

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1003

外加剂复掺对超高强风电灌浆料性能的影响

程 干^{1,2}, 祝 磊^{1,2}, 王 维³, 石军兵¹, 胡玉龙^{1,2}, 马刘付^{1,2}

(1. 合肥大学 城市建设与交通学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥大学 城市轨道交通安全与应急管理安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 西伟德宝业快可美建筑材料(合肥)有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 通过复掺减水剂、消泡剂、膨胀剂和早强剂制备了抗压强度超过 135 MPa 的超高强风电灌浆料, 系统研究了上述外加剂对灌浆料各性能的影响规律。结果显示, 经对各外加剂掺量的合理调整, 可以实现灌浆料流动度、强度及膨胀率的精准调控。适量掺加减水剂能提升灌浆料的流动性能和后期强度, 复掺消泡剂会在优化材料强度的同时影响其流动性能, 复掺膨胀剂可改善材料的早期收缩性能, 但可能影响其后期强度; 复掺早强剂可显著提高材料的早期和后期强度, 但会降低其流动度。当减水剂掺量为 0.6%、消泡剂掺量为 0.3%、膨胀剂掺量为 0.03%、早强剂掺量为 0.8% 时, 制备的灌浆料综合性能最优, 其初始流动度为 312.5 mm, 28 d 的抗压强度为 138.75 MPa, 3 h 的膨胀率为 0.107%, 24 h 与 3 h 时的膨胀值之差为 0.042%。

关键词: 水泥基灌浆料; 流动度; 抗压强度; 竖向膨胀率; 外加剂

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)01-0016-08

引文格式: 程 干, 祝 磊, 王 维, 等. 外加剂复掺对超高强风电灌浆料性能的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(1): 16-23.

Influence of Admixture Compounding on the Performance of Ultra-High Strength Wind Turbine Grouting Material

CHENG Gan^{1,2}, ZHU Lei^{1,2}, WANG Wei³, SHI Junbing¹, HU Yulong^{1,2}, MA Liufu^{1,2}

(1. School of Urban Construction and Transportation, Hefei University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Provincial Key Laboratory for Urban Rail Transit Safety and Emergency Management, Hefei University, Hefei 230601, China; 3. Sievert Baoye Quick-mix Building Materials (Hefei) Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: An ultra-high-strength grouting material, designed for wind turbine foundations with a compressive strength exceeding 135 MPa, has been developed by mixing a polycarboxylate superplasticizer, defoamer, plastic expansive agent, and composite early strength agent. A systematic investigation has been made of the influence of these admixtures on the various properties of grouting materials. Results show that proper adjustment of admixture dosages enables a precise control of the flowability, strength, and expansion rate of the grouting material. Moderate addition of water reducing agents helps to improve the flowability and later strength of grouting materials. The addition of defoamers helps to optimize the material strength while affecting its flowability. Expansion agents help to improve the early shrinkage performance of materials with a potential influence on their later strength. Early strength agents help to significantly improve the early and later strength of materials while reducing their flowability. The comprehensive performance of the prepared grouting material is optimized when the dosage of water reducer is 0.6%, defoamer 0.3%, expansion agent 0.03%, and early strength agent 0.8%, with an initial fluidity of 312.5 mm, a 28 d compressive strength of 138.75 MPa, a 3 h expansion rate of 0.107%, and a 24 h-3 h expansion difference of 0.042%.

Keywords: cementitious grouting material; fluidity; compressive strength; vertical expansion rate; admixture

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目 (2008085ME168)

作者简介: 程 干, 男, 合肥大学硕士生, 主要研究方向为高性能水泥基复合材料, E-mail: chenggan0713@163.com

通信作者: 祝 磊, 男, 合肥大学教授, 博士, 主要研究方向为高性能水泥基复合材料, E-mail: 1123931041@qq.com

0 引言

为建设环境友好型经济,我国正大力发展清洁的可再生能源,其中风力发电备受推崇。随着超大功率风电机组的快速发展,作为关键连接材料的灌浆料在超大功率风机基础与其下部桩基的连接中扮演着至关重要的角色。目前,工程上对风电灌浆料的技术要求普遍较高,需具备高流动度(初始流动度不低于290 mm,30 min流动度不低于260 mm)、超高强度(通常超过100 MPa,具体根据风电机组功率确定)及微膨胀特性(3 h竖向膨胀率不高于0.1%,24 h与3 h竖向膨胀率之差不得高于0.02%)。根据风电机组的功率不同(2 MW~10 MW),参照《风电基础用灌浆材料》T/CECS 10379—2024标准,将风电灌浆料的等级分为A100~A160共7个等级,例如2~4 MW的风机通常需使用A100~A120等级风电灌浆料,其对应的28 d抗压强度为100~120 MPa。这一强度要求主要基于风电设备基础需承受设备质量及运行动态载荷的考虑,强度不足可能导致基础沉降、开裂或破损,进而影响风电设备的整体稳定性和安全性^[1]。以A130级风电灌浆料为例,其抗压强度要求1 d超过45 MPa,3 d超过80 MPa,28 d超过130 MPa。然而现有研究表明,多数灌浆料存在抗压强度低(28 d抗压强度小于130 MPa)、易收缩等问题,难以满足超大功率风电机组对工程力学性能与工作性能的需求^[2~4]。

采取低水胶比、合理添加矿物掺合料与外加剂等措施,可有效提升水泥基灌浆料的力学性能与工作性能^[5]。当水胶比为0.07~0.25时,降低水泥基灌浆料的水胶比可提高其抗压强度,但过低的水胶比(小于0.22)也会导致灌浆料的流动度降低、易收缩等问题^[6]。适量掺入粉煤灰可增强灌浆料的流动性,但粉煤灰的掺入也可能导致灌浆料早期强度下降^[7]。此外,现有研究表明,制备灌浆料时,合理使用化学外加剂可以提升其综合性能。其中,聚羧酸减水剂(polycarboxylate superplasticizer, PCE)的掺入,可有效解决由低水胶比引起的流动度下降问题;消泡剂(defoamer, DE)的掺入,可降低浆体液相表面能和气泡液膜黏度,减少浆体内部存在的有害气泡;膨胀剂的掺入,可实现灌浆料塑性阶段的微膨胀;早强剂的掺入则有助于加速材料的水解和硬化过程,弥补大流动度灌浆料早期强度的不足^[8~10]。由于需要兼顾流动度和强度等因素,在制备超高强风电灌浆料时需多种外加剂复合使用,然而,和单一外加剂相比,目前关于多种外加剂复掺对超高强灌浆料性能的影响研究尚不充分。

本文拟系统研究复掺PCE、DE、塑性膨胀

剂(plastic expansion agent, PEA)和复合早强剂(composite early strength agent, CEA)对超高强风电灌浆料强度、流动度和竖向膨胀率的影响,以期为进一步提升超高强风电灌浆料的综合性能提供理论参考依据。

1 试验原材料及方法

1.1 试验原材料

本研究所用的原材料如下:水泥,P·Ⅱ·52.5级硅酸盐水泥(portland cement, PC),安徽怀宁海螺水泥有限公司生产;硅灰(silica fume, SF),SF90级(二氧化硅质量分数为94%~95%),上海天恺建材科技有限公司生产;矿粉(slag powder, SA),S105级,巩义市龙泽净水材料有限公司生产;粉煤灰(fly ash, FA),I级(5 μm方孔筛余量为16%),汇丰新材料有限公司生产;石英砂(quartz sand, QS),4.75 mm以下连续级配,凤阳县英武石英砂有限公司生产;PCE,西卡-540P,西卡有限公司生产;粉末DE,P803,德国明凌化工集团生产;PEA,SK-201,南京斯泰宝贸易有限公司生产;CEA,Beform,电化创新商贸有限公司生产。

1.2 试验方案

本研究首先探讨单掺PCE对灌浆料性能的影响规律,实验中设定水胶比为0.196;在确定减水剂最佳掺量后,进一步研究复掺其他外加剂对灌浆料性能的影响规律,减水剂最佳掺量试验配比见表1。

表1 灌浆料的基础配合比

Table 1 Basic mixing ratio of the grouting material

Sample No.	w(PC)/%	w(SF)/%	w(SA)/%	w(FA)/%	m(QS)/kg	w(PCE)/%
JC-1	80	10	5	5	1	0.5
JC-2	80	10	5	5	1	0.6
JC-3	80	10	5	5	1	0.7
JC-4	80	10	5	5	1	0.8

1.3 试验方法

本研究遵循国家及行业的相关标准,对灌浆料的流动性、抗折强度、抗压强度及竖向膨胀率进行精确试验测定。其中,灌浆料截锥流动度试验依据《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》(TB/T 3192—2008)执行;竖向膨胀率试验遵循《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2013)的相关规定;抗压强度试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行;抗折强度试验遵循《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)的相关规定进行。

2 试验结果与分析

2.1 PCE 掺量对灌浆料性能的影响

试验所得 PCE 掺量对灌浆料抗压强度、抗折强度、流动度及膨胀率的影响结果, 见图 1~4。

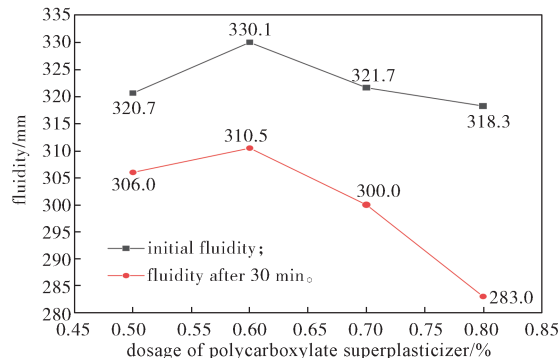


图 1 PCE 掺量对灌浆料流动度的影响曲线

Fig. 1 Influence curves of PCE dosage on the fluidity of grouting materials

由图 1 可知, 在 4 种不同 PCE 掺量下, 灌浆料初始流动度及 30 min 流动度均大于标准值 290 mm 和 260 mm, 符合 GB/T 50448—2015 中对 III 类灌浆料的相应规定。结果显示, 随着 PCE 掺量的增加, 灌浆料的流动度呈现先增强后减弱的变化趋势, 表明适量使用 PCE 能有效提升灌浆料的流动性能, 而过量使用则会产生不利影响。灌浆料的流动度随减水剂用量的增加而逐渐提高, 其原因在于减水剂的加入释放了絮凝结构中的自由水, 减少了颗粒间的摩擦力, 从而增强了浆体的流动性能^[11]。而当 PCE 的掺量继续增加时, 灌浆料的流动度开始下降或保持不变, 这可能是因为当 PCE 用量达 0.6% 时, 胶凝材料所需减水剂已达饱和状态, 过多的减水剂活性分子无法有效地与胶凝材料颗粒进行吸附反应, 导致灌浆料的流动度不再提升或保持稳定^[12]。此外, 从测试结果可看出, 在 PCE 掺量为 0.6% 的条件下, 灌浆料的初始流动度及 30 min 流动度保留值均达到其峰值 330.1 mm 和 310.5 mm, 显示出最佳的流动性能。

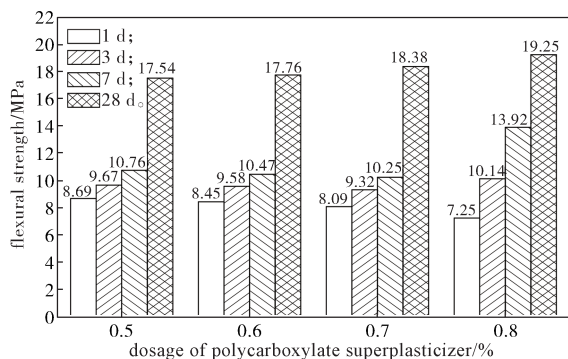


图 2 PCE 掺量对灌浆料抗折强度的影响结果

Fig. 2 Influence of PCE dosage on the flexural strength of grouting materials

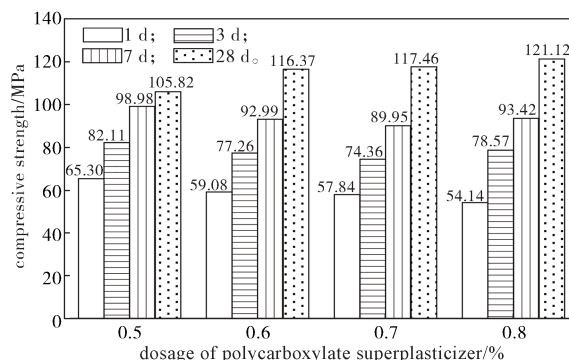


图 3 PCE 掺量对灌浆料抗压强度的影响结果

Fig. 3 Influence of PCE dosage on the compressive strength of grouting materials

由图 2 和图 3 可知, 随着 PCE 掺量的增加, 灌浆料的 1 d 抗压强度与抗折强度均逐渐降低。这一现象可能归因于减水剂分子在水泥颗粒表面的吸附作用, 该作用阻碍了水泥的水化反应, 进而影响了早期胶凝材料的水化进程, 导致了材料早期强度的降低^[13]。3 d 与 7 d 的抗压强度与抗折强度均先降低后升高, 而 28 d 的抗压强度与抗折强度则呈现出逐渐升高的变化趋势。这可能是因为 PCE 促进了胶凝材料颗粒的分散, 使得它们能更充分地与水接触, 从而提高了其水化程度, 而水化产物的增多使得结构更加紧密, 进而增强了材料中后期的强度^[14]。试验中发现, 当 PCE 掺量为 0.6% 时, 灌浆料的 28 d 抗压强度相较于 0.5% 掺量时的对应值显著提升, 但进一步增加掺量后, 其增强效应逐渐减弱。此外, 测试结果表明, 在 PCE 掺量为 0.8% 时, 灌浆料的 28 d 抗压强度与抗折强度均达到峰值, 分别为 121.12 MPa 和 19.25 MPa。

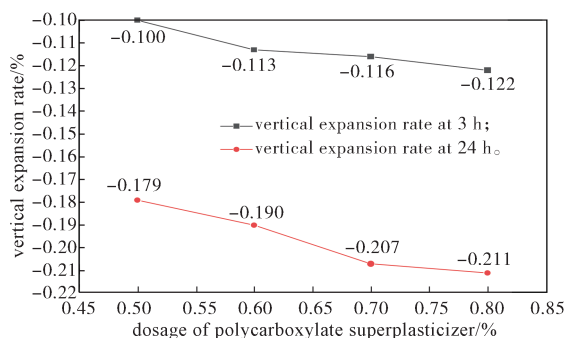


图 4 PCE 掺量对灌浆料竖向膨胀率的影响曲线

Fig. 4 Influence of PCE dosage on the vertical expansion rate of grouting materials

由图 4 可知, 随着 PCE 掺量增加, 灌浆料的 3 h 与 24 h 竖向膨胀率均呈下降趋势, 这可能是由于减水剂的加入会导致灌浆料的流动性增强, 浆体的黏度降低, 进而使得浆体内部部分气体逸出, 从而导致灌浆料的竖向膨胀率持续降低^[15]。在掺量为 0.6% 时, 灌浆料的 3 h 竖向膨胀率的数值为 -0.113%, 24 h 与

3 h 的竖向膨胀率之差为 0.087%, 整体表现为收缩现象。综合上述试验结果, 本文后续试验将 0.6% 确定为 PCE 的最佳掺量。

2.2 DE 掺量对灌浆料性能的影响

基于上一节所确定的最佳减水剂掺量, 本节进一步探讨 PCE 和 DE 复掺对灌浆料性能的影响。试验用 DE 的配合比如表 2 所示。

表 2 DE 试验的配合比

Table 2 Mixing ratio of DE tests

Sample No.	w(PC)/%	w(SF)/%	w(SA)/%	w(FA)/%	m(QS)/kg	w(PCE)/%	w(DE)/%
XPJ-1	80	10	5	5	1	0.6	0.2
XPJ-2	80	10	5	5	1	0.6	0.3
XPJ-3	80	10	5	5	1	0.6	0.4
XPJ-4	80	10	5	5	1	0.6	0.5

图 5~8 为试验所得 DE 掺量对灌浆料流动度、抗折强度、抗压强度及竖向膨胀率的影响结果。

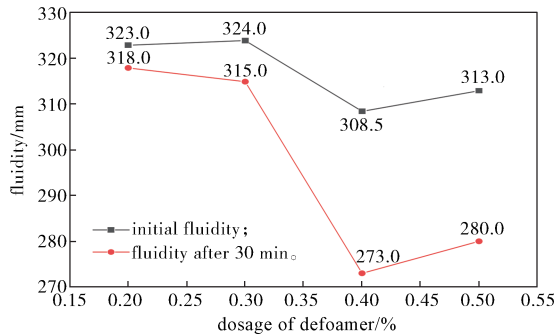


图 5 DE 掺量对灌浆料流动度的影响曲线

Fig. 5 Influence of DE dosage on the fluidity of grouting materials

由图 5 可知, 当 DE 掺量为 0.3% 时, 灌浆料的初始流动度达最高值, 为 324.0 mm; 当 DE 掺量为 0.2% 时, 灌浆料的 30 min 流动度达极值, 为 318.0 mm。值得注意的是, 与 JC-2 组别相比, 灌浆料的整体流动度有所下降。这一现象可能是由于 DE 在去除浆体中有害气泡的同时, 也削弱了起润滑效应的泡沫, 进而提升了浆体黏度, 导致其流动性能降低^[16]。

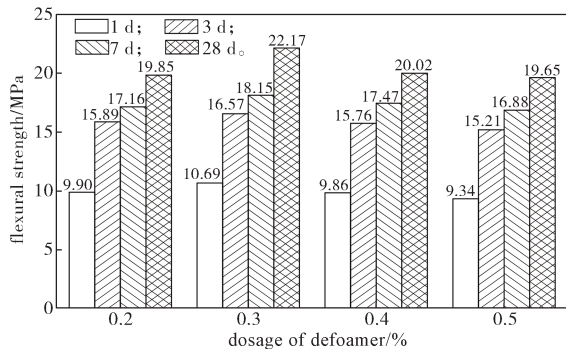


图 6 DE 掺量对灌浆料抗折强度的影响结果

Fig. 6 Influence of DE dosage on the flexural strength of grouting materials

由图 6 可知, 随着 DE 掺量的增加, 灌浆料的 1, 3, 7, 28 d 抗折强度均呈现先上升后下降的规律性变化。在 DE 掺量为 0.3% 的条件下, 灌浆料的抗折强度达到峰值, 其 1, 3, 7, 28 d 抗折强度分别为 10.69, 16.57, 18.15, 22.17 MPa。与单掺减水剂相比, 减水剂与 DE 复掺使得灌浆料的 1, 3, 7, 28 d 抗折强度分别提升了 26.5%, 73.0%, 73.4%, 24.8%, 表明 DE 的适量添加能有效提升灌浆料在各龄期的抗折性能。

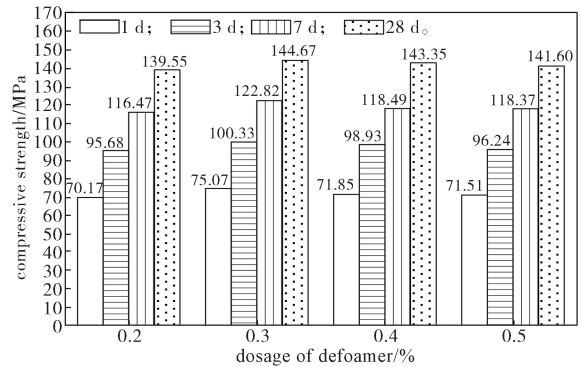


图 7 DE 掺量对灌浆料抗压强度的影响结果

Fig. 7 Influence of DE dosage on the compressive strength of grouting materials

由图 7 可知, 随着 DE 掺量增加, 灌浆料抗压强度整体呈现出先上升后下降的变化趋势。当 DE 掺量为 0.3% 时, 灌浆料抗压强度最高, 其 1, 3, 7, 28 d 抗压强度分别为 75.07, 100.33, 122.82, 144.67 MPa。相比于单掺减水剂, 复掺 0.3% 的 DE 可使灌浆料 1, 3, 7, 28 d 抗压强度分别提升 27.1%, 29.9%, 32.1%, 24.3%。其强度提升的原因在于, DE 的加入能有效排除有害气泡, 减少孔洞形成, 进而增强灌浆料整体结构的致密性^[17]。

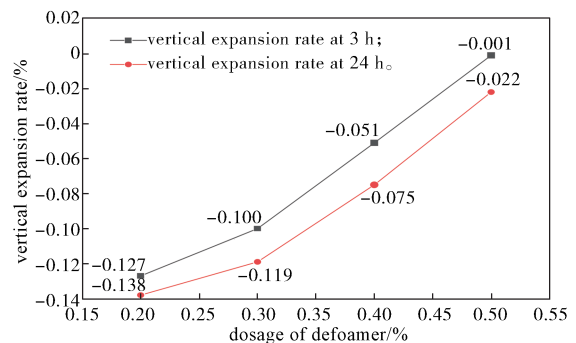


图 8 DE 掺量对灌浆料竖向膨胀率的影响曲线

Fig. 8 Influence curves of DE dosage on the vertical expansion rate of grouting materials

根据图 8 所示数据, 可以观察到, 随着 DE 掺量增加, 灌浆料在 3 h 与 24 h 的竖向膨胀率呈现出逐步上升的趋势。当 DE 掺量为 0.5% 时, 灌浆料的 3 h 与 24 h 竖向膨胀率达最高值, 分别为 -0.001% 和 -0.022%, 整体上仍表现为收缩现象。通过分析减水剂与 DE 复掺对灌浆料性能的影响规律, 本文后续

试验将 0.3% 确定为 DE 的最佳掺量。

2.3 PEA 掺量对灌浆料性能的影响

在 DE 剂最佳掺量的基础上, 本节深入探究了 PCE、DE 与 PEA 复合添加对灌浆料性能的影响, 实验所采用的灌浆料配合比详见表 3。

表 3 PEA 试验配合比

Table 3 Mixing ratio of PEA tests

Sample No.	w(PC)/%	w(SF)/%	w(SA)/%	w(FA)/%
PZJ-1	80	10	5	5
PZJ-2	80	10	5	5
PZJ-3	80	10	5	5
PZJ-4	80	10	5	5

Sample No.	m(QS)/kg	w(PCE)/%	w(DE)/%	w(PEA)/%
PZJ-1	1	0.6	0.3	0.01
PZJ-2	1	0.6	0.3	0.02
PZJ-3	1	0.6	0.3	0.03
PZJ-4	1	0.6	0.3	0.04

PEA 掺量对灌浆料强度、流动度及竖向膨胀率的影响, 分别如图 9~12 所示。

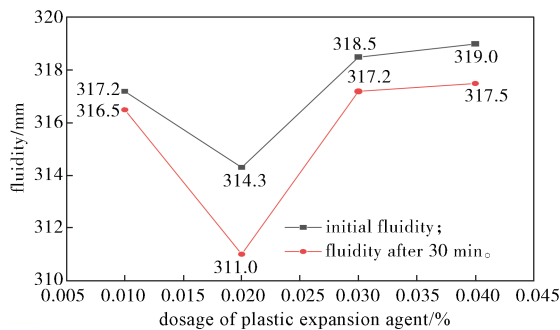


图 9 膨胀剂掺量对灌浆料流动度的影响曲线

Fig.9 Influence curves of PEA dosage on the fluidity of grouting materials

由图 9 可知, 随着膨胀剂掺量增加, 灌浆料初始流动度与 30 min 流动度的变化趋势均呈先下降后上升的变化规律。与 XPJ-2 相比, 引入膨胀剂后, 灌浆料的初始流动度与 30 min 流动度保留值之间的差值减小, 出现这一现象的主要原因在于膨胀剂能够持续产生微小气泡, 这些气泡在灌浆料中起到了滚珠作用, 从而有效提升了 30 min 流动度保留值^[18]。

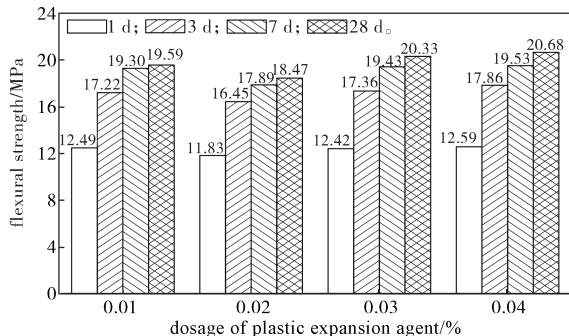


图 10 膨胀剂掺量对灌浆料抗折强度的影响结果

Fig. 10 Influence of PEA dosage on the flexural strength of grouting materials

由图 10 可知, 随着膨胀剂掺入比例的提升, 灌浆料的抗折强度整体展现出一种先下降后上升的变化态势。另一方面, 与 XPJ-2 相比, 膨胀剂的加入使得灌浆料的早期抗折强度有所增加。

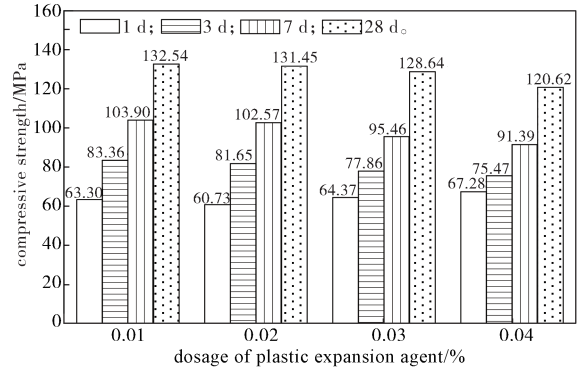


图 11 膨胀剂掺量对灌浆料抗压强度的影响结果

Fig. 11 Influence of PEA dosage on the compressive strength of grouting materials

由图 11 可知, 随着膨胀剂掺量增加, 灌浆料 1 d 抗压强度呈先降低后增加的变化趋势, 3, 7, 28 d 的抗压强度则表现出持续降低的变化趋势。当膨胀剂掺量达 0.04% 时, 灌浆料的抗压强度最低, 此时 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 91.39, 120.62 MPa。该现象可能是因膨胀剂在水化过程中会不断反应并释放氮气, 在灌浆料内部形成微小气孔, 这些气孔影响了灌浆料整体结构的致密性, 最终导致抗压强度显著降低^[19]。

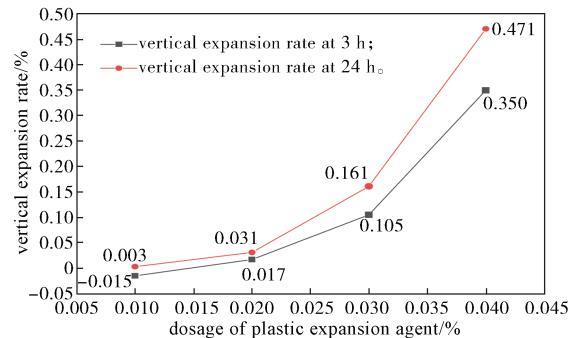


图 12 膨胀剂掺量对灌浆料竖向膨胀率的影响曲线

Fig.12 Influence curves of PEA dosage on the vertical expansion rate of grouting materials

由图 12 可知, 随着膨胀剂掺量增加, 灌浆料的 3 h 和 24 h 竖向膨胀率均呈逐渐升高的变化趋势, 这可归因于膨胀剂在水化进程中不断释放氮气的影响, 其掺入量越大, 释放气体越多^[20]。当膨胀剂掺量增至 0.03% 时, 灌浆料的竖向膨胀率获得显著改善, 其 3 h 竖向膨胀率为 0.105%、3 h 膨胀率与 24 h 膨胀率之差为 0.056%, 均能满足相关标准规定。通过分析减水剂、DE 和 PEA 复掺对灌浆料性能的影响规律, 本文后续试验将 0.03% 确定为 PEA 最佳掺量。

2.4 CEA 掺量对灌浆料性能的影响

明确 PEA 最佳掺量后, 接下来研究减水剂、DE、PEA 及 CEA 联合使用对灌浆料性能产生的具体影响, 实验所用配合比见表 4。

表 4 CEA 试验配合比

Table 4 Mixing ratio of CEA tests

Sample No.	w(PC)/%	w(SF)/%	w(SA)/%	w(FA)/%	m(QS)/kg
ZQJ-1	80	10	5	5	1
ZQJ-2	80	10	5	5	1
ZQJ-3	80	10	5	5	1
ZQJ-4	80	10	5	5	1

Sample No.	w(PCE)/%	w(DE)/%	w(PEA)/%	w(CEA)/%
ZQJ-1	0.6	0.3	0.03	0.6
ZQJ-2	0.6	0.3	0.03	0.8
ZQJ-3	0.6	0.3	0.03	1.0
ZQJ-4	0.6	0.3	0.03	1.2

试验所得 CEA 掺量对灌浆料抗压强度、抗折强度、流动度及竖向膨胀率的影响结果见图 13~16。

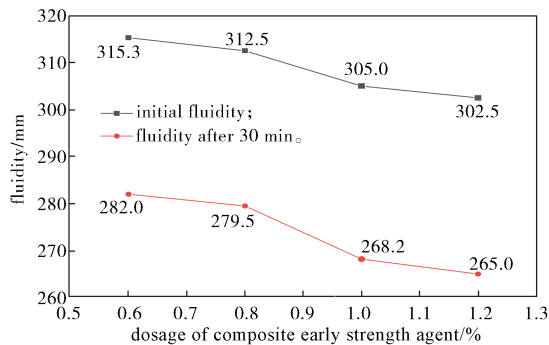


图 13 早强剂掺量对灌浆料流动度的影响曲线

Fig. 13 Influence of CEA dosage on the fluidity of grouting materials

由图 13 可知, 在不同早强剂掺量条件下, 灌浆料初始流动度均维持在 290 mm 以上, 30 min 后仍不低于 260 mm, 符合Ⅲ类灌浆料的技术标准。从变化趋势看, 随着早强剂掺量增加, 灌浆料的初始及 30 min 流动度均呈现逐渐下降的变化趋势。出现这一现象的原因可能是由于 CEA 中的无机钙盐成分能促进 C3S 的生成, 从而加速灌浆料凝结硬化, 最终导致灌浆料流动度显著降低^[21]。

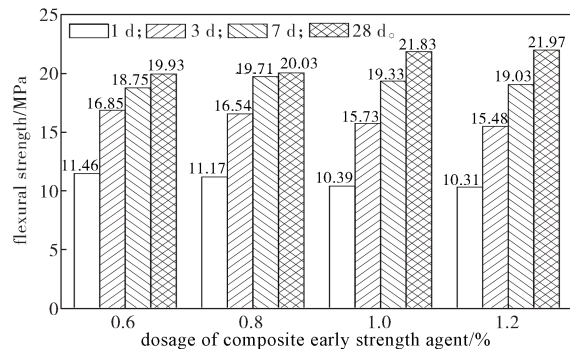


图 14 早强剂掺量对灌浆料抗折强度的影响结果

Fig. 14 Influence of CEA dosage on the flexural strength of grouting materials

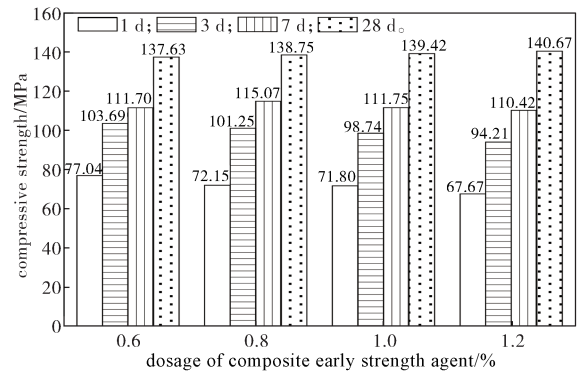


图 15 早强剂掺量对灌浆料抗压强度的影响结果

Fig. 15 Influence of CEA dosage on the compressive strength of grouting materials

由图 14 和 15 可知, 随着早强剂掺量增加, 灌浆料抗折强度及抗压强度表现出相同的变化趋势。具体而言, 其 1 d 与 3 d 抗折强度、抗压强度呈逐渐下降的变化趋势, 7 d 抗折强度、抗压强度呈现先上升后下降的变化趋势, 28 d 抗折强度、抗压强度则呈现出持续上升的变化趋势。综合来看, 相比于 PZJ-3, 早强剂的加入能显著提升灌浆料的抗压强度。出现这一现象的原因可能在于, 早强剂中的硫酸钙成分能够有效促进铝酸三钙 (C3A) 的快速水化, 生成水化硫铝酸钙晶体, 从而在初期阶段构建出稳定的骨架结构, 大幅提升灌浆料的早期强度^[22]。此外, 铝酸钙成分在高浓度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境下, 能够与硫酸钙进一步发生反应, 生成钙矾石 (AFt), 这一过程有效填充了骨架内部的空隙, 使得结构更加致密, 为后期材料强度的提升奠定了坚实的基础^[23]。

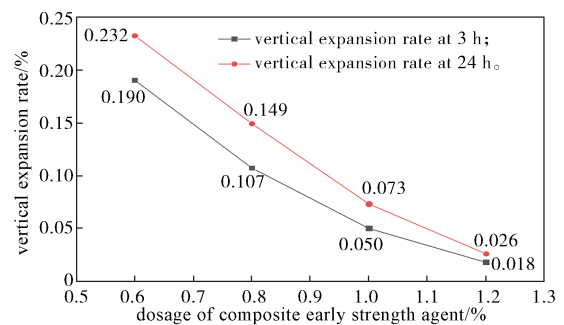


图 16 早强剂掺量对灌浆料竖向膨胀率的影响曲线

Fig. 16 Influence curves of CEA dosage on the vertical expansion rate of grouting materials

由图 16 可知, 随着早强剂掺量增加, 灌浆料的 3 h 和 24 h 竖向膨胀率呈现逐渐下降的趋势。具体来看, 当早强剂的掺量为 0.6% 时, 相较于 PZJ-3, 灌浆料的膨胀率仍然有所提高。这一现象的出现可能是由于早强剂的加入导致灌浆料内部迅速生成 AFt, 从而引发一定程度的体积膨胀, 进一步优化了灌浆料的微膨胀性能^[24]。当早强剂掺量进一步增加时, 灌

浆料凝结硬化加快导致膨胀剂的作用无法充分发挥,进而造成膨胀率下降。通过综合分析 CEA 对灌浆料各性能的影响规律,本文将 0.8% 确定为早强剂的最佳掺量,此时灌浆料的各项性能均可满足标准要求。

3 结 论

本文系统研究了 PCE、DE、PEA 和 CEA 复掺对超高强风电灌浆料强度、流动度和膨胀率的影响,得到如下结论:

1) 减水剂单掺可显著提升灌浆料流动性能,当其掺量为 0.6% 时,初始流动度达峰值 330.1 mm。随着减水剂掺量的增加,灌浆料早期强度受到不利影响,但其后期强度得到一定程度的提升。此外,在单掺减水剂的条件下,灌浆料整体表现出收缩特性。

2) PCE 和 DE 复掺可有效提升灌浆料的 7 d 和 28 d 抗压强度,但会对其流动度造成不利影响。同时,通过两者复掺还可使灌浆料的竖向膨胀率得到一定程度的改善。在复掺减水剂和 DE 的基础上加入膨胀剂,可以使灌浆料从收缩变成微膨胀,但会导致其强度下降 11.1% 左右。

3) 在复掺减水剂、DE 和膨胀剂的基础上加入早强剂,可有效弥补膨胀剂对灌浆料强度造成的不利影响。当上述 4 种外加剂的掺量分别为 0.6%、0.3%、0.03%、0.8% 时,超高强风电灌浆料的综合性能最优,此时灌浆料的 28 d 抗压强度为 138.75 MPa,流动度为 312.5 mm,膨胀率为 0.107%。

本文通过复掺减水剂、DE、膨胀剂与早强剂,成功研制出 28 d 抗压强度超过 135 MPa 的超高强风电灌浆料,为相应功率风电机组的安全稳定运行提供了保障。通过精细调控各外加剂的掺入比例,还实现了灌浆料强度、流动度及膨胀率的精确控制,为高性能灌浆材料的研发提供了有效的参考与借鉴。

参考文献:

- [1] 沙建芳,夏中升,刘建忠,等. 超高强水泥基灌浆材料疲劳性能研究综述[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11013-11026.
- [2] SHA Jianfang, XIA Zhongsheng, LIU Jianzhong, et al. A Review of the Research on the Fatigue Properties of Ultra-High Strength Cement-Based Grouting Materials[J]. Materials Reports, 2021, 35(11): 11013-11026.
- [3] 覃 森,沙吾列提·拜开依,汪 锋,等. 矿物掺合料复掺对套筒灌浆料性能的影响[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(1): 122-128.
- [4] QIN Sen, SHAWULIETI Baikaiyi, WANG Feng, et al. Effect of Mineral Admixture on Properties of Sleeve Grouting Material[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(1): 122-128.
- [5] 曾 伟. 装配式建筑用高性能套筒灌浆料研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016: 39-53.
- [6] ZENG Wei. Study on High Performance Sleeve Grouting Material for Prefabricated Buildings[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016: 39-53.
- [7] 雷 超. 加固用水泥基灌浆料性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 37-58.
- [8] LEI Chao. Study on Properties of Cement-Based Grouting Material for Reinforcement[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 37-58.
- [9] 逢鲁峰,孙立刚,常青山,等. 一种高性能风电机组基础灌浆料研制与性能研究[J]. 混凝土, 2023(3): 166-170.
- [10] PANG Lufeng, SUN Ligang, CHANG Qingshan, et al. Development and Performance Research of a High Performance Grouting Material for Wind Turbine Foundation[J]. Concrete, 2023(3): 166-170.
- [11] 罗晓峰,邢国徽,何余良. 高强套筒灌浆料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(5): 50-52, 100.
- [12] LUO Xiaofeng, XING Guohui, HE Yuliang. Study on the Preparation and Performance of High Strength Sleeve Grouting Material[J]. New Building Materials, 2020, 47(5): 50-52, 100.
- [13] 黄维蓉,郭桂香. 粉煤灰掺量对 C30 自密实混凝土的影响[J]. 混凝土, 2015(4): 119-122.
- [14] HUANG Weirong, GUO Guixiang. Dosage of Fly Ash on Properties of C30 Self-Compacting Concrete[J]. Concrete, 2015(4): 119-122.
- [15] 洪 斌. 装配式建筑用套筒灌浆料的制备及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 5-29.
- [16] HONG Bin. Study on Preparation and Application of Sleeve Grouting Material for Prefabricated Buildings[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 5-29.
- [17] 马正先,宋沛霖,杭鑫坤,等. 外加剂对负温套筒灌浆料性能的影响[J]. 混凝土, 2019(5): 142-146, 150.
- [18] MA Zhengxian, SONG Peilin, HANG Xinkun, et al. Properties Effect of Admixture on Negative Temperature Sleeve Grouting Material[J]. Concrete, 2019(5): 142-146, 150.
- [19] 蔡雪玲. 外加剂掺量对常温型套筒灌浆料性能的影响[J]. 建材技术与应用, 2023(5): 15-19.
- [20] CAI Xueling. Influence of Admixture Dosage on the Performance of Normal Temperature Type Cementitious Grout for Sleeve[J]. Research & Application of Building Materials, 2023(5): 15-19.
- [21] 朱 涛,马亚鹏,毛明杰,等. 减水剂对再生微粉-矿渣-水泥基砂浆流变性能的影响[J]. 中国粉体技术,

- 2024, 30(6): 50–61.
- ZHU Tao, MA Yapeng, MAO Mingjie, et al. Effect of Water Reducing Agent on Rheological Properties of Regenerated Micro-Powder-Slag-Cement-Based Mortar[J]. China Powder Science and Technology, 2024, 30(6): 50–61.
- [12] 黄 斌, 龚明子, 潘阿馨, 等. 减水剂与钢纤维对超高性能混凝土流变及力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3214–3223.
- HUANG Bin, GONG Mingzi, PAN Axin, et al. Influences of Water Reducing Agent and Steel Fiber on Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(9): 3214–3223.
- [13] 陈亚豪, 贺雄飞, 陆伟宁, 等. 超高性能混凝土性能试验研究进展综述[J]. 山西建筑, 2024, 50(8): 122–128.
- CHEN Yahao, HE Xiongfei, LU Weining, et al. Review of Progress in the Study of Ultra-High Performance Concrete Properties[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(8): 122–128.
- [14] 刘江峰, 张翔宇, 陈 亮, 等. 低 pH 值水泥基材料的性能及应用[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2992–3004.
- LIU Jiangfeng, ZHANG Xiangyu, CHEN Liang, et al. Properties and Applications of Low pH Value Cement-Based Material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(11): 2992–3004.
- [15] 宋小兵. 基于探地雷达检测原理的隧道二衬拱顶带模注浆材料配制技术研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(3): 37–39, 70.
- SONG Xiaobing. Research of Preparation of Grouting Material Based on Principle of the GPR Detection for Tunnel II Lining[J]. New Building Materials, 2020, 47(3): 37–39, 70.
- [16] 何 涛, 赵青林, 徐奇威, 等. 不同外加剂对水泥基灌浆材料流变性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(3): 728–733.
- HE Tao, ZHAO Qinglin, XU Qiwei, et al. Effect of Different Chemical Admixtures on Rheological Properties of Cement Based Grouting[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(3): 728–733.
- [17] 奉瑞萍. 装配式建筑钢筋连接用套筒灌浆料研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021: 52–64.
- FENG Ruiping. Study on Sleeve Grouting Material for Steel Bar Connection in Assembled Building[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021: 52–64.
- [18] 宋普涛, 王 晶, 冷发光, 等. 塑性膨胀剂对海上风电超高性能灌浆料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(5): 1608–1614.
- SONG Putao, WANG Jing, LENG Faguang, et al. Effect of Plastic Expansion Agent on Performance of Ultra High Performance Grouting Materials for Offshore Wind Power[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(5): 1608–1614.
- [19] 汪引引. 膨胀剂对水泥基灌浆料性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2022: 1–29.
- CHI Yinyin. Study on the Influence of Expansive Agent on the Properties of Cement-Based Grouting Material[D]. Xi'an: Changan University, 2022: 1–29.
- [20] 周 奎, 欧阳伟, 刘昕毅, 等. 塑性膨胀剂对半灌浆套筒连接破坏模式的影响[J]. 喀什大学学报, 2023, 44(3): 61–65.
- ZHOU Kui, OUYANG Wei, LIU Xinyi, et al. Effect of Plastic Expansion Agent on the Damage Mode of Semi-Grouted Sleeve Connections[J]. Journal of Kashi University, 2023, 44(3): 61–65.
- [21] 张 丰, 白 银, 蔡跃波, 等. 混凝土低温早强剂研究现状[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 106–113.
- ZHANG Feng, BAI Yin, CAI Yuebo, et al. Research Status of Low Temperature Early Strength Agents for Concrete[J]. Materials Review, 2017, 31(21): 106–113.
- [22] 姜梅芬, 吕宪俊. 混凝土早强剂的研究与应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2527–2533.
- JIANG Meifen, LÜ Xianjun. Research and Application Progresses of Concrete Early Strength Agent[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(10): 2527–2533.
- [23] 庞超明, 唐志远, 杨志远, 等. 水泥基材料中的早强剂及其作用机理综述[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 80–90.
- PANG Chaoming, TANG Zhiyuan, YANG Zhiyuan, et al. Early Strengthening Agent in Cementitious Composites and Its Function Mechanism: A Review[J]. Materials Reports, 2023, 37(9): 80–90.
- [24] 鲍俊伟. 复合早强剂与水泥粒径对低温混凝土早期强度影响研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021: 37–40.
- BAO Junwei. Study on the Influence of Composite Early Strength Agent and Cement Particle Size on the Early Strength of Low Temperature Concrete[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021: 37–40.

(责任编辑: 廖友媛)