

DOI:10.11918/202409080

# 纤维灌浆料钢筋套筒拉拔试验及承载力研究

王小娟<sup>1</sup>, 吴思雨<sup>1</sup>, 于松民<sup>1</sup>, 周宏元<sup>1,2</sup>, 母崇元<sup>1</sup>

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;  
2. 爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学), 北京 100081)

**摘要:** 为研究纤维掺入对灌浆套筒的力学性能影响, 对聚丙烯 (polypropylene, PP) 纤维及聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 纤维增强灌浆料进行了材性性能及其灌浆套筒力学性能试验研究。对不同长度、掺量的 PP、PVA 纤维增强灌浆料进行了力学性能试验, 对 4d、6d、8d ( $d$  为钢筋直径) 3 种钢筋锚固长度的纤维增强灌浆料套筒开展了单向拉伸试验。结果表明: 掺入纤维导致灌浆料的流动度和抗压强度出现一定程度的下降, 对抗折强度影响不明显, 且随着纤维长度及掺量的增加, 灌浆料压缩韧性显著提高; 4d 埋深套筒试件发生钢筋拔出破坏, 6d、8d 埋深套筒试件发生钢筋拉断破坏, 且随着灌浆料纤维长度与掺量增加, 发生钢筋拔出破坏的套筒极限承载力和极限位移增加; 纤维增强灌浆料的抗压强度与套筒极限承载力和极限位移之间存在显著的负相关性, 纤维增强灌浆料的压缩韧性则体现出正相关关系; 基于传统灌浆套筒极限承载力预测公式, 引入灌浆料压缩韧性指数这一参数, 提出综合考虑灌浆料抗压强度及压缩韧性的纤维增强套筒承载力预测公式。

**关键词:** 聚丙烯纤维灌浆料; 聚乙烯醇纤维灌浆料; 抗压强度; 压缩韧性; 单向拉伸试验; 灌浆套筒力学性能

中图分类号: TU525

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)10-0041-16

## Pull-out tests and load-bearing capacity studies of steel sleeves with fiber-reinforced grouting materials

WANG Xiaojuan<sup>1</sup>, WU Siyu<sup>1</sup>, YU Songmin<sup>1</sup>, ZHOU Hongyuan<sup>1,2</sup>, MU Chongyuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology (Beijing Institute of Technology), Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the influence of fiber incorporation on the mechanical properties of reinforced grouting sleeves, experimental studies were conducted on the material properties of polypropylene (PP) fiber-reinforced and polyvinyl alcohol (PVA) fiber-reinforced grouting materials. Mechanical property tests were performed on PP and PVA fiber-reinforced grouting materials with varying lengths and volume fractions. Uniaxial tensile tests were carried out on fiber-reinforced grouting sleeves with three different reinforcement anchorage lengths of 4d, 6d, and 8d (where  $d$  represents the diameter of the reinforcement bar). The results indicate that the addition of fibers leads to a certain degree of reduction in the fluidity and compressive strength of the grouting material, with insignificant impact on flexural strength. Moreover, as the fiber length and volume fraction increase, the compressive toughness of the grouting material improves significantly. For sleeve specimens with a 4d embedment depth, reinforcement pull-out failure occurred, while reinforcement rupture occurred in specimens with 6d and 8d embedment depths. Additionally, as the fiber length and volume fraction in the grouting material increase, the ultimate bearing capacity and ultimate displacement of the sleeves undergoing reinforcement pull-out failure also increase. There was a significant negative correlation between the compressive strength of the fiber-reinforced grouting material and the ultimate bearing capacity and ultimate displacement of the sleeves, whereas a positive correlation was observed with the compressive toughness of the material. Based on the traditional prediction formula for the ultimate bearing capacity of grouting sleeves, a new prediction formula that comprehensively considers both the compressive strength and compressive toughness of the grouting material is proposed by introducing the compressive toughness index as a parameter.

**Keywords:** polypropylene fiber-reinforced grouting materials; polyvinyl alcohol fiber-reinforced grouting materials; compressive strength; compressive toughness; uniaxial tensile tests; mechanical properties of reinforced grouting sleeves

收稿日期: 2024-09-29; 录用日期: 2024-11-25; 网络首发日期: 2025-03-07

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250306.1620.002>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178096, 52278477); 国家重点研发计划(2019YFD1101005)

作者简介: 王小娟(1982—), 女, 副教授, 博士生导师; 周宏元(1981—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 周宏元, hzhou@bjut.edu.cn

灌浆套筒连接因具有连接牢固、密封性好、施工便捷、维护方便等优点<sup>[1]</sup>,广泛应用于装配式建筑。灌浆套筒由钢筋、套筒、灌浆料 3 部分组成,这 3 部分的力学性能都会一定程度影响灌浆套筒的连接性能。诸多学者首先对钢筋的直径、钢筋嵌入长度、钢筋强度、钢筋形状等因素<sup>[2-3]</sup>进行了研究,结果表明,这些措施可一定程度提升套筒的承载力。此外,有学者通过改变套筒形状及套筒内部构造<sup>[4]</sup>提升套筒承载力,结果表明,尽管锥形套筒可有限提升套筒承载力,但考虑到施工的便捷性及经济性,圆柱形的普通灌浆套筒仍被视为首选方案。此外,有学者在灌浆料配合比<sup>[5]</sup>、外加剂<sup>[6-9]</sup>、灌浆料养护龄期等方面对其流动度、强度等方面影响开展了大量的研究,结果表明,上述改进措施可有效提高灌浆料的承载力。为进一步提高水泥基材料抗裂性能,鉴于研究表明聚乙烯(polyethylene, PE)纤维、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维可很大程度提高工程水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)的抗裂性能和变形能力<sup>[10]</sup>,诸多学者也将各种纤维掺入到灌浆料中改善灌浆料的力学性能,如在灌浆料中加入聚丙烯(polypropylene, PP)纤维<sup>[11-12]</sup>、碳纤维<sup>[13]</sup>、PVA 纤维<sup>[14]</sup>等,研究结果表明掺入纤维后,灌浆料的抗折、抗压强度无明显提高,但灌浆料的脆性破坏得到了明显改善,同时可显著提高灌浆套筒的连接性能。然而,上述诸多试验结果表明掺入纤维对抗压强度提升并不显著<sup>[15]</sup>,但可有效提升灌浆套筒连接性能,而传统灌浆套筒极限承载力预测公式大多仅采用抗压强度来评估灌浆套

筒连接性能<sup>[16-18]</sup>,因此,采用传统公式难以准确预测纤维增强灌浆料套筒极限承载力。相较于 ECC 材料中常使用的 PE 纤维,考虑到 PP 和 PVA 纤维成本更低<sup>[19-20]</sup>,选择 PP 纤维和 PVA 纤维制备纤维增强灌浆料,配制了 4 个不同纤维体积掺量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%),及 4 种不同纤维长度(3、6、9、12 mm)的纤维灌浆料,测试了其流动度、抗折、抗压强度并计算了压缩韧性。对于每种类型的纤维,选取不同纤维掺量及不同纤维长度下且流动度全部合格<sup>[23]</sup>的 PP 和 PVA 纤维增强灌浆料制作套筒试件进行套筒单向拉伸试验,研究了纤维种类、纤维掺量、纤维长度、钢筋锚固长度对套筒连接性能的影响,并提出了纤维增强灌浆料套筒极限承载力预测公式。

## 1 试 验

### 1.1 材料性能

选择广东凯萱塑胶科技公司生产的 PP 纤维和 PVA 纤维作为增强剂制备纤维增强灌浆料,其性能参数见表 1。使用工程常用且性能达标的灌浆料制备纤维灌浆料套筒,灌浆料根据 JG/T 408—2019《钢筋连接用套筒灌浆料》<sup>[21]</sup>中的规定选取,采用北京中德新亚建筑技术有限公司生产的钢筋连接用套筒灌浆料,其性能参数见表 2。选用直径为 16 mm 的 HRB400E 钢筋,通过钢筋的单向拉伸试验,获得了其基本力学参数。本试验选用了符合 JGJ 355—2015《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》<sup>[22]</sup>的半灌浆套筒,套筒的尺寸及剖面图如图 1 所示,其与钢筋性能参数见表 3。

表 1 纤维物理和力学性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of fibers

纤维种类	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	等效直径/μm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
PP	0.91	27	4.18	635	18
PVA	1.3	40	41.2	1 600	6

表 2 灌浆料性能参数

Tab.2 Parameters of grouting material

流动度/mm		抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
初始	30 min		
405	365	101.6	19.6

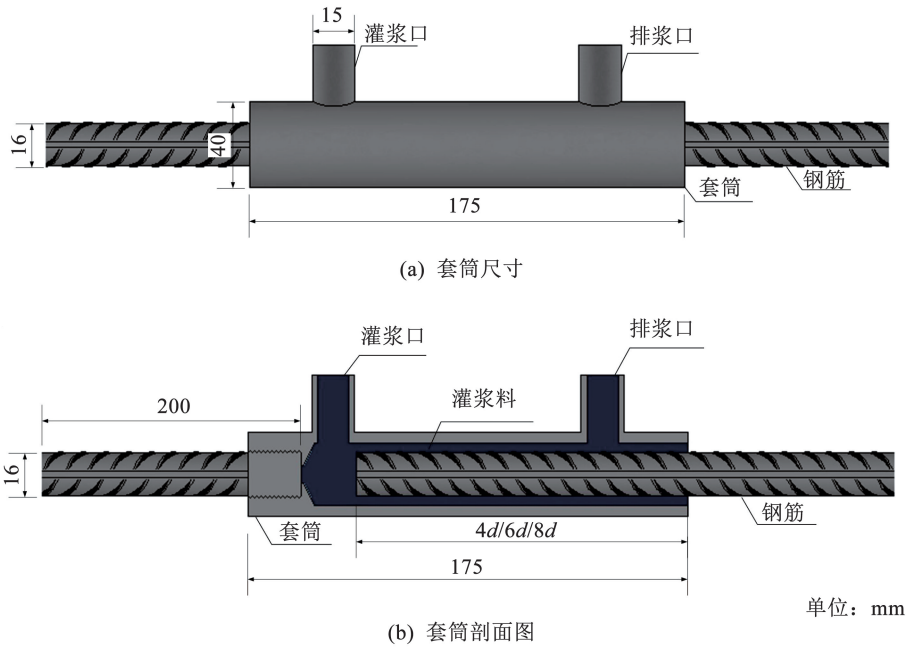


图 1 套筒尺寸及剖面图

Fig. 1 Profile of sleeve

表 3 钢筋及套筒参数

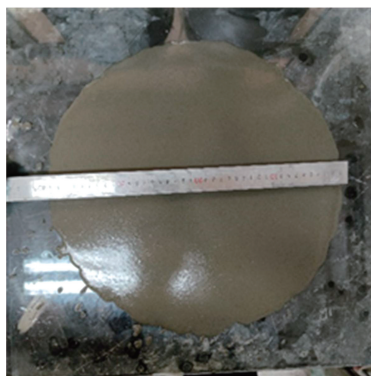
Tab. 3 Material properties of steel bar and sleeve

种类	牌号	弹性模型/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
钢筋	HRB400E	210	455	620
套筒	45#	210	355	600

## 1.2 试件制作及试验方案

按照 GB 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》<sup>[23]</sup>及 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》<sup>[24]</sup>所记载的方法测试灌浆料的流动度、抗压强度、抗折强度。前期预试验发现纤维体积掺量和纤维长度的增大会导致纤维增强灌浆料的流动度急剧降低,因此,合理地选择了 0.4% 作为最大纤维掺量和 12 mm 的最大纤维长度,共考虑了 4 个不同的纤维体积掺量,分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%,及 4 种不同的纤维长度,分别为 3、6、9、12 mm。此外作为对照,试验中制备了不含纤维的灌浆料,包含两

种纤维类型、4 种纤维体积掺量、4 种纤维长度及 1 种无纤维对照组,共计 33 种配置,每种配置均设有 3 个相同试件,总计 99 个试块,详见表 4。表中试件编号 GM (grouting material) 指不掺纤维灌浆料,PPRGM (polypropylene fiber reinforced grouting material) 和 PVARGM (polyvinyl alcohol fiber reinforced grouting material) 分别代表 PP 纤维增强灌浆料和 PVA 纤维增强灌浆料,其后数值分别代表纤维长度及纤维体积掺量。为了测量纤维增强灌浆料的力学性能,制备了 40 mm × 40 mm × 160 mm 的纤维增强灌浆料试块,进行准静态受弯及受压试验。上述试验均在 MTS Exceed E45 电子万能试验机 (300 kN) 进行,如图 2 (b),准静态受弯及受压试验的加载速率分别为 0.05 kN/s 和 2.5 kN/s。除了测试纤维增强灌浆料的抗折及抗压性能外,还开展了流动性测试,如图 2 (a)。



(a) 流动度试验



(b) 准静态压缩试验

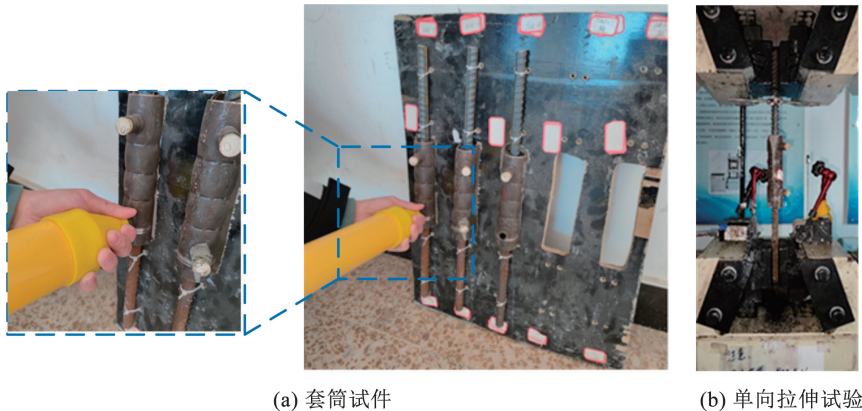
图 2 灌浆料材料性能试验

Fig. 2 Material performance test of grouting material

根据不同的纤维掺量和纤维长度,称取了对应所需的纤维和灌浆料,并使用搅拌机将两者充分搅拌。按照水与纤维增强灌浆料的质量比 0.12 量取相应制备灌浆料所需的水。先将干料倒入搅拌机干拌 2 min,再倒入 2/3 的水进行第 1 次搅拌,2 min 后倒入剩余的水进行第 2 次搅拌,3 min 后往搅拌锅内分多次掺入纤维,搅拌 3 min 后停止搅拌。压折试块浇筑前,需将搅拌好的灌浆料静置 2 min 以排出气泡,制备的一部分灌浆料浇入 40 mm × 40 mm × 160 mm 模具中以制备抗折抗压试块并用保鲜膜覆盖,放入标养室 2 h 后脱模,再放入湿度 95% 且温度为 25 ℃ 的标准养护箱进行 28 d 养护。同时一部分灌浆料用来测量其初始流动度及 30 min 流动度。

如图 3(a) 所示,套筒试件制作时,先将套筒及灌浆端的钢筋用扎带固定在事先打好孔洞的木板上,再使用灌浆枪将制作好的灌浆料注入套筒,钢筋端套筒需要朝下,以免灌浆料泄漏。对于每种类型的纤维,选取不同纤维掺量及不同纤维长度下且初始及 30 min 流动度满足规范要求<sup>[23]</sup> 的 PP 和 PVA

纤维增强灌浆料制作套筒试件进行套简单向拉伸试验。除了考虑不同的纤维掺量及纤维长度,在制备灌浆套筒试件时还考虑了 3 种不同的钢筋锚固深度,分别为 4d、6d、8d,此处  $d$  为钢筋直径。因此,本研究采用了两种纤维类型、3 种纤维掺量、3 种纤维长度及 3 种锚固长度的组合设计,另增设 1 组无纤维对照试验(亦包含 3 种锚固长度),共计形成 57 种工况,每种工况制备 3 个重复试件,总共制备了 171 个试件,见表 5。表中试件编号 GS (grouting sleeve) 指不掺纤维灌浆料套筒,PPRGS (polypropylene fiber reinforced grouting sleeve) 和 PVARGS (polyvinyl alcohol fiber reinforced grouting sleeve) 分别代表 PP 纤维增强灌浆料套筒和 PVA 纤维增强灌浆料套筒,其后数值分别代表纤维长度、纤维体积掺量及钢筋锚固长度。先采用应力控制匀速加载,加载速率为 5 MPa/s,在 70% 钢筋拉断应力时改为位移控制匀速加载,加载速率为 15 mm/min,直至试件破坏。试验装置见图 3(b)。



(a) 套筒试件

(b) 单向拉伸试验

图 3 灌浆套筒拉伸性能试验

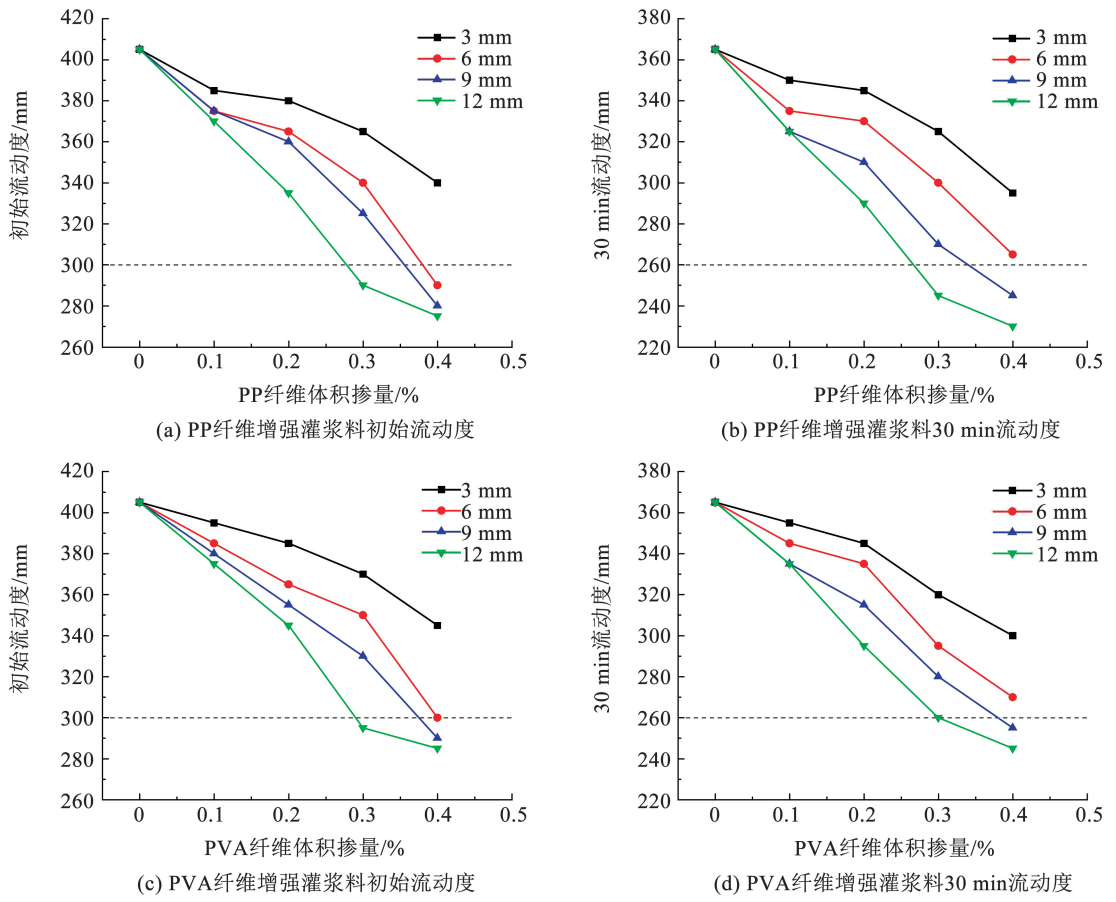
Fig. 3 Grouting sleeve tensile test setup

## 2 试验结果

### 2.1 PP/PVA 纤维长度及掺量对流动度的影响

不同 PP/PVA 纤维长度及掺量的灌浆料流动度测试结果见图 4。与以往研究<sup>[23]</sup> 类似,掺入纤维后灌浆料的流动度均出现不同程度的下降,随着掺入纤维的长度及掺量的增大,灌浆料初始流动度和 30 min 流动度不断降低。纤维掺入灌浆料后,水泥净浆在砂子间流动时会受到纤维的阻碍,进而产生

流动度降低<sup>[26-27]</sup>。在掺入同一种掺量不同长度的纤维时,由于长纤维能够阻碍更大范围内的浆体流动,会导致流动度迅速下降。根据 GB 50448—2015 《水泥基灌浆材料应用技术规范》<sup>[23]</sup>,为了确保灌浆料的质量与性能达标,灌浆料初始流动度和 30 min 流动度应分别大于 300 mm 和 260 mm。然而在经过流动度测试后,发现部分纤维较长且掺量较大的灌浆料不满足规范要求,只将满足流动度标准的纤维灌浆料应用于后续灌浆套简单向拉伸试验研究。



注: 图中虚线为规范要求最低流动度<sup>[21]</sup>。

图 4 纤维灌浆料流动度试验结果

Fig. 4 Fluidity test results of fiber-reinforced grouting materials

## 2.2 PP/PVA 纤维对灌浆料抗折抗压强度的影响

### 2.2.1 破坏模式

准静态弯曲试验观察到的破坏模式如图 5 所示,可以看出,具有不同纤维掺量和长度的试件在抗折试验中均在其中点形成一条临界裂缝,导致试件发生破坏。在试验中观察到纤维掺量及长度会一定

程度影响临界裂缝在试件中的发展情况。当纤维掺量较低且纤维长度较短时,试件迅速断裂成两部分,如图 5(a)所示。当逐渐提高纤维掺量及长度时,甚至某些掺有高掺量且长纤维的试件在破坏时,断裂面仍有连接,如图 5(b)所示。该现象说明纤维的桥接作用延缓了裂缝的进一步开展。

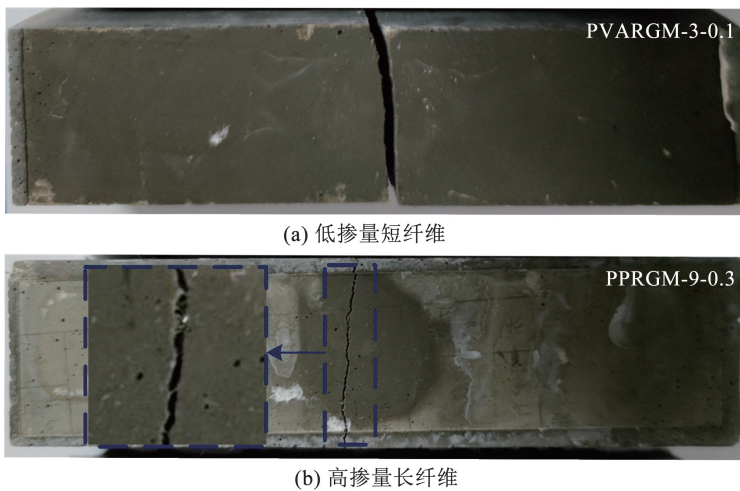


图 5 不同纤维体积掺量和纤维长度试件抗折破坏现象

Fig. 5 Flexural failure of specimens with varying fiber volume fractions and lengths

准静态压缩试验观察到的破坏模式如图 6 所示,掺有不同掺量及纤维长度的灌浆料试件均呈现相似的破坏模式,试件四周剥落,剩余部分呈对顶角锥形。与前面的弯曲试验结果相似,未掺纤维的灌浆料或掺有少量短纤维灌浆料的试件在加载过程中

临界裂缝发展迅速,且试件破坏时,发出“砰”的巨大爆裂声响,碎块四溅,具有明显的脆性破坏特征。而在高掺量长纤维的灌浆料试件中,由于纤维的桥接作用,试件破坏形态为裂而不碎,且破坏时没有发生爆裂,试件的脆性破坏得到了很大程度的改善。

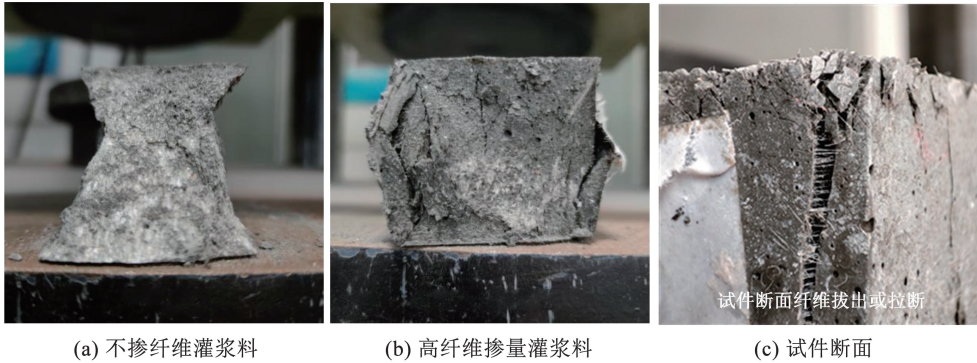


图 6 不同纤维体积掺量和纤维长度试件抗压破坏现象

Fig. 6 Compressive failure of specimens with varying fiber volume fractions and lengths

2.2.2 抗折和抗压强度

掺有不同纤维掺量及长度的 PP 和 PVA 纤维增强灌浆料的抗折强度如图 7 所示,纤维掺量及长度对灌浆料试件抗折强度的影响不大,试验结果取 3 个相同试件平均值。一方面,由于纤维的桥接作用充分发挥,促进基体中局部应力的重新分布,并延迟裂纹扩展,阻止损伤界面进一步破坏<sup>[28-29]</sup>。纤维的桥接作用本质上是把灌浆料内部的集中应力通过纤

维进行重分布,可提升灌浆料的承载力。另一方面,纤维会导致灌浆料试件内部缺陷增多,纤维掺入后灌浆料的流动度下降,且增大了浆体表面张力,灌浆料搅拌过程中混入的气泡无法及时排出,滞留在灌浆料中形成内部缺陷,因此,掺入纤维不利于灌浆料抗折强度的提升。由于上述两方面的影响,掺入纤维对提升试件抗折强度影响不大。

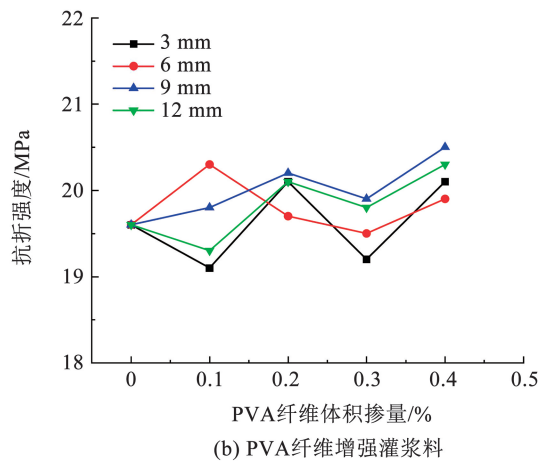
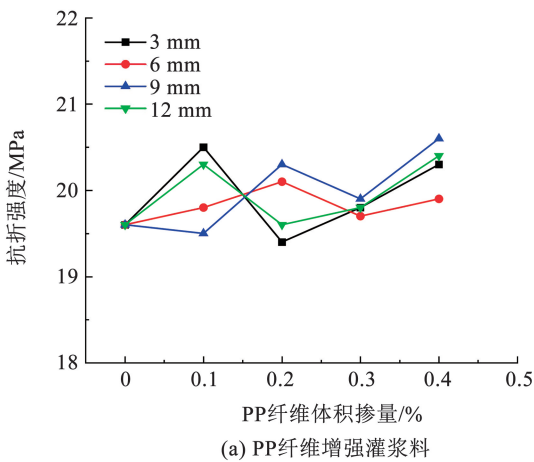


图 7 纤维增强灌浆料抗折强度

Fig. 7 Flexural strength of fiber-reinforced grouting materials

图 8 显示了纤维掺量和纤维长度对含有 PP 和 PVA 纤维试样抗压强度的影响,试验结果取 3 个相同试件平均值。随着纤维掺量增加和纤维长度增大,虽然掺入少量短纤维可些许提升试件抗压强度,但纤维增强灌浆料抗压强度总体上呈下降趋势。试件 PPRGM-3-0.1 和试件 PVARGM-3-0.1 的抗压强度最高。由于纤维掺量和纤维长度的增加导致内部

缺陷的增多,纤维增强灌浆料的抗压强度下降。相比抗折试验,在抗压试验中纤维的桥接作用并不能完全发挥,无法有效传导内部应力,延迟薄弱面开裂时间,提升抗压强度效果有限。其次,纤维掺量与纤维长度越大,灌浆料流动度越差,滞留内部的气泡越多,导致灌浆料抗压强度降低<sup>[30]</sup>。长度为 3 mm 纤维试样的抗压强度明显高于其他长度纤维的试样。

主要原因是长度为 3 mm 的纤维更容易在浆料中均匀分布, 引入灌浆料试件的内部缺陷较少。当掺入

更长纤维时, 纤维极易发生重叠和结块, 导致试件内部缺陷急剧增加。

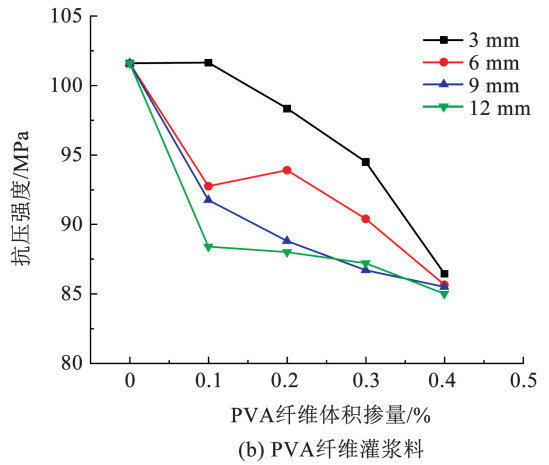
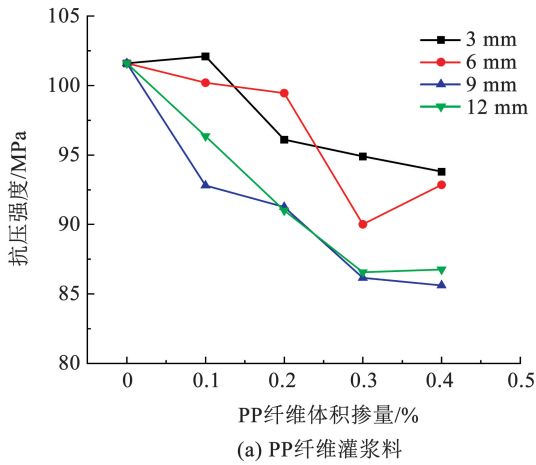


图 8 纤维灌浆料抗压强度

Fig. 8 Compressive strength of fiber-reinforced grouting materials

### 2.3 PP/PVA 纤维对灌浆料压缩韧性的影响

压缩韧性<sup>[31]</sup>是常用于评判材料延性的一个重要指标。压缩韧性指数越大, 荷载-位移曲线下落段越平缓, 残余承载力越大, 材料的压缩韧性越好。如图 9, 记原点为  $O$  点, 取荷载-位移曲线上最大承载力  $F_{max}$  对应的点为  $A$ , 其向  $X$  轴投影的点为  $A'$ ; 取荷载-位移曲线上上升段中最大承载力  $F_{max}$  的 0.85 倍的点, 记为  $B$ , 其向  $X$  轴投影的点记为  $B'$ ; 取荷载-位移曲线下落段中某点记为  $C$ , 其向  $X$  轴投影的点记为  $C'$ 。

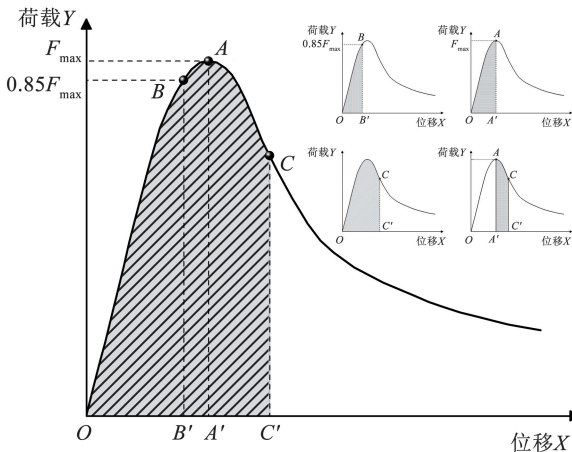


图 9 韧性指数计算方法

Fig. 9 Calculation method for compressive toughness index

诸多学者提出了不同的材料压缩韧性计算公式, 如根据纤维混凝土试验方法标准 CECS13:89<sup>[32]</sup> 中的方法计算压缩韧性指数  $T_{11}$ , 其中,  $C(C')$  点的位移为  $A(A')$  点的 1.5 倍, 计算公式如下:

$$T_{11} = \frac{S_{OCC'}}{S_{OBB'}} \quad (1)$$

式中:  $T_{11}$  为压缩韧性指数,  $S_{OAA'}$  为荷载-位移曲线与  $AA'$  以及  $X$  轴围成的面积,  $S_{OBB'}$  为荷载-位移曲线与  $BB'$  以及  $X$  轴围成的面积,  $S_{OCC'}$  为荷载-位移曲线与  $CC'$  以及  $X$  轴围成的面积。此外, 为了进一步限制强度的降低, 根据 Emad 等<sup>[33]</sup> 提出了压缩韧性指数  $T_{12}$ , 其中,  $C(C')$  点的荷载为  $0.8F_{max}$ , 计算公式如下:

$$T_{12} = \frac{S_{OCC'}}{S_{OAA'}} \quad (2)$$

式中:  $T_{12}$  为压缩韧性指数,  $S_{OCC'}$  为荷载-位移曲线中  $O$  点到下降段 80% 峰值荷载点下的面积,  $S_{OAA'}$  为荷载-位移曲线中  $O$  点到峰值荷载点下的面积。为充分考虑峰后荷载区间内灌浆料可吸收的能量, 根据 Zhou 等<sup>[34]</sup> 的方法计算压缩韧性指数  $T_{13}$ , 其中,  $C(C')$  点的荷载为  $0.3F_{max}$ , 计算公式如下:

$$T_{13} = \frac{S_{ACCA'}}{S_{OAA'}} \quad (3)$$

式中:  $T_{13}$  为压缩韧性指数,  $S_{ACCA'}$  为荷载-位移曲线中峰荷载点到下降段 30% 峰值应力点下的面积,  $S_{OAA'}$  为荷载-位移曲线中  $O$  点到峰值荷载点下的面积。依据式(1)~(3), 各纤维增强灌浆料的压缩韧性指数见图 10, 随着纤维掺量增加, 压缩韧性显著提高, 且长纤维的压缩韧性大于短纤维。表明随着纤维掺量以及长度的增加, 灌浆料的延性得到了显著提升。各纤维增强灌浆料压缩韧性指数见表 4, 其中, 各压缩韧性指数为 3 个相同试件的平均值。3 个公式计算结果的差异体现在侧重考虑了荷载-位移曲线不同阶段对压缩韧性的影响。

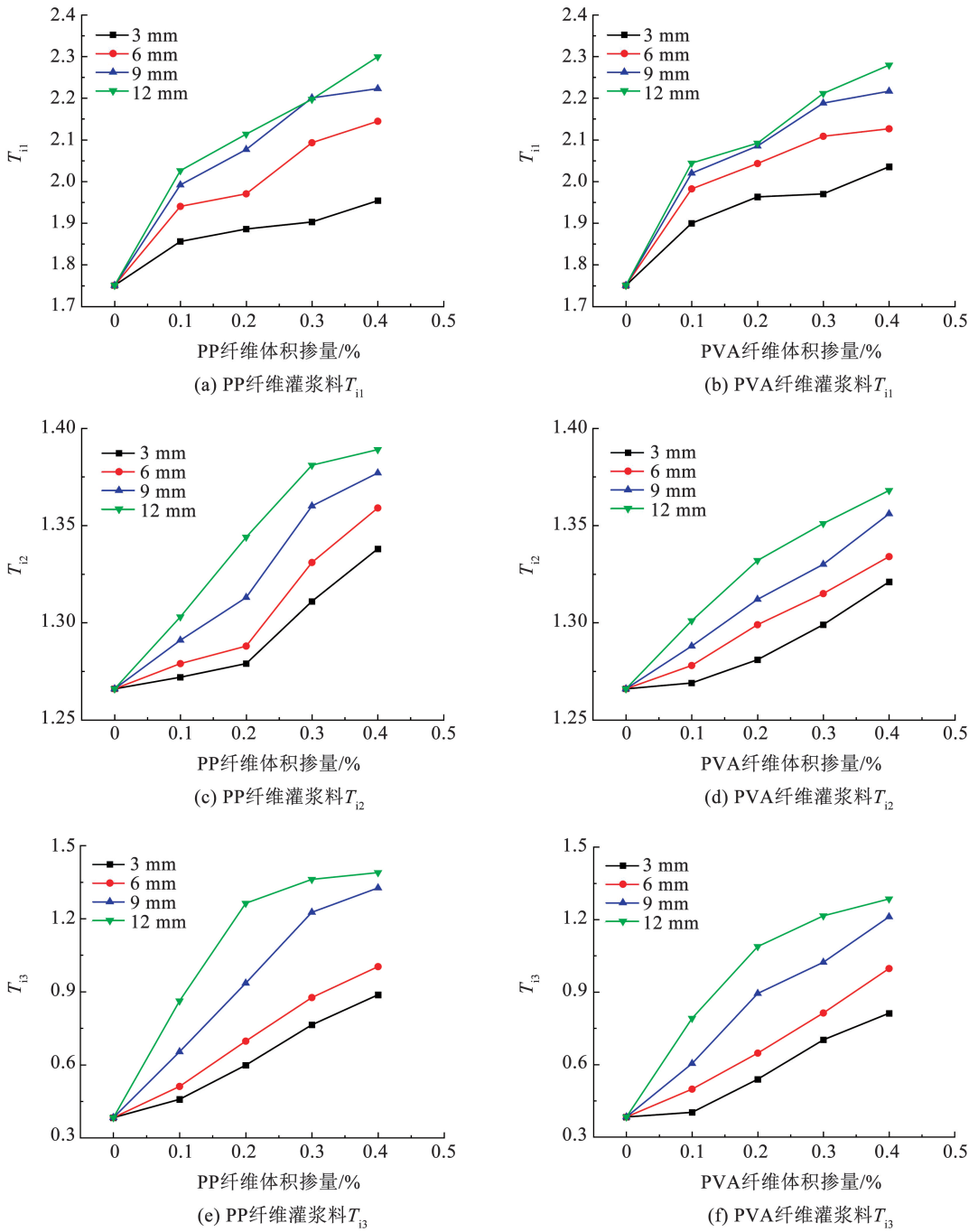


图 10 纤维灌浆料压缩韧性指数

Fig. 10 Compressive toughness index of fiber-reinforced grouting materials

表 4 纤维灌浆料压缩韧性指数

Tab. 4 Compressive toughness index of fiber-reinforced grouting materials

序号	试件编号	压缩韧性指数			序号	试件编号	压缩韧性指数		
		$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$			$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$
1	GM	1.751	1.266	0.383	18	PVARGM-3-0.1	1.900	1.266	0.402
2	PPRGM-3-0.1	1.856	1.272	0.458	19	PVARGM-3-0.2	1.963	1.269	0.539
3	PPRGM-3-0.2	1.886	1.279	0.598	20	PVARGM-3-0.3	1.970	1.281	0.702
4	PPRGM-3-0.3	1.903	1.311	0.764	21	PVARGM-3-0.4	2.035	1.299	0.812
5	PPRGM-3-0.4	1.954	1.338	0.887	22	PVARGM-6-0.1	1.982	1.278	0.498
6	PPRGM-6-0.1	1.940	1.279	0.511	23	PVARGM-6-0.2	2.043	1.299	0.647

表 4(续)

序号	试件编号	压缩韧性指数			序号	试件编号	压缩韧性指数		
		$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$			$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$
7	PPRGM-6-0.2	1.970	1.288	0.697	24	PVARGM-6-0.3	2.108	1.315	0.813
8	PPRGM-6-0.3	2.093	1.331	0.876	25	PVARGM-6-0.4	2.126	1.334	0.997
9	PPRGM-6-0.4	2.145	1.359	1.003	26	PVARGM-9-0.1	2.020	1.288	0.604
10	PPRGM-9-0.1	1.992	1.291	0.653	27	PVARGM-9-0.2	2.085	1.312	0.894
11	PPRGM-9-0.2	2.077	1.313	0.935	28	PVARGM-9-0.3	2.188	1.330	1.023
12	PPRGM-9-0.3	2.201	1.360	1.226	29	PVARGM-9-0.4	2.217	1.356	1.211
13	PPRGM-9-0.4	2.223	1.377	1.326	30	PVARGM-12-0.1	2.044	1.301	0.791
14	PPRGM-12-0.1	2.026	1.303	0.862	31	PVARGM-12-0.2	2.092	1.332	1.088
15	PPRGM-12-0.2	2.114	1.344	1.263	32	PVARGM-12-0.3	2.211	1.351	1.215
16	PPRGM-12-0.3	2.197	1.381	1.361	33	PVARGM-12-0.4	2.279	1.368	1.285
17	PPRGM-12-0.4	2.299	1.389	1.389					

注:试件编号 GM 指不掺纤维灌浆料,PPRGM 和 PVARGM 分别代表 PP 纤维增强灌浆料和 PVA 纤维增强灌浆料,其后数值分别代表纤维长度及纤维体积掺量。

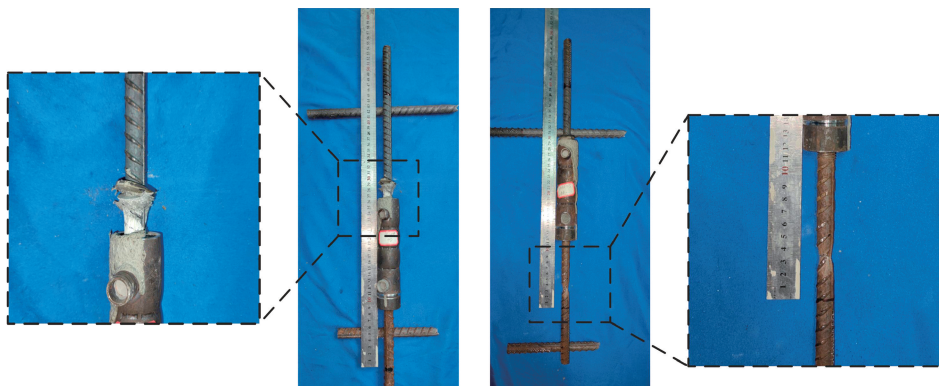
### 3 灌浆套简单向拉伸试验结果分析

半灌浆套筒连接<sup>[33]</sup>承受单向拉伸荷载时,在两端的连接钢筋、套筒和灌浆料的接触面、套筒和钢筋连接的螺纹、钢筋和灌浆料的接触面均有可能发生破坏。套筒内壁的内螺纹增大了与灌浆料的接触面积,同时有效抑制了灌浆料在受力过程中的滑动趋势<sup>[34-35]</sup>,一般状况下不会发生套筒和灌浆料的接触面破坏。本试验所设计的灌浆套筒具有足够的螺纹端钢筋与套筒的连接长度,套筒与钢筋连接的螺纹处不会出现破坏,因此,在本试验中只观察到钢筋的拔出破坏和拉断破坏。在发生这两种破坏形式的灌浆套筒中,其承载力大小主要取决于钢筋的最大承载力或钢筋和灌浆料的黏结性能<sup>[36-37]</sup>。

#### 3.1 灌浆套筒连接的破坏形态

如图 11 所示,各试件均表现出钢筋的拔出破坏或拉断破坏,其破坏形态及极限承载力见表 5,试验结果取 3 个相同试件平均值。试件的荷载-位移曲线均呈现弹性阶段、屈服阶段、强化阶段以及破坏阶

段。对于埋置深度为  $4d$  的试件,均为钢筋拔出破坏。钢筋屈服前,试件位移随荷载的增加呈线性增加。进入屈服阶段及强化阶段后,钢筋与试件整体变形明显增加。当荷载达到试件极限承载力后,灌浆料与钢筋之间的咬合黏结失效,钢筋和附着在其表面的灌浆材料一起被拔出套筒,荷载开始急剧下降,荷载-位移曲线无平稳下降段,说明试件延性不大,属于脆性破坏。试件的荷载-位移曲线代表图如图 12 所示。而对于  $6d$  和  $8d$  埋置深度的试件则发生钢筋拉断破坏,套筒外钢筋断裂,钢筋断裂位置远离套筒端部,钢筋截面出现明显颈缩,破坏形式类似于钢筋受拉的经典破坏形式。由于  $6d$  和  $8d$  埋深的试件具备足够的埋置深度,套筒内灌浆料与钢筋之间的黏结强度大于钢筋的极限抗拉强度,试件不会发生钢筋拔出破坏,钢筋屈服前,随着荷载的增加,试件位移基本呈线性缓慢增加,试件达到极限荷载后荷载开始下降,下降曲线平缓,说明试件具有一定的延性,破坏模式为延性破坏。



(a) 拔出破坏

(b) 拉断破坏

图 11 灌浆套筒试件破坏模式

Fig. 11 Failure modes of grouting sleeve specimens

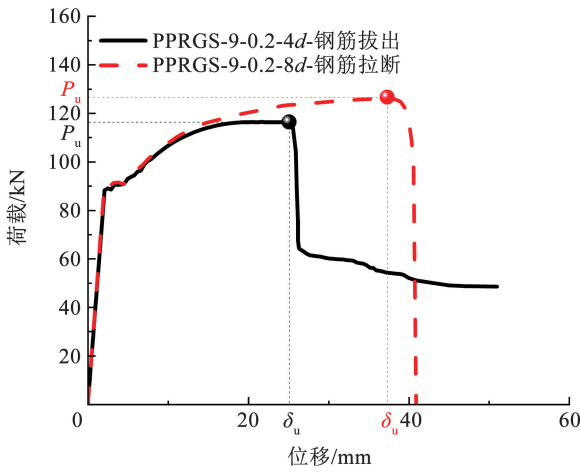


图 12 灌浆套筒荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curve of grouting sleeve

### 3.2 纤维对灌浆套筒极限承载力及延性的影响

对于套筒连接而言,其存在的两种破坏形态在

决定极限承载力大小方面各自受不同因素的影响。如表 5 所示,使用纤维增强灌浆料后,钢筋拔出时,肋间破碎灌浆料与原界面灌浆料间存在纤维拉结作用,导致其拔出阻力相较于无纤维灌浆料显著增大。纤维掺量越高,其拉结作用愈发显著,黏结性能提升幅度随之增大,进而导致试件的极限承载力相应提升,如图 13 所示。当试件发生拉断破坏时,纤维掺量及长度对套筒极限承载力影响不大,试件的极限承载力仅取决于钢筋的极限承载力。对于本文采用的 16 mm 直径 HRB400E 钢筋,极限承载力约为 125 kN。而当试件发生拔出破坏时,纤维掺量及长度对套筒极限承载力有较大的影响,试件的极限承载力取决于钢筋和灌浆料之间的黏结性能。相比普通灌浆料的试件,纤维增强灌浆料的试件极限承载力平均提高 11.29%。

表 5 灌浆套筒试件破坏模式及承载力

Tab. 5 Failure modes and load-bearing capacity of grouting sleeve specimens

序号	试件编号	$P_y$ /kN	$P_u$ /kN	$\delta_y$ /mm	$\delta_u$ /mm	破坏模式	序号	试件编号	$P_y$ /kN	$P_u$ /kN	$\delta_y$ /mm	$\delta_u$ /mm	破坏模式
1	GS-0-4d	90.52	102.95	2.01	6.43	钢筋拔出	30	PPRGS-9-0.3-8d	91.46	124.45	2.21	40.68	钢筋拉断
2	GS-0-6d	91.22	124.75	2.29	42.01	钢筋拉断	31	PVARGs-3-0.1-4d	90.32	104.05	2.04	9.08	钢筋拔出
3	GS-0-8d	90.55	124.54	2.33	43.54	钢筋拉断	32	PVARGs-3-0.1-6d	90.48	124.72	2.32	47.33	钢筋拉断
4	PPRGS-3-0.1-4d	90.36	106.09	2.02	11.56	钢筋拔出	33	PVARGs-3-0.1-8d	90.69	125.03	2.39	45.36	钢筋拉断
5	PPRGS-3-0.1-6d	90.54	127.12	2.36	50.64	钢筋拉断	34	PVARGs-3-0.2-4d	90.44	112.86	2.11	15.78	钢筋拔出
6	PPRGS-3-0.1-8d	90.57	125.53	2.31	46.36	钢筋拉断	35	PVARGs-3-0.2-6d	90.88	123.22	2.26	39.23	钢筋拉断
7	PPRGS-3-0.2-4d	90.55	114.11	2.05	13.97	钢筋拔出	36	PVARGs-3-0.2-8d	90.46	124.18	2.28	41.25	钢筋拉断
8	PPRGS-3-0.2-6d	90.89	126.77	2.21	47.43	钢筋拉断	37	PVARGs-3-0.3-4d	90.56	118.54	2.15	20.52	钢筋拔出
9	PPRGS-3-0.2-8d	91.52	125.86	2.19	42.66	钢筋拉断	38	PVARGs-3-0.3-6d	90.47	126.89	2.21	45.47	钢筋拉断
10	PPRGS-3-0.3-4d	91.56	117.53	2.08	18.73	钢筋拔出	39	PVARGs-3-0.3-8d	90.89	126.95	2.23	44.53	钢筋拉断
11	PPRGS-3-0.3-6d	90.58	125.94	2.26	46.38	钢筋拉断	40	PVARGs-6-0.1-4d	90.75	108.50	2.08	11.78	钢筋拔出
12	PPRGS-3-0.3-8d	90.56	124.91	2.25	38.34	钢筋拉断	41	PVARGs-6-0.1-6d	90.75	127.53	2.22	44.34	钢筋拉断
13	PPRGS-6-0.1-4d	90.23	109.95	2.08	13.15	钢筋拔出	42	PVARGs-6-0.1-8d	90.62	127.41	2.27	45.29	钢筋拉断
14	PPRGS-6-0.1-6d	90.55	123.08	2.17	40.58	钢筋拉断	43	PVARGs-6-0.2-4d	90.78	114.78	2.09	16.13	钢筋拔出
15	PPRGS-6-0.1-8d	90.67	125.18	2.19	45.32	钢筋拉断	44	PVARGs-6-0.2-6d	90.75	127.27	2.15	36.46	钢筋拉断
16	PPRGS-6-0.2-4d	89.98	114.85	2.02	18.71	钢筋拔出	45	PVARGs-6-0.2-8d	90.46	125.10	2.17	37.52	钢筋拉断
17	PPRGS-6-0.2-6d	90.45	124.75	2.16	35.37	钢筋拉断	46	PVARGs-6-0.3-4d	90.62	120.38	2.10	28.15	钢筋拔出
18	PPRGS-6-0.2-8d	90.48	125.65	2.22	37.49	钢筋拉断	47	PVARGs-6-0.3-6d	90.53	124.83	2.21	42.79	钢筋拉断
19	PPRGS-6-0.3-4d	90.47	118.31	2.07	23.66	钢筋拔出	48	PVARGs-6-0.3-8d	90.63	124.81	2.26	41.20	钢筋拉断
20	PPRGS-6-0.3-6d	90.66	123.62	2.26	45.34	钢筋拉断	49	PVARGs-9-0.1-4d	90.86	111.35	2.07	12.14	钢筋拔出
21	PPRGS-6-0.3-8d	92.01	123.35	2.21	43.75	钢筋拉断	50	PVARGs-9-0.1-6d	90.12	123.55	2.16	38.69	钢筋拉断
22	PPRGS-9-0.1-4d	90.63	113.05	2.03	15.63	钢筋拔出	51	PVARGs-9-0.1-8d	90.16	124.16	2.25	40.55	钢筋拉断
23	PPRGS-9-0.1-6d	90.69	124.35	2.28	45.39	钢筋拉断	52	PVARGs-9-0.2-4d	90.58	117.67	2.04	19.34	钢筋拔出
24	PPRGS-9-0.1-8d	90.47	125.84	2.16	42.64	钢筋拉断	53	PVARGs-9-0.2-6d	92.30	124.83	2.19	39.38	钢筋拉断
25	PPRGS-9-0.2-4d	90.78	116.46	2.04	25.03	钢筋拔出	54	PVARGs-9-0.2-8d	91.99	125.04	2.20	39.67	钢筋拉断
26	PPRGS-9-0.2-6d	90.79	127.41	2.31	48.16	钢筋拉断	55	PVARGs-9-0.3-4d	91.80	121.88	2.08	29.23	钢筋拔出
27	PPRGS-9-0.2-8d	90.68	126.65	2.26	37.32	钢筋拉断	56	PVARGs-9-0.3-6d	90.16	123.06	2.25	42.65	钢筋拉断
28	PPRGS-9-0.3-4d	90.52	122.98	2.11	39.31	钢筋拔出	57	PVARGs-9-0.3-8d	90.27	127.13	2.21	40.60	钢筋拉断
29	PPRGS-9-0.3-6d	91.46	124.11	2.16	43.26	钢筋拉断							

注: $P_y$  为屈服荷载, $P_u$  为极限荷载, $\delta_y$  为屈服点对应位移, $\delta_u$  为极限点对应位移,其中,屈服点和极限点为荷载-位移曲线的弹性直线段结束点和峰值点。表中试件编号 GS 指不掺纤维灌浆料套筒,PPRGS 和 PVARGs 分别代表 PP 纤维增强灌浆料套筒和 PVA 纤维增强灌浆料套筒,其后数值分别代表纤维长度、纤维体积掺量及钢筋锚固长度。

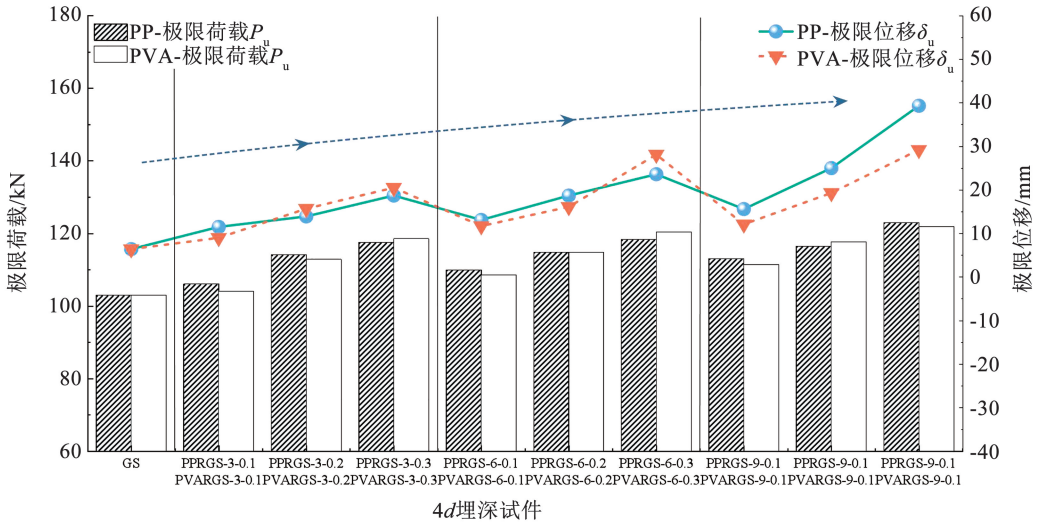


图 13 4d 灌浆套筒试件试验结果

Fig. 13 Test results of 4d grouting sleeve specimens

除了试件的承载力,延性对灌浆套筒而言也是一项重要的性能指标<sup>[38]</sup>,延性越好的构件,破坏时耗散的能量越大,抗震性能越好。灌浆套筒试件的延性主要体现在试件极限位移上,试件极限位移越大,说明其延性越好。各试件极限位移如表 5 所示,对于 4d 埋深的试件,其极限位移随着纤维掺量及长度的上升而显著提高。该结果表明,在试件发生钢筋拔出破坏时,由于纤维在钢筋与灌浆料之间滑移界面上展现出显著的拉结效应,其掺入有效改善试件的延性性能。6d 和 8d 埋深的试件均发生钢筋拉断破坏,试件主要变形和破坏集中于钢筋,灌浆料承受的破坏程度较轻,限制了纤维的拉结作用,因此,纤维增强灌浆料对试件延性的提升效果不明显。

3.3 纤维灌浆料压缩韧性对套筒极限承载力的影响

试验结果表明,纤维掺入对灌浆料抗压强度的提升不太显著甚至呈现出下降的趋势,而纤维增强灌浆料套筒极限承载力因纤维掺入有较大提升,特别是钢筋拔出破坏试件,因此,仅用纤维灌浆料的抗压强度难以准确预测灌浆套筒承载力。根据表 4 灌浆料的压缩韧性及表 5 中灌浆套筒极限承载力与极限位移,特别是试件发生钢筋拔出破坏时,随着纤维增强灌浆料压缩韧性的增加,试件极限承载力及极

限位移也随之增加。为了合理描述纤维增强灌浆料强度、纤维增强灌浆料压缩韧性与套筒承载力以及极限位移的关系,对其进行了相关性分析。相关性系数<sup>[39]</sup>计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中:r 为相关性系数,x 为对应套筒内纤维增强灌浆料强度或压缩韧性指数, $\bar{x}$ 为纤维增强灌浆料强度或压缩韧性指数的平均值,y 为套筒极限承载力或套筒极限位移, $\bar{y}$ 为套筒极限承载力或套筒极限位移的平均值。纤维增强灌浆料强度和压缩韧性指数与套筒承载力和套筒极限位移的相关性系数如表 6 及图 14 所示。选用式(1)~(3)中压缩韧性指数分别统计其与套筒承载力和极限位移的相关性,3 个压缩韧性指数与试件极限承载力和极限位移的相关性系数均表现出相同规律。无论是抗压强度还是压缩韧性,与套筒承载力和极限位移的相关性在 4d 钢筋埋深条件下尤为显著。在 6d 与 8d 钢筋埋深条件下,灌浆料的抗压强度及压缩韧性与套筒拉伸性能之间表现出较弱的相关性。这主要是因为大部分 6d、8d 埋深的试件发生钢筋拉断破坏,受纤维的影响不明显。

表 6 相关性系数

Tab. 6 Correlation coefficient

参数	直径	CS		CT					
		PP	PVA	PP			PVA		
				T <sub>i1</sub>	T <sub>i2</sub>	T <sub>i3</sub>	T <sub>i1</sub>	T <sub>i2</sub>	T <sub>i3</sub>
P <sub>u</sub>	4d	-0.874	-0.752	0.861	0.894	0.927	0.816	0.812	0.915
	6d	0.142	0.112	-0.261	-0.225	-0.094	-0.297	-0.221	-0.281
	8d	0.217	-0.312	-0.147	-0.396	-0.172	0.176	0.172	0.238
δ <sub>u</sub>	4d	-0.875	-0.694	0.933	0.957	0.987	0.834	0.829	0.886
	6d	-0.187	0.306	-0.038	0.045	0.020	-0.339	-0.284	-0.219
	8d	0.377	0.466	-0.351	-0.395	-0.542	-0.602	-0.588	-0.503

注:4d、6d、8d 为钢筋埋置深度,1.0~>0.8 为极强相关,0.8~>0.6 为强相关,0.6~>0.4 为一般相关,0.4~>0.2 为弱相关,0.2~0 为极弱相关,CS (compressive strength) 为抗压强度,CT (compressive toughness) 为压缩韧性。

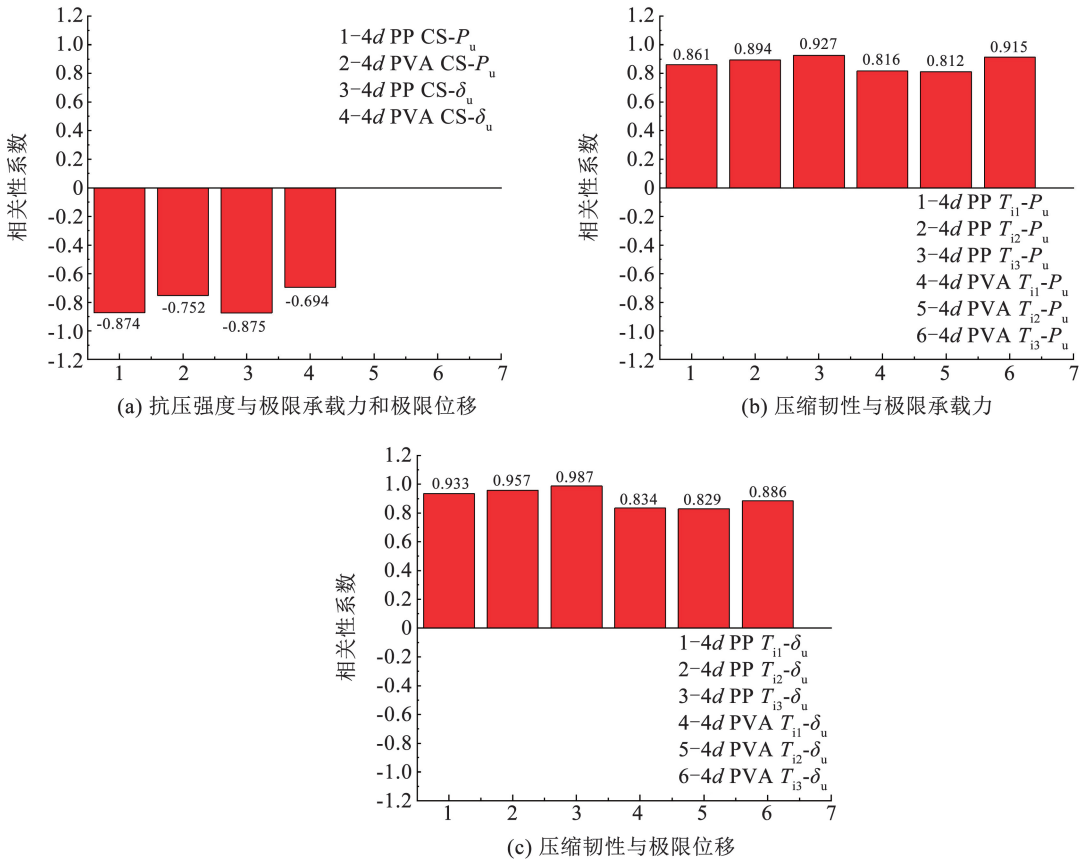


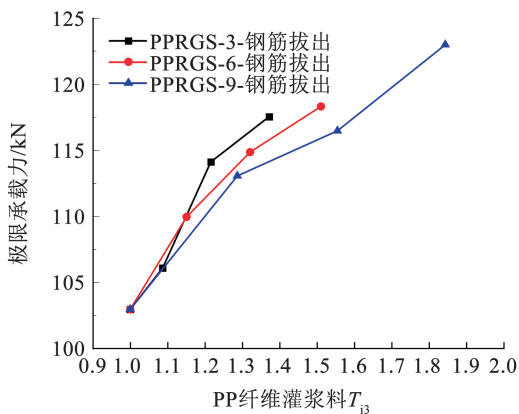
图 14 相关性系数

Fig. 14 Correlation coefficient

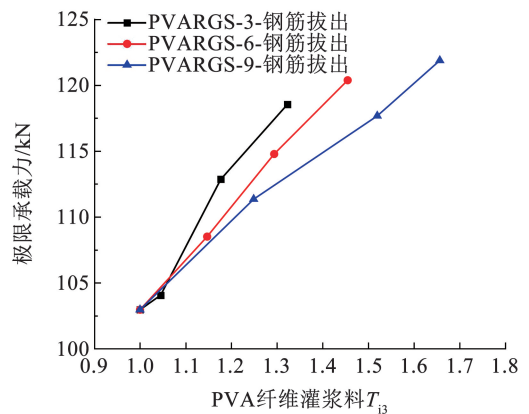
选取 PP 和 PVA 纤维增强灌浆料压缩韧性指数  $T_{i3}$  与 4d 埋深试件承载力及极限位移进行进一步分析,如图 15 所示。随着纤维增强灌浆料压缩韧性的提高,4d 埋深试件的承载力以及极限位移都显著提高。此外,相较于长纤维试件,短纤维对半灌浆套筒的承载力和极限位移提升更为显著,这一现象主要归因于短纤维掺入对灌浆料流动度影响较小,进而缓解了因内部缺陷导致灌浆套筒承载力及极限位移的降低。对于 6d,8d 埋深的试件,因主要发生钢筋拉断破坏,其承载力与极限位移主要与钢筋性能有关,受灌浆料影响不明显。

的抗压强度与套筒极限承载力和极限位移之间表现出显著的负相关性,见表 6,相反,纤维增强灌浆料的压缩韧性则表现出正相关关系。相较于未掺有纤维的灌浆料,掺有纤维的灌浆料尽管其自身强度较低,但在灌浆料与钢筋发生黏结破坏的界面区域,由于纤维的桥接作用可以延缓灌浆料微裂缝的生成和扩展<sup>[40]</sup>,从而提高了与钢筋的黏结力,进而提高了套筒的承载力。此外,纤维的加入极大地改善了灌浆料的韧性,继而提升了套筒的延性。因此,相较于仅采用灌浆料抗压强度预测套筒极限承载力,增加灌浆料压缩韧性指标有助于更准确预测套筒极限承载力。

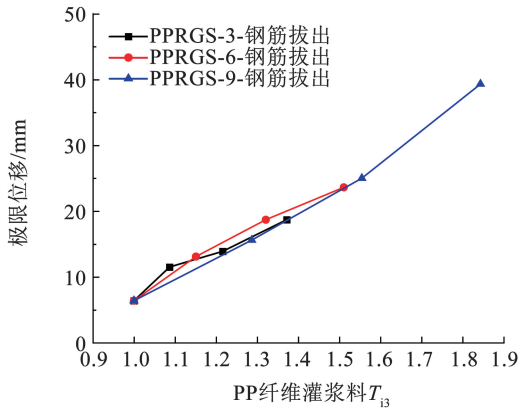
在套筒发生钢筋拔出破坏时,纤维增强灌浆料



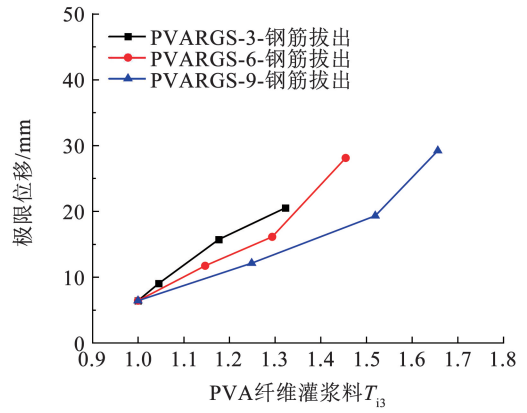
(a) PP纤维灌浆料套筒极限承载力



(b) PVA纤维灌浆料套筒极限承载力



(c) PP纤维灌浆料套筒极限位移



(d) PVA纤维灌浆料套筒极限位移

图 15 灌浆料压缩韧性指数与试件极限承载力及极限位移的关系

Fig. 15 Relationship between compressive toughness index of grouting material and load-bearing capacity and displacement of specimens

## 4 纤维增强灌浆料套筒极限承载力预测

### 4.1 灌浆套筒极限承载力预测

诸多学者开展了灌浆套简单向拉伸试验并提出了灌浆套筒极限承载力计算公式<sup>[16-18,41-42]</sup>。Ahn等<sup>[16]</sup>考虑了钢筋直径、钢筋锚固深度、灌浆料抗压强度、径向约束力等因素对灌浆套筒连接承载力的影响,得到了广泛的应用,如式(5)所示:

$$\begin{cases} P_u = \tau \pi dl \\ \tau = (1.49 + 0.45\sqrt{f_n})\sqrt{f_c} \\ f_n = 56 - 5.7(l/d) - 0.15f_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_u$ 为灌浆套筒极限承载力, $\tau$ 为钢筋与灌浆料之间的黏结强度, $f_n$ 为套筒对灌浆料的径向约束力, $f_c$ 为灌浆料的抗压强度, $l$ 为钢筋的锚固深度, $d$ 为

钢筋直径。Kim等<sup>[18]</sup>进一步考虑了钢筋屈服强度、套筒内径、套筒壁厚和套筒端部内径等变量,并根据试验结果修正了式(5),提出了灌浆套筒极限承载力计算公式:

$$\begin{cases} P_u = \tau \pi dl \\ \tau = (1.49 + 0.45\sqrt{f_y})\sqrt{f_c} \\ f_n = 170 \frac{t}{d_i} - 14 \frac{d_c}{d} - 2.2 \frac{l}{d} - 0.05f_c + \\ \quad 0.023f_y - 0.45d + 35 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f_y$ 为钢筋屈服强度; $d_i$ 、 $t$ 、 $d_c$ 分别代表套筒内径、套筒壁厚和套筒端部内径。 $6d$ 和 $8d$ 埋深试件主要发生钢筋拉断破坏,承载力主要取决于钢筋极限抗拉强度,此处仅使用上述两种计算公式对埋置深度为 $4d$ 仅发生钢筋拔出破坏试件计算其承载力,结果如表7所示。

表 7 基于 Ahn 和 Kim 计算公式的灌浆套筒承载力预测值

Tab. 7 Predicted values of load-bearing capacity of grouting sleeves based on Ahn and Kim's formula

试件编号	破坏模式	$P_u$ 试验值/kN	Ahn 等 <sup>[16]</sup>		Kim 等 <sup>[18]</sup>	
			$P_u$ 预测值/kN	误差/%	$P_u$ 预测值/kN	误差/%
GS-0-4d	钢筋拔出	102.95	110.15	6.54	115.22	10.65
GS-PP3-0.1-4d	钢筋拔出	106.09	110.30	3.81	115.46	8.11
GS-PP3-0.2-4d	钢筋拔出	114.11	108.50	-5.17	112.48	-1.45
GS-PP3-0.3-4d	钢筋拔出	117.53	108.11	-8.71	111.86	-5.06
GS-PP6-0.1-4d	钢筋拔出	109.95	109.75	-0.18	114.53	4.00
GS-PP6-0.2-4d	钢筋拔出	114.85	109.54	-4.84	114.18	-0.58
GS-PP6-0.3-4d	钢筋拔出	118.31	106.43	-11.16	109.30	-8.24
GS-PP9-0.1-4d	钢筋拔出	113.05	107.41	-5.25	110.78	-2.05
GS-PP9-0.2-4d	钢筋拔出	116.46	106.89	-8.95	109.99	-5.88
GS-PP9-0.3-4d	钢筋拔出	122.98	105.02	-17.11	107.24	-14.67
GS-PVA3-0.1-4d	钢筋拔出	104.05	110.18	5.57	115.26	9.73
GS-PVA3-0.2-4d	钢筋拔出	112.86	109.21	-3.34	113.64	0.68
GS-PVA3-0.3-4d	钢筋拔出	118.54	107.98	-9.78	111.66	-6.16
GS-PVA6-0.1-4d	钢筋拔出	108.50	107.41	-1.02	110.78	2.06
GS-PVA6-0.2-4d	钢筋拔出	114.78	107.78	-6.50	111.35	-3.08
GS-PVA6-0.3-4d	钢筋拔出	120.38	106.57	-12.96	109.51	-9.92
GS-PVA9-0.1-4d	钢筋拔出	111.35	107.07	-4.00	110.25	-0.99
GS-PVA9-0.2-4d	钢筋拔出	117.67	105.99	-11.02	108.66	-8.29
GS-PVA9-0.3-4d	钢筋拔出	121.88	105.21	-15.85	107.52	-13.36

Ahn 等的计算公式预测的套筒极限承载力与试验值相比绝对误差平均值为 7.46%，最大误差为 17.11%；而 Kim 等的计算公式所得结果与试验值之间的绝对误差平均值为 6.05%，最大误差为 14.67%。误差统计结果表明，Kim 等提出的计算公式可更准确地预测套筒极限承载力。

#### 4.2 考虑压缩韧性的灌浆套筒极限承载力预测公式

如表 7 所示，尽管 Kim 等提出的计算公式可较准确预测纤维增强灌浆料套筒的极限承载力，但随着纤维长度及掺量的增加，纤维增强灌浆料抗压强度随之降低，利用该计算公式预测灌浆套筒的承载力也逐渐降低。而表 5 中的试验结果表明，随着纤维长度及掺量的增加，灌浆套筒极限承载力呈现上升的趋势，这与 Kim 计算公式预测值趋势不符，因此，仅考虑灌浆料抗压强度预测纤维增强灌浆料套筒极限承载力并不全面。3.3 节纤维增强灌浆料的抗压强度和压缩韧性与套筒极限承载力之间的相关性分析结果表明，随着纤维长度及掺量的增加，灌浆料抗压强度与套筒承载力表现为负相关，而 Kim 等提出的计算公式中，灌浆料抗压强度始终与套筒承载力表现为正相关的规律。为更合理描述纤维对灌浆套筒承载力的影响，基于 Kim 计算公式，引入灌浆料压缩韧性指数这一参数，提出综合考虑灌浆料强度及韧性的纤维增强套筒承载力预测公式。因 3.3 节中 3 种压缩韧性指数与灌浆套筒极限承载力之间的相关性系数表现出相同规律，选取压缩韧性系数  $T_{13}$  作为引入参数基于 Kim 计算公式修正套筒

极限承载力计算公式。当  $P_u$  大于钢筋的极限承载力  $F_b$  时，取  $P_u$  为  $F_b$ ，纤维增强灌浆料套筒极限承载力的预测公式如下：

$$P_u = \tau \pi d l \quad (7)$$

$$\tau = (a + b \sqrt{f_n}) \sqrt{f_c} T_{13}^c \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_u = (a + b \sqrt{f_n}) \sqrt{f_c} T_{13}^{0.22} \pi d l, P_u < F_b \\ P_u = F_b, P_u \geq F_b \end{cases} \quad (9)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$  为无量纲参数，由试验数据拟合得到； $T_{13}$  为灌浆料压缩韧性指数； $P_u$  为灌浆套筒极限承载力； $f_n$  为套筒对灌浆料的径向约束力，由式(6)计算得到； $f_c$  为灌浆料的抗压强度； $l$  为钢筋的锚固深度； $d$  为钢筋直径。根据本文试验数据拟合得到 3 个参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 1.66、0.50、0.22，其拟合精度  $R^2 = 0.99$ ，则式(9)可进一步表示为

$$\begin{cases} P_u = (1.66 + 0.5\sqrt{f_n}) \sqrt{f_c} T_{13}^{0.22} \pi d l, P_u < F_b \\ P_u = F_b, P_u \geq F_b \end{cases} \quad (10)$$

灌浆套筒极限承载力的试验值、Kim 公式预测值与引入灌浆料压缩韧性指数的预测值见表 8。因 6d 和 8d 埋深试件承载力预测值均为钢筋的极限承载力，表 8 中仅展示 4d 埋深发生钢筋拔出破坏试件的极限承载力。此外，Kim 公式和式(10)的预测值与试验值的对比见图 16。表 8 与图 16 的结果表明，引入灌浆料压缩韧性指数后预测值的绝对误差平均值从 6.05% 降到 1.47%，且可更准确地预测纤维长度较长或掺量较大试件的极限承载力。

表 8 灌浆套筒承载力试验值与预测值

Tab. 8 Experimental and predicted load-bearing values of grouting sleeves

试件编号	$P_u$ 试验值/kN	Kim 公式		式(10)预测值	
		$P_u$ 预测值/kN	误差/%	$P_u$ 预测值/kN	误差/%
GS-0.4d	102.95	115.22	10.65	104.39	1.40
GS-PP3-0.1.4d	106.09	115.46	8.11	108.78	2.53
GS-PP3-0.2.4d	114.11	112.48	-1.45	112.32	-1.57
GS-PP3-0.3.4d	117.53	111.86	-5.06	117.83	0.26
GS-PP6-0.1.4d	109.95	114.53	4.00	110.51	0.51
GS-PP6-0.2.4d	114.85	114.18	-0.58	117.89	2.65
GS-PP6-0.3.4d	118.31	109.30	-8.24	118.62	0.26
GS-PP9-0.1.4d	113.05	110.78	-2.05	112.76	-0.26
GS-PP9-0.2.4d	116.46	109.99	-5.88	121.08	3.97
GS-PP9-0.3.4d	122.98	107.24	-14.67	123.24	0.21
GS-PVA3-0.1.4d	104.05	115.26	9.73	105.55	1.44
GS-PVA3-0.2.4d	112.86	113.64	0.68	110.93	-1.71
GS-PVA3-0.3.4d	118.54	111.66	-6.16	115.47	-2.59
GS-PVA6-0.1.4d	108.50	110.78	2.06	106.29	-2.04
GS-PVA6-0.2.4d	114.78	111.35	-3.08	113.12	-1.45
GS-PVA6-0.3.4d	120.38	109.51	-9.92	116.93	-2.86
GS-PVA9-0.1.4d	111.35	110.25	-0.99	110.34	-0.91
GS-PVA9-0.2.4d	117.67	108.66	-8.29	118.45	0.66
GS-PVA9-0.3.4d	121.88	107.52	-13.36	120.70	-0.97

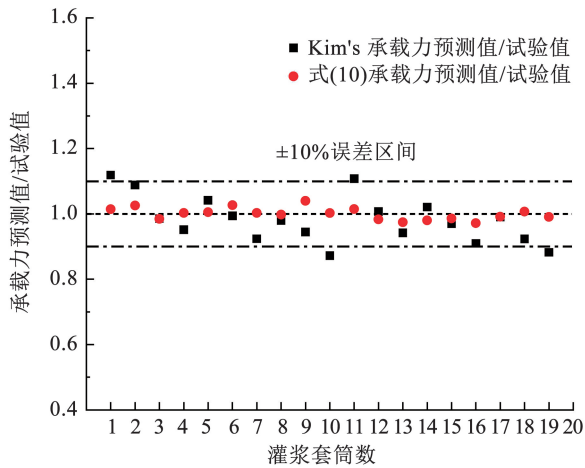


图 16 灌浆套筒承载力预测值与试验值比较

Fig. 16 Comparison between predicted and experimental load-bearing values of grouting sleeves

## 5 结 论

1) PP 及 PVA 纤维的掺入会降低灌浆料的流动度, 掺量过高时会导致灌浆料流动度低于国家标准。纤维长度越大, 流动度下降越大。纤维的掺入会导致抗压强度略有降低, 但可显著提高灌浆料的延性。纤维掺入对灌浆料抗折强度的影响不大。

2) 4d 埋深的试件主要呈现钢筋拔出破坏, 6d 及 8d 埋深试件发生钢筋拉断破坏。在发生钢筋拔出破坏试件中, 随着纤维掺量和长度的增加, 纤维的桥接作用可以减少灌浆料微裂缝的生成和扩展, 从而增强灌浆料与钢筋之间的黏结性能, 最终提升套筒的承载力。纤维增强灌浆料的抗压强度与套筒极限承载力和极限位移之间存在显著的负相关性, 相反, 纤维增强灌浆料的压缩韧性则体现出正相关关系。

3) Ahn 和 Kim 的灌浆套筒极限承载力计算公式预测值均与抗压强度呈正相关, 而试验中灌浆套筒极限承载力与抗压强度呈负相关。为更合理描述纤维对灌浆套筒承载力的影响, 基于 Kim 计算公式, 引入灌浆料压缩韧性指数这一参数, 提出综合考虑灌浆料强度及韧性的纤维增强灌浆料套筒承载力预测公式。相比 Ahn 和 Kim 的灌浆套筒极限承载力计算公式, 使用压缩韧性指数改进的计算公式在预测纤维增强灌浆料套筒极限承载力时更为准确合理。

## 参 考 文 献

[1] 马福金. 新型灌浆套筒钢筋搭接连接性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020  
MA Fujin. Experimental research on new grouting sleeve overlap-joint of sleeve bar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgd.2020.000469

[2] LIN Feng, WU Xiaobao. Effect of sleeve length on deformation properties of grouted splices[J]. Građevinar, 2017, 69(7): 537.

DOI: 10.14256/JCE.1553.2016

[3] 王磊. 半灌浆套筒连接力学性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018  
WANG Lei. Experimental study on mechanical properties of semi-grouting sleeve connection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018

[4] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.001

[5] 汪秀石, 杨智良, 吴照学. 装配式结构用高强套筒灌浆料性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015, 42(2): 65  
WANG Xiushi, YANG Zhiliang, WU Zhaoxue. Experimental research on performance of high-strength cementitious grouting for prefabricated concrete structure[J]. China Concrete and Cement Products, 2015, 42(2): 65. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2015.02.017

[6] KHAYAT K H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials; an overview[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(2/3): 171. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)80006-1

[7] ŞAHMARAN M, ÖZKAN N, KESKIN S B, et al. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(7): 930. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.007

[8] SHANNAG M J. High-performance cementitious grouts for structural repair[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(5): 803. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.007

[9] LIU Yunlin, WANG Yanshuai, FANG Guohao, et al. A preliminary study on capsule-based self-healing grouting materials for grouted splice sleeve connection[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 418. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.088

[10] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: a review[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6: 135. DOI: 10.1007/s40069-012-0018-8

[11] 张晓平, 孙长征, 赵同峰, 等. 石膏和聚丙烯纤维对超早强灌浆料性能影响研究[J]. 施工技术, 2014, 43: 16  
ZHANG Xiaoping, SUN Changzheng, ZHAO Tongfeng, et al. Study on the effect of gypsum and polypropylene fiber on the performance of super early strength grouting material[J]. Construction Technology, 2014, 43: 16. DOI: 10.7672/sjgs2014050016

[12] 冯虎, 陈风波, 李经业. 聚丙烯纤维灌浆材料的技术与应用分析[J]. 山东交通科技, 2014(3): 33  
FENG Hu, CHEN Fengbo, LI Jingye. Technology and application analysis of grouting material admixed with polypropylene fiber[J]. Shandong Science and Technology of Transportation, 2014(3): 33

[13] 王刚, 裴向军, 杨珂. 碳纤维增强型灌浆材料实验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24: 109  
WANG Gang, PEI Xiangjun, YANG Ke. An experimental study on carbon fiber reinforced grouting material[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013, 24: 109

[14] 朱清华, 郝敏, 郝志强, 等. 聚乙烯醇纤维增强水泥套筒灌浆料的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45: 26  
ZHU Qinghua, HAO Min, HAO Zhiqiang, et al. Research on performance of the PVA fiber reinforced cement couple sleeve grout[J]. New Building Materials, 2018, 45: 26

[15] ZHANG Pu, YU Jixing, PANG Yuyang, et al. Experimental study on the mechanical properties of grouted sleeve joint with the fiber-reinforced grouting material[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41: 102691. DOI: 10.1016/j.job.2021.102691

[16] AHN B I, KIM H K, PARK B M. Confining effect of mortar grouted splice sleeve on reinforcing bar[J]. Journal of the Korea

- Concrete Institute, 2003, 15(1): 102. DOI: 10.4334/JKCI.2003.15.1.102
- [17] HAYASHI Y, SHIMIZU R, NAKATSUKA T. Bond stress-slip characteristic of reinforcing bar in grout-filled coupling steel sleeve [J]. Japan Concrete Institute, 1993, 15(2): 256
- [18] KIM H K. Bond strength of mortar-filled steel pipe splices reflecting confining effect [J]. Journal of Asian Architecture Building Engineering, 2012, 11(1): 125. DOI: 10.3130/jaabe.11.125
- [19] LI V C, LEUNG C K Y. Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 992(11): 2246
- [20] LI Liang, ZHENG Xiyao, WU Jun, et al. Comparative study on the dynamic tensile properties of polypropylene and polyethylene fiber reinforced engineered cementitious composites under low to high strain rates [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108221. DOI: 10.1016/j.job.2023.108221
- [21] 北京榆构有限公司. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T 408—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
- [22] 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ 355—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
- [23] 中冶建筑研究总院有限公司. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
- [24] 中国建筑材料科学研究总院有限公司. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- [25] 陈萌, 赵伦, 李攀杰, 等. 聚丙烯纤维灌浆料及其钢筋套筒连接受拉性能试验研究 [J]. 复合材料学报, 2022, 39: 685  
CHEN Meng, ZHAO Lun, LI Panjie, et al. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber grouting material and its rebar sleeve connection [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39: 685. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210517.002
- [26] XU Yangchen, XING Guohua, ZHAO Jiahua, et al. The effect of polypropylene fiber with different length and dosage on the performance of alkali-activated slag mortar [J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124978. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124978
- [27] ABDULRAHMAN P I, BZENI D K. Bond strength evaluation of polymer modified cement mortar incorporated with polypropylene fibers [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01387. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01387
- [28] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4
- [29] WU Jianying, LI Jie, FARIA R. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(3/4): 583. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.05.038
- [30] LIN Jiaxiang, SONG Ying, XIE Zhihong, et al. Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101097. DOI: 10.1016/j.job.2019.101097
- [31] YANG Yuanyi, ZHOU Qi, LI Xingkui, et al. Uniaxial compression mechanical property and fracture behavior of hybrid inorganic short mineral fibers reinforced cement-based material [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103338. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103338
- [32] 哈尔滨建筑工程学院. 钢纤维混凝土试验方法: CECS13: 89 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1989
- [33] EAHAA B, BHAB A, IMHAA B, et al. An experimental study of compressive toughness of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced concrete [J]. Structure, 2022, 37: 379. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.025
- [34] ZHOU Jiajia, PAN J, LEUNG C K Y, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1): 15. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001034
- [35] 陈建伟, 王占文, 鞠士龙, 等. 半灌浆套筒钢筋偏心连接受拉性能试验研究与数值模拟 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41: 160  
CHEN Jianwei, WANG Zhanwen, JU Shilong, et al. Experimental study and numerical simulation on tensile behavior of eccentric rebar connection for half-grouted sleeve splice [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41: 160. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.S2.0019
- [36] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.045
- [37] 魏嘉奇, 李明越, 姜洪斌. 钢筋螺旋肋灌浆套筒连接性能试验分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(1): 110  
WEI Jiaqi, LI Mingyue, JIANG Hongbin. Reinforcing steel spiral rib grouting sleeve connection performance test [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(1): 110. DOI: 10.11918/202402022
- [38] 高向玲, 李梓桑. 灌浆套筒连接中高强钢筋锚固长度研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47: 60  
GAO Xiangling, LI Zishen. Study on embedded length of high-strength reinforcement in splice sleeve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47: 60. DOI: 10.13245/j.hust.190812
- [39] 余琼, 孙佳秋, 袁炜航. 带肋钢筋与套筒约束灌浆料黏结性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50: 98  
YU Qiong, SUN Jiaqiu, YUAN Weihang. Experimental study on bond behavior between ribbed steel bars and sleeve constrained grouting material [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50: 98. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201711108
- [40] 余琼, 白汶鑫, 唐子鸣, 等. 套筒灌浆搭接及对接接头高应力反复拉压试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56: 151  
YU Qiong, BAI Wenxin, TANG Zimin, et al. Mechanical test of grouted sleeve lapping connector and butt connector under high stress repeated tension-compression loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56: 151. DOI: 10.11918/202308027
- [41] 谢明文. 关于协方差、相关系数与相关性的关系 [J]. 数理统计与管理, 2004(3): 33  
XIE Mingwen. The relation of covariance, correlation coefficient and correlation [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2004(3): 33. DOI: 10.13860/j.cnki.sltj.2004.03.008
- [42] 王凯, 张义顺, 王信刚. 低掺量 S-P 混杂纤维增强增韧的作用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1209  
WANG Kai, ZHANG Yishun, WANG Xingang. Effect of smaller volume S-P hybrid fibers on mechanical properties of high performance concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(10): 1209
- [43] YUAN Huang, ZHENG Gengzhu, NAITO C J, et al. Tensile behavior of half grouted sleeve connections: experimental study and analytical modeling [J]. Construction Building Materials, 2017, 152: 96. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.154
- [44] ZHANG Zhangrong, JIANG Shaofei, CAI Wanxia, et al. Effects of grout compactness on the tensile behavior of grouted splice sleeve connectors [J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4595. DOI: 10.3390/app12094595