

# Effect of CF on compressive strength of Portland cement concrete at negative temperatures

Jiazhi Yan<sup>1</sup> Jie Wang<sup>1</sup> Jinxing Wang<sup>1</sup> Yifan Xiong<sup>1</sup> Fengyun Liu<sup>2</sup>

1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

2. Department of Engineering Management Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

## Abstract

In order to explore the improvement effect of ceramic fiber on the compressive properties of ordinary silicate concrete under negative temperature conditions, the compressive strength of concrete with different mass fractions (0%, 0.2%, 0.3%, 0.4%) of ceramic fiber under normal temperature (20°C) and negative temperature (-5°C, -10°C, -20°C) was studied by systematic experiments. The microstructure and strengthening mechanism were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that ceramic fiber can significantly improve the compressive strength of concrete in negative temperature environment. Especially at -10°C and -20°C, when the fiber content is 0.2%~0.3%, the growth rate of compressive strength exceeds 40%, showing the best enhancement effect. SEM analysis reveals that ceramic fibers can effectively improve the low-temperature mechanical properties and frost resistance of concrete by inhibiting crack propagation, optimizing pore structure, reducing the content of frozen water, and forming a three-dimensional network to alleviate the expansion stress of ice crystals.

## Keywords

ceramic fiber; ordinary silicate concrete; negative temperature conditions; compressive strength; microstructure

## CF 对负温下硅酸盐砼抗压性能的影响

颜佳志<sup>1</sup> 王杰<sup>1</sup> 王金星<sup>1</sup> 熊艺凡<sup>1</sup> 刘凤云<sup>2</sup>

1. 西南石油大学, 中国·四川成都 610500

2. 西南石油大学工程管理教研室, 中国·四川成都 610500

## 摘 要

为探究陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的改善效果, 本文通过系统试验研究了不同质量分数(0%、0.2%、0.3%、0.4%)陶瓷纤维掺量下混凝土在常温(20°C)及负温(-5°C、-10°C、-20°C)养护条件下的抗压强度变化, 并结合扫描电镜(SEM)分析了其微观结构与增强机制。结果表明: 陶瓷纤维能显著提升混凝土在负温环境中的抗压强度, 尤其在-10°C和-20°C条件下, 纤维掺量为0.2%~0.3%时, 抗压强度增长率超过40%, 显示出最优增强效果; SEM分析揭示, 陶瓷纤维通过抑制裂缝扩展、优化孔结构、减少可冻结水含量, 并形成三维网络以缓解冰晶膨胀应力, 从而有效改善混凝土的低温力学性能与抗冻性。

## 关键词

陶瓷纤维; 普通硅酸盐混凝土; 负温条件; 抗压强度; 微观结构

## 1 引言

随着工程领域的拓展, 混凝土的应用场景不断扩大,

【基金项目】西南石油大学土木工程与测绘学院大学生科技创新基金项目“陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的影响研究”; 2025年四川省大学生创新训练计划项目“陶瓷纤维改良混凝土抗压性能及其纤维分散性影响机理研究”(项目编号: S202510615214); 四川省自然科学基金项目(No. 2025ZNSFSC1314)。

【作者简介】颜佳志(2003-), 男, 中国四川达州人, 本科, 从事工程管理研究。

但其抗拉强度低、脆性大、韧性差等缺点使得混凝土的应用得到了一定的限制。为了克服混凝土自身的缺陷, 国内外众多学者采用玻璃纤维<sup>[1]</sup>、镀铜钢纤维<sup>[2]</sup>等对混凝土进行改良, 发现纤维的掺入能够有效提升混凝土的力学性能。

上述研究表明, 纤维能够显著提高混凝土的力学性能及耐久性。但陶瓷纤维(CF)相较于玻璃纤维和碳纤维等, 不仅具有玻璃纤维抗腐蚀的特性、碳纤维轻量化的特性, 还具有耐高温、热稳定性好、导热率低、比热小及耐机械震动的特性<sup>[3]</sup>。因此, CF在混凝土改良方面具有巨大的潜力。苏灏扬、许金余团队<sup>[4]</sup>对体积分数分别为0.1%、0.2%和0.3%的陶瓷纤维混凝土的准静态和动态力学性能进行了研究, 深入分析了CF的增强机理, 最终发现CF对普通硅酸盐混凝土

土在增强和增韧方面的效果总体上比碳纤维更优。

目前，无机非金属纤维材料对各类混凝土力学性能影响的研究已经趋于成熟，但关于 CF 在负温条件下对普通硅酸盐混凝土力学性能影响的研究却少见。因此，本研究采用 CF 对混凝土进行改良，研究不同质量分数的 CF 掺量下混凝土在常温和负温的条件下的抗压强度变化，并基于扫描电镜（SEM）对 CF 固化土的水化产物及微观结构进行分析，揭示固化机理，以期寒冷地区的建筑结构提供材料解决方案。

2 实验概况

2.1 实验材料

本研究需要制备不同质量分数的 CF 掺量的改良混凝土，主要使用的原材料如下：

胶凝材料：PO·42.5R 普通硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、微硅粉；细骨料：细度模数在 2.5 的河细砂；粗骨料：粒径在 5~20 mm 之间的石灰岩碎石；外加剂：聚羧酸高效减水剂、甲酸钙早强剂；外加材料：CF 各项指标参数（质量密度：200~300 kg/m<sup>3</sup>；导热系数：0.03~0.06 W/m·k；耐高温温度：1200~1400℃；纤维直径：3.0~5.0 μm；介电常数：3~7），水：自来水。

2.2 配合比

普通硅酸盐混凝土的设计强度为 C30，使用的普通硅酸盐混凝土配合比为：水泥：粉煤灰：硅粉：水：河细砂：石灰岩碎石：减水剂：早强剂=288：72：25：160：849：1081：2.88：6.5。本实验中，CF 的掺量分别为普通硅酸盐混凝土质量的 0%、0.2%、0.3%、0.4%（对应质量为 0 kg/m<sup>3</sup>、4.98 kg/m<sup>3</sup>、7.48 kg/m<sup>3</sup>、9.98 kg/m<sup>3</sup>），所采用的 CF 长度介于 100 mm~200 mm。

2.3 试件制备

本实验试件制备严格按照相关规范标准制备，各类材料严格按照上述配合比进行添加。在混凝土试件制备前，须对粗细骨料进行含水量测试，对于含水量过高的骨料，需要在烘箱中进行烘干处理，防止影响混凝土配合比。所有材料处理达标后即可开始制备混凝土试样，在制备试样的过程中，为使 CF 在混凝土中均匀分散，避免因制备导致的纤维团聚增强效果干扰，使用先干拌后湿拌与分散剂法两种方式结合的方式来制备陶瓷纤维混凝土，具体制备流程按照 JGJ/T 221-2010《纤维混凝土应用技术规程》相关规范开展。本实验使用单卧轴混凝土搅拌机进行搅拌，混凝土入模后需进行振荡处理，混凝土成型尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试样尺寸。根据下表 1 分组，将各组试块在设置的温度下养护 28 天。

表 1 实验分组设计

| 分组编号   | CF 掺量 | 养护温度 | 分组编号   | CF 掺量 | 养护温度 |
|--------|-------|------|--------|-------|------|
| CF-0-1 | 0%    | 20℃  | CF-3-1 | 0.3%  | 20℃  |
| CF-0-2 | 0%    | -5℃  | CF-3-2 | 0.3%  | -5℃  |
| CF-0-3 | 0%    | -10℃ | CF-3-3 | 0.3%  | -10℃ |
| CF-2-4 | 0%    | -20℃ | CF-3-4 | 0.3%  | -20℃ |
| CF-2-1 | 0.2%  | 20℃  | CF-4-1 | 0.4%  | 20℃  |
| CF-2-2 | 0.2%  | -5℃  | CF-4-2 | 0.4%  | -5℃  |
| CF-2-3 | 0.2%  | -10℃ | CF-4-3 | 0.4%  | -10℃ |
| CF-2-4 | 0.2%  | -20℃ | CF-4-4 | 0.4%  | -20℃ |

2.4 实验方法

2.4.1 无侧限抗压试验

无侧限抗压强度试验参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)。试验设备采用微机控制电液伺服万能试验机（SHT4106），加载速率为 0.3~0.5 mm/min。无侧限抗压强度试验结果基于平行试样，平行试样抗压强度的最大值或最小值均不超过平均值的 10%，以平行试样平均值为试验结果；当平行试样抗压强度的最大值或最小值超过平均值的 10%，则结果无效，需重新制样养护进行测试。

2.4.2 SEM 测试

选取压碎试块的内部破坏截面，吹风清扫后用导电胶将试样黏至底座上，随后进行喷金处理，最后放入扫描电子显微镜内部进行扫描电镜试验，观察微观孔隙结构和内部纤维特征。

3 试验结果

3.1 抗压实验测试结果

对于抗压实验的数据，筛选排除差距过大的数据，计算每组试件的最大抗压强度的平均值。不同掺量以及不同养护温度下的陶瓷纤维混凝土试件的最大抗压强度（平均值）。混凝土最大抗压强度随着温度的降低而降低。而 CF 掺量在 0%~0.4% 范围内，各组温度下的混凝土试件抗压强度最大值随着 CF 掺量的增加而增加，表明在一定的掺量范围内，在负温条件下，CF 能够有效缓解混凝土因冻融破坏而导致其抗压强度下降的情况。

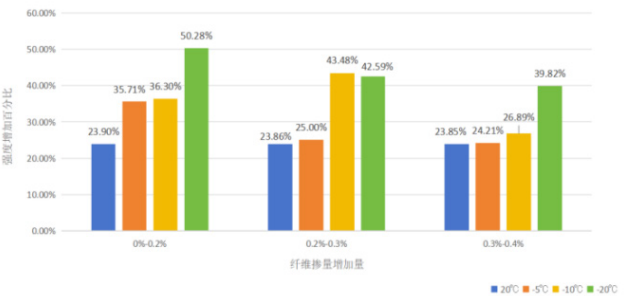


图 1 混凝土试件最大抗压强度变化率

图1为纤维掺量增加后,各温度下混凝土试件最大抗压强度的变化率,由图可知,在各个阶段,20℃条件下混凝土试件最大抗压强度变化率最低,处于23%~24%之间,而-20℃条件下的混凝土试件最大抗压强度变化率较大,处于领先位置。当CF掺量从0%增加到0.2%后,-5℃与-10℃条件下混凝土试件最大抗压强度的增长率相近,处于36%上下,-20℃条件下增长率最大,达到50.28%。当CF掺量从0.2%增加到0.3%后,-10℃和-20℃条件下都出现了混凝土最大抗压强度增长率较大的情况,均处于40%以上,表明0.2%~0.3%是CF增强普通硅酸盐混凝土抗压强度效应最佳时的掺量范围。当CF掺量从0.3%增加到0.4%,各温度条件下的混凝土试件最大抗压强度增长率相较于前两个有所下降,表明此掺量区间下,CF在普通硅酸盐混凝土内部的增强效应开始减缓,但还未达到最大阈值区间,其仍对混凝土抗压强度起正向增强作用。

### 3.2 SEM 测试结果

通过SEM电镜扫描测试发现,陶瓷纤维主要通过两种途径提高混凝土的抗压强度。第一种途径,在混凝土承压时,陶瓷纤维通与混凝土之间的粘结作用来抑制混凝土裂缝的开展,进而提高混凝土的强度,如图2。第二种途径,在裂缝开展时,若裂缝与陶瓷纤维交叉,陶瓷纤维则通过牵拉作用和自身韧性来减缓裂缝开展,进而提高混凝土的抗压强度。

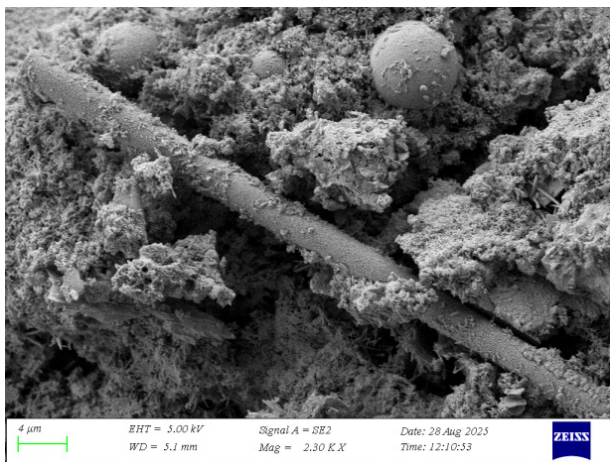


图2 陶瓷纤维与混凝土发生粘结

通过SEM电镜扫描测试发现,尽管存在早强剂和减水剂等促进混凝土水化的外加剂,在负温条件下,混凝土内部还是会存在部分水分凝结成细小冰状颗粒,导致混凝土内部存在许多细小空洞,进而降低混凝土的抗压强度。

在负温条件下,掺入陶瓷纤维的混凝土试块的抗压强度相较于未掺入陶瓷纤维的混凝土试块的抗压强度更高。造成这种影响的主要原因有以下两种:第一,陶瓷纤维可以抑

制冰晶膨胀应力,在负温条件下,混凝土内部中的水结成冰膨胀,产生巨大的内应力,而陶瓷纤维形成的三维网络能够约束和分担这种应力,减少水泥石基体和骨料界面过渡区的破坏,从而保全混凝土的整体性;第二种,陶瓷纤维的加入能有效优化混凝土的孔结构<sup>[5]</sup>,减少有害孔洞的数量,从而降低可冻结水的含量,降低冻结水对混凝土抗压强度的影响。

## 4 结语

通过系统的试验研究与微观分析,本文探讨了CF对普通硅酸盐混凝土在负温条件下抗压性能的影响,主要得出以下结论:

陶瓷纤维对负温条件下混凝土抗压强度具有显著增强作用。在CF掺量为0%~0.4%范围内,混凝土在-20℃~20℃养护条件下的抗压强度均随纤维掺量的增加而提高,表明陶瓷纤维能有效缓解因冻融引起的强度损失。

存在最佳纤维掺量区间。试验结果表明,CF掺量在0.2%~0.3%时,混凝土在负温条件下的抗压强度增长率最高,尤其是在-10℃和-20℃条件下,增长率均超过40%,说明该掺量区间为增强效应的最优范围。

纤维增强机理主要包括抑制裂缝发展与优化孔结构。SEM结果显示,陶瓷纤维通过与基体的粘结作用和裂缝牵拉效应,有效抑制了混凝土在受力过程中的微裂缝扩展;同时,纤维的掺入改善了混凝土的孔结构,减少了有害孔数量,降低了可冻结水含量,从而提升了抗冻性和力学性能。

负温条件下纤维的应力分担作用显著。陶瓷纤维形成的三维网络结构能够有效抑制冰晶膨胀引起的内部应力,保护水泥石与骨料界面过渡区,维持混凝土在低温环境下的整体性与耐久性。

## 参考文献

- [1] 叶晗晖,茅鸣,布占宇.玻璃纤维增强复合材料管约束装配式混凝土桥墩抗震性能[J/OL].复合材料学报,2025,42.
- [2] 陈晶,亢晋军,梁雄雄,等.陶瓷纤维和钢纤维对轻骨料混凝土力学性能的影响[J].建筑科学,2023,39(09):104-113.
- [3] Kareem M ,Ajadi E ,Fadipe O , et al.Sustainability-driven application of waste steel and tyre rubber fibres as reinforcement in concrete: An optimization study using response surface methodology[J].Next Materials,2025,7100345-100345.
- [4] 苏灏扬,许金余,高志刚,等.陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土的强韧化效应[J].高压物理学报,2013,27(01):69-75.
- [5] Banthia N ,Gupta R .Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete[J].Cement and Concrete Research,2006,36(7):1263-1267.