

高强混凝土高温性能研究进展

李海艳, 刘 刚

(石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043)

摘要:对近年来高强混凝土高温性能的研究成果进行了综述与分析,包括热工性、高温下和高温后力学性能以及高强高性能混凝土的爆裂性能。其中,高强混凝土热工性能方面的研究成果较少且研究结果离散性较大;高强混凝土力学性能方面的研究主要集中于抗压强度、抗拉强度、变形性能、弹性模量、泊松比、应力-应变关系等,而对高强混凝土结构、构件高温力学性能和温度场分析方面的研究较少;高强高性能混凝土爆裂方面的研究多集中于爆裂规律和爆裂抑制措施,对爆裂机理和微观结构的研究较少。本文分别从 3 个方面指出了高强混凝土高温性能研究中存在的问题和今后的研究方向,为深入研究高强混凝土的高温性能提供参考。

关键词:高强混凝土(HSC);高温;热工性能;力学性能;爆裂

中图分类号:TU528.31 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)01-0048-07

0 引言

混凝土高温性能主要包括热工性能和力学性能^[1],热工性能是进行结构构件内部温度场分析的基础。目前,对混凝土特别是高强混凝土热工性能的研究成果较少,仅有的研究成果离散性也较大,这在一定程度上影响了混凝土结构温度场理论分析的准确性。

混凝土高温力学性能对建筑防火设计及灾后结构构件的评估修复有重大意义,有关普通混凝土(NSC)高温力学性能的研究相对比较成熟,对高强混凝土(HSC)高温力学性能的研究还需进一步加强。依据试验方法的不同,力学性能又分为高温下和高温后两种形式,高温后试验先对试件进行升温处理,待其冷却后再进行加载试验,而高温下试验则先将试件加热到目标温度,然后在目标温度下进行加载试验,由于高温下试验难度较大,目前对高温后混凝土力学性能的研究较多。纤维的掺入可以有效改善混凝土高温性能,但不同的纤维类型和掺量对混凝土高温性能的改善效果不同,所以,纤维混凝土已成为目前研究的热点问题之一。

此外,与 NSC 相比,HSC 由于其致密的内部结构,高温下容易发生爆裂。混凝土爆裂具有突发性、不可预见性和严重破坏性。但到目前为止,爆裂机理还不明确,不同学者提出了不同的见解,其中“蒸汽压机理”与“热应力机理”得到了多数人的认同。爆裂的发生是多种因素共同作用的结果,爆裂成因和机理究竟如何还需通过大量试验进行研究。

1 混凝土热工性能

热传导系数(λ_c)、质量热容(C_c)、质量密度(ρ_c)和热膨胀系数(α_c)为混凝土热工性能对应的 4 个基本热工参数,其他参数可由基本热工参数导出。

热传导系数(λ_c)为单位时间内、单位温度梯度情况下,通过材料单位等温面积的热量,单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$,影响热传导系数 λ_c 的因素主要有温度、骨料类型、含水率、混凝土配合比等,硅质骨料混凝土的热传导系数比钙质骨料的略大^[2]。质量热容(C_c)又称比热容,定义为单位质量的材料,温度升高 $1^\circ C$ 需要吸收的

收稿日期:2015-03-30 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2016.01.09

基金项目:国家自然科学基金(51508346);河北省自然科学基金(E2015210020)

作者简介:李海艳(1984-),女,博士,讲师,主要从事高强混凝土高温性能方面的研究。E-mail:haiyan126@163.com

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.

热量,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,混凝土质量热容 C_c 受骨料种类的影响较小,普通混凝土比各种轻骨料混凝土的 C_c 稍大^[2]。质量密度(ρ_c)也称体积质量,为材料单位体积的质量,单位为 kg/m^3 ,混凝土的质量密度随温度变化不大,在构件温度场分析时,体积质量取为常值($2\,200 \sim 2\,400$) kg/m^3 ^[2]。线膨胀系数(α_c)指温度每变化 $1\,^\circ\text{C}$,材料长度变化的百分率,线膨胀系数仅影响材料和结构的应力和温度变形,与温度场分布无关,影响线膨胀系数的因素有混凝土配比、龄期、试件尺寸、加热速率、试件密实度和外部环境等,由于影响因素较多,为计算简便一般只考虑温度影响而给出关系式^[2]。

1989年,同济大学陆洲导^[3]对 NSC 的 4 个基本热工参数进行了测定。Kodur^[4]于 2003 年提出了高强混凝土质量密度(ρ_c)、质量热容(C_c)、热传导系数(λ_c)、线膨胀系数(α_c)和质量损失随温度变化的关系式。V Kodur^[5]试验发现高强混凝土的热工参数低于自密实混凝土,并提出了热工参数的简化计算式,为混凝土结构防火分析提供了参考。EN1992-1-2(欧洲防火设计规程 2004)给出了被研究人员广泛采用的混凝土热工参数值。鞠杨,刘红彬等^[6]试验测定了钢纤维体积掺量分别为 0、1%、2%和 3%的活性粉末混凝土(RPC)各热工参数值,并建立了 ρ_c 、 λ_c 、 α_c 、 C_c 和 α_l 以钢纤维体积率和温度为参数的计算公式,与普通混凝土相比,RPC 的热扩散系数偏高,质量损失率、热传导系数和比热容偏低,线膨胀系数则基本持平,说明 RPC 热扩散性能较好,但传导和贮存热量的能力不高。郑文忠,王睿^[7]等采用热线法测定了 4 种不同体积纤维掺量的 RPC 在常温、 $100 \sim 900\,^\circ\text{C}$ 下的导热系数,拟合发现 RPC 导热系数随温度升高而降低,且高于普通混凝土。

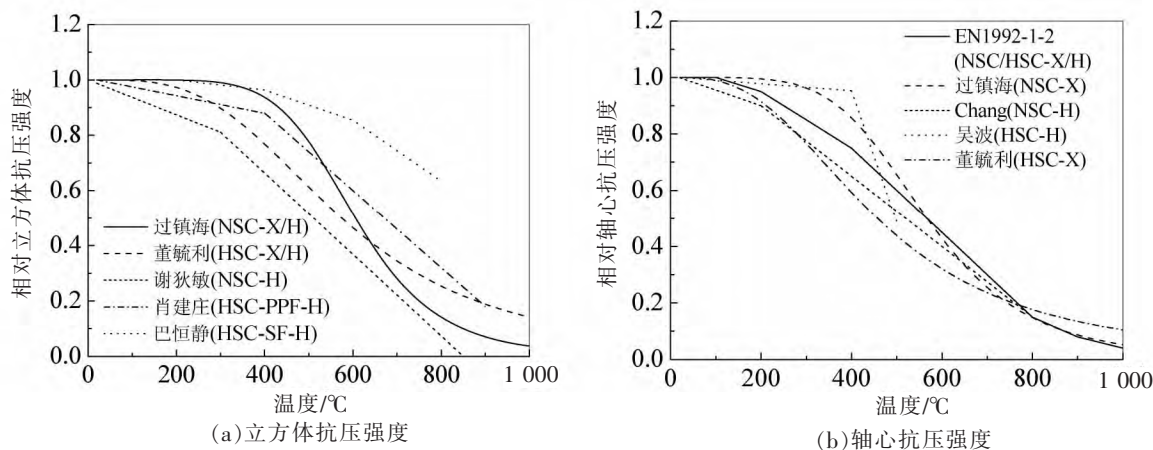
综合上述分析可知,针对混凝土热工性能的研究成果较少,普通混凝土热工参数的取值比较统一,但高强混凝土热工参数的取值离散性较大,为推进混凝土温度场理论分析的发展,应加强高强混凝土热工性能的试验研究工作。

2 高强混凝土高温力学性能

混凝土高温力学性能可以用各项强度、变形、弹模、应力-应变关系等来表达。虽然试验时所选用的强度等级、试验方法、试件尺寸和升降温机制不同,但试验结果总体变化规律相似。

2.1 受压性能

在混凝土受压力学性能指标中,抗压强度是最基本的。目前,对不同强度等级混凝土的立方体抗压强度^[8-12]和轴心抗压强度^[11-15]研究较多,本文通过分类汇总绘制出了不同类型混凝土抗压强度随温度的变化曲线如图 1 所示。



NSC为普通混凝土;HSC为高强混凝土;X为高温下;H为高温后;PPF为聚丙烯纤维;SF为钢纤维

图1 混凝土抗压强度随温度变化

对图 1 进行分析可知:随温度的升高,不同强度等级的混凝土抗压强度均呈下降趋势,且轴心抗压强度曲线衰退速率快于立方体抗压强度;无论是立方体抗压强度还是轴心抗压强度,高温后强度均低于高温下强度,因为在降温过程中,形成了与升温过程相反的温度梯度,强度进一步损失^[16];HSC 与 NSC 抗

压强度衰退速率以 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为界,当温度低于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,NSC 强度衰退速率较快,高于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,HSC 强度损失较快,因为 HSC 内部结构较 NSC 更为致密,当温度较高时所受高温损伤自然更大,所以强度下降更快^[17];掺入钢纤维对 NSC 和 HSC 高温力学性能均有较大提高^[18-19],但掺入聚丙烯纤维对混凝土高温力学性能是否有提高则结论不一,孙伟^[20]指出聚丙烯纤维对混凝土残余抗压强度有明显提高作用,Poon^[21]则认为聚丙烯纤维的掺入反而降低了混凝土的高温力学性能,文献^[22-23]认为聚丙烯纤维对混凝土高温力学性能的影响不大。

此外,混凝土高温力学性能与水灰比、骨料类型、冷却制度等因素也有较大关系。水灰比与混凝土高温强度成反比关系^[24],轻骨料混凝土的高温强度最高,钙质骨料混凝土次之,硅质骨料混凝土最低^[1,25],泡水冷却对混凝土抗压强度的损伤最大,洒水不少于 30 min 与泡水冷却的效果相当^[26],因为泡水冷却在混凝土内外形成了巨大的温差变化,从而产生了较大的收缩裂纹,强度损失也相应较大。

2.2 受拉性能

抗拉强度和抗折强度可有效反应混凝土的受拉性能。本文对混凝土高温受拉性能研究结果进行了整理和汇总,不同强度等级混凝土的抗拉强度^[11,13,14,27,28]和抗折强度^[29-31]随温度变化曲线如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 中可以看出:抗折强度和抗拉强度均随温度的升高大致呈线性规律降低,相对于抗压强度而言,抗折和抗拉强度下降速率更快,因为高温作用使混凝土内部出现裂纹从而导致力学性能出现衰退,而裂纹对受拉性能的影响大于受压性能,所以抗拉强度衰退速率快^[32-34];NSC 和 HSC 抗拉强度随温度的变化基本相同,EN1992-1-2 曲线位于最下面,说明具有较大的安全储备。

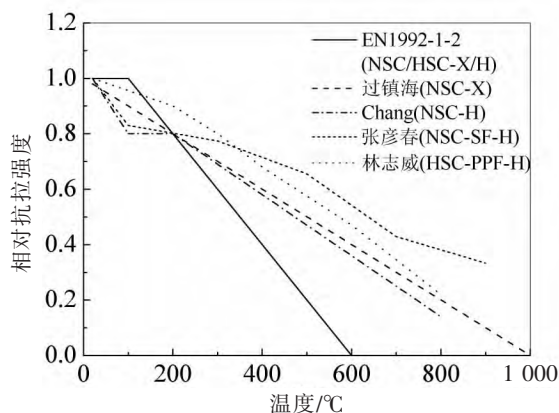


图 2 混凝土抗拉强度随温度变化

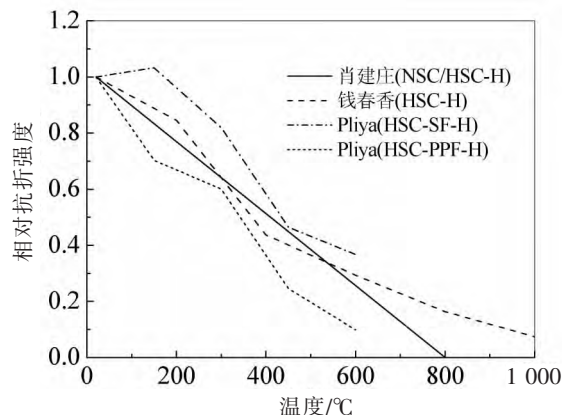


图 3 混凝土抗折强度随温度变化

纤维对抗拉和抗折强度的增强效果明显大于抗压强度。Pliya 等试验研究了钢纤维和聚丙烯纤维单掺及混掺对 HSC 高温后抗折强度的影响,发现随经历温度的升高,3 种混凝土抗折强度均不断降低,且经较高温度作用后,混掺两种纤维的 HSC 抗折强度低于单掺钢纤维的 HSC^[31]。Chen 等试验研究了单掺及混掺钢纤维和聚丙烯纤维对 HSC 劈裂抗拉强度的影响,发现钢纤维和聚丙烯纤维混掺对高温后 HSC 劈裂强度提高明显^[22]。鞠丽艳、张雄试验发现混掺钢纤维和聚丙烯纤维对高温后 HSC 抗折强度和劈裂抗拉强度的提高幅度大于抗压强度^[35]。由此可见,钢纤维在提高抗压性能的同时,对混凝土高温抗拉性能也有较大提高作用,而聚丙烯纤维对抗拉性能的提高效果明显优于抗压性能^[36-37]。

2.3 变形性能

本文通过峰值应变来研究混凝土的变形性能,所谓峰值应变即为轴心抗压强度所对应的应变值。不同强度等级的混凝土峰值应变随温度变化情况见图 4。由图 4 可知,NSC 和 HSC 峰值应变均随温度的升高迅速增大,HSC 峰值应变增速高于 NSC^[11-12,14]。文献^[21]试验研究发现,经历较高温度作用后,HSC 峰值应变为其常温峰值应变的 2~3 倍,钢纤维的掺入使得 HSC 高温峰值应变取得了明显提高,而掺入聚丙烯纤维的 HSC 峰值应变基本无变化。肖建庄^[38]对同一配比的混凝土试件进行加热并研究其变形性能,发现混凝土横向变形能力随经历的温度升高不断增大,且峰值拉应变普遍小于峰值压应变。

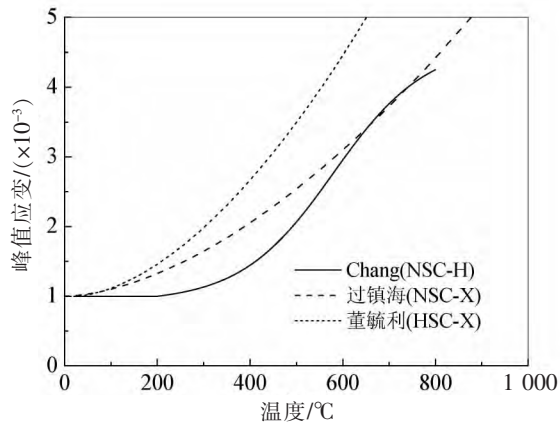


图 4 混凝土峰值应变随温度变化

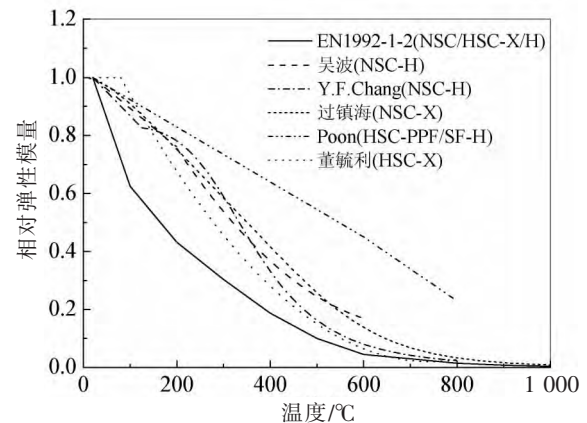


图 5 混凝土弹性模量随温度变化

2.4 弹性模量与泊松比

几种典型混凝土相对弹性模量随温度变化曲线如图 5 所示。由图可知:与抗压强度变化规律相似, NSC 与 HSC 的弹性模量均随温度升高快速降低,且 HSC 下降速率快于 NSC^[12,14];混掺碳纤维和聚丙烯纤维可以提高混凝土高温后弹性模量^[21]。Pliya^[31]认为,钢纤维能有效提高混凝土弹性模量,聚丙烯纤维对弹性模量无明显提高作用;EN1992-1-2 曲线位于最下面,安全储备较大。

目前针对混凝土泊松比与温度间关系的研究较少。吴波等^[15,39]研究了 NSC 和 HSC 泊松比随温度的变化规律,发现二者均随温度的升高逐渐降低,临界温度分别为 300 °C 和 400 °C。肖建庄等发现对应于 0.5 倍峰值应力的泊松比随温度的升高不断降低,提出了该泊松比与温度间的关系式^[38]。

2.5 应力-应变关系

混凝土高温下(后)受压应力-应变关系是火灾下(后)结构构件力学行为分析的基础。对 NSC 和 HSC 高温应力-应变关系研究发现^[8,15,40-41],随温度的升高,NSC 和 HSC 应力-应变曲线渐趋扁平,峰值点向右向下明显偏移,经历温度高于 400 °C 时,HSC 应力-应变曲线下降段比 NSC 曲线陡,力学性能的衰退速率也远大于 NSC。针对不同强度等级的混凝土,国内外学者提出了不同的方程表达式^[42-44],较典型的方程见表 1 所示。

表 1 典型混凝土高温受压本构方程

提出者	混凝土等级	试验方法	方程形式
EN1992-1-2:2004	NSC	高温下/高温后	$y = \begin{cases} \frac{3x}{(x+2)^3} & x \leq 1 \\ \text{线性或非线性} & x \geq 1 \end{cases}$
过镇海	NSC	高温下/高温后	$y = \begin{cases} ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{a(x-1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases}$
Lie T T	NSC	高温下/高温后	$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ 1 - (\frac{x-1}{3})^2 & x \geq 1 \end{cases}$
吴波	NSC	高温后	$y = \begin{cases} 0.628x + 1.741x^2 - 1.371x^3 & x \leq 1 \\ \frac{0.674x - 0.217x^2}{1 - 1.326x + 0.783x^2} & x \geq 1 \end{cases}$
董毓利	HSC	高温下	$y = xe^{\frac{1-x^2}{2}}$
吴波	HSC	高温后	$y = \begin{cases} 0.724x + 1.552x^2 - 1.276x^3 & 0 \leq x \leq 1 \\ -2.535 + 8.448x - 6.291x^2 + 1.378x^3 & 1 < x \leq 2 \\ -22.651 + 32.252x - 15.008x^2 + 2.3x^3 & 2 < x \leq 2.5 \end{cases}$

注: NSC-普通混凝土; HSC-高强混凝土; $x = \epsilon/\epsilon_{cT}$, ϵ_{cT} 为 T 作用后混凝土峰值应变; $y = \sigma/f_{cT}$, f_{cT} 为 T 作用后混凝土抗压强度。

3 高强混凝土的高温爆裂

HSC 因其优异的使用性、工作性和耐久性被广泛应用于工程结构。与 NSC 相比, HSC 内部结构更为致密, 因而在高温作用下更容易发生爆裂。柳献^[45], 吴波^[15]等试验观察到了 HSC 的高温爆裂。文献^[46]认为影响混凝土爆裂的最重要的两个因素为含湿量和强度等级, 存在一个控制混凝土爆裂发生与否的强度等级界限值, 当强度等级高于此值时, 爆裂发生几率随湿含量的提高而增大^[47]。Kodur^[48]认为导致 HSC 发生高温爆裂的根源在于其较低的抗拉强度和低孔隙率, 提高保护层厚度和掺入聚丙烯纤维可以提高 HSC 的抗爆裂能力。Han^[49]等通过试验研究发现, 聚丙烯纤维体积掺量 0.05% 时可以防止爆裂的发生, 金属纤维抑制爆裂效果较好, 但碳纤维和玻璃纤维抑制爆裂作用不大。Kalifa^[50]研究发现 HSC 较大的内部孔压力增大了其在高温下爆裂发生的可能性。钱春香^[51]认为 HSC 中掺入絮状单丝聚丙烯纤维、网状聚丙烯纤维、植物纤维及聚合物乳液对爆裂均有一定改善作用, 相对而言, 抑制爆裂效果最好的为小直径的单丝聚丙烯纤维。吴波^[52]试验研究了防火涂料厚度与 HSC 高温爆裂性能间的关系, 发现防火涂料厚度为 10 mm 时, 试块爆裂剧烈; 厚度为 20 mm 时, 试块无爆裂发生; 与其他涂料相比, 非膨胀型隧道防火涂料抑制爆裂效果较好。中国矿业大学刘红彬、鞠杨等^[53]利用自行设计的加温装置对钢纤维体积掺量为 0%、1% 和 2% 的 RPC 进行爆裂行为试验。发现当试件中心温度为 250 °C 左右时, RPC 发生爆裂, 钢纤维的掺入对 RPC 爆裂温度的提高效果不明显, 但对试件爆裂破坏程度有较好的改善作用, 研究中仅考虑了钢纤维掺量变化对爆裂的影响, 未考虑湿含量和升温速度等因素对 RPC 爆裂的影响, 未对 RPC 爆裂机理和防爆裂措施进行研究。北京交通大学朋改非教授及其团队^[54]进行了 RPC 材料高温下爆裂性能试验研究, 结果表明, 湿含量和水胶比是 RPC 高温爆裂的重要影响因素, 但研究中未考虑渗透性和试件尺寸这两个重要因素对 RPC 爆裂的影响, 也未对 RPC 的爆裂机理进行深入探讨。

由上述分析可知, 现有的对高强混凝土爆裂性能的研究都有一定局限性, 且都是针对试块在电炉升温下的爆裂情况, 与实际火灾作用有一定差别。此外, 爆裂影响因素和爆裂机理非常复杂, 要摸清 HSC 的高温爆裂性能, 还需通过试验进行大量深入研究。

4 结论与展望

通过对已有研究成果的分析、归纳, 总结了混凝土的高温力学性能研究现状和 HSC 的高温爆裂性能。混凝土高温力学性能随温度的升高逐渐衰退, 高强混凝土强度衰退速率大于普通混凝土; 钢纤维的掺入可明显提高混凝土高温力学性能, 聚丙烯纤维对力学性能的影响效果尚不确定; 与普通混凝土相比, 高强混凝土致密的内部结构和较低的孔隙率使得其在高温环境下容易发生爆裂, 金属纤维和聚丙烯纤维的掺入均可有效抑制爆裂的发生。综合当前的研究现状, 应从以下几方面开展混凝土高温性能方面的研究工作:

(1) 应加强超高强混凝土热工性能的试验研究工作, 为混凝土结构温度场分析提供更加丰富的数据支持。对高强混凝土的高温力学性能, 特别是超高强混凝土的力学性能进行更全面的试验研究工作, 建立混凝土高温拉压本构关系。对不同纤维类型和掺量的混凝土热工性能和高温力学性能进行研究。

(2) 进一步研究高强混凝土的高温爆裂机理, 对混凝土孔结构特征, 物相组成和微观照片等微观结构进行研究, 建立混凝土微观结构与宏观力学性能及高温爆裂性能间的关系, 为混凝土抗火抗爆裂措施的制定提供理论依据。

(3) 进行高强混凝土结构、构件的明火试验和温度场分析, 为防火设计建议的提出提供依据。

参 考 文 献

[1] 张智梅, 叶志明, 刘涛. 钢筋混凝土结构抗火研究进展[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 128-135.

[2] 李海艳. 活性粉末混凝土高温爆裂及高温后力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[3] 陆洲导. 钢筋混凝土梁对火灾反应的分析[D]. 上海: 同济大学工程结构研究所, 1989.

[4] Kodur V K R, Sultan M A. Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete[J]. Journal of Ma-

- terials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 101-107.
- [5] Kodur V, Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(6): 793-801.
- [6] 鞠杨, 刘红彬, 刘金慧, 等. 活性粉末混凝土热物理性质的研究[J]. 中国科学:技术科学, 2011, 41(12): 1584-1605.
- [7] 郑文忠, 王睿, 王英. 活性粉末混凝土热工参数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 107-115.
- [8] 谢狄敏, 钱在兹. 高温(明火)作用后混凝土强度与变形试验研究[J]. 工程力学, 1996(增刊): 54-58.
- [9] 肖建庄, 王平. 掺聚丙烯纤维高性能混凝土高温后的抗压性能[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(3): 81-85.
- [10] 巴恒静, 杨少伟. 钢纤维混凝土高温应力损伤性能[J]. 混凝土, 2009(1): 15-17.
- [11] 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: 73-76.
- [12] 胡海涛, 董毓利. 高温时高强混凝土强度和变形的试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 44-47.
- [13] European Committee for Standardization. BS EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [14] Chang Y F, Chen Y H, Sheu M S, Yao G C. Residual Stress-strain Relationship for Concrete after Exposure to High Temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1999-2005.
- [15] 吴波, 袁杰, 王光远. 高温后高强混凝土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 8-12.
- [16] 王珍, 张泽江, 黄涛. 高温中及冷却后高性能混凝土残余抗压强度试验[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(5): 78-81.
- [17] Chan Y N, Peng G F, Anson M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 23-27.
- [18] Song P S, Wang S H. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(9): 669-673.
- [19] 刘沐宇, 程龙, 丁庆军, 等. 不同混杂纤维掺量混凝土高温后的力学性能[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(4): 123-125.
- [20] Chan Y N, Luo X, Sun W. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(2): 247-251.
- [21] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2215-2222.
- [22] Chen B, Liu J Y. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1065-1069.
- [23] Xiao J Z, Falkner H. On Residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 115-121.
- [24] Phan L T, Carino N J. Effects of test conditions and mixture proportions on behaviour of high-strength concrete exposed to high temperatures[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(1): 54-66.
- [25] 李卫, 过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 8-16.
- [26] 陈茜, 朋改非. 不同冷却制度下普强高性能混凝土的残余力学性能与渗透性的探讨[J]. 江苏建材, 2008(1): 24-26.
- [27] 张彦春, 胡晓波, 白成彬. 钢纤维混凝土高温后力学强度研究[J]. 混凝土, 2001(9): 50-53.
- [28] 林志威. PPF 高性能混凝土高温后性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [29] 肖建庄, 任红梅, 王平. 高性能混凝土高温后残余抗折强度研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(5): 80-85.
- [30] Li M, Qian C X, Sun W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1001-1005.
- [31] Pliya P, Beaucour A-L, Noumowé A. Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1926-1934.
- [32] Husem M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 155-163.
- [33] Cülfik M S, Özturan T. Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(8): 1486-1493.
- [34] Khalig W, Kodur V K R. Effect of high temperature on tensile strength of different types of high-strength concrete[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4): 394-402.

- [35]鞠丽艳, 张雄. 混杂纤维对高性能混凝土高温性能的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 89-92.
- [36]鞠丽艳, 张雄. 聚丙烯纤维对高性能混凝土高温性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(1): 25-28.
- [37]刘沐宇, 林志威, 丁庆军, 等. 不同 PPF 掺量的高性能混凝土高温后性能研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2007, 24(2): 14-17.
- [38]Xiao J Z, Xie M, Zhang Ch. Residual compressive behaviour of pre-heated high-performance concrete with blast-furnace-slag[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 91-98.
- [39]吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后混凝土变形特性及本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 42-49.
- [40]Youssef M A, Moftah M. General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2618-2634.
- [41]Lau A, Anson M. Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1698-1707.
- [42]Li L-Y, Purkiss J. Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(7): 669-686.
- [43]He Z J, Song Y P. Failure mode and constitutive model of plain high-strength high-performance concrete under biaxial compression after exposure to high temperatures[J]. Acta Mechanica Sinica, 2008, 21(2): 149-159.
- [44]过镇海. 混凝土的强度和本构关系—原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 33-38.
- [45]柳献, 袁勇, 叶光, Geert De Schutter. 高性能混凝土高温爆裂的机理探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 61-68.
- [46]朋改非, 陈延年, Mike Anson. 高性能硅灰混凝土的高温爆裂与抗火性[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 193-198.
- [47]朋改非, 段旭杰, 黄广华. 钢纤维对高性能混凝土高温爆裂行为的抑制作用[C]//“全国特种混凝土技术及工程应用”学术交流会. 西安: 中国土木工程学会, 2008: 566-571.
- [48]Kodur V K R. Spalling in high strength concrete exposed to fire-concerns, causes, critical parameters and cures[C]// Structures Congress 2000: Advanced Technology in Structural Engineering, 2004, 103.
- [49]Han C-G, Hwang Y-S, Yangb S-H, Gowripalan N. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(9): 1747-1753.
- [50]Kalifa P, Chéné G, Gallé C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to micro-structure[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1487-1499.
- [51]钱春香, 游有鲲. 抑制高强混凝土受火爆裂的措施[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(7): 846-852.
- [52]吴波, 周鹏. 表面设置防火涂料高强混凝土的高温爆裂[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 406-412.
- [53]刘红彬, 李康乐, 鞠杨. 钢纤维活性粉末混凝土的高温爆裂试验研究[J]. 混凝土, 2010(8): 6-8.
- [54]陈强. 高温对活性粉末混凝土高温爆裂行为和力学性能的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

Progress of Research on High-temperature Performance of High Strength Concrete

Li Haiyan, Liu Gang

(Engineering Mechanics Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The recent researches on high-temperature properties of high strength concrete are summarized and analyzed, including the thermal performance, mechanical properties and the spalling behavior. There are few studies on the thermal performance of high strength concrete and the results of large discrete. Research on the mechanical properties of high strength concrete has been focused on the compressive properties, tension properties, deformation properties, elastic modulus, Poisson's ratio, stress-strain relationship, etc., but few studies have been performed on the mechanical properties and temperature field of high strength concrete structures and members. A lot of researches on the spalling law and spalling inhibition of high strength concrete have been carried out, but the studies on the spalling mechanism and microstructure are not enough. In this paper, the existing problems and future research directions of the high temperature-properties of high strength concrete are pointed out from three aspects, which provide a reference for further study on high-temperature properties of high strength concrete.

Key words: High strength concrete (HSC); High temperature; Thermal performance; Mechanical properties; Spalling