

# 玄武岩-聚丙烯混杂纤维混凝土与钢筋的粘结锚固性能研究

袁雪钰

昆明理工大学 昆明市 650031

**摘要:** 本文通过正交试验研究了玄武岩纤维和聚丙烯纤维复合掺入对混凝土力学性能及其与钢筋粘结锚固性能的影响规律。研究表明:混杂纤维的掺入能显著提高混凝土的劈裂抗拉强度,改善混凝土的破坏特征,提升其韧性与抗裂性能。通过中心拉拔试验发现,相比普通混凝土,混杂纤维混凝土能有效改善钢筋的粘结性能,提高钢筋的极限粘结强度与滑移值,且在相同纤维掺量条件下,混杂纤维的粘结增强效应优于单掺纤维。本文还对比了混杂纤维混凝土中钢筋粘结强度的试验值与已有本构模型的计算值,验证了考虑玄武岩纤维、聚丙烯纤维影响的粘结滑移本构关系的适用性。

**关键词:** 玄武岩纤维;聚丙烯纤维;混杂纤维;混凝土;粘结锚固性能

## 1. 引言

钢筋混凝土构件的受力性能很大程度上取决于钢筋与混凝土间的粘结锚固性能。玄武岩纤维和聚丙烯纤维作为新型混凝土增强材料,其复合掺入对钢筋混凝土构件力学性能的影响机理尚不明确。本研究通过玄武岩-聚丙烯混杂纤维混凝土(BPPHFRC)力学性能及其与钢筋粘结锚固性能的试验研究,旨在揭示混杂纤维对混凝土力学性能及钢筋粘结性能的影响规律。

## 2. 试验材料与方法

### 2.1 原材料

试验采用安徽海螺PC42.5普通硅酸盐水泥,其主要性能指标如表1所示。骨料选用中粗砂(细度模数2.76)和520mm连续级配碎石。纤维采用玄武岩纤维(长度12mm,密度 $2.652.80\text{g}/\text{cm}^3$ ,抗拉强度4100~4800MPa)和聚丙烯纤维(长度19mm,密度 $0.91\text{g}/\text{cm}^3$ ,抗拉强度 $\geq 400\text{MPa}$ )。钢筋选用HRB400级螺纹钢,直径20mm。

表1 水泥的主要性能指标

项目	细度(80 $\mu\text{m}$ 方孔筛筛余)(%)	标准稠度用水量(%)	抗压强度(MPa)	安定性(煮沸法)
测定值	1.6	26.4	49.8	合格

### 2.2 试验方案

根据正交试验设计方法,选取玄武岩纤维掺量(0.08%~0.16%)、聚丙烯纤维掺量(0.08%~0.16%)和混凝土强度等级(C30~C50)作为主要研究因素,制备23组混凝土试件。通过抗弯拉、抗压、劈裂抗拉等试验测试混凝土的基本力学性

能。同时,设计中心拉拔试验研究混杂纤维混凝土与钢筋的粘结锚固性能。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1 混凝土基本力学性能

#### 3.1.1 抗弯拉强度分析

通过三点弯曲加载试验测试了各组试件的抗弯拉强度。表2给出了HFRC试件的抗弯拉强度测试结果。研究发现,纤维的掺入显著改善了混凝土的抗弯拉性能。与基准组A23相比,单掺玄武岩纤维(A19)、单掺聚丙烯纤维(A21)以及玄武岩-聚丙烯混杂纤维(A14)的抗弯拉强度分别提高了34.6%、20.5%和55.1%。这表明,玄武岩纤维与聚丙烯纤维的复合使用,可以更有效地增强混凝土抵抗弯曲开裂的能力。

表2 HFRC抗弯拉强度测试结果

试件编号	BF体积率	BF长度	PPF体积率	PPF长度	混凝土强度等级	抗弯拉强度(MPa)
A1	0.08%	6mm	0.08%	6mm	C30	5.12
A7	0.16%	6mm	0.16%	12mm	C40	8.04
A14	0.12%	12mm	0.12%	12mm	C50	8.92
A19	0.12%	12mm	0	0	C40	7.75
A21	0.16%	12mm	0	0	C40	8.56
A23	0	0	0	0	C40	5.74

为定量评估各因素的影响权重,采用了极差分析法。结果表明,影响HFRC抗弯拉强度的主要因素依次为:玄武岩纤维体积率( $R=1.81$ )>混凝土强度等级( $R=1.26$ )>玄武岩纤维长度( $R=1.22$ )>聚丙烯纤维长度( $R=1.16$ )>聚丙烯纤维体积率( $R=1.04$ )。方差分析进一步表明,玄武岩纤维体积率和混凝土强度等级对HFRC抗弯拉强度的影响达到了极显

著水平。

### 3.1.2 抗压强度分析

混凝土立方体抗压强度测试结果如表 3 所示。研究表明, 混杂纤维的掺入对混凝土抗压强度具有复杂的影响。随着玄武岩纤维掺量从 0.08% 增加至 0.16%, 抗压强度先升后降。这主要是由于过量纤维的掺入会增加混凝土内部缺陷, 降低其密实度。当玄武岩纤维掺量为 0.12%、聚丙烯纤维掺量为 0.10% 时, 混凝土抗压强度达到最优, 较基准组提高 20.5%。

表 3 混杂纤维混凝土立方体抗压强度测定值

试件编号	BF 体积率	PPF 体积率	基体强度	抗压强度 (MPa)
A1	0.08%	0.08%	C30	32.85
A4	0.12%	0.12%	C50	51.92
A14	0.12%	0.12%	C50	54.30
A19	0.12%	0.12%	C40	42.39
A21	0.16%	0.12%	C40	35.04

### 3.1.3 劈裂抗拉强度分析

劈裂抗拉强度是评价混凝土抗裂性能的重要指标。表 4 列出了立方体劈裂抗拉强度试验的全部测试数据。由该表可见, HFRC 的劈裂抗拉强度范围在 2.22~4.15MPa 之间, 较普通混凝土有显著提高。

表 4 立方体劈裂抗拉强度试验测定结果

试件编号	玄武岩纤维体积率	聚丙烯纤维体积率	混凝土强度等级	劈裂抗拉强度 (MPa)	抗压比
A4	0.12%	0.12%	C50	4.15	0.083
A8	0.16%	0.08%	C50	4.03	0.081
A14	0.12%	0.12%	C50	4.10	0.082
A1	0.08%	0.08%	C30	2.22	0.074
A20	0.14%	0.12%	C40	3.60	0.090
A23	0	0	C40	2.15	0.070

极差分析表明, 影响 HFRC 劈裂抗拉强度的主要因素依次为: 混凝土强度等级 ( $R=1.687$ ) > 玄武岩纤维体积率 ( $R=0.360$ ) > 聚丙烯纤维体积率 ( $R=0.280$ ) > 玄武岩纤维长度 ( $R=0.143$ ) > 聚丙烯纤维长度 ( $R=0.034$ )。方差分析进一步显示, 混凝土强度等级对劈裂抗拉强度的影响极显著 ( $P<0.01$ ), 而玄武岩纤维和聚丙烯纤维掺量的影响显著 ( $P<0.05$ )。

随着混凝土强度等级由 C30 提高至 C50, HFRC 的劈裂抗拉强度显著提升, 最大增幅达 34.9%。这主要是由于高强混凝土基体密实度更高, 与纤维的粘结性能更好。玄武岩纤维掺量从 0.05% 增至 0.15% 时, 劈裂抗拉强度提高 12.9%,

这归因于玄武岩纤维优异的力学性能和界面粘结特性。

### 3.1.4 破坏形态分析

混杂纤维的掺入显著改变了混凝土的破坏特征。普通混凝土在加载过程中表现出典型的脆性破坏特征, 裂纹贯通后试件迅速断裂。而 HFRC 试件则呈现出明显的韧性破坏特征, 裂纹发展较为缓慢, 且在达到峰值荷载后仍具有一定的承载能力。

在抗压试验中, 普通混凝土试件破坏时通常伴随着突然的爆裂声, 并形成较大的破碎块体。而 HFRC 试件则表现出渐进性破坏特征, 裂纹扩展速度较慢, 破碎后的试件仍保持一定的完整性。这主要归因于纤维的桥联作用, 能够有效阻止裂纹扩展。

在劈裂试验中, HFRC 试件的断裂面较普通混凝土更加曲折多变, 断面上可见大量纤维拔出和断裂。随着纤维掺量增加, 试件表面的裂缝宽度显著减小。当玄武岩纤维掺量从 0.05% 提高至 0.15% 时, 裂缝宽度从 0.26mm 降低至 0.13mm; 混凝土强度等级由 C30 提升至 C50 时, 裂缝宽度降低了 60.7%。

## 3.2 粘结锚固性能分析

### 3.2.1 粘结强度分析

通过中心拉拔试验研究了不同纤维组合条件下钢筋与混凝土的粘结性能。表 5 给出了各组试件的极限粘结强度测试结果。由表可见, 混杂纤维的掺入能显著提高钢筋与混凝土的粘结强度。在相同条件下, 混杂纤维混凝土的粘结增强效应优于单掺纤维混凝土。

表 5 不同因素水平组合下的钢筋极限粘结强度

试件编号	BF 体积率	PPF 体积率	混凝土等级	极限粘结强度 (MPa)	较基准提高率 (%)
A1	0.08%	0.08%	C30	15.47	11.3
A5	0.12%	0.16%	C30	16.42	18.5
A7	0.15%	0.05%	C50	22.00	58.7
A13	0.15%	0.10%	C50	22.39	61.6
A14	0.12%	0.12%	C50	21.45	54.8
A20(基准)	0	0	C40	13.86	-

极差分析结果表明, 影响粘结强度的主要因素依次为混凝土强度等级 ( $R=5.55$ ) > 玄武岩纤维掺量 ( $R=2.33$ ) > 聚丙烯纤维掺量 ( $R=0.97$ )。这说明基体强度的提高是改善粘结性能的关键。随着混凝土强度由 C30 提高至 C50, 粘结强度最大提高 34.9%。这主要是因为高强混凝土基体能为钢筋提供更强的机械咬合力和径向约束力。

玄武岩纤维对粘结强度的提升效果显著。当掺量从 0.05% 增至 0.15% 时, 粘结强度提高 12.9%。这归因于玄武岩纤维优异的力学性能和空间网络结构, 能有效控制混凝土开裂, 提供额外的径向约束。聚丙烯纤维的影响相对较弱, 掺量从 0.05% 提高至 0.15% 时粘结强度仅提高 1.2%。

### 3.2.2 破坏模式分析

试验中观察到两种主要破坏模式: 钢筋拔出破坏和复合破坏(拔出与劈裂并存)。对于复合破坏模式, 试件在达到极限荷载后, 通常会在其横截面上呈现出 2 至 4 条放射状的裂缝。但与普通混凝土试件相比, 这些裂缝的长度普遍较短, 且很少贯穿整个试件。

表 6 统计了不同因素水平下的裂缝宽度和试件完整性评级。可以看出, 随着纤维掺量增加和基体强度提高, 裂缝宽度显著减小, 试件完整性提升。

表 6 不同因素水平对试件破坏特征的影响

影响因素	水平	平均裂缝宽度 (mm)	试件完整性评级 *
玄武岩纤维掺量	0.05%	0.26	C
	0.10%	0.19	B
	0.15%	0.13	A
聚丙烯纤维掺量	0.05%	0.22	B
	0.10%	0.17	B
	0.15%	0.15	A
混凝土强度等级	C30	0.28	C
	C40	0.20	B
	C50	0.11	A

\* 注: 试件完整性评级:A- 基本完整, B- 轻微损伤, C- 中度破坏, D- 严重破坏

### 3.2.3 粘结应力 - 滑移性能分析

HFRC 试件在达到峰值粘结应力后, 荷载迅速下降至峰值的 1/3 左右, 随后曲线逐渐趋于平缓。与普通混凝土相比, HFRC 的  $\tau-s$  曲线形态更加饱满, 且下降段更为平缓, 表现出更好的延性特征。

随着玄武岩纤维掺量增加, 峰值滑移和极限滑移值显著提高。以 C40 混凝土为例, 当玄武岩纤维掺量为 0.15%、聚丙烯纤维掺量为 0.10% 时, 峰值滑移较普通混凝土提高 59%, 极限滑移增加 32%, 残余应力提高 48.8%。

## 4. 结论

(1) 混杂纤维的掺入能显著改善混凝土的力学性能。当

玄武岩纤维掺量 0.12%、聚丙烯纤维掺量 0.10% 时, 混凝土的抗弯拉强度、抗压强度和劈裂抗拉强度分别较基准组提高 34.6%、20.5% 和 55.1%。

(2) 影响混杂纤维混凝土与钢筋粘结性能的主要因素依次为混凝土强度等级、玄武岩纤维掺量和聚丙烯纤维掺量。当混凝土强度由 C30 提高至 C50 时, 粘结强度最大提高 34.9%; 玄武岩纤维掺量从 0.05% 增至 0.15% 时, 粘结强度提高 12.9%。

(3) 混杂纤维能有效改善钢筋的粘结滑移性能, 使粘结应力 - 滑移曲线更加饱满, 峰值滑移和极限滑移值显著提高。当玄武岩纤维掺量为 0.15%、聚丙烯纤维掺量为 0.10% 时, 混杂纤维混凝土的峰值滑移较普通混凝土提高 59%。

(4) 本研究提出的考虑玄武岩纤维、聚丙烯纤维影响的粘结滑移本构关系, 能较好地描述混杂纤维混凝土与钢筋的粘结特性, 计算值与试验值吻合良好。

## 5. 展望

(1) 建议进一步研究不同纤维长径比条件下混杂纤维混凝土力学性能与粘结性能的变化规律。

(2) 需开展锈蚀钢筋与混杂纤维混凝土粘结性能的研究, 为工程实际应用提供参考。

(3) 深入探讨混杂纤维混凝土材料本构关系, 完善理论体系。

### 参考文献:

- [1] 王欣, 吴楠, 刘国安, 等. 混杂纤维活性粉末混凝土与普通混凝土界面黏结性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022(03):61-65.
- [2] 陈良豪. 聚丙烯纤维高性能混凝土高温后粘结性能试验研究 [D]. 太原理工大学, 2018.
- [3] Jong Sim, Cheolwoo Park. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites Part B, 2005, 36(6-7):504-512.
- [4] 贺晶晶. 混杂效应对混杂纤维混凝土力学性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2014, 36(10):113-117.
- [5] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3):26-36.