

文章编号:1007-9629(2022)02-0142-08

PP 纤维和钢筋对高温下 C60HPC 板热应变的影响

杜红秀^{1,*}, 吴振戌¹, 杜 帆^{1,2}

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中建科工集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:通过测试高温下掺与未掺聚丙烯(PP)纤维、有无钢筋网的 C60 高性能混凝土板内部不同深度处的温度和热应变变化,研究了 PP 纤维和钢筋网对 C60 高性能混凝土板高温变形性能的影响.结果表明:C60 高性能混凝土板内部各深度处的温度随着加热时间的推移而升高,随着与受热面距离的增加而递减;与高温下未掺纤维但布置钢筋网的钢筋混凝土板升温速率相比,掺加 PP 纤维可降低钢筋混凝土板的升温速率;高温下混凝土板的热应变随着温度的升高而增大,在相同温度下,距混凝土板底部受热面 50 mm 处的热应变最大;与高温下未掺纤维但布置钢筋网的钢筋混凝土板热应变相比,掺加 PP 纤维可降低钢筋混凝土板的热应变,两者在距钢筋混凝土板底部受热面 25、50、75 mm 处所测的热应变最大差值分别为 54、50、36 $\mu\text{m}/\text{m}$ 左右;距底部受热面 25 mm 时,钢筋混凝土板中钢筋周围混凝土的热应变明显小于无钢筋网混凝土板的热应变,表明钢筋和 PP 纤维均能降低混凝土在高温下的热应变,改善混凝土的变形性能.

关键词:聚丙烯纤维;钢筋;高温;C60 高性能混凝土板;热应变

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.005

Effect of Polypropylene Fiber and Steel Bar on Thermal Strain of C60 High Performance Concrete Slab at High Temperature

DU Hongxiu^{1,*}, WU Zhenxu¹, DU Fan^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. China Construction Science and Industry Corporation Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The high temperature test of C60 high performance concrete slab mixed with or without polypropylene (PP) fiber and with or without steel mesh is carried out. By testing the temperature and thermal strain changes at different depths of the concrete slab under high temperature, the effect of PP fiber and steel mesh on the high temperature deformation performance of the concrete slab is studied. The results show that the temperature at each depth of the C60 high performance concrete slab increases with the passage of heating time, and decreases with the increase of the distance from the heating surface. Compared with the heating rate of the reinforced concrete slab without PP fiber at high temperature, adding PP fiber can reduce the heating rate of the reinforced concrete slab. The thermal strain of the concrete slab increases with the increase of the temperature at high temperature, and at the same temperature, the thermal strain is the largest at 50 mm from the bottom of the concrete slab. Compared with the thermal strain of reinforced concrete slab without PP fiber at high temperature, adding PP fiber can reduce the thermal strain of reinforced concrete slab, the maximum strain difference between the two measured at 25, 50, 75 mm from the bottom of the reinforced concrete slab are about 54, 50, 36 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectively. When

收稿日期:2020-10-09; 修订日期:2020-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478290)

第一作者(通讯作者):杜红秀(1962—),女,山西晋城人,太原理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:tydxx@163.com

the distance from the bottom is 25 mm, the thermal strain of the concrete around the steel bars under high temperature of the reinforced concrete slab is significantly less than that of the concrete without steel mesh, indicating that both steel bars and PP fibers can reduce the thermal strain of concrete and improve the deformation performance of concrete.

Key words: polypropylene(PP) fiber; steel bar; high temperature; C60 high performance concrete slab; thermal strain

随着经济的发展,高性能混凝土(HPC)由于耐久性高、工作性好、体积稳定性强等特点被广泛用于超高层、大跨建筑^[1-2]。然而,发生火灾时高性能混凝土内部化学成分发生变化、内部结构被破坏,致使其力学性能、耐久性等降低^[3-7],甚至发生爆裂^[8-9]。有研究表明,掺加聚丙烯(PP)纤维能够改善高温时高性能混凝土的内部结构,降低高温对高性能混凝土的损伤,有效抑制高性能混凝土的高温爆裂^[10-13]。

目前国内外已经对高温后混凝土的热应变进行了一系列研究,发现混凝土应变随着受火温度的升高而逐渐增大^[14-17];掺加PP纤维可增大混凝土延性,降低混凝土损伤时的变形^[18-19]。当建筑物发生火灾时,混凝土构件在高温、荷载及相关约束等多重作用下,内部所产生的热应力、热变形是结构力学性能发生变化的重要影响因素。本文针对C60高性能混凝土(C60HPC)板,采用振弦式应变计测量该板的热应变,分析温度、纤维、钢筋对C60HPC板不同位置处热应变的影响,以期为分析计算结构热应力及承载力损伤提供试验依据。

1 试验设计

1.1 原材料及配合比

水泥为太原产P·O42.5水泥;粗骨料选用粒径为5~25 mm连续级配的石灰石碎石;细骨料选用细度模数为2.89的豆罗沙;粉煤灰为太原热电厂的Ⅱ级粉煤灰,矿粉为S95级矿粉;PP纤维长度为15 mm、直径为25 μm,熔点约170 ℃;减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水率25%~30%;水为自来水。

在制备C60高性能混凝土板之前,本课题组已进行了C60高性能混凝土配合比设计及力学性能试

验。该混凝土设计坍落度为(180±20) mm,实测拌和物坍落度为170~200 mm,黏聚性、保水性良好;试块成型后标准养护28 d,测得其立方体抗压强度满足C60强度等级,氯离子迁移系数为 $1.711\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ^[20],小于 $3.0\times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$,符合JGJ/T 385—2015《高性能混凝土评价标准》的要求。本试验C60HPC配合比见表1。表1中:SJHPC表示布置钢筋网且PP纤维体积分数为0%的C60钢筋混凝土板;PWHPC表示无钢筋网且PP纤维体积分数为0.2%的C60纤维增强混凝土板;PJHPC表示布置钢筋网且PP纤维体积分数为0.2%的C60纤维增强钢筋混凝土板。

1.2 混凝土板的制备及测试

参照GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》以及实验室电阻炉尺寸,3种混凝土板尺寸均为390 mm×390 mm×100 mm;钢筋混凝土板所用钢筋为HRB400、 $\phi 12$ 螺纹钢,两同向钢筋间距为200 mm,距侧面95 mm,钢筋网呈“井”字排布,距混凝土板底部受热面25 mm。为监测加热过程中混凝土板不同位置处的热应变变化情况,在距混凝土板底部受热面25、50、75 mm处埋置测温范围为-55~125 ℃的振弦式应变计;同时,为监测整个加热过程中混凝土板不同位置处的温度变化情况,在应变计周围埋置K型热电偶,通过与温度巡检仪连接可测得加热过程中距混凝土板底部受热面25、50、75 mm处的温度。钢筋在混凝土板中的排布、混凝土板内部热电偶和应变计的布置见图1。混凝土板成型24 h后脱模,放入(20±2) ℃的水中养护至28 d,养护完毕后捞出静置,使其达到当地平衡含水率。

1.3 试验方法

使用SRJX箱式电阻炉(额定电压220 V,炉膛温度0~1 200 ℃)对混凝土板进行加热,最高升温速率

表1 C60HPC配合比
Table1 Mix proportions of C60HPC

Concrete slab type	Coarse aggregate	Fine aggregate	Cement	Mineral powder	Superplasticizer	Water	Fly ash	PP fiber
SJHPC	1 024. 00	711. 00	412. 00	83. 00	12. 65	165. 00	55. 00	0
PWHPC	1 022. 00	710. 00	411. 00	83. 00	12. 62	165. 00	55. 00	1. 80
PJHPC	1 022. 00	710. 00	411. 00	83. 00	12. 62	165. 00	55. 00	1. 80

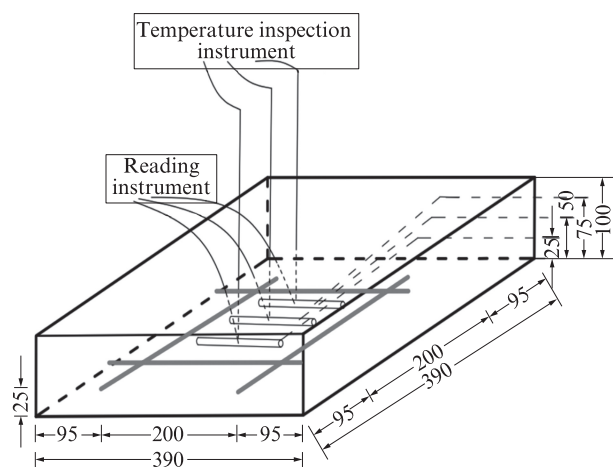


图1 混凝土板设计图

Fig. 1 Design drawing of concrete slab (size: mm)

为 $23\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 平均升温速率约 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 低于标准升温速率. 由于本次试验与课题组的蒸汽压试验同时进行, 且蒸汽压试验的温度需要达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故本次试验目标温度设置为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. 将混凝土板立于炉膛门口, 并将混凝土板与炉膛的缝隙用耐高温岩棉封堵, 以防止炉膛内热气逸散. 加热过程中每隔 5 min 通过应变计读数仪、温度巡检仪记录 1 次混凝土板不同位置处的应变和温度, 直至应变计在高温下烧损; 待加热完成的混凝土板自然冷却后取出, 试验结束.

2 试验结果分析

2.1 混凝土板在高温下的现象

混凝土板在加热温度小于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时无明显变化; 大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 混凝土板内部自由水变为水蒸气向外逸出, 并伴随“吡吡”的声响; 随着温度的升高, 混凝土板背后出现渗水现象 (见图 2), 且伴随刺鼻的味道, 这可能是高温下外加剂蒸发引起的; 当加热温度大于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 混凝土板四周出现大量肉眼可见的水蒸气; 当加热温度达到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 混凝土板表面有残留水印.



图2 混凝土板高温渗水图

Fig. 2 Water seepage diagram of concrete slab at high temperature

2.2 混凝土板测点温度随加热时间的变化关系

本文用升温速率 (温度变化差值与温度变化时间的比值) 来表征高温作用下钢筋和 PP 纤维对混凝土板内部温度变化的影响.

在高温作用下, 有钢筋网、无钢筋网的纤维增强混凝土板 PJHPC、PWHPC 在不同测点处的温度随加热时间的变化关系见图 3. 由图 3 可见: 加热前, 这 2 种混凝土板在各测点处的温度基本相同, 随着加热时间的增加, 混凝土板在各测点处的温度逐渐增大; 测点距底部受热面越近, 其升温速率越快, 温度越高^[21]. 距底部受热面 25 mm 处, PJHPC、PWHPC 的升温速率分别为 2.39 、 $2.21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 距底部受热面 75 mm 处, PJHPC、PWHPC 的升温速率分别为 0.84 、 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. 当加热时间大于 75 min 时, 距底部受热面 25 mm 处, PJHPC 的温度较 PWHPC 略大, 这可能是由于此处热电偶靠近钢筋网, 而钢筋网的升温速率远大于混凝土的升温速率所致. 图 4 为 PJHPC、PWHPC 在加热时间达 120 min 时, 距底部受热面 25 、 50 、 75 mm 处的温度. 由图 4 可知: 距底部受热面 25 mm 处, PJHPC 的温度明显高于 PWHPC 的温度, 两者相差

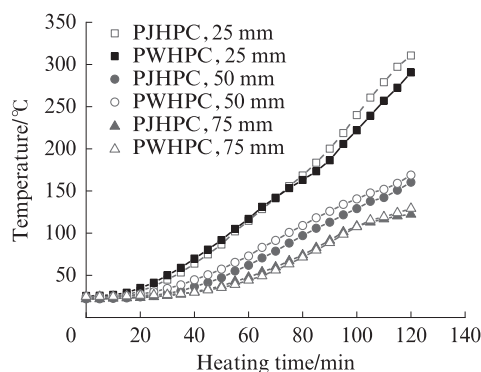
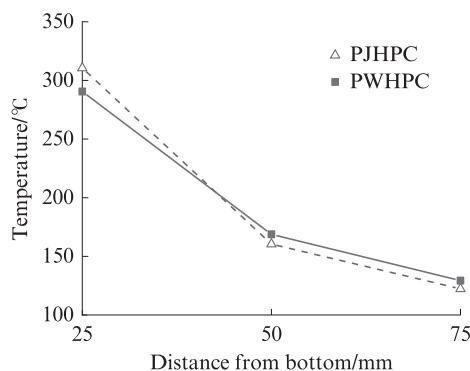


图3 PJHPC、PWHPC 的温度随加热时间变化关系

Fig. 3 Temperature changes of PJHPC and PWHPC with the heating time

图4 加热 120 min 时 PJHPC、PWHPC 在不同测点处的温度Fig. 4 Temperature of PJHPC and PWHPC at different measuring points when heating for 120 min

20.1℃;距底部受热面50、75 mm处,由于距钢筋网较远,PJHPC与PWHPC的温度较接近,两者分别相差8.4、7.0℃,远小于25 mm处两者的温差。

高温作用下,未掺、掺有PP纤维的钢筋混凝土板SJHPC、PJHPC在不同测点处的温度随加热时间的变化关系见图5。由图5可见,SJHPC和PJHPC在各测点处的温度均随着加热时间的增加而增大。SJHPC在距底部受热面25、50、75 mm处的升温速率分别为2.60、1.30、1.18℃/min;PJHPC在距底部受热面25、50、75 mm处的升温速率分别为2.39、1.15、0.84℃/min。加热时间为60 min时,SJHPC和PJHPC在距底部受热面25、50、75 mm处的温度分别为118、64、53℃左右,两者较为接近;加热时间大于60 min后,SJHPC在各测点处的温度均大于PJHPC,且加热时间越长,两者的温差越大。图6为SJHPC和PJHPC在加热时间达120 min时,距底部受热面25、50、75 mm处的温度。由图6可知,距底部受热面25、50、75 mm处,SJHPC和PJHPC的温差分别为22.8、16.4、41.6℃。表明掺加PP纤维可以降低

混凝土受热时的温度。原因是PP纤维导热系数较低,致使加热时间相同时PJHPC的升温速率低于SJHPC^[22]。

2.3 钢筋对混凝土板热应变的影响

有无钢筋网的纤维增强混凝土板PJHPC、PWHPC在各测点处的热应变随其温度的变化关系如图7所示。由图7可见,PJHPC、PWHPC这2种纤维增强混凝土板在各测点处的热应变均随其温度的升高而增大。距混凝土板底部受热面25 mm处,当其温度小于60℃时,PWHPC和PJHPC的热应变变化趋势基本相同、应变值接近,60℃时两者应变值约为61 μm/m;当其温度大于60℃后,PWHPC和PJHPC的热应变变化速率分别为1.10、0.82 μm/(m·℃),前者大于后者;至140℃时,与PJHPC的应变值相比,PWHPC的应变值高出32 μm/m左右,表明钢筋网对相同温度下的混凝土变形有约束作用。距混凝土板底部受热面50 mm处,PWHPC和PJHPC的热应变变化趋势大致相同,两者的热应变变化速率分别为2.23、2.25 μm/(m·℃);当温度大于70℃后,PWHPC和PJHPC的应变值接近,两者相差7 μm/m左右。距混凝土板底部受热面75 mm处,当其温度小于60℃时,PWHPC和PJHPC的热应变变化趋势基本相同、应变值接近,60℃时两者应变值约为125 μm/m;当其温度大于60℃后,PWHPC的应变值略大于PJHPC,但远小于25 mm处两者的差值。通过测试距混凝土板底部受热面25、50、75 mm处的热应变可知,在高温作用下,钢筋网对自身周围的混凝土有明显的约束作用,而对距钢筋网较远的混凝土约束作用效果不明显^[19]。

2.4 纤维对钢筋混凝土板热应变的影响

掺与未掺纤维的钢筋混凝土板PJHPC、SJHPC在各测点处的热应变随其温度的变化关系如图8所示。由图8可见,PJHPC、SJHPC这2种钢筋混凝土板在各测点处的热应变均随其温度的升高而增大。距混凝土板底部受热面25 mm处,当温度小于40℃时,相同温度下SJHPC和PJHPC的热应变基本相同,40℃时两者应变值约为48 μm/m;当温度大于40℃后,SJHPC和PJHPC的热应变变化速率分别为1.34、0.83 μm/(m·℃),前者大于后者;至122℃时,SJHPC的应变值明显高于PJHPC,两者相差约54 μm/m。距混凝土板底部受热面50 mm处,当温度小于55℃时,相同温度下SJHPC和PJHPC的热应变接近,55℃时两者应变值约为120 μm/m;当温度大于55℃后,SJHPC和PJHPC的热应变变化速率分别为1.69、1.42 μm/(m·℃),前者大于后者;至98℃时,SJHPC

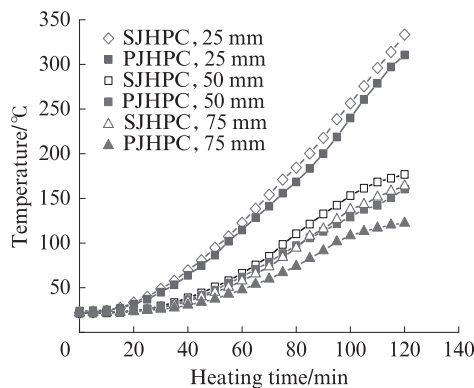


图5 SJHPC、PJHPC的温度随加热时间变化关系
Fig. 5 Temperature changes of SJHPC and PJHPC with the heating time

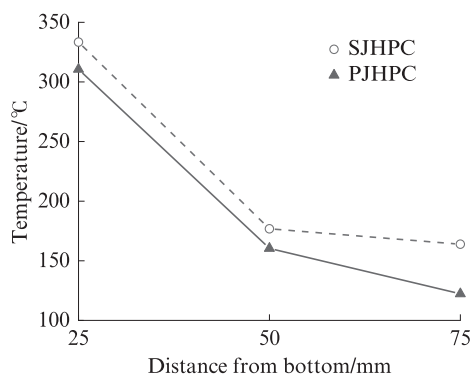


图6 加热120 min时SJHPC、PJHPC在不同测点处的温度
Fig. 6 Temperature of SJHPC and PJHPC at different measuring points when heating for 120 min

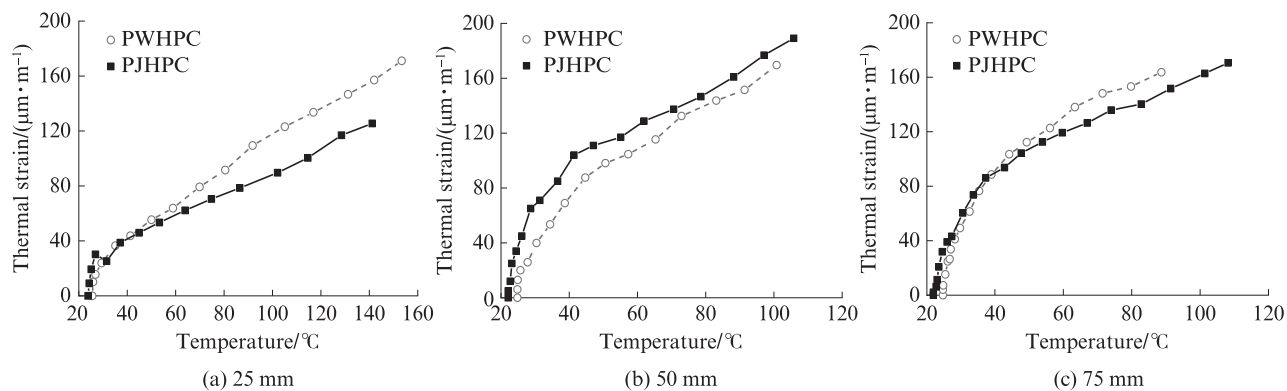


图7 高温作用下钢筋对混凝土板不同测点处热应变的影响

Fig. 7 Effect of steel bars on thermal strain of concrete slab at different positions under high temperature

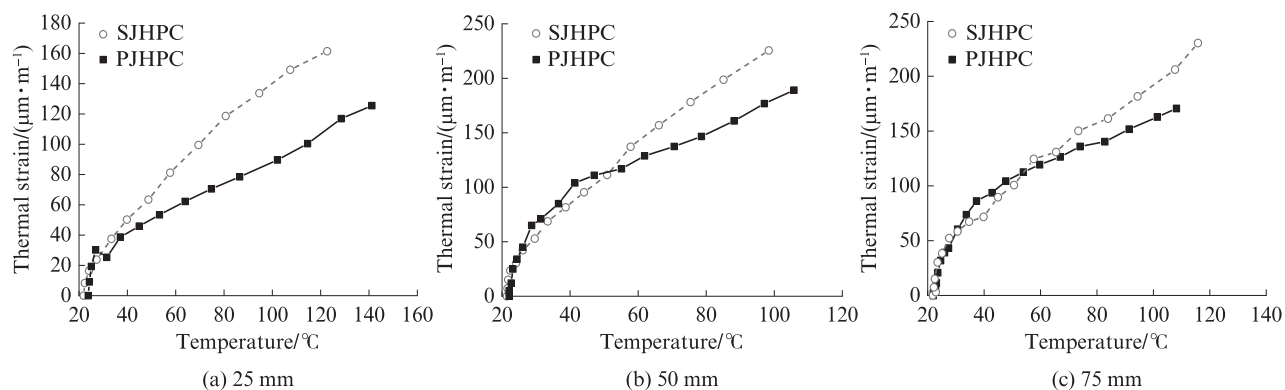


图8 高温作用下PP纤维掺量对混凝土板不同测点处热应变的影响

Fig. 8 Effect of PP fiber content on thermal strain of concrete slab at different positions under high temperature

的应变值明显高于PJHPC,两者相差约 $50 \mu\text{m}/\text{m}$.距混凝土板底部受热面75 mm处,当温度小于 60°C 时,相同温度下SJHPC和PJHPC的热应变接近, 60°C 时两者应变值约为 $123 \mu\text{m}/\text{m}$;当温度大于 60°C 后, SJHPC和PJHPC的热应变变化速率分别为 1.94 、 $1.24 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,前者大于后者;至 113°C 时, SJHPC的应变值明显高于PJHPC,两者相差约 $36 \mu\text{m}/\text{m}$.通过测试SJHPC和PJHPC在距底部受热面25、50、75 mm处的应变值,发现相同温度、相同测点处

PJHPC的应变值均小于SJHPC,表明掺加PP纤维能够约束混凝土的变形,降低混凝土的高温损伤^[23].

SJHPC、PJHPC这2种钢筋混凝土板在各测点处的热应变随其温度的变化关系见图9.由图9可见,对于未掺PP纤维的钢筋混凝土板SJHPC而言,当距其底部受热面50、75 mm处的温度小于 60°C 时,两者应变值相近,25 mm处的热应变由于钢筋网的约束作用而偏小;当温度大于 60°C 后,50 mm处(混凝土板中心)的应变值较另2处测点大,至 98°C

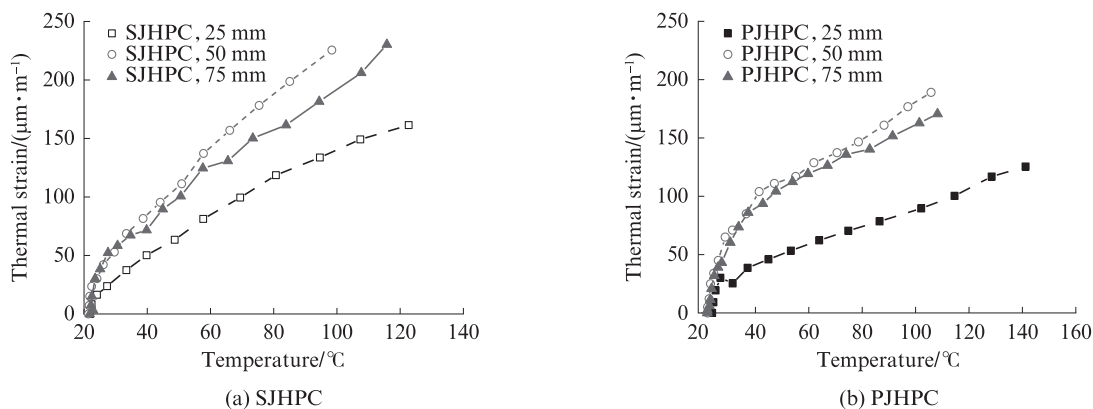


图9 SJHPC、PJHPC的热应变随温度变化情况

Fig. 9 Thermal strain of SJHPC and PJHPC varies with temperature

时,50 mm处的应变值约为 $225 \mu\text{m}/\text{m}$,要比75、25 mm处的应变值分别高出19.5%、40.7%。对于掺有PP纤维的钢筋混凝土板PJHPC而言,其在各测点处的热应变变化关系与SJHPC相似,但数值偏小;至98℃时,PJHPC在50 mm处的应变值较SJHPC降低了21.6%,原因同样是掺加PP纤维能够有效约束混凝土的变形。

2.5 加热时间、温度与热应变的关系

SJHPC、PWHPC、PJHPC的加热时间和温度

对其热应变的影响见图10。由图10可见,随着加热时间和温度的增加,3种混凝土板的热应变均逐渐增大。相同加热时间和温度下:(1)3种混凝土板在距底部受热面50 mm处的热应变均大于25、75 mm测点处的热应变;(2)与未掺PP纤维的钢筋混凝土板相比,掺加PP纤维后的钢筋混凝土板热应变偏小;(3)在钢筋混凝土板中,钢筋周围混凝土的热应变明显小于无钢筋网混凝土板的热应变。

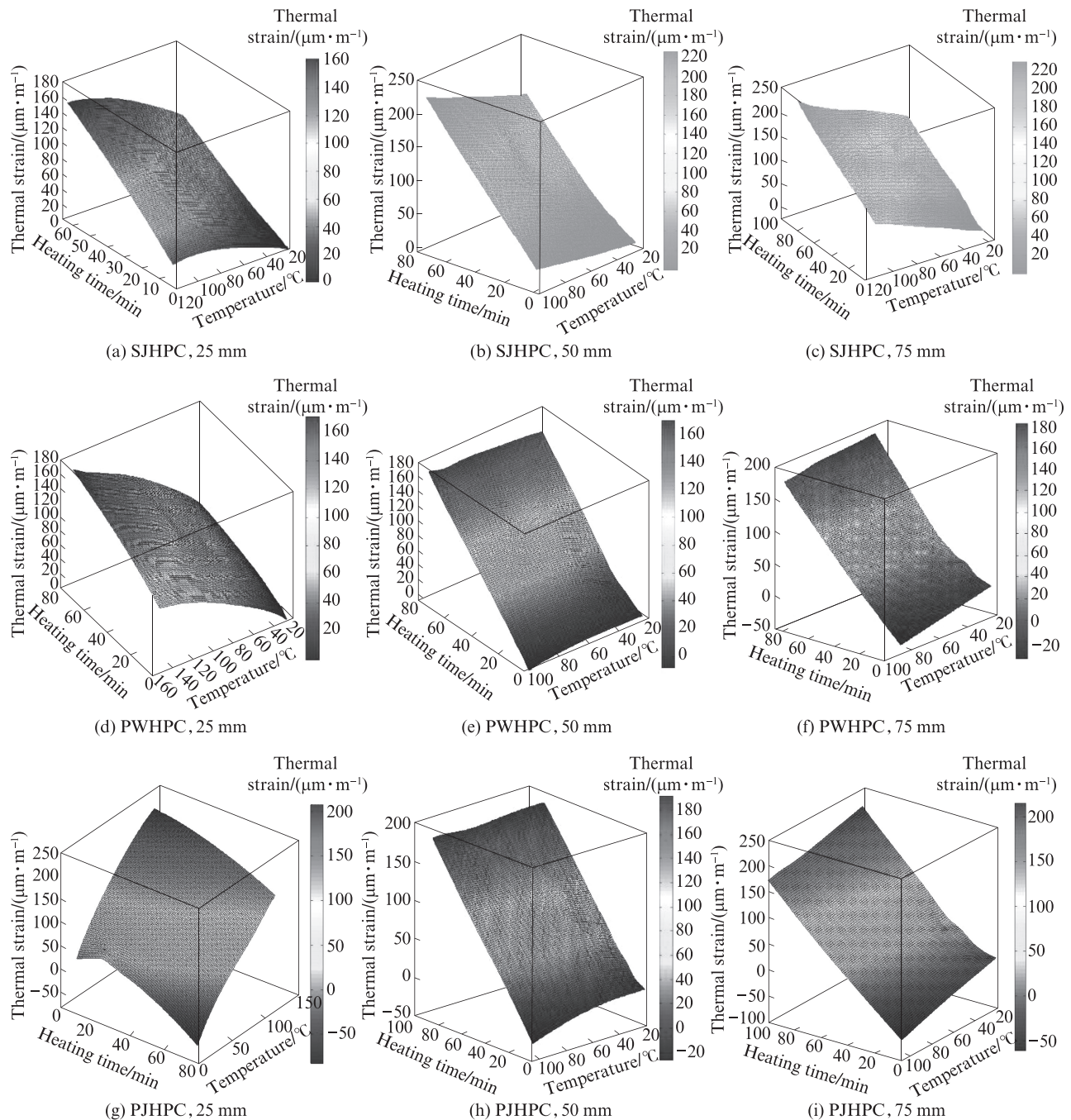


图10 在SJHPC、PWHPC、PJHPC不同测点处加热时间、温度与热应变的关系

Fig. 10 Relationship between heating time, temperature and thermal strain at different positions of SJHPC, PWHPC, PJHPC

3 结论

(1)随着加热时间的增加,C60高性能混凝土板的温度逐渐升高;相同加热时间下,C60高性能混凝土板的温度随着与受热面距离的增加而降低;钢筋网能增加自身周围混凝土的升温速率;与高温下未掺聚丙烯纤维的钢筋混凝土板相比,掺加聚丙烯纤维能够减缓钢筋混凝土板的升温速率。

(2)随着温度的升高,无钢筋网和有钢筋网的纤维增强混凝土板PWHPC和PJHPC的热应变逐渐增大;距混凝土板底部受热面25 mm处,当其温度小于60℃时,PWHPC和PJHPC的热应变变化趋势基本相同,当其温度大于60℃时,PWHPC和PJHPC的热应变变化速率分别为1.10、0.82 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,至140℃时,PWHPC的热应变值要比PJHPC高32 $\mu\text{m}/\text{m}$ 左右,表明钢筋网对混凝土的变形有约束作用。

(3)随着温度的升高,掺与未掺PP纤维的钢筋混凝土板PJHPC和SJHPC的热应变逐渐增大,且距钢筋混凝土板底部受热面50 mm处的热应变较25、75 mm处略大;当温度相同时,SJHPC在不同测点处的热应变均大于PJHPC,两者在距钢筋混凝土板底部受热面25、50、75 mm处测得的最大差值分别为54、50、36 $\mu\text{m}/\text{m}$ 左右,表明掺加聚丙烯纤维能够降低高温时混凝土的应变,改善混凝土的变形能力。

参考文献:

- [1] 清华大学老科技工作者协会,北京交通大学土建学院.CECS 207—2006:高性能混凝土应用技术规程[S].北京:中国计划出版社,2006.
Tsinghua University Association of Senior Scientists and Technicians, School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University. CECS 207—2006: Technical specification for application of high performance concrete [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.(in Chinese)
- [2] 董方园,郑山锁,宋明辰,等.高性能混凝土研究进展Ⅱ:耐久性能及寿命预测模型[J].材料导报,2018,32(3):496-502, 509.
DONG Fangyuan, ZHENG Shansuo, SONG Mingchen, et al. Research progress of high performance concrete Ⅱ: Durability and life prediction model [J]. Materials Reports, 2018, 32(3): 496-502, 509.(in Chinese)
- [3] 李敏,钱春香,王珩,等.高强混凝土受火后力学性能变化规律的研究[J].硅酸盐学报,2003,31(11):1116-1120.
LI Min, QIAN Chunxiang, WANG Heng, et al. Mechanical properties of high-strength concrete after fire [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11): 1116-1120.(in Chinese)
- [4] 高丹盈,赵亮平,杨淑慧.纤维矿渣微粉混凝土高温中的劈拉性能[J].硅酸盐学报,2012,40(5):677-684.
GAO Danying, ZHAO Liangping, YANG Shuhui. Splitting tensile properties of fiber reinforced ground granulated blast furnace slag concrete at high temperatures [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(5): 677-684.(in Chinese)
- [5] 申嘉荣,徐千军.高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究[J].材料导报,2020,34(2):2046-2051.
SHEN Jiarong, XU Qianjun. Characteristics of pore structure change and compressive strength reduction of concrete under elevated temperatures [J]. Materials Reports, 2020, 34(2): 2046-2051.(in Chinese)
- [6] 杜红秀,樊亚男.基于X-CT的C60高性能混凝土高温微观结构损伤研究[J].建筑材料学报,2020,23(1):210-215.
DU Hongxiu, FAN Yanan. Meso-structure damage of C60 high performance concrete at high temperature based on X-CT [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 210-215.(in Chinese)
- [7] 姜福香,于奎峰,赵铁军,等.高温后混凝土耐久性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2010,36(2):32-34.
JIANG Fuxiang, YU Kuifeng, ZHAO Tiejun, et al. Experimental study on durability of concrete after exposure to high temperature [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(2): 32-34.(in Chinese)
- [8] XIAO J, 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.
- [9] 柳献,袁勇,叶光,等.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.
LIU Xian, YUAN Yong, YE Guang, et al. Investigation on the mechanism of explosive spalling of high performance concrete at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 61-68. (in Chinese)
- [10] YE H W, FENG N Q, YAN L H, et al. Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 2012(1687-8434).
- [11] DING Y, ZHANG C, CAO M, et al. Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 456-469.
- [12] 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.
JU Liyan, ZHANG Xiong. Investigation of influence of PP fiber on performances of HPC under high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(1): 25-28.(in Chinese)
- [13] PENG G F, YANG W W, JIE Z, et al. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber toughened high-performance concrete subjected to high temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): 723-727.
- [14] 徐明,王韬,陈忠范.高温后再应力-应变关系试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(2):158-164.
XU Ming, WANG Tao, CHEN Zhongfan. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 158-164.(in Chinese)
- [15] 时金娜,赵燕茹,郝松,等.基于DIC技术的高温后混凝土变形性能[J].建筑材料学报,2019,22(4):584-591.

- SHI Jinna, ZHAO Yanru, HAO Song, et al. Deformation behavior of concrete under uniaxial compression after high temperature by DIC technology[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4):584-591.(in Chinese)
- [16] CHANG Y F, CHEN Y H, SHEU M S, et al. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1999-2005.
- [17] 刘鑫, 杨鼎宜, 刘廉, 等. 温度-恒载耦合作用下钢纤维混凝土损伤时变规律及其声发射响应[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):24-30.
- LIU Xin, YANG Dingyi, LIU Lian, et al. Time-varying law and acoustic emission response of steel fiber reinforced concrete under temperature-constant load coupling action[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):24-30.(in Chinese)
- [18] 周兴宇, 杨鼎宜, 李玉寿, 等. 多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能及损伤演化研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4):49-53.
- ZHOU Xingyu, YANG Dingyi, LI Yushou, et al. Study on mechanical properties and damage evolution of multi-size polypropylene fiber reinforced concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4):49-53. (in Chinese)
- [19] 陈尧. C80 高性能混凝土简支梁高温热应变试验及模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- CHEN Yao. The thermal strain experimentation and computer simulation of C80HPC simple beam on elevated temperature[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.(in Chinese)
- [20] 张琦. 基于氯离子渗透性的高性能橡胶混凝土高温后耐久性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- ZHANG Qi. The study on the durability of rubber-high performance concrete at different temperature based upon the chlorine-ion penetration [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.(in Chinese)
- [21] 魏朝园, 李亮. 高温作用下钢筋混凝土梁温度场数值模拟[C]//《工业建筑》2018 年全国学术年会论文集(下册). 北京: 工业建筑杂志社, 2018:786-790.
- WEI Zhaoyuan, LI Liang. Numerical analysis of reinforced concrete beams under high temperature [C]// "Industrial Construction" 2018 National Academic Annual Conference Proceedings (Volume 2). Beijing: Industrial Construction, 2018: 786-790. (in Chinese)
- [22] JU Y, LIU H, et al. On the thermal spalling mechanism of reactive powder concrete exposed to high temperature: Numerical and experimental studies [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 98:493-507.
- [23] 徐礼华, 李彪, 池寅, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴循环受压应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4):140-152.
- XU Lihua, LI Biao, CHI Yin, et al. Experimental investigation on stress-strain relation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4):140-152.(in Chinese)