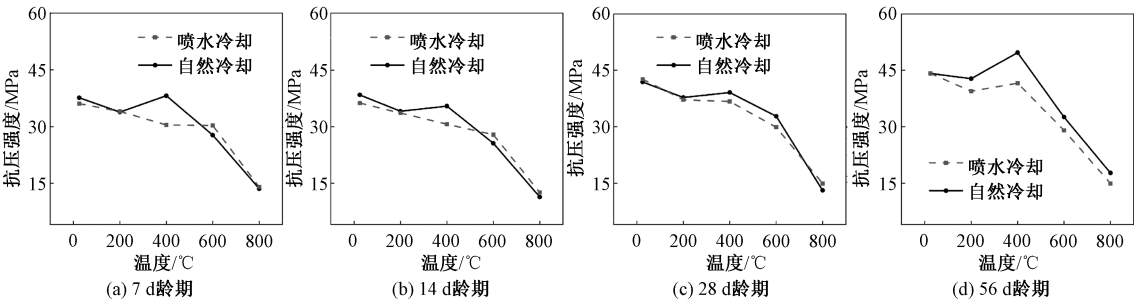


图 4 自然冷却和喷水冷却混凝土试块随温度变化的抗压强度
Figure 4 Compressive strength of natural cooling and water cooling

图 5 为采用自然冷却、七氟丙烷和哈龙 1211 处理的混凝土试块的抗压强度。采用自然冷却处理的混凝土试块的抗压强度整体随温度升高呈现先下降后升高再下降的变化趋势。400 ℃ 的温度条件会促进混凝土水化反应,使内部氢氧化钙含量增加,也有研究认为高温使水泥浆体对骨料的包裹性增强,随后导致其强度稍微恢复^[18-20]。随着温度的继续升高,试块的抗压强度迅速下降。温度增加至 800 ℃ 时,14 d 和 28 d 龄期的混凝土试块的残余强度仅为常温时的 29.46% 和 31.33%。从图 5 可以看出,灭火剂对常温下混凝土试块的抗压强度影响并不明显;当加热温度为 200 ℃ 时,所有试块的抗压强度都较常温下有一定的下降,但是依然未见灭火剂处理的影响。加热至 400 ℃ 时,相对于自然冷却方式,灭火剂冷却处理的混凝土试块的抗压强度会明显降低。以 28 d 龄期为例,哈龙 1211 和七氟丙烷处理的混凝土试块抗压强度分别降低了 6.73% 和 16.53%。当温度升高至 600 ℃ 时,试块的抗压强度较 400 ℃ 时急剧降低,哈龙 1211 和七氟丙烷的冷却处理分别使试块的抗压强度降低了 15.25% 和 10.34%。加热温度为 800 ℃ 时,试块抗压强度整体迅速降低,其主要原因在于混凝土内部氢氧化钙脱水,受灭火剂的影响较小。由此可见,加热温度为 400 ℃ 和 600 ℃ 时,哈龙 1211 灭火剂和七氟丙烷会对混凝土试块的抗压强度产生明显影响;而在室温、200 ℃ 和 800 ℃ 温度条件下,灭火剂对试块抗压强

度的影响较小。其主要原因是当灭火剂从气瓶中喷向高温试块时,常压外界环境会使得灭火剂迅速汽化、大量吸热,迅速降低试块表面温度^[21],当预定温度为 400 ℃ 和 600 ℃ 时,试块内外的温度差会产生热应力使其内部裂缝进一步扩展导致抗压强度进一步降低;在常温和 200 ℃ 时,灭火剂喷在混凝土试块上产生的热应力较小,从而其影响较小;当加热温度为 800 ℃ 时,试块内部裂缝较多且宽度较大,灭火剂处理后未能使其内部裂缝进一步发展,因此两种灭火剂均未对其抗压强度产生影响。

图 6 比较了高温后二氧化碳灭火剂处理和自然冷却的试块的抗压强度。二氧化碳与水在灭火过程中均不参与燃烧反应,但由于自然状态不一样,故对混凝土试块的抗压性能影响会不同。如图 6 所示,二氧化碳冷却处理的结果与自然冷却的结果保持了很好的一致性,且二氧化碳冷却处理对混凝土试块抗压强度的影响较小。这主要是因为二氧化碳在常温常压下均为气态,即便从气瓶中喷出时会快速汽化,但其较低的比热容并不会引起周围环境的快速降温,其降温效果与其他灭火剂相比较差,主要依靠降低氧气浓度达到灭火效果,不能引发明显的热应力变化,从而影响较小。

2.4 灭火剂对高温混凝土试块劈拉强度的影响

图 7 为不同温度和不同处理方式下混凝土试块的劈拉强度,试块养护龄期为 28 d。从图 7 中可以看出,混凝土的劈拉强度随温度的升高而降低,对于

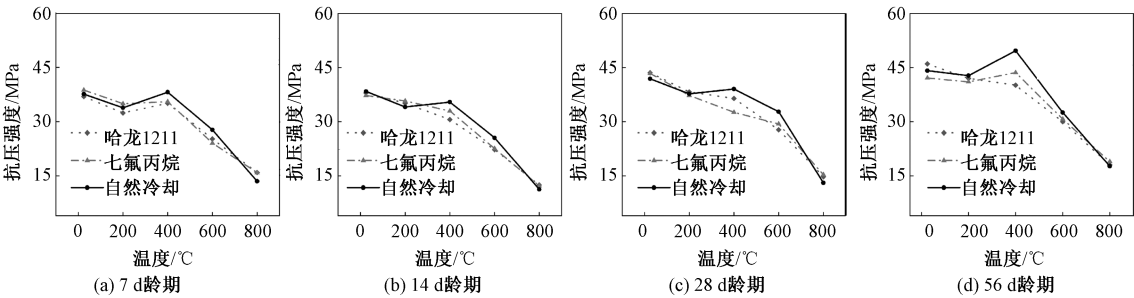


图 5 自然冷却、七氟丙烷和哈龙 1211 处理后混凝土试块的抗压强度

Figure 5 Compressive strength of specimens after natural cooling, Halon 1211 and HFC-277ea treatment

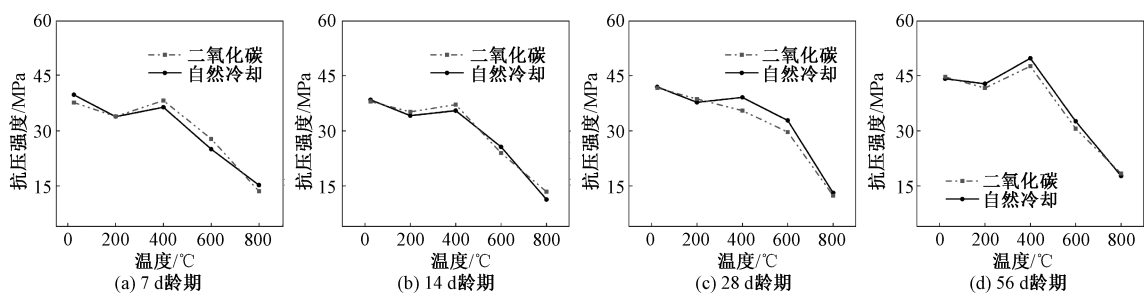


图 6 自然冷却和二氧化碳处理后试块抗压强度与温度的关系

Figure 6 Compressive strength of specimens after natural cooling and carbon dioxide treatment

自然冷却试块,400 ℃ 和 600 ℃ 条件下混凝土的劈拉强度残余率约为 60.9% 和 21.1%。比较不同处理方式下试块的劈拉强度,常温和 200 ℃ 条件下,灭火剂对混凝土试块的劈拉强度影响较小。温度升高至 400 ℃ 时,水、哈龙 1211 和七氟丙烷均进一步导致试块的劈拉强度降低,与自然冷却的试块相比,混凝土的劈拉强度分别降低了 20.67%、35.1% 和 23.1%。这是因为在高温下混凝土试块内部由于骨料膨胀系数的不同而出现裂缝,裂缝的产生对混凝土劈拉强度的影响是最直接的,而灭火剂的冷却效果则会促进裂缝的发展,因此导致试块的劈拉强度进一步降低。在 600 ℃ 和 800 ℃ 条件下,混凝土的劈拉强度主要受温度的影响,灭火剂对劈拉强度的影响较小。这是因为在较高温度下,试块内部已经出现较多的裂缝,其残余劈拉强度较低,灭火剂对高温试块的影响不能体现。二氧化碳由于其冷却效果有限,在不同温度下,二氧化碳灭火剂对混凝土的劈拉强度影响较小。

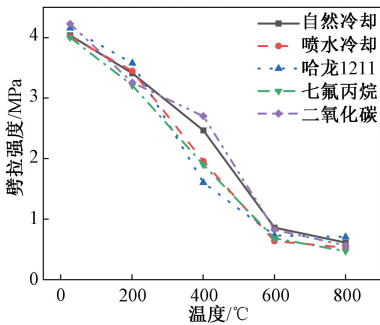


图 7 不同温度和处理方式下混凝土试块的劈拉强度

Figure 7 Splitting tensile strength of specimens with different temperatures and treatment methods

3 结论

(1)随着受热温度的升高,混凝土表面颜色历经青灰色、淡红色、米黄色,最终为灰白色,试块表面裂缝逐渐增多且变宽,800 ℃ 时可看到试块内部骨料。混凝土试块的烧失率随温度的升高而增加。温度加热至 400 ℃ 时,7 d 和 14 d 龄期的试块烧失率

要大于 28 d 龄期试块的烧失率。

(2)高温受热后的试块强度会受喷水处理的影响,且不同龄期下试验结果不同。哈龙 1211 和七氟丙烷灭火剂会对受热温度 400 ℃ 和 600 ℃ 的不同龄期混凝土试块的抗压强度产生明显影响,与自然冷却试块相比,其抗压强度降低。

(3)试块受热温度为 400 ℃ 时,水、哈龙 1211 和七氟丙烷会进一步导致混凝土劈拉强度的降低,这一现象在其他温度并未体现。

(4)不同灭火剂对高温混凝土抗压强度的影响不同,主要取决于灭火剂的冷却效果,其中,二氧化碳冷却处理对混凝土的抗压强度和劈拉强度的影响可忽略不计。

参考文献:

[1] 陈宗平,王欢欢,陈宇良. 高温后混凝土的力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(1): 13-17.
CHEN Z P, WANG H H, CHEN Y L. Test study on mechanical properties of concrete after a fire high temperature[J]. Concrete, 2015(1): 13-17.

[2] 花尉攀,李凯峰,谢晓杰. 高温后混凝土抗压强度及细观损伤机理实验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(9): 1317-1321.
HUA W P, LI K F, XIE X J. Experimental study on compressive strength and meso-damage of concrete under high temperature [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(9): 1317-1321.

[3] 梁书锋,方士正,韦贵华,等. 高温作用后硅质砂岩力学性能试验[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(3): 87-92.
LIANG S F, FANG S Z, WEI G H, et al. Experiments on mechanical properties of siliceous sandstone after high temperature[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(3): 87-92.

[4] 徐彧,徐志胜. 高温作用后混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2000(2): 44-45, 53.
XU Y, XU Z S. Experiment investigation of strength of concrete after high temperature[J]. Concrete, 2000(2):

- 44-45, 53.
- [5] 贾福萍, 吕恒林, 崔艳莉, 等. 不同冷却方式对高温后混凝土性能退化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 25-29.
JIA F P, LYU H L, CUI Y L, et al. Research on degraded behaviors of research into the degraded properties of concrete specimens heated to different temperatures and then subject to various cooling methods[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 25-29.
- [6] ARIÖZ O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(8): 516-522.
- [7] MUBARAK Y, ALBTOOSH S, AL-HAMAMREH Z. Effects of the exposure to fire and fire extinguishing agents on the behavior of building materials[J]. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020, 8(7): 3433-3441.
- [8] 曹丽英, 张品, 张永丰, 等. 七氟丙烷灭火剂热解规律研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(12): 1426-1428, 1439.
CAO L Y, ZHANG P, ZHANG Y F, et al. A study on the pyrolysis regularity of HFC-227ea[J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(12): 1426-1428, 1439.
- [9] 傅学成, 陈涛, 周彪, 等. 七氟丙烷与火焰作用过程中产生的氟化氢研究[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(4): 363-367.
FU X C, CHEN T, ZHOU B, et al. Generation of hydrogen fluoride during fire suppression using 2-H-heptafluoropropane[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(4): 363-367.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥: GB 175—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Common portland cement: GB 175—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Pebble and crushed stone for construction: GB/T 14685—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Sand for construction: GB/T 14684—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [14] DWAİKAT M B, KODUR V K R. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 425-434.
- [15] YAO W J, PANG J Y, LIU Y S. Performance degradation and microscopic analysis of lightweight aggregate concrete after exposure to high temperature[J]. Materials, 2020, 13(7): 1566.
- [16] 李春玲, 陈兵, 陈龙珠. 早龄期混凝土高温性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 184-188.
LI C L, CHEN B, CHEN L Z. Experimental study on mechanical properties of early-aged concrete after exposure to high temperatures[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(4): 184-188.
- [17] 杨倩. 高温后自然冷却的普通混凝土承压性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
YANG Q. Experimental study on compressive behavior of ordinary concrete with cooling naturally after high temperature[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [18] WANG G M, ZHANG C, ZHANG B, et al. Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste[J]. Fire and Materials, 2015, 39(8): 741-750.
- [19] ZHANG J R, LV T, ZHU Y, et al. Damage mechanism of engineered cementitious composites after exposed to elevated temperatures: experimental and molecular dynamics study[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 129: 104507.
- [20] ZHAO Y, DING D, BI J, et al. Experimental study on mechanical properties of precast cracked concrete under different cooling methods[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124141.
- [21] KE W, WANG K, ZHOU B, et al. The cooling performance of halogenated alkane fire extinguishing agent and its quantitative prediction model[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 26: 101093.