第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0340-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
© 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:丁明冬, 杜红秀. 混杂纤维对活性粉末混凝土高温后力学性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 340—344
Ding Mingdong, Du Hongxiu. The influence of the mixed fiber on the mechanical properties of the reactive powder concrete at high temperature [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 340—344

混杂纤维对活性粉末混凝土高温后力学性能的影响

丁明冬 杜红秀
(太原理工大学建筑与土木工程学院,太原 030024)

摘 要 研究了聚丙烯纤维体积掺量为 0.3% 时,不同钢纤维掺量对活性粉末混凝土高温后轴心抗拉强度、抗压强度、抗折强度、拉压比、折压比的影响及其随温度的变化规律。结果表明:聚丙烯纤维能够有效抑制爆裂、改善活性粉末高温后的性能;混掺聚丙烯纤维和钢纤维能够提高高温后混杂纤维活性粉末混凝土力学性能,500 ℃之前损伤率较小,500 ℃之后损伤率较大;混掺 2% 钢纤维的混杂纤维活性粉末混凝土高温后的拉压比、折压比提高较多,混杂纤维可以优势互补。

关键词 活性粉末混凝土 混杂纤维 高温 力学性能
中图法分类号 TU528.34; **文献标志码** A

随着科学技术的迅猛发展,人们对水泥基复合材料提出了越来越高的要求。活性粉末混凝土(RPC)是一种超高强、低脆性、耐久性优异的新型水泥基复合材料[1],是在 20 世纪 90 年代法国一个实验室开发研究出的新型超高性能材料,与传统的混凝土相比,RPC 可以大幅度提高结构的耐久性,可以有效减轻结构自重。但是活性粉末混凝土作为一种新兴的材料,具有比高强混凝土更加致密的内部结构,受高温作用时容易引发爆裂[2]。文献[3]制备研究了纤维率为 0、1% 和 2% 三种钢纤维掺量的活性粉末混凝土试件,测试了高温条件下 RPC 试件的爆裂行为。试验结果表明:当试件中心温度为 250 ℃左右时,活性粉末混凝土会发生爆裂,与素 RPC 试件以及高强混凝土相比,掺加钢纤维未能显著提高试件的爆裂温度。

本研究小组前期试验研究表明,当聚丙烯体积掺量低于 0.3% 时,高温条件下的 RPC 极易发生爆裂。同时文献[4]也指出当聚丙烯纤维体积掺量 0.1% 和 0.2% 时,对 RPC 高温爆裂的抑制作用不明显,体积掺量 0.3% 时可以防止 RPC 发生爆裂。目前国内外对 RPC 力学性能的研究仅限于抗压强度和抗折强度[5—10],高温后 RPC 抗拉强度、拉压比、折压比等研究的比较少。本研究旨在探究高温后活性粉末不发生爆裂的情况,混杂纤维对活性粉末混凝土力学性能的影响,以期为结构抗火设计提供依据。

2017 年 6 月 22 日收到 国家自然科学基金(51478290)资助
第一作者简介:丁明冬,硕士研究生。研究方向:建筑材料。E-mail:794575291@qq.com。

1 试验设计

1.1 试验原材料

(1)水泥:某厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥,28 d 后抗压强度 45 MPa、抗折强度 7 MPa。

(2)石英砂:粗砂、中砂和细砂所占比例 40%、45%、15%。细度模数为 3.3。

(3)硅灰:硅灰 SiO_2 含量大于 95%,表观密度 2.23 g/cm^3,比表面积 20.3 m^2/g。

(4)钢纤维:钢纤维采用表面镀铜光面平直钢纤维,长度 13 mm,直径 0.24 mm,长径比 50.1,抗拉强度大于 2 500 MPa。

(5)聚丙烯纤维:长度 8 mm,直径 25 μm,熔点 165 ℃。

(6)减水剂:山西产聚羧酸减水剂外观呈淡黄色油状。

(7)拌合水:普通自来水。

1.2 配合比及试件标记

聚丙烯纤维体积掺量为 0.3% 并且钢纤维体积掺量为 0、1%、2% 的 RPC 分别标记为 PP3-S0、PP3-S1、PP3-S2。

2 试验方法

2.1 试件制作

先按表 1 将水泥、硅灰、石英砂、矿粉按照配合

表 1　试验配合比

Table 1　Trial ratio

/(kg·m³)

编号	矿粉	水泥	硅灰	水	减水剂	石英砂	钢纤维	聚丙烯纤维
PP3-S0	100.0	720.0	180.0	200.0	40.0	1150.0	0.00	2.7
PP3-S1	99.0	712.8	178.2	198.0	39.6	1138.5	78.5	2.7
PP3-S2	98.0	705.6	176.4	196.0	39.2	1127.0	157	2.7

比称量好，倒入搅拌锅内，搅拌 2 min，然后将一半水与减水剂混合倒入搅拌锅，搅拌 1 min 后将纤维和剩余水倒入搅拌锅，搅拌 3 min 后出料。搅拌好的 RPC 浇筑于钢模中，在高频振动台上振捣。除常温，高温下每组试件中，取一个试件，在试件的中心部位放入热电偶，在室温下将试件静止 24 h 后拆模，同时将试件进行编号或标记，再放入养护箱中养护至 28 d。根据试验内容，RPC 抗压强度和抗折强度的试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm。

2.2　高温试验方法

试验采用 SRJX 型箱式电阻炉，其额定电压为 220 V，输出功率为 15 kW，最高工作温度为 1 200 ℃，加热速率为 10 ℃/min 左右。炉膛尺寸长×宽×高为 600 mm×400 mm×400 mm。试验设定目标温度为 100 ℃、300 ℃、500 ℃、700 ℃，常温为对比组。

具体加温方法如下：将 RPC 试件放入高温炉中加热，通过热电偶测定 RPC 试件内部温度，当所研究的试件烧透（即试件温度与电阻炉温度一致），然后打开炉门冷却 1.5 h 后取出试件，置于室内地面，自然冷却至室温后进行加载试验。

2.3　强度测试

抗拉强度测试：试验在 1 000 kN 电子液压式万能试验机上进行。轴心抗拉试验中，为了得到 RPC 材料轴心抗拉强度，除对试验方法和试件本身有要求外，加载试件要具有足够大的刚度，以保证试件的破坏在稳定、缓慢过程中进行。试验采用加载装置如图 1 所示，两端的刚度足够大，并且能使试件在中心处断裂。试验时，将 RPC 轴心受拉试件卡在刚架的上下夹头里，试验机开动前，将试验机分别夹住加载装置的两侧。

抗压强度和抗折强度测试：试验方法参考《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》（GB/T 17671—1999），RPC 试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm，先进行抗折强度测试，之后每组三块折断为六块，作为抗压强度测试，20 ℃（常温）为对比组。测试抗折强度试验仪器为微机控制电液伺服万能试验机，加载速度为 0.05 kN/s。测试抗压强度试验仪器为电液伺服万能试验机，加载速率 2.4 kN/s，实验结果精确至 0.1 MPa。

图 1　轴心抗拉试件加载装置

Fig. 1　Axis tensile test piece loading

3　试验结果和分析

3.1　试验现象

在抗拉强度实验中，不同温度的 RPC 破坏大体一致，仅掺聚丙烯纤维的 RPC 断裂呈脆性破坏，断裂之前没有任何的预兆，掺有混杂纤维的 RPC 破坏呈现出一定的韧性破坏。破坏开始时，试件中部开始出现裂缝，而随着裂缝的扩展，可以明显听到钢纤维被拔出发出的撕裂声，破坏的试件断裂面有掉渣现象，断面钢纤维错乱分布，钢纤维未被拔出的试件未能完全分开，两断裂面仍有钢纤维连接。

在抗折试验过程中，仅掺聚丙烯纤维的 RPC 当荷载达到极限抗折强度时会立即折断，承载力迅速下降为零，试件折断为两截，断裂面均匀、平整。掺有混杂纤维的 RPC，当荷载达到初始开裂值时，试件下部的受拉区出现一道明显的裂纹，随着荷载的加大，裂缝不断扩展，最终破坏。

在抗压试验过程中，仅掺聚丙烯纤维的 RPC 和混杂纤维的 RPC 没有明显区别，裂缝在很短的时间内迅速形成，随着荷载逐渐接近极限荷载，发出撕裂的声音，裂缝很快发展为贯通的斜向裂缝。

3.2　混杂纤维对 RPC 高温后抗拉强度的影响

掺混杂纤维 RPC 抗拉强度随温度变化如图 2。常温（20 ℃）时，PP3-S2 和 PP3-S1 的抗拉强度比 PP3-S0 的抗拉强度分别高 18.75%、

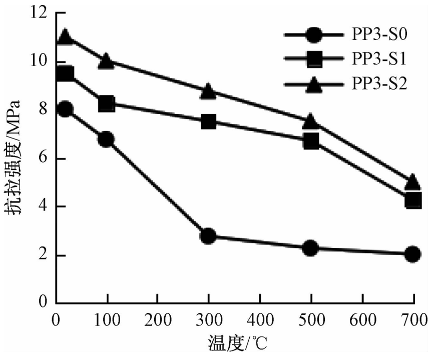

图 2　掺混杂纤维 RPC 抗拉强度
Fig. 2　Mixed fiber RPC tensile strength

37.5%。300 ℃后,PP3-S1 和 PP3-S2 的抗拉强度比 PP3-S0 的抗拉强度分别高 172.73%、218.18%。700 ℃后,PP3-S1 和 PP3-S2 的抗拉强度比 PP3-S0 的抗拉强度分别高 112.5%、150%。可见,高温前后混杂纤维 RPC 的抗拉强度始终大于单掺聚丙烯纤维 RPC 的抗拉强度。在 100～300 ℃之间,单掺聚丙烯纤维的 RPC 抗拉强度下降的比较快,可能是由于聚丙烯纤维在 165 ℃左右开始融化,对 RPC 抗拉强度发挥的作用很小。而混杂纤维中的钢纤维熔点比较高,使得高温后的 RPC 仍然具有较高的抗拉强度。钢纤维掺量的提升对 RPC 抗拉强度的改善可能是由于钢纤维较高的抗拉强度,进而阻止 RPC 裂缝的形成及发展。同时,钢纤维与水泥基体之间良好的粘结也是 RPC 抗拉强度增大的原因,钢纤维可以起到桥接裂缝的作用。基于实验结果,给出了在钢纤维体积掺量 2%,同时混掺聚丙烯纤维体积掺量 0.3% 的 RPC 平均抗拉强度与受火温度的关系式。

$y = -0.2143x^2 - 0.1643x + 11.3$;　$R^2 = 0.9939$。

式中,y 为 RPC 高温后抗拉强度值;x 表示温度;R 为相关系数。

3.3　混杂纤维对 RPC 高温后抗压强度和抗折强度的影响

由图 3 和图 4 可知,单掺 0.3% 聚丙烯纤维与混和掺入两种纤维后,RPC 抗压强度和抗折强度都随温度的升高而降低,但混掺纤维的强度始终大于单掺聚丙烯纤维的强度。经 700 ℃高温作用后,相比于 PP3-S0,PP3-S1 和 PP3-S2 的平均抗折强度分别提高了 46.6% 和 177.7%,平均抗压强度分别提高了 9.2% 和 29%。试验结果表明,混合掺入两种纤维的 RPC,其力学性能得到了充分发挥,在 RPC 中掺入钢纤维和 PP 纤维后,由于 PP 纤维的熔点低,当作用温度达到 165 ℃左右时,PP 纤维熔化形成连通孔隙,为内部水分的蒸发提供了有利的通道,从而防止了爆裂的产生。由于钢纤维熔点高,在没有达到熔点的状态下对 RPC 基体起增韧和阻裂的效果,使高温作用下 RPC 继续保持着较高的残余强度。

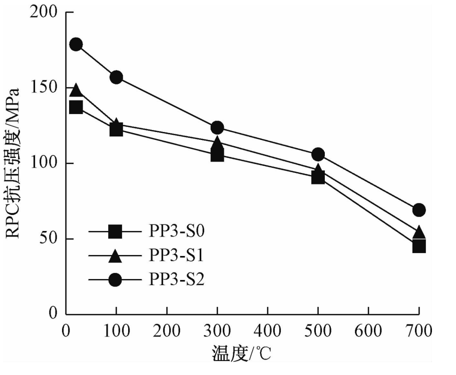

图 3　掺混杂纤维 RPC 抗压强度
Fig. 3　Mixed fiber RPC compressive strength

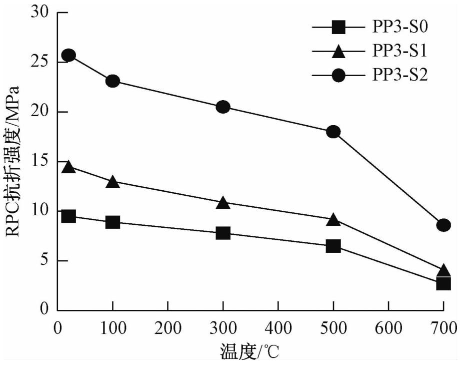

图 4　掺混杂纤维 RPC 抗折强度
Fig. 4　Mixed fiber RPC flexural srtength

3.4　混杂纤维对 RPC 高温后拉压比的影响

由图 5 可知,拉压比是衡量活性粉末力学性能的一个重要指标。常温(20 ℃)时,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 的拉压比提高了 0.006 和 0.004。300 ℃后,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 分别提高了 0.04 和 0.044。700 ℃后,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 分别提高了 0.057 和 0.052。总体看,高温作用后 PP3-S1 和 PP3-S2 的拉压比程缓慢上升趋势,而 PP3-S0 程下降趋势,尤其 100～300 ℃下降的幅度最大。当 RPC 掺入混杂纤维后,钢纤维均匀分散在 RPC 试件中,对 RPC 抗拉强度提升幅度很大,对抗压强度提升幅度很小,所以 PP3-S1 和 PP3-S2 拉压比会增大。而 RPC-0 仅掺聚丙烯纤维,聚丙烯纤维在 165 ℃左右会融化,所以 100～300 ℃下降的幅度特别大。由此可见混杂纤维能够使混凝土脆性大、韧性小的缺点得到显著改善。

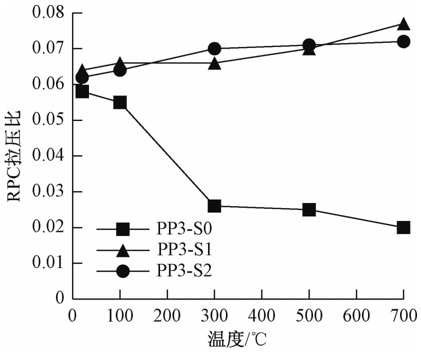

图 5 掺混杂纤维 RPC 拉压比

Fig. 5 Mixed fiber RPC tension and compression ratio

3.5 混杂纤维对 RPC 高温后折压比影响

由图 6 可知,常温(20 ℃)时,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 的折压比提高了 0.027 和 0.075。500 ℃后,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 分别提高了 0.024 和 0.098。700 ℃后,相对于 PP3-S0,PP3-S1、PP3-S2 分别提高了 0.017 和 0.066。总体看,高温作用对 PP3-S0 和 PP3-S1 的折压比都缓慢下降趋势,但对于 PP3-S2,20 ~ 500 ℃程上升趋势,500 ℃后程下降趋势。对折压比要求较高的构件选用 PP3-S2 最好。

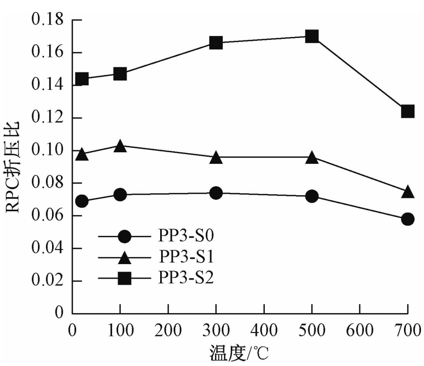

图 6 掺混杂纤维 RPC 折压比

Fig. 6 Mixed fiber RPC fold and compression ratio

4 结论

(1)聚丙烯纤维体积掺量为 0.3% 时的塑-钢混杂纤维 RPC 不仅有效抑制了高温爆裂,而且能够提高高温后 RPC 力学性能。

(2)给出了钢纤维掺量为 2% 时,聚丙烯掺量 0.3% 的 RPC 高温后抗拉强度关系式。

(3)高温前后聚丙烯纤维体积掺量 0.3%、钢纤维体积掺量 2% 的混杂纤维 RPC 相比单掺聚丙烯纤维拉压比提高幅度在 6.89% ~260% 之间、折压比提高幅度在 101% ~136% 之间。

参 考 文 献

1 王 月,安明喆. 活性粉末混凝土耐久性研究现状综述. 混凝土,2013;(8):12—20

Wang Yue, An Mingzhe. Research on the mechanical properties of reactive powder concrete:a review. Concrete, 2013;(8):12—20

2 刘红彬,鞠 杨. 活性粉末混凝土的高温爆裂及其内部温度场的试验研究. 工业建筑,2014;44(11):126—130

Liu Hongbin,Ju Yang. Experiment on the spalling and temperature field distribution of reactive powder concrete under high temperature. Industrial Building, 2014;44(11):126—130

3 刘红彬,李康乐,鞠 杨,等. 钢纤维活性粉末混凝土的高温爆裂试验研究. 混凝土,2010;(8):6—8

Liu Hongbin,Li Kangle,Ju Yang, *et al*. Explosive spalling of steel fiber reinforced reactive powder concrete subject to high temperature. Concrete, 2010;(8):6—8

4 郑文忠,李海燕,王 英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量活性粉末混凝土力学性能试验研究. 建筑结构学报,2012;33(9):119—126

Zheng Wenzhong, Li Haiyan, Wang Ying. Mechanical properties of reactive powder concrete with different dosage of polypropylene fiber after high temperature. Journal of Building Structures, 2012;33(9):119—126

5 曹 霞,彭金成,李文龙. 掺不同纤维的活性粉末混凝土力学性能研究. 混凝土与水泥制品,2014;(10):54—57

Cao Xia,Peng Jincheng, Li Wenlong. Study on mechanical properties of reactive powder concrete with different fiber. China Concrete and Cement Products, 2014;(10):54—57

6 鞠艳忠,于 泳,王德弘. 不同养护条件下钢纤维掺量对 RPC 强度的影响. 混凝土与水泥制品,2015;(4):42—44

Ju Yanzhong,Yu Yong, Wang Dehong. Effect of steel fiber content on RPC strength under different curing conditions. China Concrete and Cement Products, 2015;(4):42—44

7 王 刚,何东坡. 高温养护对活性粉末混凝土强度的影响. 低温建筑技术,2011;(2):17—18

Wang Gang, He Dongpo. Effect of high temperature maintenance on strength of reactive powder concrete. Low Temperature Architecture Technology, 2011;(2):17—18

8 高卫平. 混杂纤维活性粉末混凝土耐高温性能研究. 道路工程,2016;(2):13—16

Gao Weiping, Research on high-temperature resistance performance of hybrid-fiber reactive powder concrete. Road Engineering, 2016;(2):13—16

9 鞠艳忠,邵安乐,王德弘. 活性粉末混凝土抗压强度影响因素研究. 混凝土,2017;(1):130—136

Ju Yanzhong,Shao Anle,Wang Dehong. Study on factors affecting the compressive strength of reactive powder concrete. Concrete, 2017;(1):130—136

10 贾芳芳,王万金,贺 奎,等. 不同纤维活性粉末混凝土基本性能研究. 混凝土与水泥制品,2016;(9):53—56

Jia Fangfang,Wang Wanjin,He Kui, *et al*. Study on basic properties of different fiber reactive powder concrete. China Concrete and Cement Products, 2016;(9):53—56

The Influence of the Mixed Fiber on the Mechanical Properties of the Reactive Powder Concrete at High Temperature

DING Ming-dong, DU Hong-xiu
(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[**Abstract**] The polypropylene fiber volume content was 0.3%, different steel fiber content on the axis of reactive powder concrete after high temperature tensile strength, compressive strength, flexural strength, tension and compression ratio, the influence of the folding ratio and its variation law with temperature. The results show that the polypropylene fiber can effectively inhibit the bursting and improve the performance of the active powder. Mixed with polypropylene fiber and steel fiber can improve the mechanical properties of hybrid fiber reactive powder concrete after high temperature, 500 ℃ before damage rate is smaller, damage rate after 500 ℃; mixed fiber with 2% fiber is mixed fiber active powder concrete high temperature, the pull ratio of the pressure ratio, the pressure ratio increases more, the hybrid fiber can complement each other.

[**Key words**] reactive powder concrete hybrid fiber high temperature mechanical properties