

高温后高强高性能混凝土双轴压力学性能

何振军¹⁾ 宋玉普

(中国大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要 利用大型静动真三轴试验机, 进行了常温 20°C 以及 200°C ~ 600°C 6 个温度等级高温后高强高性能混凝土在 7 种应力比双轴压应力状态下的强度与变形试验. 测得了双轴主压方向的静态强度、峰值应变与应力应变曲线, 剖析了温度和应力比对单、双轴压强度与峰值应变发展趋势的影响规律性以及试件破坏形态. 试验结果表明: 随温度的升高, 高强高性能混凝土的单轴抗压强度并不一定降低; 双轴压强度相对于单轴抗压强度的提高倍数取决于应力比、不同温度等级后的高强高性能混凝土“脆硬性”. 提出了带有温度和应力比参数的 Kupfer-Gerstle 破坏准则公式.

关键词 高强高性能混凝土, 高温, 应力比, 力学性能, 单双轴压强度, 应力应变曲线

中图分类号: TU528.31, TU317+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2008)03-0364-11

引 言

混凝土成为主导工程结构材料已近一个世纪. 混凝土作为最广泛使用的工程结构材料正朝着高性能、高强、和良好的可施工性发展. 具有高强度或具有良好施工性的高性能混凝土正逐渐取代现有的普通混凝土. 高性能混凝土通常被定义为具有高强度、高流动性、高耐久性的混凝土, 或者具有其中之一性能; 而且高性能减水剂和超细矿物混合物是其必不可少的组成部分. 和普通混凝土相比, 高强混凝土致密的内部微观结构使其具有高强度和较低的渗透性, 以致使其有相对较低变形能力或者说有更高的“脆硬性”. 但是, 高强混凝土这种致密的微观结构在高温 (火灾) 的情况下呈现出极其的不利性. 最近的相关试验结果表明: 高强混凝土在高温环境下, 与普通混凝土相比, 其力学性能呈现出极大不同^[1,2]: 高强混凝土在遭受快速升温, 例如火灾情况下, 极易胀裂甚至爆裂^[3,4]. 因此, 高强高性能混凝土在火灾情况下最为关注之一就是其防火性能. 众所周知, 目前钢筋混凝土结构分析和设计方法仍基于混凝土材料最基本的单轴材料特性, 但是在混凝土结构中, 真正意义上的单轴情况极为少见, 实际上更多的是在二轴和三轴应力状态下的混凝土结构, 例如: 建筑物的构件与结点、核反应堆压力容器、水

坝、海洋工程结构等等. 因此, 必须通过试验研究, 建立混凝土多轴强度准则和本构关系, 为混凝土工程设计和分析提供有效的试验资料. 同时, 伴随着计算机和有限元方法在混凝土结构中的广泛应用以及高强高性能混凝土在工程中的普遍使用, 关于高强高性能混凝土多轴应力状态下强度与变形的试验研究及基于多轴力学性能的钢筋混凝土结构非线性分析和设计显得尤为重要和紧迫, 已经成为国内外学者十分关注的课题. 早在 20 世纪 70 年代, 一些学者^[5,6]为了解决核电站反应堆压力容器等设计就进行过普通混凝土在多轴应力状态下的试验研究; 然而截至目前为止, 大多数研究^[7]仍只是局限于高性能或高强混凝土在单轴应力状态下或普通混凝土在多轴压下的力学性能研究, 而关于高强高性能混凝土在多轴应力状态下的力学性能研究极少, 并且这些研究中的试验绝大多数是对圆柱体试块进行常规三轴压试验. 例如: Lu 等^[8]研究了高强混凝土和钢纤维高强混凝土在单轴和三轴压下的力学性能, 试验采用的是 100 mm×200 mm 和 100 mm×150 mm 圆柱体试件, 减摩措施为二层 0.125 mm 厚聚四氟乙烯加一层 0.015 mm 厚的铝箔. Mahboubi 等^[9]阐述了试件的龄期、水灰比、火山灰含量、定侧压力在常规三轴压应力状态下对塑性混凝土剪切强度与混凝土渗透性的影响, 采用的方法是轴向施加主压

2007-04-29 收到第 1 稿, 2008-03-21 收到修改稿.

1) E-mail: zjhe0101@yahoo.com.cn

应力, 侧向静水压应力由圆柱形压力壳施加。梁伟等^[10]研究了高强混凝土在三轴压下的强度性能, 使用的是 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体。在双轴压应力状态和高温恶劣环境下, 高强高性能混凝土强度与变形性能如何应被考虑。另外, 关于高温后高性能或高强混凝土的试验研究目前也仅仅局限在单轴应力状态下的力学性能研究, 而高温后高强高性能混凝土在多轴应力状态下的力学性能还未见报导。例如: Thienel^[11]认为在双轴应力下普通混凝土强度降低起点温度是由混凝土组成材料决定的, 尤其是粗骨料最大粒径起到至关重要的作用, 而粗骨料的含量与水灰比几乎是没什么影响。Luo 等^[12]阐述了高强混凝土在遭受高温作用后, 其强度劣化比普通混凝土更严重。Chan 等^[13]指出了 400°C 到 800°C 之间的温度等级对于混凝土强度损失最大。因此, 针对高温这一恶劣因素对高强高性能混凝土在双轴压应力状态下强度和变形的影响研究是目前当务之急。本文阐述常温 20°C 以及 200°C~600°C 6 个温度等级高温后高强高性能混凝土在 7 种应力比

$\alpha = \sigma_2 : \sigma_3 = -0.00 : -1, -0.20 : -1, -0.30 : -1, -0.40 : -1, -0.50 : -1, -0.75 : -1, -1.00 : -1$ 双轴压应力状态下的强度和变形性能; 双轴压试验所采用试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体。本文可以对高强高性能混凝土结构在常温状态下以及高温 (例如火灾) 后抗火设计、损伤评估和维修以及寿命评估提供试验资料、相关公式和力学性能。

1 试验材料和方法

1.1 原材料与高强高性能混凝土配合比

本次试验所采用的水泥是大连小野田硅酸盐水泥, 其型号为 P-I52.5 R, 其 28 天抗压强度大于 52.5 MPa (GB175-1999)^[14]; 矿物混合物为一级粉煤灰, 粗骨料为碎石, 其粒径范围为 5~20 mm; 细骨料为河砂, 其细度模数为 2.7, 水为饮用水。表 1 为高强高性能混凝土每立方米的配合比及主要性能指标。 f_c 为常温时, 100 mm×100 mm×100 mm 立方体单轴压减摩强度, 等于 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体压强度。

表 1 高强高性能混凝土的配合比及主要性能指标

Table 1 Mix proportions and major parameters of HSHPC

	Water-cementitious ratio	Water/kg·m ⁻³	Cement/kg·m ⁻³	Fly ash/kg·m ⁻³	Sand/kg·m ⁻³	Coarse aggregate/kg·m ⁻³	Superplasticizer/kg·m ⁻³	Slump/cm	Compressive strength/ f_c /MPa
HSHPC	0.31	175	470	94.52	615.77	1 094.71	6.77	24	60.16

1.2 试件及试验方法

1.2.1 试件浇注和养护

以上 3 种材料 (水泥、碎石、河砂) 和葫芦岛电厂生产的一级粉煤灰用搅拌机均匀搅拌 3 分钟, 然后把已搅拌均匀带有 SiKa^(R)NF-III 高性能减水剂的配比水缓慢地加入, 约 1 分钟, 然后再搅拌 2~3 分钟^[15], 最后将拌合料置入钢模中, 在振动台上轻微振动成型, 所有试件 24 小时后拆模, 然后根据“混凝土长期和耐久性试验方法” GBJ82-85^[16] 在温度为 20°C±3°C 和相对湿度 95% 的标准条件下养护 28 天, 然后在室内存放约 1 年。

高强高性能混凝土试件尺寸类型分为 3 种: 100 mm×100 mm×100 mm 立方体, 150 mm×150 mm×150 mm 立方体, 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱体。100 mm 立方体用来量测二轴压强度和应变, 对于每批混凝土试件, 浇注 6 个 150 mm 标准立方体试件和 150 mm×150 mm×300 mm 棱柱

体试件分别来确定混凝土强度等级和棱柱体强度。

1.2.2 试验设备和试验方法

本文高温和双轴压试验分别是在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室的箱式电阻高温炉和大型混凝土静动真三轴试验机上进行的。单双轴压高温试件尺寸是 100 mm 立方体。对于每个应力比, 至少高温 6 个试件。本次试验采用 6 个温度等级: 20°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C。升温机制为: 升温速率为 10°C/min, 达到设计的温度等级后恒温 6 小时 (使试块中心温度达到设计值, 使温度梯度减小), 然后打开炉门炉冷 1 小时, 然后取出试件置于室内, 令其自然冷却至室温。24 小时之后, 在三轴试验机上进行单、双轴压试验。在本次试验中, 在放入电阻高温炉前, 所有试件表面是干燥的。在 200°C~600°C 高温等级范围内, 整个高温过程没有发生爆裂。

双轴力学试验所使用的三轴试验机是大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室设计的,并能够按任意应力比进行三轴方向独立的拉、压,拉力能达到 50 吨,压力能达到 250 吨. 整个试验过程,必须确保每个立方体试块具有均匀一致的尺寸. 每个主应力作用方向必须垂直于试件表面,所有三轴试验加载试块在以主应力 σ_3 方向的 0.3~0.5 MPa/s 施加压力,并且在试块和加载板之间带有减摩擦垫层(三层黄油加三层塑料薄膜). 加载机制为: 每一个温

度等级 (20°C (常温), 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C) 都对应 7 种应力比 $\alpha = \sigma_2 : \sigma_3 = -0.00 : -1, -0.20 : -1, -0.30 : -1, -0.40 : -1, -0.50 : -1, -0.75 : -1, -1.00 : -1$, 主压应力与应变的表达方式为: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ (压为负, 拉为正), 每个应力比至少试验 3 个试块, 删除离散值, 取其平均值. 图 1 为试件在三轴试验机上, 单双轴主压应力加载方向和形态.

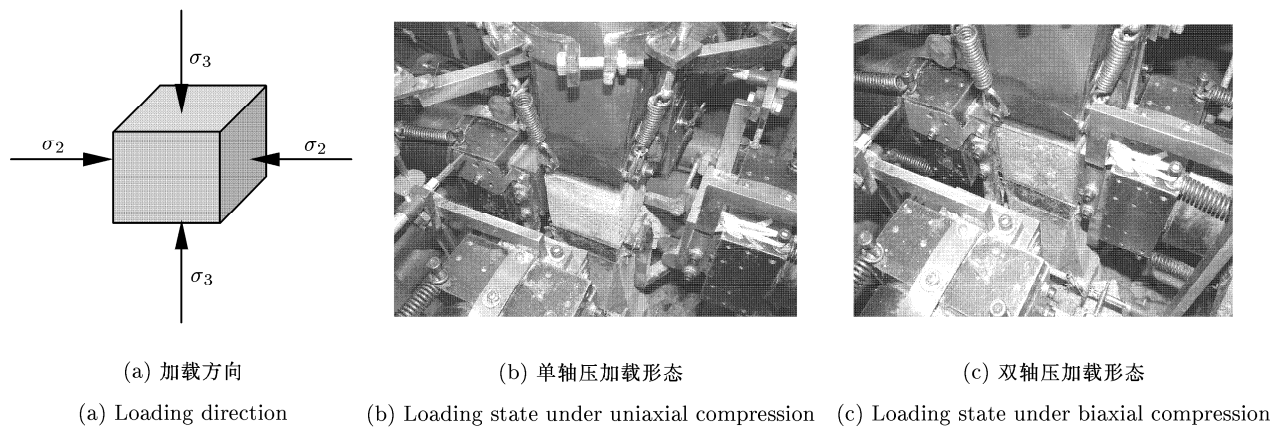


图 1 试件在三轴试验机上单双轴压加载方向和形态

Fig.1 Loading direction and state of specimens under uniaxial and biaxial compression in triaxial experimental machine

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

表 2 给出了高温后高强高性能混凝土在不同温

度等级和不同应力比下双轴压强度与峰值应变值. ($\varepsilon_{2p}, \varepsilon_{3p}$ 分别为峰值应力 σ_2, σ_3 对应的主压峰值应变.)

表 2 高强高性能混凝土在不同温度等级和不同应力比下双轴压强度与峰值应变值
Table 2 The biaxial compressive strength and strain index of plain HSHPC under various stress ratios after different temperature levels

High temperature levels/°C	Stress ratio $\alpha = \sigma_2 : \sigma_3$	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	$\varepsilon_{2p}/10^{-3}$	$\varepsilon_{3p}/10^{-3}$
20	0.00 : -1		-60.16		-2.13
	-0.20 : -1	-13.52	-67.58	0.15	-2.76
	-0.30 : -1	-20.99	-69.97	-0.36	-2.65
	-0.40 : -1	-30.33	-75.83	-0.57	-2.51
	-0.50 : -1	-36.93	-73.85	-0.78	-2.42
	-0.75 : -1	-51.28	-68.37	-1.32	-2.23
	-1.00 : -1	-66.78	-66.78	-2.18	-2.18
200	0.00 : 1		63.96		1.92
	-0.20 : -1	-14.42	-72.10	0.2	-2.36
	-0.30 : -1	-20.69	-68.98	-0.19	-2.24
	-0.40 : -1	-29.06	-72.65	-0.29	-2.13
	-0.50 : -1	-36.80	-73.59	-0.51	-2.08
	-0.75 : -1	-53.22	-70.96	-1.26	-2.01
	-1.00 : -1	-67.48	-67.48	-1.98	-1.98

表 2 高强高性能混凝土在不同温度等级和不同应力比下双轴压强度与峰值应变值 (续)
Table 2 The biaxial compressive strength and strain index of plain HSHPC under various stress ratios after different temperature levels (continued)

High temperature levels/ $^{\circ}\text{C}$	Stress ratio $\alpha = \sigma_2 : \sigma_3$	σ_2/MPa	σ_3/MPa	$\varepsilon_{2p}/10^{-3}$	$\varepsilon_{3p}/10^{-3}$
300	0.00 : -1		-61.64		-2.01
	-0.20 : -1	-13.03	-65.16	0.18	-2.54
	-0.30 : -1	-21.21	-70.70	-0.22	-2.43
	-0.40 : -1	-28.54	-71.35	-0.48	-2.31
	-0.50 : -1	-37.59	-75.18	-0.56	-2.26
	-0.75 : -1	-53.08	-70.77	-1.21	-2.18
	-1.00 : -1	-66.69	-66.69	-2.06	-2.06
400	0.00 : -1		-49.70		-2.58
	-0.20 : -1	-11.41	-57.04	-0.11	-4.19
	-0.30 : -1	-17.81	-59.36	-0.56	-3.96
	-0.40 : -1	-24.67	-61.68	-0.98	-3.79
	-0.50 : -1	-32.21	-64.41	-1.33	-3.56
	-0.75 : -1	-45.21	-60.28	-1.98	-3.36
	-1.00 : -1	-55.88	-55.88	-2.97	-2.97
500	0.00 : -1		-35.72		-4.47
	-0.20 : -1	-8.38	-41.91	-0.23	-6.34
	-0.30 : -1	-13.72	-45.73	-0.66	-6.21
	-0.40 : -1	-18.70	-46.74	-1.02	-5.82
	-0.50 : -1	-25.36	-50.72	-1.65	-5.47
	0.75 : 1	35.78	47.70	3.39	5.06
	-1.00 : -1	-42.26	-42.26	-4.99	-4.99
600	0.00 : -1		-24.90		-5.12
	-0.20 : -1	-5.98	-29.90	-0.39	-7.38
	-0.30 : -1	-10.15	-33.83	-0.83	-7.07
	-0.40 : -1	-14.18	-35.46	-1.41	-6.71
	-0.50 : -1	-18.31	-36.61	-1.94	-6.37
	-0.75 : -1	-25.39	-33.85	-3.79	-6.13
	-1.00 : -1	-30.65	-30.65	-5.78	-5.78

2.2 破坏形态

高温后高强高性能混凝土试件在单轴和双轴压

状态下的表面劣化和破坏形态如图 2 所示.

从图 2 中, 可以明显地看到高温的作用并未改

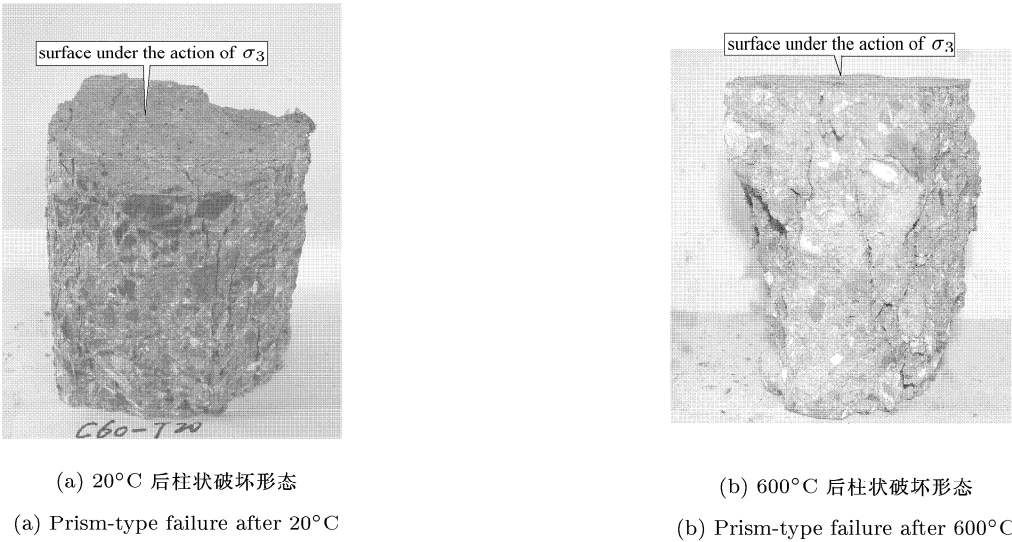
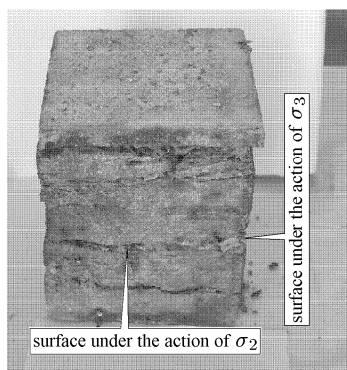


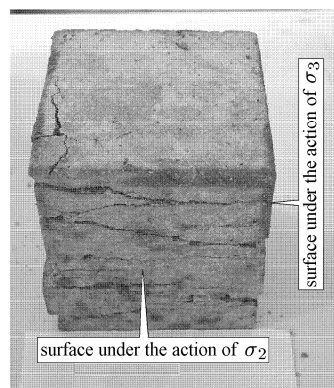
图 2 在不同温度等级与单双轴压应力状态下高强高性能混凝土破坏形态

Fig.2 Failure modes of plain HSHPC under uniaxial and biaxial compressive loading at different temperature levels



(c) 200°C 后片状破坏形态

(c) Plate-type failure after 200°C



(d) 400°C 后片状破坏形态

(d) Plate-type failure after 400°C

图 2 在不同温度等级与单双轴压应力状态下高强高性能混凝土破坏形态 (续)

Fig.2 Failure modes of plain HSHPC under uniaxial and biaxial compressive loading at different temperature levels (continued)

变常温状态下劈拉破坏模式. 在单轴压应力状态下, 高温与否, 高强高性能混凝土破坏形态为柱状破坏, 被劈裂成多个小柱体, 如图 2(a),(b) 所示. 在双轴压应力状态下, 则形成平行的片状破坏, 如图 2(c),(d) 所示. 以上两种破坏形态表明: 如果沿应力 σ_2 方向施加一定应力比的侧向压力, 那么就能改变破坏形态. 尽管在单轴和双轴压应力状态下, 其破坏形态不同, 但沿未施加荷载面方向的劈拉应变大于混凝土本身拉应变是其破坏的主要原因.

2.3 强度特性

图 3(a) 给出了在不同的温度等级, 应力比对主压强度 σ_3 的影响规律. 从图中可以看出, 对于同一温度等级, 双轴压强度 σ_3 在所有应力比都比其单轴压强度大; 而且, 最大双轴压强度发生在 $\alpha = 0.52$ 左右; 双轴压强度的变化取决于应力比, 并按抛物线变化. 从 400°C 温度开始, 其单轴强度开始降低. 因此, 400°C 是单轴压极限强度的临界温度. (注: 图 3(a),(b) 中的趋势线在 20°C 和 300°C 接近于重合.)

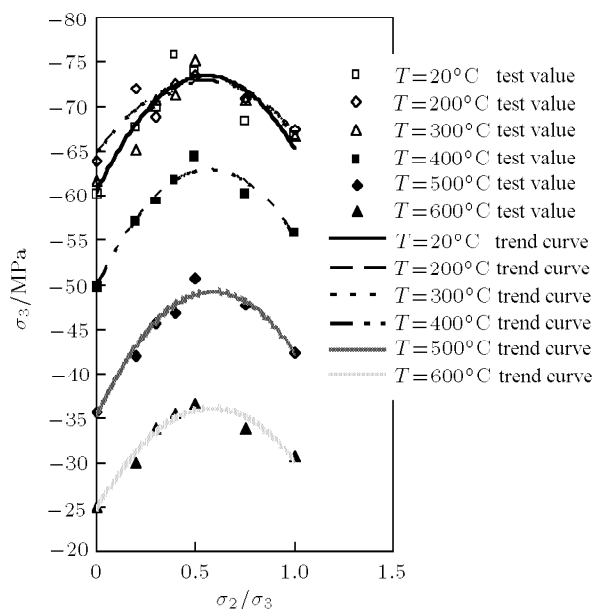
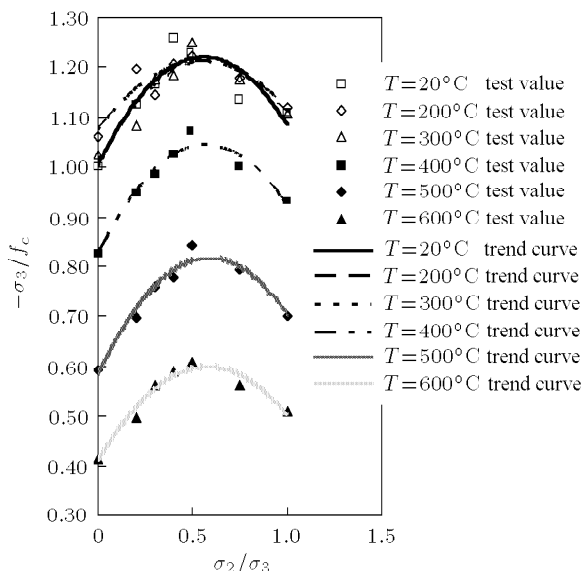
(a) 应力比对 σ_3 的影响规律(a) Influence of σ_2/σ_3 on σ_3 (b) 应力比对 $-\sigma_3/f_c$ 的影响规律(b) Influence of σ_2/σ_3 on $-\sigma_3/f_c$

图 3 应力比和温度等级对高强高性能混凝土强度的影响规律

Fig.3 Influence regularity of stress ratios and high temperature levels on HSHPC strengths

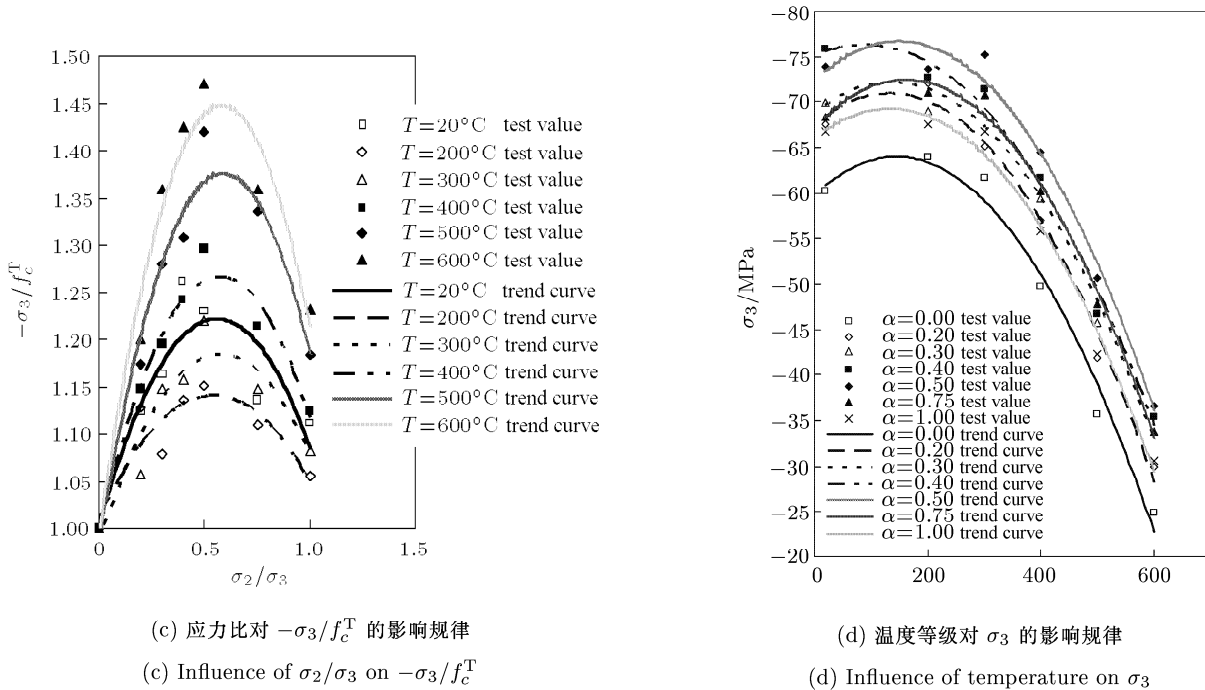


图 3 应力比和温度等级对高强高性能混凝土强度的影响规律 (续)

Fig.3 Influence regularity of stress ratios and high temperature levels on HSHPC strengths (continued)

图 3(b),(c) 分别给出了在不同的温度等级, 伴随着应力比变化, 双轴压强度相对于其高温前后单轴压强度的提高倍数关系. 从图 3(b) 可以看出, 在 200°C 和 300°C 温度时, 双轴压强度均大于常温时单轴强度 f_c (即其提高倍数大于 1), 这和文献 [17] 在普通混凝土下的不同, 并且从 400°C 开始, 其提高倍数开始小于 1. 从图 3(c) 中可以看出, 在所有温度等级, 双轴压强度分别均大于其高温后单轴压强度 f_c^T , 即提高倍数大于 1; 而且在不同的温度等级, 应力比影响的幅度不同. 例如: 当 $\alpha = 0.52$ 时, 双轴压强度在每一个温度等级 (20°C (常温), 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C) 提高倍数最大; 其双轴压强度 ($-75.83, -73.59, -75.18, -64.41, -50.72, -36.61 \text{ MPa}$) 分别为常温时单轴压强度 (-60.16 MPa) 1.26, 1.22, 1.25, 1.07, 0.84, 0.61 倍; 分别为其高温后单轴压强度 ($-60.16, -63.96, -61.64, -49.7, -35.72, -24.9 \text{ MPa}$) 1.26, 1.15, 1.22, 1.30, 1.42, 1.47 倍. 双轴压提高倍数除了受应力比影响之外, 还取决于高温后混凝土的“脆硬性”. 高温后混凝土脆硬性越大, 双轴压提高倍数越小. 在 200°C 和 300°C 时, 高温后的单轴压强度提高, 从其双轴压提高的倍数来看, 它的脆硬性比其它温度等级的要大 (f_c^T 为高温后, 每个高温等级 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 立方体单轴压减摩强度).

图 3(d) 描述的是温度等级对主压强度 σ_3 的影

响规律. 从图 3(d) 和表 2 中, 可以看出在单轴和双轴压下的 σ_3 并不是完全伴随着温度的升高而降低. 在 200°C 和 300°C , 单轴压强度增大; 在 200°C 左右, 个别应力比下双轴压强度有所增大; 单、双轴压强度均伴随着温度增加按类似于抛物线变化.

覃丽坤 [17] 研究了 20°C (常温), 高温 200°C , 300°C , 500°C , 600°C 后, 普通混凝土在双轴压下的强度与变形. 试件尺寸 100 mm^3 立方体, 在试块和加载板之间带有减摩垫层 (三层黄油加三层塑料薄膜); 当 σ_2/σ_3 大约等于 0.52 时, 每个温度等级下的双轴压强度提高倍数为最大, 其强度 ($-45.49, -44.8, -41.5, -35.6, -28.5 \text{ MPa}$) 分别为高温后单轴压强度 ($-34.2, -32.6, -30.5, -23.8, -19.5 \text{ MPa}$) 的 1.33, 1.37, 1.36, 1.50, 1.46 倍.

以下引用为常温状态下双轴压强度力学性能. Lee [18] 的试验结果表明: 在 $\alpha = 0.50$ 时, 双轴压强度最大; 并且在 $\alpha = 1.00, 0.50$ 时, 其双轴压强度较单轴压强度分别提高了 17%, 28%. Kupfer [6] 进行了带有刷形加载板作为减摩层的 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 板式双轴压试验, 试验结果表明: 其双轴压强度在单轴压强度的 1.18~1.27 倍之间.

把本文的双轴压强度提高倍数与以上作者的试验结果相比, 可以看出, 有些是相近的, 有些是不同的. 其中的差异主要是由于以下几方面的原因: (1) 混凝土强度等级的不同; (2) 加载系统影响; (3) 加

载速率的不同; (4) 试件和粗骨料的形状与尺寸的不同; (5) 不同的减摩材料和试验方法. 由于浇注和养护方法的差异, 即使是相同的材料, 共同项目双轴压试验结果在某种程度上也呈现出离散性, 但大体趋势是一致的.

2.4 破坏准则

通过对高强高性能混凝土在不同温度等级后试验结果回归分析, 得出了带有应力比和温度参数的 Kupfer-Gerstle 双轴压公式, 如下

$$\left(\frac{\sigma_3}{f_c} + \frac{\sigma_2}{f_c}\right)^2 + F_1(T)\frac{\sigma_3}{f_c} + F_2(T)\frac{\sigma_2}{f_c} = 0 \quad (1)$$

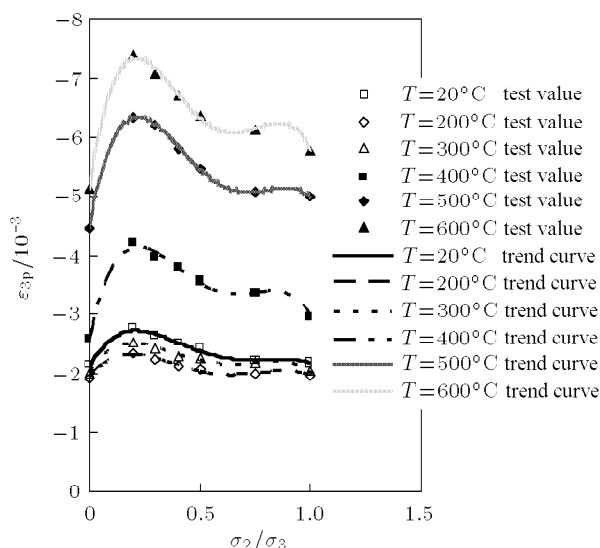
式 (1) 转换为如下应力比形式

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = \frac{F_1(T) + F_2(T) \times \alpha}{(1 + \alpha)^2} \quad (2)$$

其中, $\alpha = \sigma_2/\sigma_3$ ($0 \leq \alpha \leq 1$), α 为应力比; T 为温度等级 ($20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$); f_c 为常温时高强高性能混凝土单轴压强度; $F_1(T)$ 和 $F_2(T)$ 分别是温度 T 的函数, 回归公式如下

$$F_1(T) = 2.6425\left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0.6571\left(\frac{T}{1000}\right) - 0.9813 \quad (R^2 = 0.9906)$$

$$F_2(T) = 9.5206\left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 2.8027\left(\frac{T}{1000}\right) - 3.3708 \quad (R^2 = 0.9869)$$



(a) 应力比对 ε_{3p} 的影响规律

(a) Influence of σ_2/σ_3 on ε_{3p}

从图 4 中可以看出高温后高强高性能混凝土在主应力空间的双轴压破坏准则模型包络线与试验值符合较好, 具有可应用性.

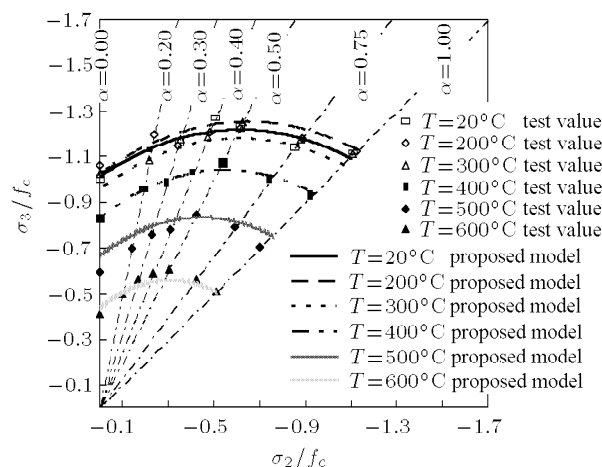
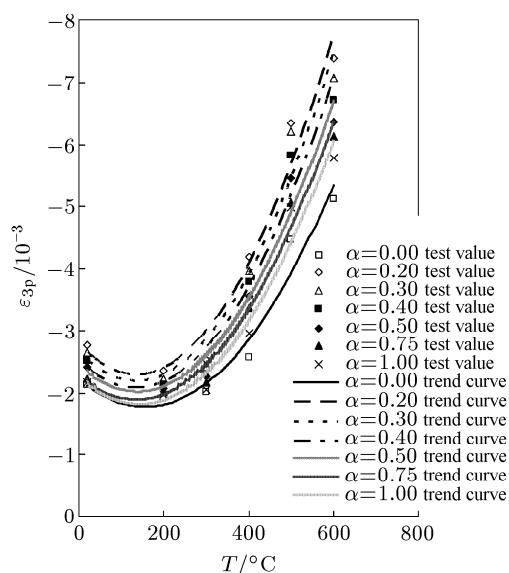


图 4 式 (2) 与试验值比较

Fig.4 The comparison of Eq.(2) and test values

2.5 应变特性

下述分析为高强高性能混凝土主压峰值应变 ε_{3p} 的变化规律. 图 5(a) 给出了在不同温度等级双轴压下, 应力比对 ε_{3p} 的影响规律. 从表 2 和图 5(a) 可以看出, 在相同的温度等级, 双轴压下的 ε_{3p} 均比其单轴压峰值应变大, 其变化取决于应力比, 最大 ε_{3p} 发生在 $\alpha = 0.20$. 例如: 高温 20°C 和 600°C 后,



(b) 温度等级对 ε_{3p} 的影响规律

(b) Influence of temperature on ε_{3p}

图 5 应力比和温度对高强高性能混凝土峰值应变的影响规律

Fig.5 Influence regularity of stress ratios and high temperatures on HSHPC peak strains

双轴压 ε_{3p} 分别是在其单轴压峰值应变的 1.02~1.3 倍和 1.13~1.44 倍之间变化. 在所有高温等级下, ε_{3p} 伴随着应力比的增大呈类似于抛物线变化.

图 5(b) 给出了在不同的应力比双轴压下, 温度等级对 ε_{3p} 的影响规律. 从表 2 和图 5(b) 中可以看出, 高温 200°C~300°C 后, 单轴、双轴压 ε_{3p} 在相同的应力比下降低; 之后, 伴随着温度升高而逐渐增大. 高温 600°C 后, 在 $\alpha = 0.20$, 双轴压下的最大 ε_{3p} 是其常温的 2.67 倍; 而高温 200°C 后, 却降低为其常温的 85.51%. 400°C 是 ε_{3p} 增大的分界温

度. 从图 5(a),(b) 可以看出, 温度等级对 ε_{3p} 的影响要比应力比对其影响大.

2.6 应力应变关系

图 6(a)~6(d) 给出了不同的温度等级后高强高性能混凝土在单双轴压下的应力应变曲线. 从图 6(a)~6(d) 中可以看出, 高强高性能混凝土应力应变曲线形状的差异归因于温度等级与应力比的不同; 并且, 在主压应力 σ_2 方向上施加一定大的侧应力, 就能明显地改变主压应力 σ_3 方向上的强度与变形性能.

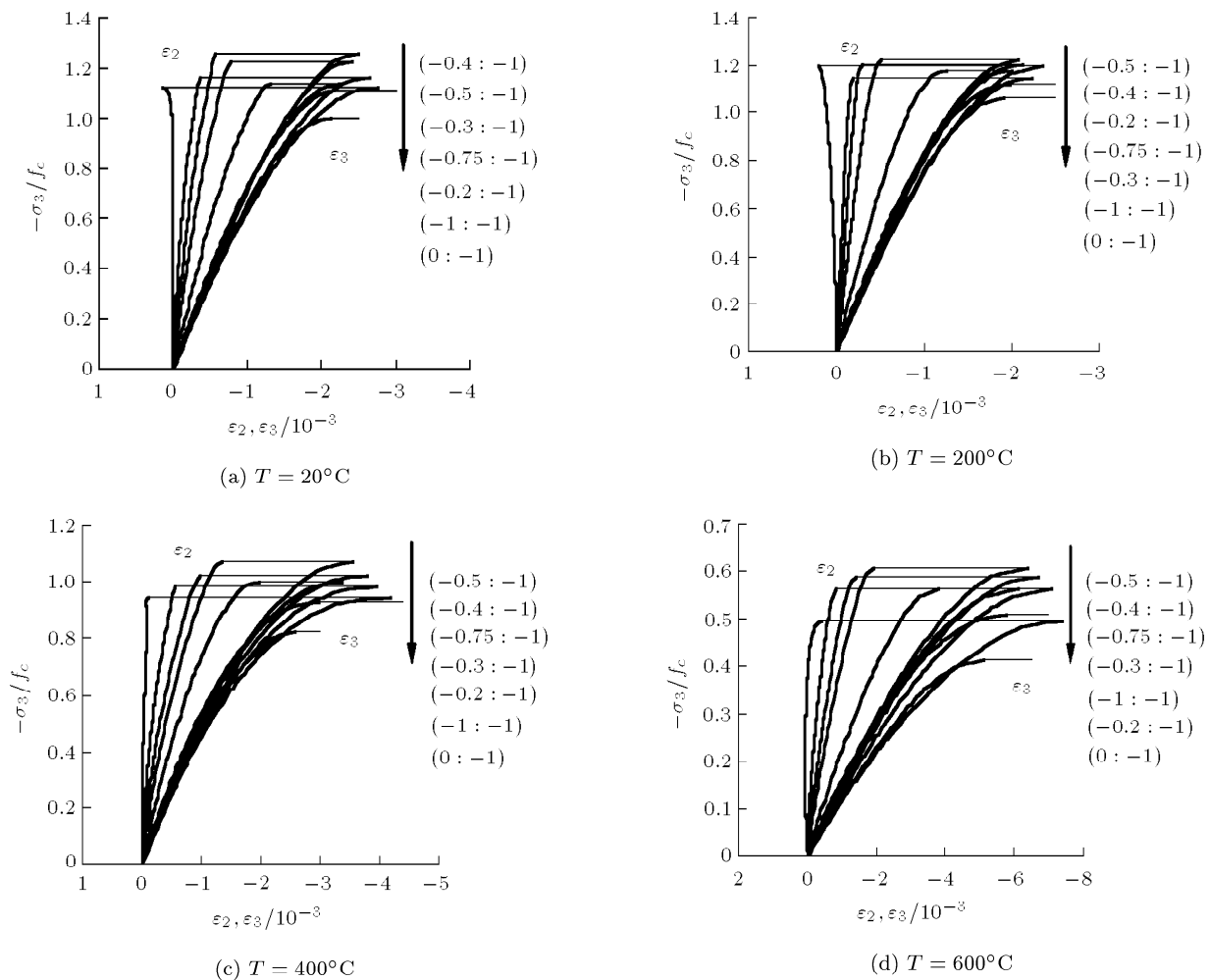


图 6 不同的高温等级后高强高性能混凝土在单双轴压下的应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves for plain HSHPC under uniaxial and biaxial compression at different high temperature levels

从图 6(a)~6(d) 可以明显地看出, 主压峰值应变 ε_{3p} 并不完全是伴随着温度增加而增大. 在相同的温度等级下, 主压应力 σ_3 在 $\alpha = 0.40 \sim 0.50$ 时最大; ε_{3p} 在 $\alpha = 0.20$ 左右时最大; 在 20°C, 200°C, 300°C 时, ε_{2p} 在 $\alpha = 0.20 \sim 0.30$ 时, 从拉应变转为压应

变, 而在 400°C, 500°C, 600°C 时, 均为压应变; 伴随着温度等级的升高, ε_{3p} 从 400°C 温度开始, 迅速增大. 受一侧侧向压力的影响, 双轴压下应力应变曲线的初始切线倾斜度, 伴随着应力比的增加变陡. 在相同的温度等级下, 双轴压下应力应变曲线

的上升段线性长度比单轴压要长, 而且伴随着应力比的增加而有所增大.

从图 7(a) ~ 7(d) 中可以看出, 高温 20°C, 200°C, 300°C 后, 高强高性能混凝土应力应变曲线在不同应力比下的形状差异不大; 高温 200°C, 300°C 后的单轴压强度 σ_3 和 20°C 相比, 有所增大, 但其 ε_{3p} 有所

降低. 高强高性能混凝土强度与变形性能从 400°C 开始有明显的改变: 主压强度 σ_3 迅速降低, 而 ε_{3p} 迅速增大, 以至于应力应变曲线逐渐趋于平缓. 这种结论与文献 [2]“用电炉作高温设备与燃油炉相比, 其试验结果不同, 电炉的强度降低分界温度为 400°C, 而燃油炉则不是”相符.

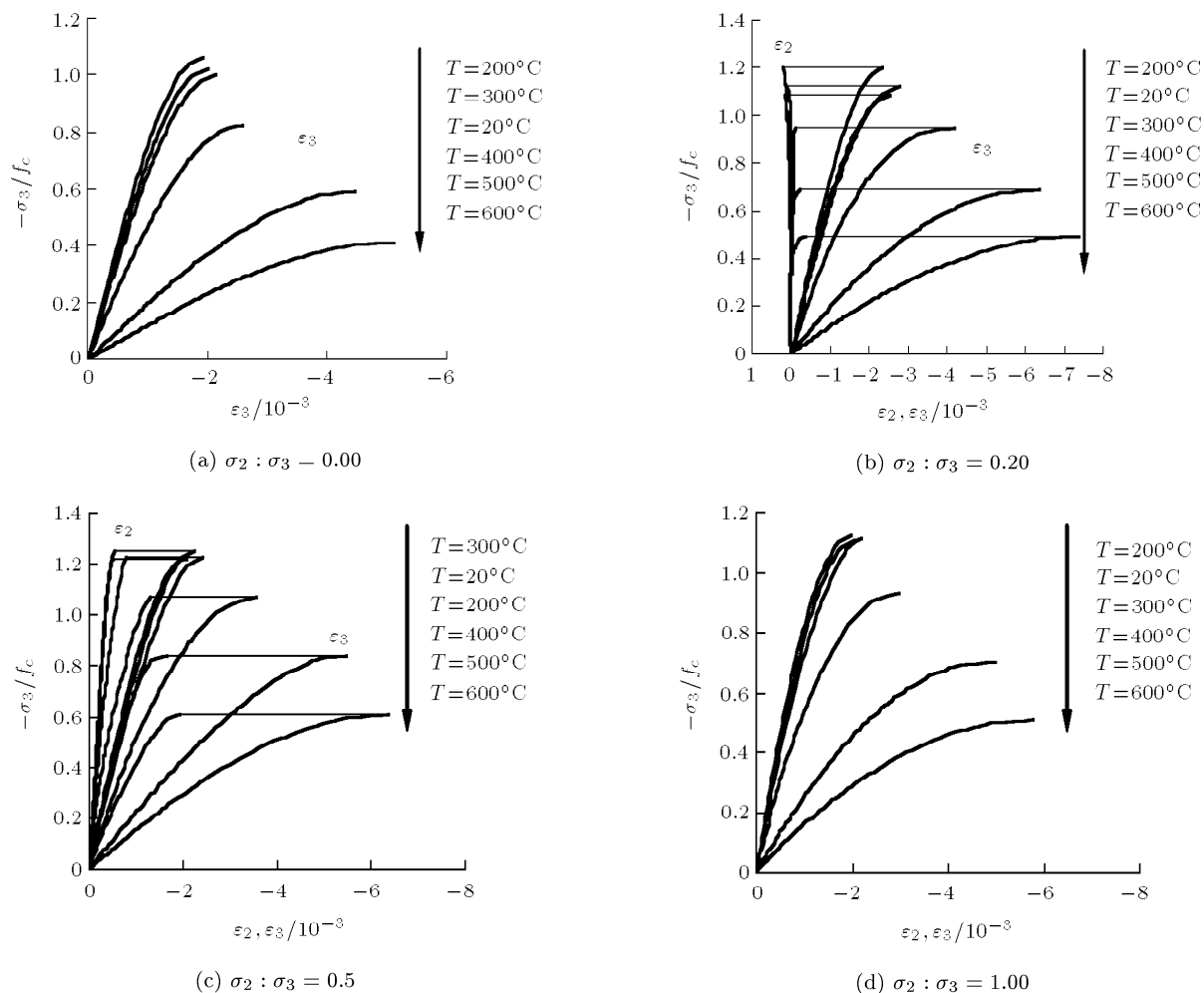


图 7 高温后高强高性能混凝土在不同应力比的应力应变曲线

Fig.7 The stress-strain curves for plain HSHPC after high temperatures at different stress ratios

2.7 高温对高强高性能混凝土损伤讨论

单、双轴压高强高性能混凝土在高温前后力学性能差异是由各个高温等级所导致的微观结构不同而引起的. 单轴压下高强高性能混凝土在 200°C, 300°C 时的强度增加, 主要归因于吸附的水分迁移导致水泥凝胶体的硬化或水泥凝胶体颗粒间表面张力的增加. 吸附的水分迁移和强度开始下降的温度等级取决于混凝土内部结构的孔隙率. 在 200°C, 300°C 时, 单轴压强度的增加表明随着高强高性能混凝土脆硬性的增大, 导致双轴压强度提高倍数的降低.

在 400°C 时, 水泥胶体开始脱水, 从而导致其解体; 超过 400°C 之后, 高强高性能混凝土非常明显地以较快的速率失去强度. 在 400°C~600°C 之间, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解; 超过 600°C 之后, 高强高性能混凝土微观结构的损伤是由 CaCO_3 分解所造成的. 这种结论是与文献 [19,20] 结论相一致的. 从 400°C 开始, 伴随着高强高性能混凝土由高温所引起的结构损伤加重, 塑性应变大大增加. 这种现象发生的原因是: 损伤越大, 高强高性能混凝土试件承载力越小, 并且迅速地达到其塑性点. 这意味着双轴压峰值应变

将随着温度的增加而增大, 且高强高性能混凝土在高温期间所产生的内部裂缝也导致其初始刚度有较高的降低。

3 结 论

基于试验结果, 得出以下结论:

(1) 高强高性能混凝土 100 mm³ 立方体试件, 在高温 200°C~600°C 之间没有发生爆裂现象。

(2) 对于同一温度等级, 高强高性能混凝土双轴压强度在所有的应力比下都比其单轴压强度大。高温 200°C, 300°C 后, 高强高性能混凝土单轴压强度并不降低, 其单轴、双轴压峰值应变大小与常温下相比, 有所降低; 而且, 其脆硬性比 400°C, 500°C, 600°C 3 个温度等级后的要大。400°C 是其极限压强度和峰值应变的分界点: 强度迅速降低, 峰值应变迅速增大。双轴压强度相对于单轴压强度提高倍数取决于应力比以及不同温度等级后高强高性能混凝土的脆硬性。

(3) 在相同的温度等级下, 高强高性能混凝土双轴压应力应变曲线的上升段线性和单轴压相比有所改善; 从 400°C 开始, 其应力应变曲线变得平缓。

(4) 高温并不能改变高强高性能混凝土的多轴压破坏形态。破坏形态从单轴压下的柱体破坏改变为双轴压下的片状破坏。

(5) 提出了高强高性能混凝土带有温度和应力比参数 Kupfer-Gerstle 破坏准则公式。

参 考 文 献

- Husem Metin. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(2): 155~163
- Li Min, Qian Chunxiang, Sun Wei. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(6): 1001~1005
- Kalifa Pierre, Menneteau François-Dominique, Quenard Daniel. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12): 1915~1927
- Peng Gaifei, Yang Wenwu, Zhao Jie, et al. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(4): 723~727
- Mills Laddie L, Zimmerman Roger M. Compressive strength of plain concrete under multiaxial loading conditions. *ACI Journal, Proceeding*, 1970, 67(10): 802~807
- Kupfer HB, Gerstle KH. Behavior of concrete under multi-axial stress states. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1980, 106(6): 1383~1403
- Husem Metin, Gozutok Serhat. The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(1): 49~53
- Lu Xiaobin, Thomas Hsu Cheng-Tzu. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(9): 1679~1685
- Mahboubi Ahmad, Ajorloo Ali. Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression. *Cement and Concrete Research*, 2005, 5(2): 412~419
- 梁伟, 吴佩刚, 赵光仪等. 高强混凝土三轴强度规律与破坏准则. 建筑结构, 2003, 33(1): 17~19 (Liang Wei, Wu Peigang, Zhao Guangyi, et al. The triaxial strength rule and failure criterion of high strength concrete. *Architecture Structure*, 2003, 33(1): 17~19 (in Chinese))
- Thienel K-CH, Rostasy FS. Strength of concrete subjected to high temperature and biaxial stress: Experiments and modeling. *Materials and Structures*, 1995, 28(10): 575~581
- Luo X, Sun W, Chan YN. Residual compressive strength and microstructure of high performance concrete after exposure to high temperature. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 2000, 33(6): 294~298
- Chan Sammy YN, Peng Gaifei, Chan John KW. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 1996, 29(12): 616~619
- 中华人民共和国国家标准编写组. GB175-1999 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥. 北京: 中国标准出版社, 1999 (The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB175-1999 Portland Cement and Ordinary Portland Cement. Beijing: China Standards Press, 1999 (in Chinese))
- 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003 (The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB/T50081-2002 Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003 (in Chinese))
- 中华人民共和国国家标准编写组. GBJ82-85 混凝土长期和耐久性试验方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985 (The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GBJ82-85 Testing Methods of Long-Term and Long-Lasting Performance of Ordinary Concrete. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985 (in Chinese))
- 覃丽坤, 宋玉普, 张众等. 高温后双轴压混凝土强度和变形性能研究. 大连理工大学学报, 2005, 45(1): 113~117 (Qin Likun,

- Song Yupu, Zhang Zhong, et al. The research on strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after high temperatures. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(1): 113~117 (in Chinese))
- 18 Lee Sang-Keun, Song Young-Chul, Han Sang-Hoon. Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 227(2): 143~153
- 19 Cheng Fuping, Kodur VKR, Wang Tien-Chih. Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering* © ASCE, 2004, 16(1): 84~90
- 20 Janotka I, Mojumdar SC. Thermal analysis at the evaluation of concrete damage by high temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 81(1): 197~203

MECHANICAL PROPERTIES OF PLAIN HIGH-STRENGTH HIGH-PERFORMANCE CONCRETE UNDER BIAXIAL COMPRESSION AFTER EXPOSURE TO HIGH TEMPERATURES

He Zhenjun¹⁾ Song Yupu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract This study aims to generate the mechanical response of plain high-strength high-performance concrete (HSHPC) subjected to biaxial compressive loading at seven stress ratios, $\alpha = \sigma_2 : \sigma_3$, $-0.00 : -1$, $-0.20 : -1$, $-0.30 : -1$, $-0.40 : -1$, $-0.50 : -1$, $-0.75 : -1$, $-1.00 : -1$, after exposure to the temperature of 20°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C and 600°C, using the true-triaxial loading system. The biaxial static compressive strengths, strains at the peak stress and the stress-strain curves are obtained to analyze the influence of the temperature and the stress ratio. Failure modes of plain HSHPC specimens are observed. The experimental results show that the biaxial compressive strength of HSHPC is more sensitive to the stress ratio and the exposure treatment to high temperatures than the uniaxial compressive strength. The Kupfer-Gerstle failure criterion for plain HSHPC is developed with the parameters of the temperature and stress ratio.

Key words high-strength high-performance concrete (HSHPC), high temperatures, stress ratios, mechanical properties, uniaxial and biaxial compressive strength, stress-strain relationship