

文章编号:0253-9993(2010)12-2049-04

混凝土高温后抗压强度的影响因素研究

梁爱莉¹,张倩茜²,袁广林²,董亚男³

(1. 徐州工程学院 土木工程学院,江苏 徐州 221008;2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221008;3. 北京城建设计研究总院有限公司 青岛分院,山东 青岛 266000)

摘要:对强度等级分别为 C20、C25 和 C30 的硅质骨料和钙质骨料混凝土立方体试块高温后的抗压强度进行了试验,分析了受火温度、冷却方式、骨料类型、静置时间和强度等级等因素对混凝土高温后抗压强度的影响。试验结果表明:随温度的升高混凝土抗压强度总体呈下降趋势,在受热温度较低时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较小,在受热温度较高时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较大;骨料类型对高温后混凝土强度的影响不可忽略,温度低于 550℃ 时,硅质骨料混凝土强度高于钙质骨料,但当超过 750℃ 后,硅质骨料混凝土强度迅速降低,温度越高,钙质骨料相对于硅质骨料的耐火优越性表现的越明显;受火灾作用后,混凝土强度值随着时间的推移趋于稳定,在某一静置时间,混凝土强度都会出现最小值;高温后不同强度等级混凝土抗压强度变化趋势相似,高温后抗压强度变化规律受强度等级的影响不能忽略。

关键词:混凝土;高温;抗压强度;骨料类型;冷却方式;静置时间

中图分类号:TU501 **文献标志码:**A

Study on the influencing factors of concrete compressive strength after elevated temperature

LIANG Ai-li¹,ZHANG Qian-qian²,YUAN Guang-lin²,DONG Ya-nan³

(1. Civil Engineering Department, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Qingdao Branch, Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: Compressive strength test of concrete cube specimens made by siliceous and calcareous coarse aggregates after high temperature was carried out, whose strength grades were C20, C25 and C30 respectively. Considering the effects of temperatures, cooling methods, aggregate types, standing time and strength grades, analyzed the influence of these factors on concrete compressive strength respectively. The test results show that the compressive strength decreases with the temperature rising in general. In the mass, the cooling methods have minimal impact on the heated concrete strength at lower temperatures, while they have a great influence on concrete strength at higher temperatures. The effect of aggregate types on concrete strength after elevated temperature can't be ignored. Below 550℃, the siliceous aggregate concrete has higher strength than calcareous aggregate concrete, but the strength of siliceous aggregate concrete decreases rapidly over 750℃. So compare to siliceous aggregate concrete, the higher the temperature is, the more significant fire resistance of calcareous aggregate concrete has. Concrete strength values become steady with the lapse of time after the fire, and the minimum of concrete strength appear at some standing time. In addition, after high temperature the trends of changes on concrete compressive strength for different strength grades are similar, whereas the influence of strength grades on concrete compressive strength can't be neglected.

Key words: concrete; high temperature; compressive strength; aggregate types; cooling methods; standing time

在众多火灾案例中,建筑结构严重破坏甚至倒塌的情况屡有发生,火灾对建筑结构的危害已受到人们

的广泛关注。目前,国内外对混凝土高温后力学性能的研究进行了大量研究工作并取得了一定成果^[1-3]; Petzold^[4]研究了加热速度、达到的最高温度、在最高温度下的暴露时间对混凝土强度的影响; Mohamedbhai^[5]进行了混凝土升温、冷却速率对剩余强度的试验; 过镇海等^[6]研究了硅质骨料混凝土和钙质骨料混凝土高温后的相对强度。然而,混凝土暴露在高温下的强度取决于许多因素,如骨料类型、冷却方式、强度等级、高温后静置时间等^[7-8]。目前这些因素对混凝土高温后强度的影响作用还缺乏系统的研究。本文正是基于这种情况,通过试验研究了骨料类型、冷却方式、强度等级、静置时间等因素对混凝土高温后抗压强度的影响,为高温(火灾)后进行结构的安全

评估和鉴定、加固提供依据。

1 试验概况

1.1 试验方案与试件分组设计

本试验设计考虑 2 种骨料类型(硅质骨料花岗岩和钙质骨料石灰岩)、3 种强度等级(C20、C25、C30)、4 个受热温度(150、350、550、750 °C)、2 种冷却方式(自然冷却和喷水冷却)、7 个静置时间点(1、3、7、14、28、56、84 d),需制作高温试块 336 组(每组 3 块);另外需要常温试块 6 组进行对照。总共制作了 1 026 块 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块。混凝土配合比设计见表 1。C20、C25、C30 混凝土 28 d 后实测抗压强度分别为 22.2、27.8、33.3 MPa。

表 1 混凝土的材料配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

混凝土种类	配合比(水泥:水:砂:石)	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)				水灰比	砂率/%
		水泥	水	砂	石		
C20	1:0.60:1.81:2.96	376.77	226.06	681.95	1 115.24	0.60	0.38
C25	1:0.55:1.75:2.98	382.17	210.19	668.80	1 138.87	0.55	0.37
C30	1:0.48:1.51:2.92	406.25	195.00	611.61	1 187.14	0.48	0.34

1.2 试验装置

本试验采用中国矿业大学建筑结构与材料实验室研发的 GWD-005 型实验电炉,最高温度可达 1 100 °C。试验时设定升温速度为 10 °C/min,当达到预定温度后,恒温 90 min,取出试块,按试验安排进行“自然冷却”或“喷水冷却”,然后按照设计的静置时间来测量混凝土立方体试块的抗压强度。

测量混凝土立方体抗压强度,采用 YE-200 型液压力式压力试验机和 TATW-2000 岩石三轴试验机,其加载速度控制在 3~5 kN/s。

1.3 试验过程及试件外观特征

按照表 1 设计的混凝土配合比制作混凝土立方体试块,两种骨料都分别制成 C20、C25、C30 混凝土试块各 171 块,养护 28 d 后,取出放置两周,然后进行高温试验。混凝土试块经高温加热,分别从常温加热至 150、350、550、750 °C,然后自然冷却或喷水冷却,其外观特征发生一系列变化,见表 2。在 150、350、550 °C 时,两种骨料不同冷却方式的颜色接近,当达到 750 °C 时,喷水冷却的试块表面泛白,且硅质骨料泛白程度比较严重^[9]。

随着温度的升高,表面裂纹逐渐增多、连通、加宽,温度越高,宽度越大^[10-11],并且硅质骨料混凝土的裂纹明显多于钙质骨料混凝土^[12],这主要是因为

在加热温度段内,硅质骨料的热膨胀系数大于钙质骨料^[13]。同时,温度越高,混凝土越疏松。

表 2 高温后混凝土外观特征

Table 2 Apparent phenomena of concrete after high temperature

温度/°C	颜色变化	裂缝	缺角	疏松
150	同常温	几乎无	无	不
350	浅红色	细微,极少	无	不
550	红色	明显,细	个别	轻度
750	灰白色	多且宽,连通	各角都有,程度不等	严重,冷却后可用手碾碎

2 试验结果分析

2.1 温度对抗压强度的影响

这里仅以高温后静置 28 d 的 C25 混凝土为例,来说明采用钙质混凝土和硅质混凝土在不同冷却方式下抗压强度 f_{cu} 和温度 T 的关系,如图 1 所示。

研究表明,随着温度的升高,两种骨料混凝土抗压强度的总体变化趋势是下降的。对钙质骨料,在自然冷却和喷水冷却情况下,受高温后,混凝土强度均下降,在受热温度为 750 °C 时,在自然冷却条件下降低 63.6%,在喷水冷却条件下降低 41.9%。对硅质

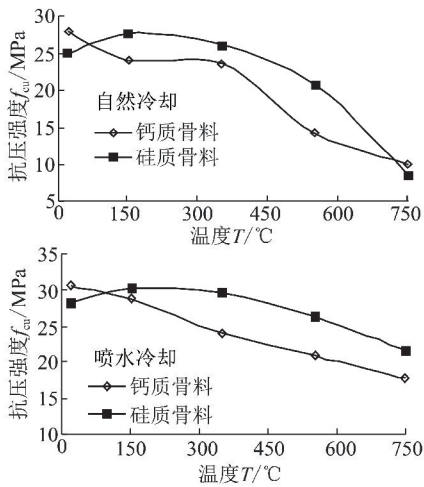


图 1 抗压强度与温度的关系

Fig. 1 Relation between compressive strength and temperature

骨料,在自然冷却和喷水冷却情况下,当受热温度低于 150°C 时,混凝土抗压强度有所提高,在自然冷却条件下提高 10.8%,在喷水冷却条件下提高 7.0%;当温度超过 150°C 时,混凝土抗压强度下降,在受热温度为 750°C 时,在自然冷却条件下降低 65.4%,在喷水冷却条件下降低 23.0%。

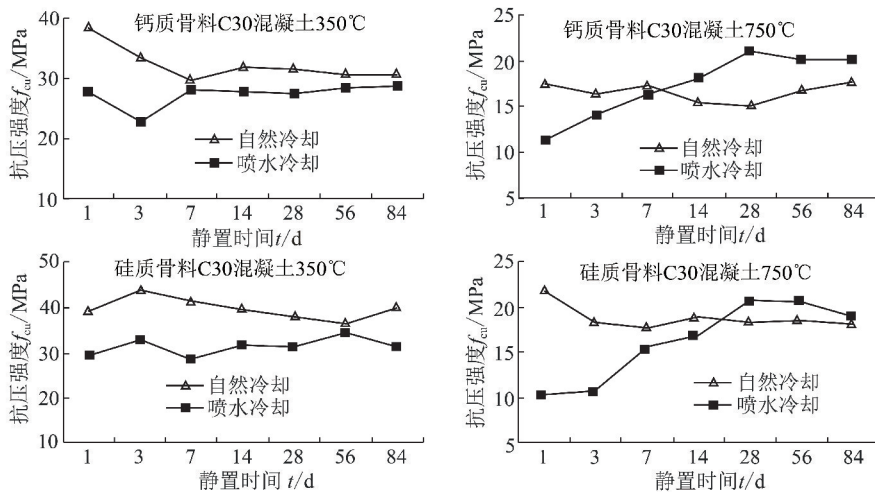


图 2 抗压强度与冷却方式的关系

Fig. 2 Relation between compressive strength and cooling methods

2.3 骨料类型对抗压强度的影响

试验表明,温度低于 550°C 时,硅质骨料混凝土抗压强度大于钙质骨料混凝土;超过 750°C 后,硅质骨料混凝土强度低于钙质骨料。以 C30 为例,温度为 150°C 、 350°C 、 550°C 、 750°C 时,自然冷却情况下,硅质骨料混凝土强度分别是钙质骨料混凝土强度的 1.201、1.389、1.231、0.973 倍;喷水冷却情况下,硅质骨料混凝土强度分别是钙质骨料混凝土强度的 1.045、1.014、1.313、0.952 倍。温度低于 350°C 时,抗压强

2.2 冷却方式对抗压强度的影响

总体来讲,在受热温度较低(350°C 以下)时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较小,在受热温度较高(550°C 以上)时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较大。这里仅列出钙质和硅质骨料 C30 混凝土在 350°C 和 750°C 时,不同冷却方式下的试验结果,如图 2 所示。由图 2 可以看出,总体来看,在自然冷却后,随着静置时间的增加,混凝土的强度呈下降趋势;在喷水冷却后,随着静置时间的增加,混凝土的强度呈上升趋势。由图 2 还可以看出,受热温度为 350°C 时,自然冷却混凝土试块的强度大于喷水冷却的强度;而受热温度为 750°C 时,在混凝土试件高温后静置的前期,自然冷却混凝土试块的强度大于喷水冷却的强度,但到静置后期,随着静置时间的延长,喷水冷却的混凝土立方体试块强度反而高于自然冷却的强度。造成这种现象的原因是,当混凝土受热温度较高,喷水冷却开始时造成混凝土外表面温度骤然降低,内外温度差产生的不均匀温度场对混凝土试块内部造成一定程度的损伤^[14],后期高温中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 分解形成的 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸收水分和空气中的 CO_2 ,进一步生成 CaCO_3 ,混凝土强度提高。

度降低比较缓慢,达到 550°C 后,强度降低加速,且硅质骨料混凝土的强度降低速率大于钙质骨料混凝土。C30 混凝土自然冷却情况下,钙质骨料混凝土在 150°C 、 350°C 、 550°C 、 750°C 时,其强度分别是常温情况下的 0.890、0.895、0.681、0.522 倍,硅质骨料分别是常温情况下的 0.970、1.128、0.760、0.460 倍;喷水冷却,钙质骨料混凝土在 150°C 、 350°C 、 550°C 、 750°C 时,其强度分别是常温情况下的 0.937、0.992、0.777、0.580 倍,硅质骨料混凝土分别是常温情况下的 0.736、0.756、

0.768、0.415倍。所以,温度越高,钙质骨料相对于硅质骨料的耐火优越性表现得越显著。

2.4 静置时间对抗压强度的影响

试验得到了混凝土试块在4个高温温度下的抗压强度 f_{cu} 与静置时间 T 的关系。试验表明,高温后的钙质骨料混凝土在自然冷却情况下其强度在3~7 d和28 d出现最小值。钙质骨料混凝土在低于350℃喷水冷却情况下,在28 d出现最小值,高于350℃时,在1~3 d时出现最小值;硅质骨料混凝土在自然冷却情况下其强度也在28 d左右出现最小值,喷水冷却情况,在1 d时出现最小值。对于两种骨料混凝土,喷水冷却比自然冷却早出现强度最小值。

2.5 强度等级对抗压强度的影响

试验得到了强度等级为C20、C25、C30的钙质骨料和硅质骨料混凝土,其高温后自然冷却的混凝土抗压强度与受热温度的关系。试验表明,粗骨类型相同但强度等级不同的混凝土高温后抗压强度变化趋势相似,其在同一高温下抗压强度相对值 $f_{cu,T}/f_{cu,0}$ (高温抗压强度与常温下抗压强度)相差一般都在15%之内,可认为当混凝土强度等级不高时,混凝土强度等级对高温后混凝土强度有一定影响。

3 结 论

(1)混凝土受高温(或火灾)作用后,其力学性能随着温度的升高总体呈下降趋势。总体来讲,在受热温度较低(350℃以下)时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较小;在受热温度较高(550℃以上)时,冷却方式对受热后混凝土强度的影响较大。

(2)骨料类型对高温后混凝土强度的影响不可忽略,温度低于550℃时,硅质骨料混凝土强度高于钙质骨料,但当超过750℃后,硅质骨料混凝土性能明显变差,强度迅速降低。所以,温度越高,钙质骨料相对于硅质骨料的耐火优越性表现的越明显。

(3)受火灾作用后,混凝土强度值随着时间的推移趋于稳定,无论在自然冷却情况还是在喷水冷却情况下,在某一静置时间,混凝土强度都会出现最小值。

(4)高温后不同强度等级混凝土抗压强度变化趋势相似,其在同一高温下的抗压强度相对值 $f_{cu,T}/f_{cu,0}$ 相差一般都控制在15%之内,所以高温后抗压强度变化规律受强度等级的影响不能忽略。

参考文献:

[1] 时旭东,过镇海. 高温下钢筋混凝土受力性能的试验研究[J].

土木工程学报,2000,33(6):6-16.

Shi Xudong, Guo Zhenhai. Investigation on the behavior of reinforced concrete at elevated temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 6-16.

[2] 贾艳东,田傲霜,张斌,等. 不同时间高温后混凝土性能的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(6):864-866.

Jia Yandong, Tian Aoshuang, Zhang Bin, et al. Experimental study on properties of concrete exposed to elevated temperatures at various heated time [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6): 864-866.

[3] 刘利先,吕龙,刘铮,等. 高温下及高温后混凝土的力学性能研究[J]. 建筑科学,2005,21(3):16-20.

Liu Lixian, Lü Long, Liu Zheng, et al. Investigation on the mechanical behavior of concrete at and after elevated temperature [J]. Architectural Science, 2005, 21(3): 16-20.

[4] Petzold A, Röhrs M. Concrete for high temperatures [J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33: 75-84.

[5] Mohamedbhai G T G. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of Heated concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1986, 38: 151-158.

[6] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[7] 吕天启,赵国藩,林志伸. 高温后静置混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(1):63-70.

Lü Tianqi, Zhao Guofan, Lin Zhishen, et al. Experimental study on mechanical properties of long standing concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 63-70.

[8] Chi Sun Poon, Chi Sing Lam. The effect of aggregate to cement ratio and types of aggregates on the properties of precast concrete blocks [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30: 283-289.

[9] Ghobarah A, El-Amoury T. Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(5): 408-416.

[10] Megget L M, Park R. Reinforced concrete exterior beam-column joints under seismic loading [J]. Newzealand Engineering, 1971, 7(4): 341-353.

[11] Abrams M S. Behavior of inorganic materials in fire [J]. Journal of the PCA Research and Development Lab, 1976.

[12] Parvin A, Granata P. Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints [J]. Composites: Part B: Engineering, 2000, 31: 499-509.

[13] Carette G G, Malhotra V M. Performance of dolostone and limestone concrete at sustained high temperature [A]. The Symposium on Temperature Effects on Concrete [C]. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 1985: 38-67.

[14] Hamrthy G A, Allen L W. Thermal properties of selected Masonry Unit concrete [J]. ACI Journal, Proceedings, 1973, 70(2): 132-142.

[15] L Simoes da Silva, Aldina Santiago, Paulo Vila Real. A component model for the behaviour of steel joints at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57: 1 169-1 195.