

Experiments on High Temperature Mechanical Properties and Micropore Structure of Polypropylene Concrete

Ze Yu*, Ruizhen Yan[#]

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: 857007557@qq.com, [#]yanruizhen2266@163.com

Received: Dec. 27th, 2019; accepted: Jan. 30th, 2020; published: Feb. 6th, 2020

Abstract

Because of its good stability and mechanical properties, the polypropylene can effectively prevent concrete from bursting at high temperatures and can improve the mechanical properties of the concrete in a certain temperature range. In this paper, a number of mechanical properties (cubic comparison of compressive strength, cubic split tensile strength, axial compressive strength, and modulus of elasticity) were obtained, and the conclusion that the mechanical properties of concrete were improved by mixing polypropylene fibers in a certain temperature range (<400°C) was obtained. However, with the increase of temperature (>400°C), the fiber has almost no effect on the mechanical properties. The mercury pressure test was performed on the concrete without fiber in the temperature range of 400°C~500°C. The porosity of polypropylene fiber reinforced concrete increased in the temperature range of 400°C~500°C and the number of pores at 50 nm increased rapidly, and the porosity increased a lot compared with normal temperature.

Keywords

Concrete, Polypropylene Fiber, Pore Structure, Mechanical Properties, Mercury Pressure Test

掺聚丙烯混凝土高温力学性能及微观孔隙结构试验

于 泽*, 阎蕊珍[#]

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: 857007557@qq.com, [#]yanruizhen2266@163.com

*第一作者。

[#]通讯作者。

摘要

聚丙烯纤维由于其良好的稳定性和机械性能掺入混凝土可有效防止混凝土高温爆裂, 同时可以在一定温度范围内提高混凝土力学性能, 本文对不同温度下普通混凝土掺聚丙烯前后多项力学性能(立方体抗压、立方体劈裂抗拉、轴心抗压、弹性模量)进行对比, 得到掺入聚丙烯纤维在一定温度范围($<400^{\circ}\text{C}$)对混凝土力学性能有提升的结论。但随着温度的升高($>400^{\circ}\text{C}$), 掺纤维对力学性能几乎无影响; 并针对 400°C ~ 500°C 不掺纤维混凝土进行压汞试验, 得到这一温度区间内混凝土孔径分布变化规律, 在 400°C ~ 500°C 温度区间孔隙率增加和50 nm以上孔快速增多, 且孔隙率相比常温时增加很多。

关键词

混凝土, 聚丙烯纤维, 孔结构, 力学性能, 压汞试验

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高性能混凝土(HPC)因其综合性能优良, 在工程领域得到越来越广泛的应用, 然而, HPC 高温下容易爆裂, 成为其推广的一大瓶颈。为提高 HPC 高温火灾的抗爆裂性能, 国内外学者进行了许多研究, 发现在高性能混凝土中掺入适量聚丙烯纤维可以有效抑制混凝土高温爆裂的发生且对混凝土力学性能有改善作用[1] [2] [3] [4] [5], 其原因主要在于聚丙烯纤维 165°C 左右熔化, 并在混凝土中留下微孔道, 这些孔道的形成有助于缓冲混凝土内部的蒸气压。已有研究表明[6], 长径比为 600 (长度 15 mm, 直径 $25\ \mu\text{m}$)、掺量为 $1.8\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的聚丙烯纤维掺入对混凝土常温及高温下力学性能改善效果最佳。吴中伟和韦江雄[7] [8] 等人都提出 50 nm 孔径为孔分类的分界点, 将小于 50 nm 孔称为微孔大于 50 nm 的为宏观孔(也称为有害孔)。为进一步探究高温对混凝土力学性能的影响, 一些学者对高温后混凝土的内部孔结构变化规律进行了分析, 研究表明[9] [10] [11], 400°C 之前, 混凝土孔结构的变化主要由于混凝土内部水分的散失; 当温度在 400°C ~ 500°C 之间时, 由于混凝土内部组分, 特别是水泥水化产物水化硅酸钙(CSH)脱水和氢氧化钙(CH)分解产生大量孔隙, 使其力学性能出现显著降低。

大多数研究只是对孔隙率随温度的变化进行了描述, 而未将混凝土力学性能与孔隙结构结合对比且对混凝土微观结构分析中较少的研究使用压汞试验方法。为此本文选用长度为 15 mm, 直径 $25\ \mu\text{m}$ 的聚丙烯纤维, 以 $1.8\ \text{kg}/\text{m}^3$ 掺量掺入混凝土中, 研究其不同温度(20°C ~ 600°C)作用后的力学性能的变化规律, 并对 400°C ~ 500°C 作用后的混凝土使用压汞试验对其内部微孔结构变化进行了深入分析, 进一步揭示孔结构变化对混凝土力学性能的影响。

2. 试验方案

2.1. 原材料及配合比

本试验选用的原材料为:

水泥: 山西智海混凝土公司生产的 P.O 42.5;
 粗骨料: 5~20 mm 连续级配的碎石;
 细骨料: 中砂, 级配区为 II 区, 细度模数为 2.9;
 矿物掺合料: II 级粉煤灰; S95 级磨细矿渣粉;
 外加剂: 萘系高效减水剂(HS-AF), 减水率为 15%~20%;
 聚丙烯纤维: 长度 15 mm, 直径 25 μm 。试验掺量为 1.8 kg/m^3 。其他主要技术参数见表 1;
 拌和用水: 自来水。

Table 1. Main technical parameters of polypropylene fiber

表 1. 聚丙烯纤维主要技术参数

比重	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	燃点 ($^{\circ}\text{C}$)	含湿度 (%)	抗低温性 ($^{\circ}\text{C}$)	抗酸碱碱性	纤维直径 (μm)
0.91	>400	>3.5	约 160	约 580	<0.1	-78	极高	25

本试验主要研究素混凝土和掺聚丙烯纤维混凝土的高温性能, 其中聚丙烯掺量为 1.8 kg/m^3 , 配合比详见表 2。

Table 2. Mixing ratio of M and P15/25 for test (kg/m^3)

表 2. 试验用 M 和 P15/25 配合比(kg/m^3)

	水泥	矿渣	粉煤灰	砂子	石子	减水剂	水	聚丙烯纤维
M	400	80	20	770	1000	10	185	0
P15/25	400	80	20	770	1000	10	185	1.8

2.2. 试件制备及试验方案

2.2.1. 试件制备

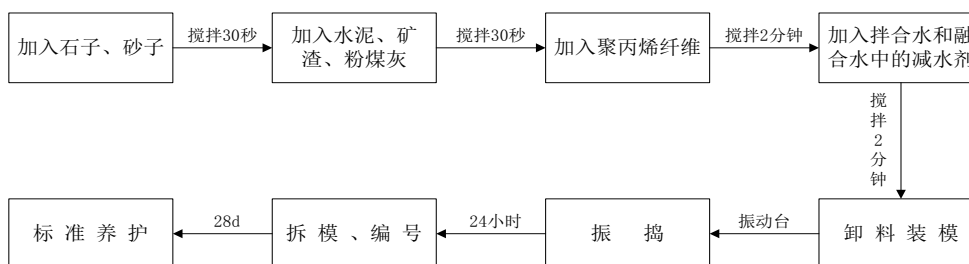


Figure 1. Test specimen preparation sequence

图 1. 试件制备顺序

本次试验测试的力学性能主要为立方体抗压强度、立方体劈裂抗拉强度、轴心抗压强度以及弹性模量。其中抗压强度和劈拉强度所用试件尺寸为 150 mm \times 150 mm \times 150 mm 立方体, 轴压强度和弹性模量作用试件尺寸为 150 mm \times 150 mm \times 300 mm 的棱柱体。试件制备过程如图 1 所示, 试件养护龄期为 28 d。试件共分为两个系列, 即未掺纤维素混凝土(M)与掺聚丙烯纤维混凝土(P15/25)。

2.2.2. 试验方案

试验设定温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ (常温)、300 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$ 、600 $^{\circ}\text{C}$ 共 6 个温度等级, 试件制备数量如表 3。

Table 3. Number of test specimens prepared**表 3.** 试件制备数量

试件尺寸(mm)	组数	每组块数	备用	总计
150 × 150 × 150	24	3	7	79
300 × 300 × 300	24	3	6	78

混凝土微孔结构分析采用压汞试验, 取立方体试块用切割机切出 1 cm 左右厚度切片后钻取包含骨料与浆体部分, 将取出的样品与混凝土试件共同放置于实验室阴凉处, 以备进行高温试验。

2.2.3. 高温试验

将试件放在通风的阴凉处进行为期 7~15 天的自然晾干, 使试件的含水率与实际结构中的含水率接近, 随后将试块放入电阻炉中, 以升温速率 24°C/min 升温至目标温度。由于试件中预埋热电偶, 可根据巡检仪上显示混凝土内部温度, 当内外温度一致时, 即表示混凝土完全烧透。打开炉门, 取出试件。在通风干燥的自然条件下自然冷却到室温再进行试验, 压汞所用样品取出后装入干燥的样品瓶中密封, 随后进行压汞分析。

随后对试件做立方体抗压、立方体劈裂抗拉、轴心抗压、弹性模量以及压汞试验。试验使用的仪器有: 本试验中用到的主要仪器有: 箱式电阻炉(SRJX), 压力试验机(STYE-3000), 热电偶, 压汞实验仪器, 弹性模量试验机等。

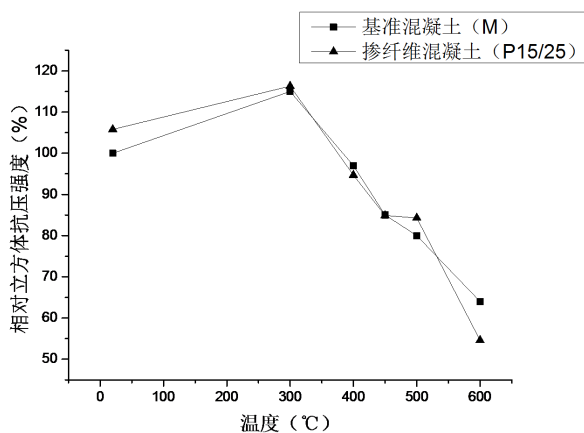
本试验方法参考了《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002)。

3. 试验数据分析与讨论

3.1. 混凝土立方体抗压强度与劈裂抗拉强度

本试验结果中的相对值均以各条件下强度与常温时素混凝土(M)强度比值确定。M 表示素混凝土, P15/25 表示掺聚丙烯纤维混凝土。

图 2 为 M 与 P15/25 不同温度下相对立方体抗压强度随温度变化图。常温时 P15/25 比 M 强度高 5% 左右且在 400°C 前强度均高于 M。特别的是两者都在 300°C 强度相比于常温有提升。有研究表明[12]其主要原因在于随着温度升高, 由于水蒸气的蒸发, 促进了水泥的进一步水化, 从而使得混凝土强度有所增加。在 300°C 之后两者相对强度与下降趋势都基本相同。且在 400°C 时两者相对抗压强度仍还有 90% 左右, 600°C 时仅为 50% 左右。

**Figure 2.** Relative cubic compressive strength as a function of temperature**图 2.** 相对立方体抗压强度随温度变化

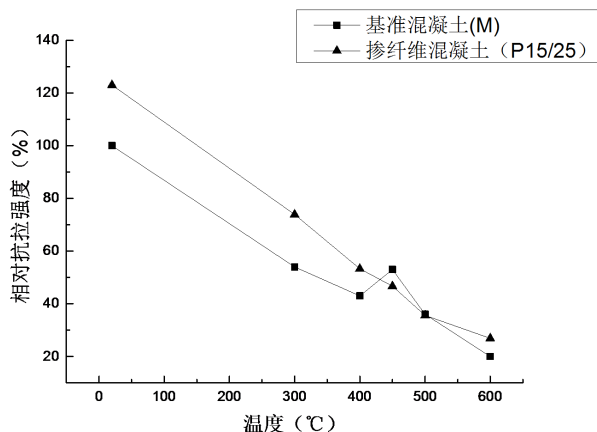


Figure 3. Relative tensile strength as a function of temperature
图 3. 相对抗拉强度随温度变化

图 3 为 M 和 P15/25 相对劈裂抗拉强度随温度变化图, M 和 P15/25 的劈裂抗拉强度总体都随着温度的升高而降低。但 P15/25 抗拉强度在 300°C 前都远高于 M 约 20%。在 300°C 时 M 与 P15/25 抗拉强度与常温相比分别降低了 46%、40%。400°C 两者的劈裂抗拉强度就降到了常温的 43%, 所以认为 400°C 是临界温度, 400°C 后混凝土的劈裂抗拉强度已经严重丧失。到 600°C 时, M 和 P15/25 的劈裂抗拉强度都只为常温时的 20%。

3.2. 混凝土轴心抗压强度和弹性模量

由于工程中受压构件主要为柱, 而柱多为棱柱体, 所以利用 150 mm × 150 mm × 300 mm 试块测得的轴向抗压强度更符合实际工程。同样弹性模量也是混凝土重要力学之一, 弹性模量可以体现构件抵抗弹性变形能力。较高的弹性模量可以确保构件在弹性范围内变形后恢复能力, 同时在火灾场景下柱通常有单面、多面受火情况。若高温后混凝土弹性模量降低过多也会导致构件受火面更快的开裂变形。所以对混凝土高温后轴心抗压和弹性模量的研究不仅对实际工程有重要意义同样也可以对结构抗火提供有利依据。

图 4 为 M 和 P15/25 不同温度下相对轴心抗压强度随温度变化图。常温时 P15/25 轴心抗压强度比 M 高约 10% 左右, 在 300°C 时两者基本相同为常温时的 94% 左右。强度损失也只有 6% 左右。300°C 后两者数值相差不大且下降趋势相同。在 400°C 两者强度为常温时 70% 左右, 500°C 时仅有 40% 左右强度残余已基本丧失承载力。而在 600°C 强度仅为常温时 30%。可以看出在 400 摄氏度后混凝土轴心抗压强度下降明显。仅在 400°C~500°C 区间混凝土轴心抗压强度就下降了 30%。

图 5 为 M 和 P15/25 不同温度下相对弹性模量随温度变化图, 由于弹性模量试验与轴心抗压强度试验才用的都为 150 × 150 × 300 mm 试块, 两者的变化规律基本相同。总体上混凝土弹性模量随着温度的升高而降低。常温时 P15/25 比 M 高 10% 左右。300°C~500°C 反而 M 比 P15/25 高 10% 左右。500°C 两者都为常温 40% 左右。600°C 时仅为常温 20%。可以看出随着温度升高掺聚丙烯纤维对混凝土弹性模量影响不大, M 在 400°C~500°C 区间弹性模量损失量接近 50%。

3.3. 拉压比结果分析

图 6 为 M 和 P15/25 拉压比随温度变化图。M 和 P15/25 的拉压比都随着温度的升高而降低, 说明在高温作用下, 混凝土的劈裂抗拉强度下降的更快, 即温度对混凝土的劈裂抗拉强度的影响比立方体抗压强度的影响更为显著。掺聚丙烯混凝土(P15/25)的拉压比在温度小于 400°C 时都比基准高性能混凝土(M)拉压比大, 说明了聚丙烯纤维的加入使高性能混凝土的拉压比增大, 改善了混凝土的劈裂抗拉强度性能,

增强了混凝土的韧性, 降低了脆性。而在 400℃ 之后两者拉压比呈现不同程度的波动, 且在 400℃~500℃ 间较为接近。说明 400℃ 是关键温度。掺入聚丙烯纤维对力学性能的改善多数在 400℃ 前。

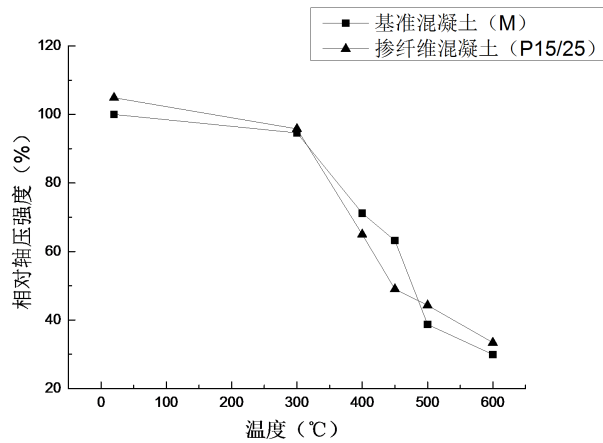


Figure 4. Relative axial compressive strength as a function of temperature
图 4. 相对轴心抗压强度随温度变化

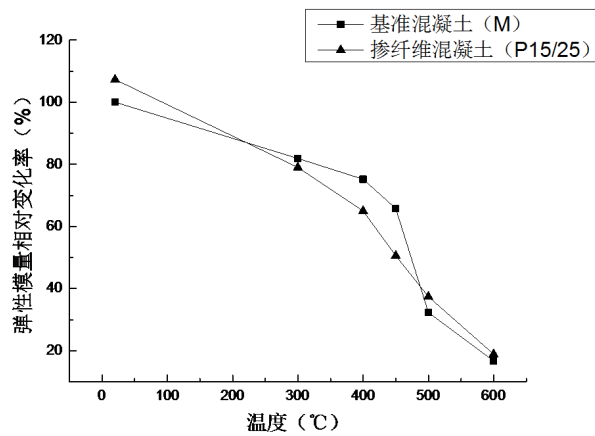


Figure 5. Relative change rate of elastic modulus
图 5. 弹性模量相对变化率

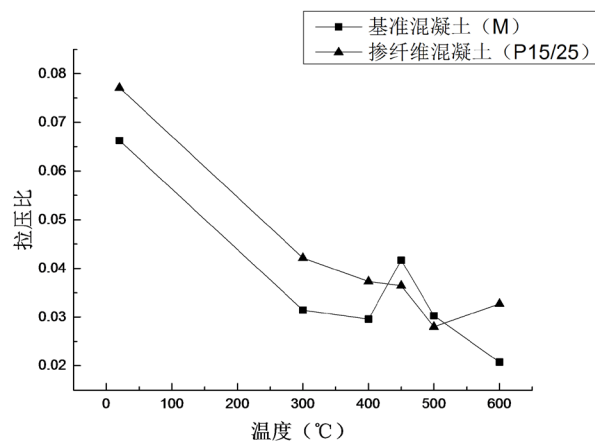


Figure 6. Variation of tension and compression ratio with temperature
图 6. 拉压比随温度变化

3.4. 压汞试验结果

由 3.1~3.3 节可知掺纤维仅对混凝土 400℃前力学性能有所提升, 而 400℃~500℃混凝土力学性能丧失最为严重尤其是轴心抗压和弹性模量。所以将孔结构分布研究重点放在 400℃~500℃区间, 同时 M 与 P15/25 在 400℃后力学性能基本相同进而本试验针对 M 在 20℃, 400℃, 450℃, 500℃试件进行压汞试验, 结果如图 7~10。

常温时混凝土内部孔隙直径多数集中在 16~26 nm, 其中最可几孔径为 23.5 nm。在 400℃下可以看到孔径仍多数集中于 50 nm 以下, 但有部分 50 nm 以上孔出现占比 16.56%, 其中最可几孔径为 33.28 nm。当温度升至 450℃时, 50 nm 以上孔明显增多占比 23.76%, 最可几孔径为 77.86 nm。温度在 500℃时, 50 nm 以上孔已经占总孔体积 50.98%。可以看出在 400℃前孔径分布仍集中在 50 nm 以下。而在 450℃、500℃两个温度下 50 nm 以上孔急剧增多。从表 4 孔隙率的变化也可以看出常温时孔隙率只有 5.864%, 400℃, 450℃, 500℃时分别达到了 12.498%、13.845%和 18.148%。这是由于当温度升高到 400℃时, 混凝土形成微裂缝, 水分随裂缝通道蒸发逃逸, 使总孔隙率继续增加。500℃时, 可以看到孔隙率有一段大幅度的增长, 这可能是由于水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及硫铝酸盐受热分解。

本实验结果可以看出随着温度的升高混凝土中出现概率最高的孔径增大, 也说明了随着温度的升高混凝土内部无害孔变少, 向有害孔增多的趋势发展。同时也映证了表 4 中孔隙率随温度的变化趋势。结合在 400℃~500℃区间内孔径分布变化, 以及孔隙率变化可以很好地解释 3.1~3.3 节中混凝土在 400℃后力学性能大幅下降的原因。

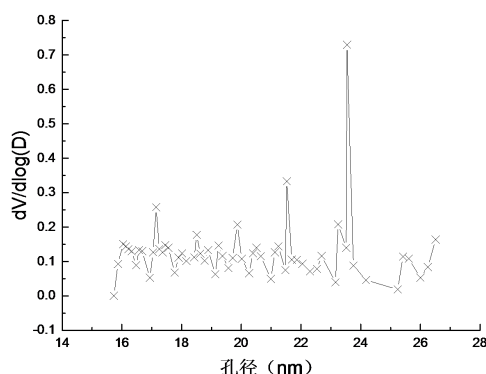


Figure 7. Pore structure distribution at 20°C

图 7. 20℃孔隙结构分布

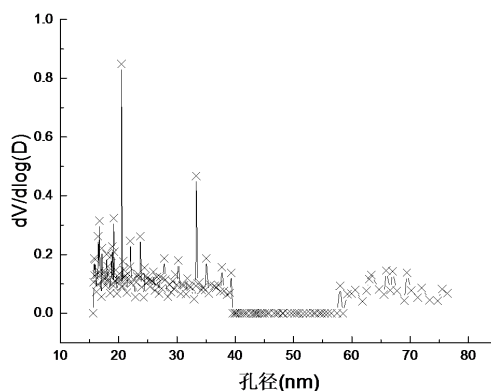


Figure 8. Pore structure distribution at 400°C

图 8. 400℃孔隙结构分布

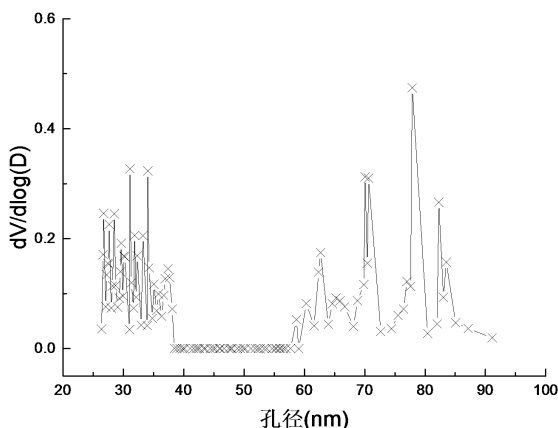


Figure 9. Pore structure distribution at 450°C
图 9. 450°C 孔隙结构分布

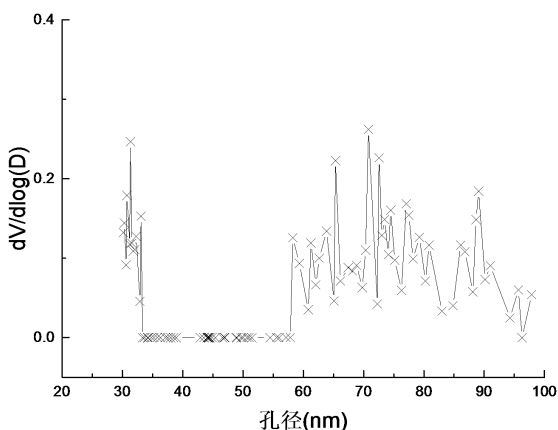


Figure 10. Pore structure distribution at 500°C
图 10. 500°C 孔隙结构分布

Table 4. Porosity of concrete at different temperatures
表 4. 混凝土不同温度下孔隙

温度	25°C	400°C	450°C	500°C
孔隙率(%)	5.864	12.498	13.845	18.148

4. 结论

本文共进行了混凝土立方体抗压、轴心抗压、立方体劈裂抗拉、弹性模量以及压汞试验，通过试验数据分析得出如下结论：

- 1) 掺入聚丙烯纤维可以在一定温度范围内(<300°C)略微提高混凝土立方体抗压强度和轴心抗压强度；在一定温度范围内(<400°C)较大程度的提高混凝土立方体劈裂抗拉强度。在 400°C 后掺聚丙烯纤维对混凝土力学性能几乎无提高。
- 2) 聚丙烯纤维的加入使高性能混凝土的拉压比增大，改善了混凝土的劈裂抗拉强度性能，增强了混凝土的韧性，降低了脆性。
- 3) 在 400°C~500°C 温度区间孔隙率的增加和 50 nm 以上有害孔快速增多是导致混凝土各项力学性能都有明显下降的重要原因之一。

参考文献

- [1] Kalifa, P., Chene, G. and Galle, C. (2001) High Temperature Behavior of HPC with Polypropylene Fibers from Spalling to Microstructure. *Cement and Concrete Research*, **31**, 1487-1499.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00596-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00596-8)
- [2] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 聚丙烯纤维长径比对混凝土力学性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2019(9): 25-30.
- [3] 尹强. 聚丙烯纤维对高强混凝土高温后力学性能的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(5): 651-654.
- [4] 常传鹏, 田波, 黄世武, 等. 高温下聚丙烯纤维混凝土抗压强度试验研究[J]. *公路工程*, 2014(5): 324-327, 336.
- [5] 元成方, 高丹盈, 赵毅. 聚丙烯纤维混凝土高温损伤研究[J]. *混凝土*, 2014(1): 61-64.
- [6] 吴佳, 杜红秀, 郝晓玉. 聚丙烯纤维长径比对高温后高性能混凝土抗压强度的影响[J]. *混凝土*, 2016(3): 65-67, 75.
- [7] 吴中伟. 混凝土科学技术近期发展方向的探讨[J]. *硅酸盐学报*, 1979, 7(3): 262-270.
- [8] 韦江雄, 余其俊, 曾小星, 等. 混凝土中孔结构的分形维数研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 121-124.
- [9] 陈晓婷, 赵人达. 高温对混凝土孔隙率及渗透性影响的试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2007(2): 11-14.
- [10] 柳献, 袁勇, 叶光, 等. 高性能混凝土高温微观结构演化研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(11): 1473-1478.
- [11] 元成方, 高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土高温后的孔隙结构特征研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4): 122-126.
- [12] 特列夫耐尔 W, 等. 耐火材料显微结构文集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.