

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.053



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同纤维增强超高性能混凝土的高温后力学性能试验研究

仵鹏涛^{1,2,3}, 张雪燕², 刘中宪², 邱鹏³

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384; 3. 天津市建筑材料集团(控股)有限公司, 天津 300381)

摘要:通过对高温作用后不同纤维增强的超高性能混凝土圆柱体进行抗压强度试验, 研究高温后不同纤维对超高性能混凝土的表观特征和力学性能的影响。制备108个超高性能混凝土圆柱体试件, 进行6个目标温度(常温(20℃)、200℃、400℃、600℃、800℃、1 000℃)后的单轴压缩试验, 对比单掺钢纤维、混掺不同长度钢纤维、混掺钢纤维和聚丙烯纤维以及混掺钢纤维和聚乙烯纤维对超高性能混凝土高温爆裂的抑制效果以及对抗压强度的影响。结果表明: 温度越高, 超高性能混凝土损伤程度越严重; 高温作用后, 混掺钢纤维和聚丙烯纤维超高性能混凝土还能保持较好的完整性以及较高的抗压强度, 在1 000℃高温作用后仍能保持30%的残余强度; 随着温度的升高, 超高性能混凝土抗压强度整体上表现出先升高后降低的规律, 高温增强了超高性能混凝土的延性。

关键词:超高性能混凝土; 高温作用; 力学性能; 抗压强度; 纤维

中图分类号: TU541 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-08

Mechanical properties of different fiber reinforced ultra-high performance concrete after high temperature

WU Pengtao^{1,2,3}, ZHANG Xueyan², LIU Zhongxian², QIU Peng³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. Tianjin Key Laboratory of civil structure protection and reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 3. Tianjin Construction Materials Group (Holding) Co., Ltd, Tianjin 300381, P. R. China)

Abstract: By conducting compressive strength tests on ultra-high performance concrete cylinders reinforced with different fibers after high-temperature treatment, the influence of different fibers on the appearance characteristics and mechanical properties of ultra-high performance concrete after high-temperature treatment was studied. 108 specimens of ultra-high performance concrete cylinders were prepared, and uniaxial

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(52308518); 天津科技企业特派员资助项目(23YDTPJC00100); 天津市建筑结构防护与加固重点实验室开放基金(FHJG-2024-03)

作者简介: 仵鹏涛(1989-), 男, 副教授, 主要从事超高性能混凝土结构抗爆研究, E-mail: wupengtao0228@tcu.edu.cn。

Received: 2024-11-20

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52308518); Tianjin Science and Technology Enterprise Special Commissioner Funded Project (No. 23YDTPJC00100); Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement Fund (No. FHJG-2024-03)

Author brief: WU Pengtao (1989-), associate professor, main research interest: blast resistance of ultra-high performance concrete structures, E-mail: wupengtao0228@tcu.edu.cn.

compression tests were carried out at 6 target temperatures (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1 000 °C). The effects of single steel fiber, mixed steel fiber of different lengths, mixed steel fiber and polypropylene fiber, mixed steel fiber and polyethylene fiber on high temperature cracking and compressive strength of ultra-high performance concrete were compared. The results show: with the increase of temperature, the damage degree of ultra-high performance concrete becomes more serious. After high temperature action, the mixed steel fiber and polypropylene fiber ultra-high performance concrete can also maintain good integrity and high compressive strength, and can still maintain 30% residual strength after high temperature action at 1000 °C. With the increase of temperature, the compressive strength of ultra-high performance concrete increases and then decreases, and the ductility of ultra-high performance concrete is enhanced by high temperature.

Keywords: ultra high-performance concrete; high temperature effect; mechanical properties; compression strength; fiber

当代建筑工程结构不断创新,这既带来了施工难度的提升,也催生了更高的材料性能要求。在此背景下,依托材料科学领域的技术突破与长期积累,超高性能混凝土(UHPC)得以研发应用,该材料具有卓越的抗压强度、抗拉性能以及致密的微观结构等特征^[1]。值得注意的是,作为建筑工程安全领域的重大威胁,火灾会显著影响UHPC构件的力学性能和耐久性。当暴露于高温环境时,UHPC内部会产生显著的温度梯度,进而引发水化产物相变、化学分解、材料脆化及热应力集中等复杂的物理化学反应过程。研究表明,随着混凝土强度等级的提高,这些劣化效应更加显著^[2-3]。

在高温环境中,由于热传导特性的差异,结构构件内部会形成不均匀的温度梯度分布,这种热力学不平衡状态将引发显著的温差应力效应,进而促使结构体系内部产生内力重新分配现象^[4-5]。提高UHPC耐高温性能的主要措施有增加孔隙减少温差和加入某种材料使高温下混凝土内部结构发生改变^[6]。钢纤维的掺入会适度降低UHPC材料的密实程度^[7-8],这种结构变化在高温环境下有利于水蒸气的逸散,从而增强材料的热稳定性,使残余轴压强度增大,减少高温爆裂现象^[9]。顾连胜等^[10]研究了高温后玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)的力学性能,发现随着温度升高,BFRC的抗压强度降低。Sciarretta等^[11]研究发现,UHPC中掺入一定量的混杂纤维能提高其耐高温性能,随着钢纤维含量的增加,材料的残余抗压强度呈现系统性提升趋势。许成祥等^[12]通过实验研究发现,聚乙烯(PVA)纤维能抑制混凝土爆裂,与钢纤维混杂能实现优势互补。众多学者^[13-15]发现,聚丙烯(PP)纤维的掺入能提高混凝土高温后的力学性能,PP纤维的熔点温度为170 °C左右,在高温作用下融化后会使得UHPC试件内部形成水蒸汽释放通道,混凝土内部水分在高温时能通过这些毛细孔快速蒸发,温差减小,水蒸气

的及时排出降低了材料内部的温度梯度,从而有效缓解了高温对混凝土结构的损伤程度。

现有研究表明,虽然UHPC的高温性能已得到部分学者关注,但其在经历高温作用后的残余强度仍存在明显缺陷。笔者从材料制备入手,通过改变纤维种类和组合,基于掺加纤维的体积率和种类制备6种性能优越且耐高温的UHPC试件,并进行高温试验,系统分析纤维类型和纤维掺加方式对温度下UHPC表现特征和力学性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用材料包括水泥、粉煤灰、硅灰、标准石英砂、减水剂、水、钢纤维(MF)、聚丙烯(PP)纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维,种类及形态如图1所示,具体纤维参数见表1。

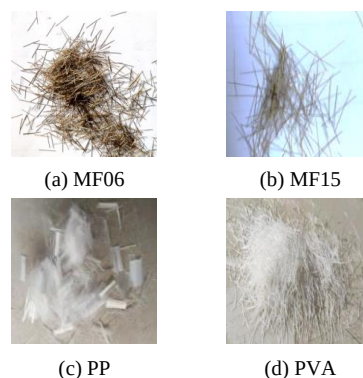


图1 纤维种类及形态

Fig.1 Fiber type and shape

1.2 配合比设计

为探究不同纤维掺量和纤维种类对高温后UHPC抗压强度的影响,采用正交试验方法,共设计6组配合比,如表2所示。以单掺MF15为基准UHPC配合比,通过改变长径比以及材料类型,研究不同UHPC配合比的耐高温性能。为了减小/消

表 1 纤维基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of fiber						
纤维类型	长度/mm	直径/mm	长径比	密度/(g/cm ³)	熔点/℃	抗拉强度/MPa
PP	19	0.031		0.91	168	≥400
PVA	12	0.015		1.3	185	≥1 990
MF06	6	0.12	50	7.8	1 450	>2 000
MF15	15	0.12	125	7.8	1 450	>2 850

除环箍效应,采用直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体

试件,试件直径与压力试验机加载端直径基本一致。为提高试件制备过程中材料(尤其是纤维)分布的均匀性,采用标准制备工艺:首先浇筑 100 mm×100 mm×400 mm 标准长方体试件,浇筑后静置 48 h 脱模,经标准养护 28 d 后,采用专业取芯设备进行芯样取样,按照 6 个配合比、6 种温度(20、200、400、600、800、1 000 ℃),每组 3 个试件,共取芯 108 个圆柱体试件,再用高温电炉进行温度试验。

表 2 UHPC 配合比

Table 2 UHPC mix proportion (kg/m ³)										
组别	水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	减水剂	水	PVA	PP	MF06	MF15
UHPC1	800	150.5	130.5	1 100	123	150				195
UHPC2	800	150.5	130.5	1 100	123	150			78	117
UHPC3	800	150.5	130.5	1 100	123	150		4.55	78	117
UHPC4	800	150.5	130.5	1 100	123	150		4.55		195
UHPC5	800	150.5	130.5	1 100	123	150	6.5		78	117
UHPC6	800	150.5	130.5	1 100	123	150	6.5			195

1.3 试验方案

试验设置 6 个温度工况:20、200、400、600、800、1 000 ℃,加热装置采用洛阳神佳窑业制造的型号为 SSJ-14T,最高温度可达 1 400 ℃的高温电炉,升温曲线如图 2 所示。杨婷等^[16]研究发现,出升温速率为 4 ℃/min 最有利于 UHPC 的加热,同时指出混凝土加热时存在惰性,要想减小试件内外温度差,达到目标温度后保持 2 h 恒温,再冷却至室温,取出试件进行压力试验。压力试验机采用中国科学院武汉岩土所研制液压伺服试验机(RMT-150C),如图 3 所示。

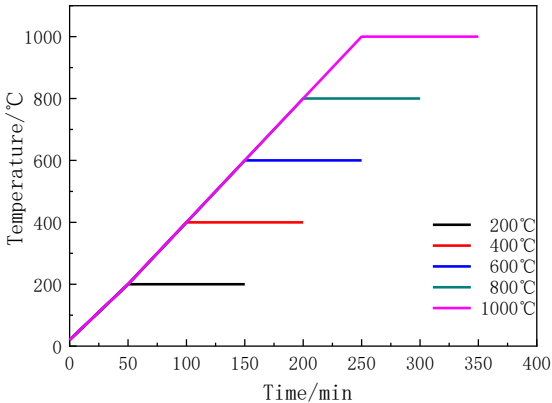


图 2 试验升温曲线

Fig.2 Test temperature rise curves

2 试验结果与讨论

2.1 高温后 UHPC 试件特征

温度试验后的 UHPC 试件如图 4 所示,颜色和外观变化随着温度的不同有明显变化,6 个配合比



图 3 液压伺服试验机

Fig.3 Hydraulic servo testing machine

中,加入聚丙烯纤维的 UHPC3 和 UHPC4 两组能承受 1 000 ℃的高温,其余组在超过 400 ℃时均发生炸裂,故而完好进行抗压试验的试件共计为 68 个。

对照组 UHPC1 和 UHPC2 在 400 ℃时发生炸裂,颜色由深灰变成浅灰,表面钢纤维也逐渐由银色变成黑色。UHPC3 和 UHPC4 组随着温度的升高,可以看到试件颜色逐渐变浅,由灰色慢慢过渡到淡黄色,表面钢纤维逐渐变为黑色,当温度达到 1 000 ℃时试件表面变得疏松,混凝土脱氧碳化严重,钢纤维氧化变黑,高温过程中伴有粉末状脱落。UHPC5 和 UHPC6 在温度达到 400 ℃时,试件表面出现大量细孔和黑色焦孔,细孔是由于单根 PVA 纤维达到熔点后溶化产生的,黑色焦孔则是因为在高温加热时表面温度过高,纤维烧焦碳化形成黑色焦

孔。两组试件随着温度的升高,内部水分逐渐蒸发,外观逐渐由灰色到灰白色,再到浅黄色的变化。

综上所述,试件在加热时内外存在温度差,外部温度最高,水分蒸发最完全,试件颜色最浅。

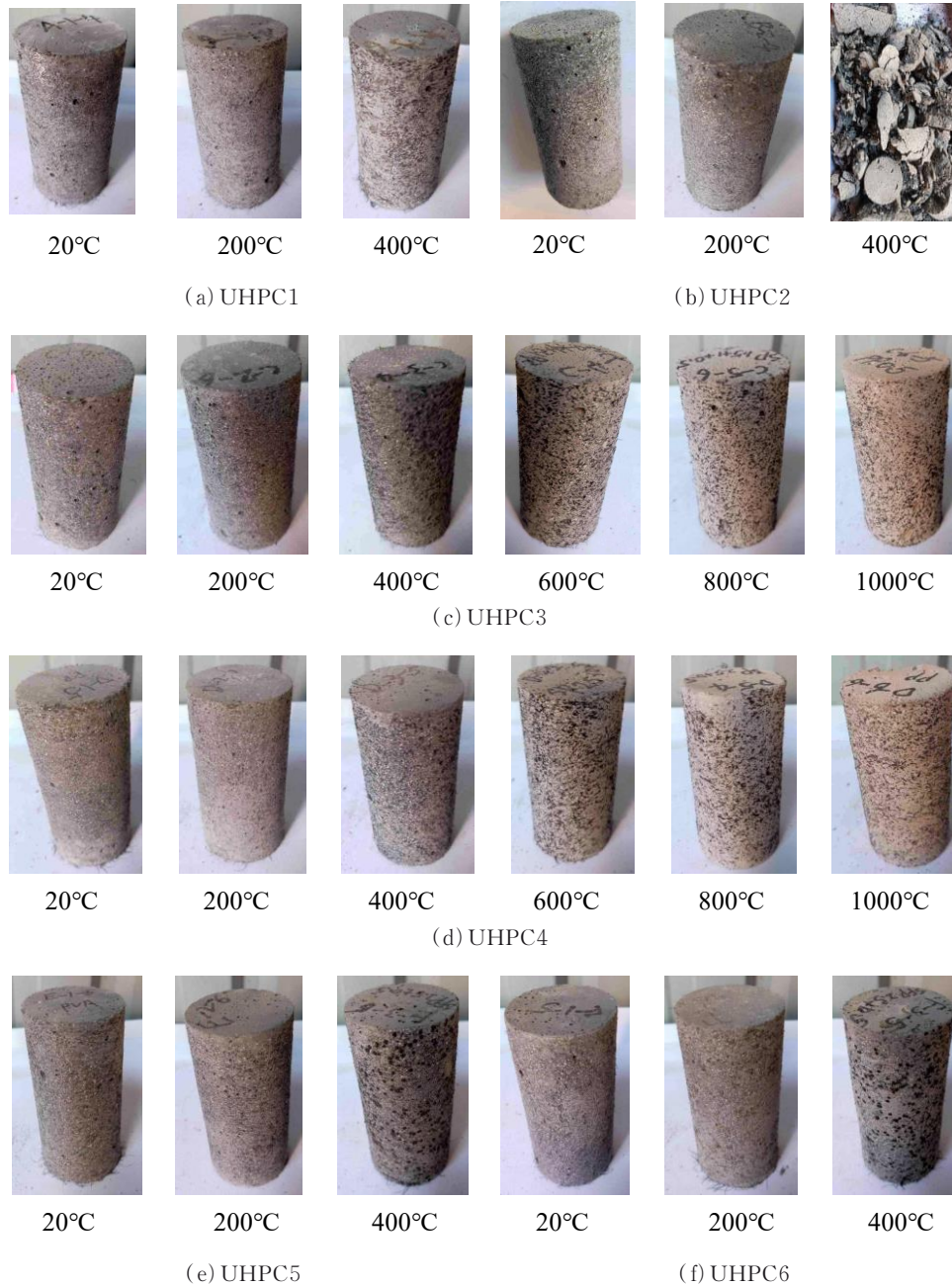


图4 高温后 UHPC 试件

Fig.4 UHPC specimens after high temperature

2.2 UHPC 高温后抗压试验破坏模式

UHPC 圆柱体试件高温后抗压试验破坏模式见图5。除 UHPC3 和 UHPC4 外, UHPC2 组试件在 400 °C 高温发生炸裂现象, 其余试件在 600 °C 高温出现粉碎性炸裂现象, 无法进行抗压试验。试验采用液压伺服压力机, 设置为位移加载, 加载速率为 0.02 mm/min, 加载过程中荷载持续增大, 达到峰值之后, 荷载下降到峰值荷载的 30% 时, 停止试验, 得到力-位移曲线。

由图5可知, 在 400 °C 之前, 试件整体性强, 破

坏裂缝大致可以分为两种, 如 UHPC1 在常温下中间先开裂, 裂缝逐渐倾斜, 向两边延伸形成贯穿性斜裂缝; 另一种 UHPC4 在常温下角线附近先出现裂缝, 并逐渐向底部斜着延伸, 形成贯穿性斜裂缝。圆柱体试件抗压试验时, 上部受到压力作用, 整体向下压缩, 垂直力无处抵消, 就会向两边膨胀, 产生横向拉应力, 试件本身的抗拉强度逐渐小于拉应力后, 竖向裂缝随之产生; 又因为试件进行抗压试验时上下都有传压钢板固定, 会对圆柱试件顶面和地面形成摩擦阻力, 限制竖向膨胀, 进而造成裂缝沿

两侧延伸。相同条件下,400℃之后抗压试件裂纹增多,破坏裂缝由一条裂缝发展成多条,UHPC3、UHPC4组试件在经过1000℃高温后,试件受压破坏严重,试件骨料碳化解,伴有粉末状的颗粒或表皮整体脱落。与对照组相比,试件韧性降低,脆性增加,更易开裂。

UHPC内部掺入混杂纤维,钢纤维导热系数较混凝土大得多^[17],使得混凝土试件内部水分的分解与蒸发加快,同时两者的膨胀系数也不相同,在电

炉内加热或冷却时存在热胀冷缩现象,导致材料之间出现间隙。间隙的出现使内部水分蒸发加快,形成孔道,减少蒸汽压力的堆积,因此,在钢纤维的作用下,UHPC试件内部的温度差减小;聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维的熔点比混凝土低,温度升高达到熔点,提前融化形成孔隙,为自由水和结合水的蒸发提供通道,使UHPC试件内部产生的蒸汽压力小于本身的抗拉强度^[18]。综上所述,在混凝土中掺杂纤维,可减小UHPC试件的爆裂机率。



图5 UHPC圆柱体抗压试验破坏特征

Fig.5 Failure characteristics of UHPC cylinder compression test

2.3 UHPC 高温后抗压强度

2.3.1 高温后抗压强度

根据《钻芯检测离心高强混凝土抗压强度试验

方法》(GB/T 19496—2004)^[19]对高温后的混凝土试件进行抗压强度试验,抗压试验结果见表3。分析其离散程度,常温基准组的强度离散程度较小,说

明采用的UHPC配合比以及试件制作效果满足试验要求,随着温度升高,离散程度变大。随着温度的升高,由于PVA和PP纤维融化,试件内部孔洞越多,以及纤维在UHPC内部空间的取向随机性,其受力状态会出现较大不同,可能会使相同温度下破坏荷载存在较大差异,从而导致混凝土强度的离散性增大。

图6为各组UHPC试件的温度-相对抗压强度。结合表3可见,在200℃之前抗压强度的变化不大,200~400℃之间各组UHPC抗压强度均有较大提升,其中UHPC3、UHPC4在温度达到1000℃时还能够保持一定的强度,平均抗压强度为26.25、26.41 MPa,分别为常温下的30.51%、29.62%。UHPC5、UHPC6比对照组UHPC1和UHPC2更耐高温,在400℃时均未炸裂,且均在400℃时平均抗压强度最大。在400℃高温环境下,混掺双尺度钢纤维的UHPC试件2组出现爆裂现象,导致其力学性能完全丧失。

在未掺加高分子合成纤维的情况下,对照组UHPC1和UHPC2高温后的抗压强度较大。在20~200℃范围内,混凝土基体内有自由水和少数胶凝水也成为物理结合水蒸发,并伴有部分水化碳铝酸物脱水,钙矾石出现化学分解、石膏发生分解

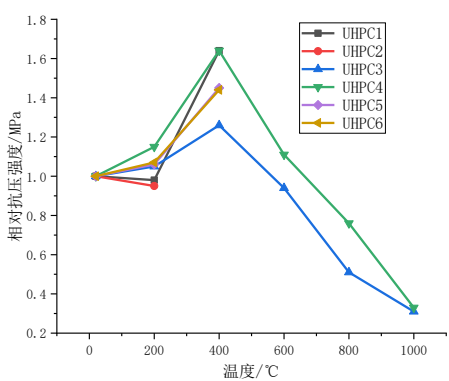


图6 不同温度作用后UHPC相对抗压强度

Fig.6 Relative compressive strength of UHPC under different temperatures

反应;由于这些物理化学反应刚开始发生,由图6可以看出,UHPC试件相对抗压强度增大,但变化不太明显。当温度到达200~400℃时,基体内水化硅酸钙发生分解反应,水化碳铝酸物几乎全部脱水。此时相对抗压强度在400℃时达到最大,除UHPC2组爆裂未测得抗压强度外,其余各组的强度分别都有所增加,与常温下相比,UHPC1组抗压强度提高了54.45%、UHPC3组抗压强度提高了34.36%、UHPC4组抗压强度提高了58.94%、UHPC5组抗压强度提高了44.65%、UHPC6组抗压强度提高了

表3 各温度下UHPC圆柱体试件平均残余抗压强度

Table 3 Average residual compressive strength of UHPC cylinder test block at various temperatures

组号	温度/℃	强度/MPa	平均强度/MPa	方差/MPa ²	标准差/MPa	变异系数/%
UHPC1	20	106.99、109.12、111.55	109.22	5.21	2.28	2.09
	200	104.15、115.30、112.22	110.56	33.16	5.76	5.21
	400	174.64、162.75	168.70	70.69	8.41	4.98
UHPC2	20	87.56、83.79、84.07	85.14	4.41	2.10	2.47
	200	88.82、97.54、76.18	87.51	115.34	10.74	12.27
UHPC3	20	82.31、86.04、82.02	83.46	5.03	2.24	2.69
	200	87.54、95.57、90.12	91.08	16.81	4.10	4.50
	400	116.79、114.24、115.61	115.55	1.63	1.28	1.10
	600	82.71、80.94、79.18	80.94	3.12	1.77	2.18
	800	48.88、46.61、44.26	46.58	5.34	2.31	4.96
	1000	24.04、27.84、26.87	26.25	3.90	1.97	7.52
UHPC4	20	94.71、89.20、83.56	89.16	31.08	5.58	6.25
	200	107.76、99.36、90.81	99.31	71.83	8.48	8.53
	400	138.81、141.78、144.63	141.74	8.47	2.91	2.05
	600	88.37、96.63、104.73	96.58	66.91	8.18	8.47
	800	54.68、69.92、66.39	63.66	63.64	7.98	12.53
	1000	24.52、27.84、26.87	26.41	2.91	1.71	6.46
UHPC5	20	104.09、97.04、89.85	96.99	50.70	7.12	7.34
	200	107.51、103.54、111.35	107.47	15.25	3.91	3.63
	400	142.18、140.66、137.94	140.26	4.61	2.15	1.53
UHPC6	20	95.16、97.21、87.41	93.26	26.72	5.17	5.54
	200	96.41、97.02、96.11	96.51	0.22	0.46	0.48
	400	135.59、130.44、155.74	140.59	178.77	13.37	9.51

50.75%。温度在 400~600 °C 之间时,水泥产生的 C-S-H 凝胶脱水分解,氢氧化钙发生分解反应产生碳酸钙,除加入 PP 纤维的混凝土试件,其余均在此温度范围内发生爆炸,UHPC3 组抗压强度降低了 6.14%、UHPC4 组增加了 7.68%。当温度达到 600~800 °C 时,前一个过程产生的碳酸钙再二次分解,此时难以分解的化学结合水也已分解完全,抗压强度均大幅下降,UHPC3 组减小了 45.83%,UHPC4 组强度减少了 28.48%;当温度超过 900 °C

时,水泥水化产物已不复存在,进而试件整体变疏松,相对抗压强度相差不大,分别为常温下的 30.51% 和 29.62%。

2.3.2 UHPC 高温后应力-应变曲线

图 7 为 UHPC1-UHPC6 的应力-应变曲线,随着应变轴的右移,UHPC 试件强度整体呈现先上升后下降的趋势,不同颜色的曲线代表不同温度后试件的应力-应变曲线,可以看出,随着温度的升高,峰值应力逐渐增大,且下降段下降速率更大。

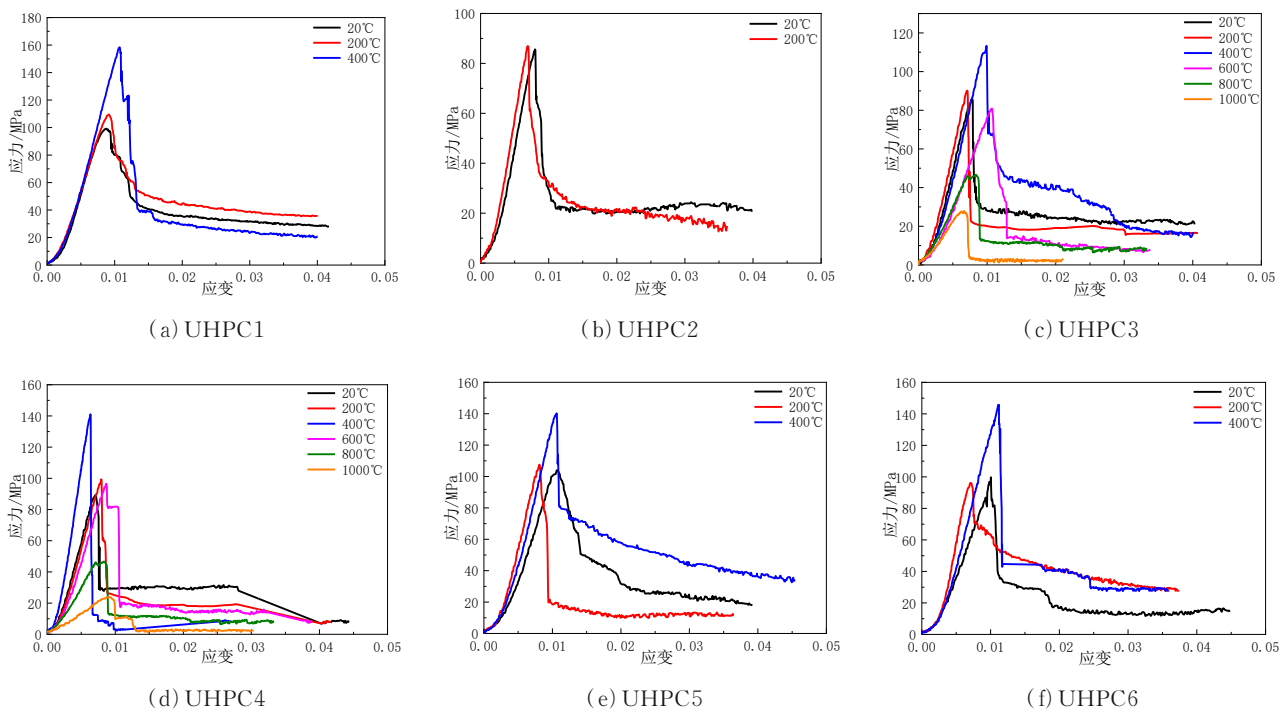


图 7 UHPC 应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of UHPC

UHPC3 和 UHPC4 同为混掺 PP 纤维组,温度能达到 1 000 °C,残余抗压强度变化 400 °C 为一个分界点,400 °C 之前应力-应变曲线随着温度提高逐渐增大,400 °C 之后,峰值应力逐渐变小,当试件达到最大峰值应力时,UHPC4 组相比与 UHPC3 组应变更靠近左侧坐标轴,说明 UHPC3 配合比的试件韧性更好,脆性破坏更小;温度在 1 000 °C 时,两组试件峰值应力均在 26 MPa 左右,破坏后的应力均低于 10 MPa,强度降低明显。对比 UHPC1 和 UHPC2 配合比,可以发现:单掺钢纤维的试件韧性要比参加两种钢纤维的大。随着温度的不断增大,如 800~1 000 °C 时,图中峰值点附近应力上下波动,有时还会出现小幅度应力反弹的情况,出现这种现象主要是因为温度过高,基体内的水泥水化产物绝大部分发生物理或化学分解,水分蒸发完全,试件中间集中区域与边缘区域均已达到极限承载力。

对比分析 UHPC1、UHPC4、UHPC6 应力-应变

曲线可见:高温后 UHPC 圆柱体试件抗压强度中,单掺钢纤维的抗压强度大于混掺 PVA 纤维的抗压强度大于混掺 PP 纤维的抗压强度;混掺 PP 纤维的试件弹性模量大于混掺 PVA 纤维试件大于单掺钢纤维试件。

3 结论

通过对高温作用后不同纤维增强的超高性能混凝土圆柱体进行抗压强度试验,得出以下结论:

1) 纤维的掺入可以提高 UHPC 的塑性,增大变形能力,单掺钢纤维的试件韧性要优于混掺两种钢纤维。

2) 随着温度的升高,UHPC 试件峰值应变变大,说明高温提高了超高性能混凝土的延性。

3) 掺加 PP 纤维 UHPC 试件温度应力明显小于其他组,且 400 °C 为分界点,之前均随着目标温度的增加呈上升趋势,400 °C 之后逐渐下降。

4)PP纤维的能抵抗温度应力,有效减少高温爆裂现象,掺加PP纤维的UHPC试件在经过1 000℃高温后任何保留30%的抗压强度。

参考文献

- [1] BONNEAU O, LACHEMI M, DALLAIRE É, et al. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes [J]. *ACI Materials Journal*, 1997, 94(4): 286-290.
- [2] MA Q M, GUO R X, ZHAO Z M, et al. Mechanical properties of concrete at high temperature: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 371-383.
- [3] ZHANG P, KANG L Y, WANG J, et al. Mechanical properties and explosive spalling behavior of steel-fiber-reinforced concrete exposed to high temperature: A review [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2324.
- [4] KALIFA P, CHÉNÉ G, GALLÉ C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(10): 1487-1499.
- [5] TANG W Z, YANG L, ZHU W, et al. Numerical simulation of temperature distribution and thermal-stress field in a turbine blade with multilayer-structure TBCs by a fluid-solid coupling method [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(5): 452-458.
- [6] 董香军. 纤维高性能混凝土高温、明火力学与爆裂性能研究 [D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2006.
- DONG X J. Research on mechanical properties and spalling behaviours of FRHPC subjected to high temperature and fire [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] YANG J, CHEN B C, NUTI C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302: 124104.
- [8] LARSEN I L, THORSTENSEN R T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119459.
- [9] CHEN H J, YU Y L, TANG C W. Mechanical properties of ultra-high performance concrete before and after exposure to high temperatures [J]. *Materials*, 2020, 13(3): 770.
- [10] 顾连胜, 刘大为, 梁炯丰, 等. 高温后玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[J]. *混凝土*, 2023(3): 74-76.
- GU L S, LIU D W, LIANG J F, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete after high temperature [J]. *Concrete*, 2023(3): 74-76. (in Chinese)
- [11] SCIARRETTA F, FAVA S, FRANCINI M, et al. Ultra-high performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124608.
- [12] 许成祥, 赵晓悦, 许奇琦, 等. 钢-PVA混杂纤维高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(5): 2015-2025.
- XU C X, ZHAO X Y, XU Q Q, et al. Experimental study on the residual mechanical properties of steel-PVA hybrid fiber high performance concrete after high temperature [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(5): 2015-2025. (in Chinese)
- [13] LIANG X W, WU C Q, SU Y, et al. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 400-412.
- [14] 王平, 肖建庄, 陈瑞生, 等. 聚丙烯纤维对高性能混凝土高温后力学性能的影响试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(11): 67-69, 77.
- WANG P, XIAO J Z, CHEN R S, et al. Experimental study on effect of polypropylene fiber on mechanical property of high performance concrete after high temperature [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(11): 67-69, 77. (in Chinese)
- [15] WU C, MENG S P, ZHOU Z. Analyses on temperature field distribution and internal force of concrete containment vessel after LOCA [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(12): 206-212.
- [16] 杨婷, 刘中宪, 杨烨凯, 等. 超高性能混凝土高温后性能试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 115-126.
- YANG T, LIU Z X, YANG Y K, et al. Experimental investigation on behavior of ultra-high performance concrete after high temperature [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(3): 115-126. (in Chinese)
- [17] 肖建庄, 宋志文, 张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(1): 17-21.
- XIAO J Z, SONG Z W, ZHANG F. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1): 17-21. (in Chinese)
- [18] 高丹盈, 李晗, 杨帆. 聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(1): 187-193.
- GAO D Y, LI H, YANG F. Performance of polypropylene-steel hybrid fiber reinforced concrete after being exposed to high temperature [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(1): 187-193. (in Chinese)
- [19] 钻芯检测离心高强混凝土抗压强度试验方法: GB/T 19496—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Determinating of the compressive strength of spun high-strength concrete cores: GB/T 19496—2004 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)