

文章编号:1007-9629(2024)07-0611-09

组合膨胀剂对风电灌浆料早期膨胀性能的影响

韩宇栋^{1,*}, 谢月^{1,2}, 岳清瑞³, 杨峰⁴, 丁振跃⁵

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 北京纽维逊建筑工程技术有限公司, 北京 100088;
3. 北京科技大学 城镇化与城市安全研究院, 北京 100083; 4. 金风科技股份有限公司,
新疆 乌鲁木齐 830026; 5. 北京城建亚东混凝土公司, 北京 100101)

摘要: 基于改进的竖向膨胀率(ϵ_v)测试方法, 获得了高强风电灌浆料 0~24 h、1~7 d 的 ϵ_v 发展全曲线; 并研究了掺合料比例及组合膨胀剂比例对灌浆料 ϵ_v 、流动度、力学强度的影响. 结果表明: 灌浆料 0~24 h 竖向膨胀率曲线呈“四阶段”特征; 在 0%~20% 掺量范围内提高硅灰掺量, 灌浆料流动度下降, 0~24 h 内 ϵ_v 曲线峰值先增大后减小; 塑性膨胀剂 (PEA) 对 24 h 内 ϵ_v 发展起主导作用, 复掺氧化钙-硫铝酸钙双源膨胀剂 (HP-CSA) 后, ϵ_v 峰值减小, 24 h ϵ_v 下降, 3 h ϵ_v 增大, 有利于控制 24 h 与 3 h 的 ϵ_v 差值; 在 1~7 d 内, 0.03% 掺量的 PEA 即可促进 HP-CSA 膨胀效能的发挥, 6% 以上掺量的 HP-CSA 可较好补偿竖向自收缩变形而获得净膨胀灌浆料; PEA 与 HP-CSA 组合, 可发挥时间上接力、效果上协同的膨胀调控作用, 可分阶段、按需设计, 从而实现对灌浆料 7 d 内竖向膨胀率的精细调控; 随组合膨胀剂掺量增加, 灌浆料初始和 30 min 流动度无明显变化, 28 d 抗压强度先增大后减小; 在本文研究范围内, 0.06% PEA+6% HP-CSA 是最优掺量组合.

关键词: 高强风电灌浆料; 竖向膨胀率; 塑性膨胀剂; 氧化钙-硫铝酸钙双源膨胀剂; 组合与协同

中图分类号: TU528.55

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.006

Effect of Composite Expansive Agent on Early-Age Expansion Properties of Cementitious Grouting Material for Wind Power Project

HAN Yudong^{1,*}, XIE Yue^{1,2}, YUE Qingrui³, YANG Feng⁴, DING Zhenyue⁵

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;
2. Beijing New Vision Building Construction Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Research Institute of Urbanization and City Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Goldwind Sci & Tech Co., Ltd., Urumqi 830026, China; 5. Beijing Urban Construction Yadong Concrete Company, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on an improved vertical expansion rate (ϵ_v) testing method, the development of ϵ_v of high-strength cementitious grouting material for wind power project within 0–24 hours and 1–7 days was obtained. The effects of the proportions of mineral admixtures as well as expansive agents on ϵ_v , fluidity and mechanical strength of grouting material were experimentally investigated. Results show that a typical developing characteristic with “four stages” is observed in the curves of ϵ_v -time of grouting material during 0–24 hours. With the increase of silica fume percentage in the range of 0%–20%, the fluidity of grouting material decreases gradually, and the peak value of ϵ_v firstly increases and then decreases from casting to 24 hours. Plastic expansive agent (PEA) dominates the development

收稿日期: 2023-09-02; 修订日期: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52178263); 北京市科技新星计划项目 (Z201100006820024); 中冶集团“181 计划”重大研发项目 (CBN2022Kt01)

第一作者 (通讯作者): 韩宇栋 (1986—), 男, 安徽安庆人, 中冶建筑研究总院有限公司正高级工程师, 硕士生导师, 博士. E-mail: hanyudong@cribc.com

of ϵ_v within 24 hours. Furthermore, calcium sulphoaluminate-calcium oxide expansive agent (HP-CSA) is added, the peak value of ϵ_v decreases, the 24 h-value decreases, and the 3 h-value increases, which is beneficial to the control of the difference between the 24 h-value and 3 h-value. During the age of 1-7 days, the expansive efficiency of HP-CSA can well be promoted by PEA with addition of 0.03%. And the vertical autogenous shrinkage can generally be "compensated" by HP-CSA with the addition percentage not less than 6%, resulting in a grouting material with a net expansion during the period either 0-24 hours or 1-7 days. Relay effect in time and synergistic effect in outcome on expansion regulation for the grouting material are observed when PEA and HP-CSA composite are used, and if an appropriate dosage is found, a fine regulation on ϵ_v is well achieved in stages within 7 days. In addition, with the increase of the composite expansive agent, the initial and 30 mins values of fluidity of the grouting material shows little change, and the compressive strength at 28 days first increases and then decreases. Within the scope of this study, PEA at 0.06% and HP-CSA at 6% is comprehensively the optimal dosage composite.

Key words: high-strength cementitious grouting material for wind power project; vertical expansion rate; plastic expansive agent; calcium sulphoaluminate-calcium oxide expansive agent (HP-CSA); composite and synergistic effect

灌浆料的微膨胀性能往往会显著影响灌浆连接部位接触的饱满程度、共同工作效应、节点承载力和耐久性等,是风电灌浆料的核心性能之一^[1]。但通常高强风电灌浆料胶材用量大且水胶比低、自收缩率高^[2-3],其早期的塑性膨胀结束后,即进入持续的综合自收缩阶段^[4],会出现较大的收缩变形^[5]并容易引发裂缝。经与国内风电灌浆料几家重点生产厂家以及工程设计、施工单位走访调研,工程中风电灌浆料竖向膨胀率(ϵ_v)不达标、早期收缩开裂等问题频发。而直至目前,几乎没有相关研究重点关注此问题,因此急需厘清相关影响规律,并进行合理精细调控。

风电灌浆料的抗压强度一般设计为 80~130 MPa^[6-9],1 d 龄期抗压强度普遍可达到 50 MPa 以上^[10],一般采用掺加硅灰(SF)、微珠(FFA)和超细矿粉等高细度的高性能掺合料来实现其早期强度发展快且最终强度高,采用不同的掺合料组合,将影响其新拌浆体的流动性、黏稠度以及强度发展历程。传统的非高强灌浆料早期微膨胀主要由塑性膨胀剂(PEA)提供,目前以偶氮型 PEA 应用最为广泛^[6,11-13]。其在碱性条件下水化产生氮气为主的细小气泡来实现灌浆料的早期塑性膨胀^[13]。因此,若风电灌浆料流动度过大,将导致 PEA 反应产生的气体快速逸散而无法形成有效膨胀;若风电灌浆料终凝太早、早期强度发展过快、过高,则 PEA 产生气体塑性膨胀的过程就会受到显著的外部约束,也无法产生足够的塑性膨胀率。PEA 引发的竖向膨胀过程往往在 1 d 龄期内即停止,而此后直至 7 d 龄期风电灌浆料的自收缩仍在快速发展^[2,14]。当前,大多数研究仅关注 PEA 对灌

浆料 1 d 龄期内变形的影响^[6,8,10,15-16]。对于灌浆料 1 d 龄期后的收缩变形调控,仅有少数学者使用硬化膨胀剂(如氧化钙-硫铝酸钙双源膨胀剂(HP-CSA)和氧化镁膨胀剂)进行了初步探索^[17-19],但仍未对 PEA 和硬化膨胀剂之间的关系、相互影响机理进行深入研究。

基于以上分析,本研究首先对 GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》中 ϵ_v 测试方法进行了改进,使其可对风电灌浆料 7 d 内的 ϵ_v 进行分阶段精细测试,然后研究了掺合料组合(微珠+硅灰)与膨胀剂组合(PEA+HP-CSA)对风电灌浆料 0~24 h 及 1~7 d 两阶段内 ϵ_v 发展曲线的影响,并进行流动度、力学强度试验,以综合分析其作用机理。在满足初始流动度不小于 290 mm 的条件下,使其 28 d 抗压强度不小于 100 MPa,在此目标下实现对风电灌浆料早期膨胀性能的可设计调控。

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为江苏产 P·II 52.5 水泥;细骨料采用唐山产粒径 0.850~0.300 mm(20~50 目)和 0.300~0.212 mm(50~70 目)的石英砂,分别记作 S1 和 S2;硅灰 SF 和微珠 FFA 均为河北唐山某厂家生产;氧化钙-硫铝酸钙双源膨胀剂 HP-CSA 为天津某化学品公司生产,其矿物组成¹⁾如表 1 所示;塑性膨胀剂 PEA 为上海某新材料公司生产;聚羧酸减水剂(PS)减水率不小于 21%,pH 值 6.5~7.5,粉体,活性成分不小于 90%;消泡剂(DA)和可再分散乳胶粉(RPP)均为上海某化学品公司生产;水(W)为自来水。

1)文中涉及的组成、掺量等除特别说明外均为质量分数。

表1 HP-CSA的矿物组成
Table 1 Mineral composition (by mass) of HP-CSA

Unit: %				
CaO	Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ SO ₄	CaSO ₄	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
47	7	36	7	3

1.2 配合比设计

首先,为研究不同比例的掺合料组合对PEA 1 d内膨胀效能发挥的影响,先用20%微珠替代水泥,记为F20S0,再依次用5%、10%、15%、20%的硅灰替代微珠,分别记为F15S5、F10S10、F5S15、F0S20,共设计5个配合比,见表2。

表2 风电灌浆料的基础配合比
Table 2 Fundamental mix proportions of grouting material

Unit: kg/m ³											
Mix No.	C	FFA	SF	S1	S2	W	PEA	RPP	DA	PS	
F20S0	880	220	0	550	550	176	0.33	1.10	1.10	5.50	
F15S5	880	165	55	550	550	176	0.33	1.10	1.10	5.50	
F10S10	880	110	110	550	550	176	0.33	1.10	1.10	5.50	
F5S15	880	55	165	550	550	176	0.33	1.10	1.10	5.50	
F0S20	880	0	220	550	550	176	0.33	1.10	1.10	5.50	

然后,从试验结果中优选强度较高、流动度达标的基础配合比,进一步研究膨胀剂组合对风电灌浆

料7 d龄期内膨胀曲线的影响.其中PEA掺量 w_p (外掺,以胶凝材料总质量计)取0%、0.03%、0.06%,分别标记为P0、P3和P6;HP-CSA掺量 w_E (内掺,以胶凝材料总质量计)取0%、3%、6%、9%,分别标记为E0、E3、E6和E9.共12个配合比,分别记为P0E0~P0E9、P3E0~P3E9、P6E0~P6E9。

1.3 试验方法

1 d龄期内的竖向膨胀率 ϵ_v 根据GB/T 50448—2015附录A.0.6测试.在此基础上进行如图1所示的改进:0~24 h内,使用可自动采集数据的千分表,每30 min记录1次读数;到1 d龄期时,解除试件与模具的粘连,将试件包裹塑料薄膜后,立即重新置于模具中,安装复原但不完全紧固,确保上表面覆盖严密,将千分表置零,调整为每12 h采集1次数据.记录1~7 d内千分表读数,并采用国际中竖向膨胀率计算方法对测量结果进行计算,精确至0.001%.此种改进的合理性在于:按国标要求,水泥基灌浆材料(通常掺加PEA)1 d内的净膨胀率高于0.120%(大于其早期总收缩),由此可保证解除粘连后的灌浆材料试件可以实现竖向自由变形,并被测试仪器记录为竖向收缩或膨胀。

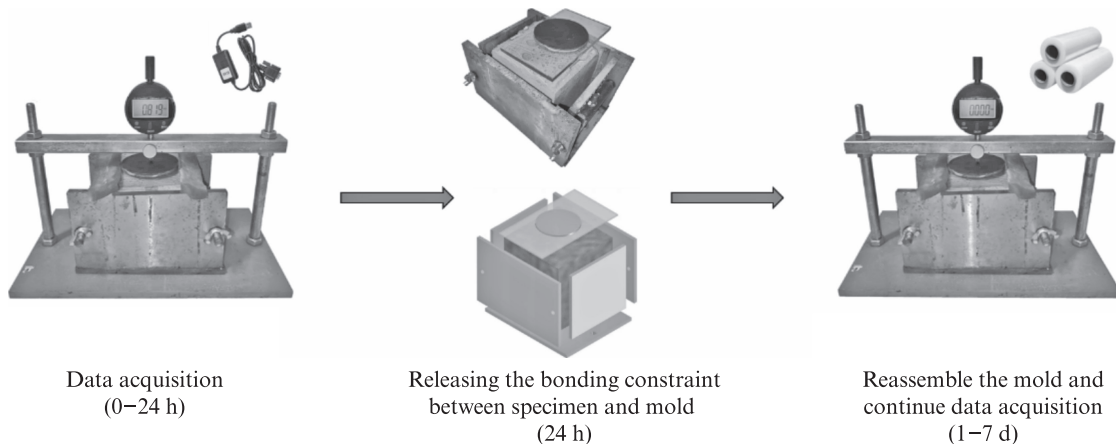


图1 竖向膨胀率测试流程
Fig. 1 Flow chart of ϵ_v test

风电灌浆料初始流动度、30 min流动度参照GB/T 50448—2015附录A.0.2测试.抗压强度、抗折强度参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》测试。

2 结果与讨论

2.1 竖向膨胀率试验可重复性分析

为保证风电灌浆料 ϵ_v 测试结果的可靠性,选取试件F15S5,对其0~24 h内 ϵ_v 进行了3次重复试验,结果见图2.由图2可见:试验结果的重复性较好,其

24 h竖向膨胀率 ϵ_{v-24} 分别为0.404%、0.381%、0.423%,与平均值的误差依次为0.33%、5.38%、5.05%,均在 $\pm 10.0\%$ 以内.为保证试验结果可靠且便于提高试验效率,本研究中每组进行2次 ϵ_v 试验,并取平均值作为测试结果。

2.2 不同掺合料组合对PEA效能发挥的影响

图3为不同掺合料组合下风电灌浆料1 d龄期内 ϵ_v 发展曲线.由图3可见,随硅灰掺量增大、微珠掺量减小,各组 ϵ_v 的发展仍具有统一的“四阶段”规律特征(见图2).第I阶段为潜伏期, ϵ_v 曲线在此阶段几乎不

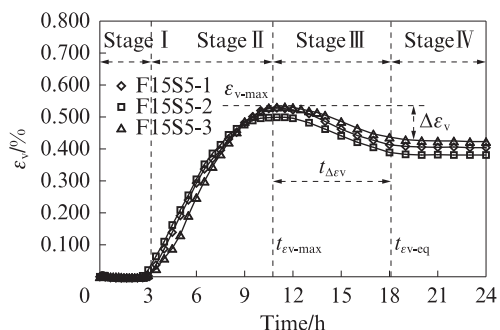


图2 试件F15S5在24 h内重复试验 ϵ_v 结果对比
Fig. 2 Comparison of repeated test results of ϵ_v of specimen F15S5 within 24 h

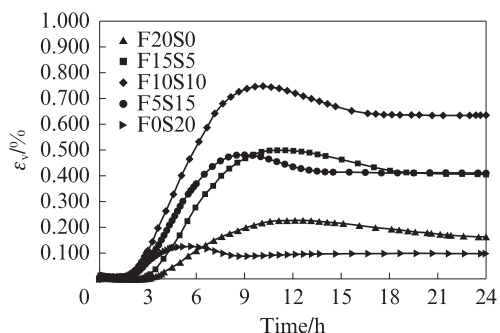


图3 不同掺合料组合下风电灌浆料24 h内 ϵ_v 发展曲线
Fig. 3 Development curve of ϵ_v of grouting material with different proportions of admixture within 24 h

明显发展,因掺合料配比不同,其结束时刻约为从加水搅拌时刻 t_0 后1~3 h不等.此阶段与普硅水泥水化

的潜伏期有关,还与PEA中呈酸性的反应抑制剂有关.第Ⅱ阶段为加速发展期,此阶段竖向膨胀率进入快速上升期,并逐渐到达峰值 ϵ_{v-max} ,此时刻记为 t_{ev-max} ,约为 t_0 后的5~11 h.此阶段竖向膨胀率首先快速发展,其原因为水泥水化进入加速期后生成大量 $Ca(OH)_2$,孔隙溶液碱度升高,激发PEA快速反应释放大量气体并成泡,导致浆体内存量气泡体积快速增大;而后竖向膨胀率逐渐达到峰值,这与发气成泡过程与存量气泡自然破裂过程趋于平衡有关.第Ⅲ阶段为短暂回落期,此阶段 ϵ_v 经短暂回落至某一稳定的平衡值,峰值回落结束时刻 t_{ev-eq} 约为 t_0 后的8~23 h,将由峰值到回落稳定所需时间记作 $t_{\Delta ev}$.此阶段竖向膨胀率回落,与存量气泡破裂速率大于PEA产泡速率相对应.第Ⅳ阶段为平稳期,此阶段竖向膨胀变形在24 h内趋于某一稳定的平衡值,将峰值与回落稳定后平衡值之差记作 $\Delta\epsilon_v$;此阶段PEA逐渐消耗完毕,浆体已充分硬化,存量气孔稳定不再破泡塌陷.

表3为不同矿物掺合料比例对风电灌浆料的流动性以及 ϵ_v 参数.由表3可知,随着硅灰掺量的提高,峰值时刻 t_{ev-max} 提前,峰值 ϵ_{v-max} 先增大后减小,在硅灰掺量10%时 ϵ_{v-max} 达到最大,峰值回落过程的时长 $t_{\Delta ev}$ 亦逐渐缩短,差值 $\Delta\epsilon_v$ 先增大后减小.由表3流动性数据可见,随硅灰掺量增加,其初始流动性与 t_{ev-max} 、 $t_{\Delta ev}$ 同步降低.

表3 不同矿物掺合料比例风电灌浆料流动性及 ϵ_v 参数

Table 3 Fluidity and parameters of ϵ_v of grouting material with different proportions of mineral admixtures

Mix No.	Initial fluidity/mm	$\epsilon_{v-max}/\%$	$\Delta\epsilon_v/\%$	t_{ev-max}/h	$t_{\Delta ev}/h$
F20S0	335	0.227	0.054	12.13	9.02
F15S5	310	0.499	0.086	11.03	8.02
F10S10	275	0.748	0.111	10.15	7.50
F5S15	178	0.481	0.066	9.00	5.00
F0S20	115	0.126	0.035	5.72	2.50

对以上结果,结合风电灌浆料流动性与塑性膨胀发展特征相关关系做如下基础分析.硅灰的比表面积大,需水量较大,对减水剂吸附效应也较大,且本文掺量范围内硅灰起到一定的促进水泥水化的作用.单调增加硅灰掺量,即减少微珠的掺量,会削弱其滚珠促流效应,并产生增黏、早强效果,这会导致两方面的结果.一方面,硅灰掺量的增加($w_{sf} \leq 10\%$ 时)提高了浆液的黏稠度,降低了浆液初始流动性,并对流动性占据主要影响.流动性下降将有利于浆液在塑性阶段滞留PEA产生的气体,减少其逸散,从而降低体系的自身模量,增大塑性膨胀效应, ϵ_{v-max} 和 $\Delta\epsilon_v$ 均增大;同时,在0%~10%掺量范围内,硅灰的早强作用还将促使 t_{ev-max} 和 $t_{\Delta ev}$ 缩短.另一方面,当硅灰

掺量较高($w_{sf} \geq 15\%$)时,硅灰的早强作用可进一步凸显出来,并占据主要影响,体系早期强度和模量发展加快,带来对初期塑性膨胀过程更高的自身约束,这也促使其快速发展窗口期和短暂回落窗口期均进一步缩短,由此引发 ϵ_{v-max} 和 $\Delta\epsilon_v$ 逐渐减小以及 t_{ev-max} 和 $t_{\Delta ev}$ 继续单调减小.

由试验结果还可看出,F10S10组似乎可以充分地发挥PEA效能.但是,流动性也是风电灌浆料的核心指标之一.F10S10组初始流动性为275 mm,不满足GB/T 50448—2015标准要求(290 mm以上),其3 h竖向膨胀率 ϵ_{v-3} 也不达标.综合以上分析,优选F15S5作为基础配合比,进行后续PEA与HP-CSA组合膨胀剂调控风电灌浆料早期膨胀性能

的试验研究.

2.3 不同膨胀剂组合对风电灌浆料 ϵ_v 的影响

2.3.1 24 h 内的 ϵ_v 发展

不同膨胀剂组合下风电灌浆料 24 h 内 ϵ_v 发展曲线如图 4 所示,其关键参数见表 4. 由图 4 和表 4 可见: PEA 和 HP-CSA 组合双掺的风电灌浆料 24 h 内竖向膨胀发展规律仍遵从上述“四阶段”特征;随着 PEA 掺量的增加,风电灌浆料的 ϵ_v 明显增高,由 PEA 掺量 0% 时的 24 h 内几乎不发展,变化为 PEA 掺量为 0.06% 时的各组 ϵ_{v-24} 均大于 0.9%, 总体上,PEA 掺量对风电灌浆料竖向膨胀变形发展起到决定性影响;当 PEA 掺量从 0.03% 增加到 0.06% 时,在 HP-CSA 掺量从 0% 增加到 9% 条件下,其 ϵ_{v-24} 和 ϵ_{v-max} 的相对增长率均呈增长趋势, ϵ_{v-24} 相对增长率由 237.5% 增长至 631.3%, ϵ_{v-max} 相对增长率由 195.8% 增长至 372.3%.

由图 4(b) 可见,当 PEA 掺量达到 0.03% 后,

HP-CSA 掺量从 0% 增加到 9%, 风电灌浆料 ϵ_{v-max} 和 ϵ_{v-24} 减小, t_{ev-max} 提前, ϵ_{v-3} 总体增大, 将有利于控制二者差值 $\epsilon_{v-(24-3)}$ 在合理范围内. HP-CSA 具有促凝作用^[20], 在 1 d 内即可提高初期强度, 从而使竖向膨胀变形发展过程提前启动, 也促使该过程提前结束. 由表 4 可见, 在 PEA 掺量为 0.03% 时, 其 ϵ_{v-3} 均不足 0.1%, 不符合灌浆料国标要求; 在 PEA 掺量为 0.06% 时, 其 ϵ_{v-3} 均超过 0.2%, 达到了灌浆料国标要求, 但 ϵ_{v-24} 与 ϵ_{v-3} 之差 $\epsilon_{v-(24-3)}$ 均大于 0.5%, 不符合灌浆料国标要求; 掺入 PEA 后, 在 HP-CSA 掺量从 0% 增加到 9% 过程中, 风电灌浆料 ϵ_{v-3} 值呈先增大后降低趋势, 且 HP-CSA 掺量为 9% 时材料成本偏大. 因此, 综合考虑 PEA 掺量过大对灌浆料强度的不利影响^[6], 可合理推测 PEA 掺量在 0.03%~0.06%、HP-CSA 掺量在 3%~6% 范围内, 应存在合适组合掺量, 可使得风电灌浆料 ϵ_{v-3} 、 $\epsilon_{v-(24-3)}$ 同时满足灌浆料国标要求.

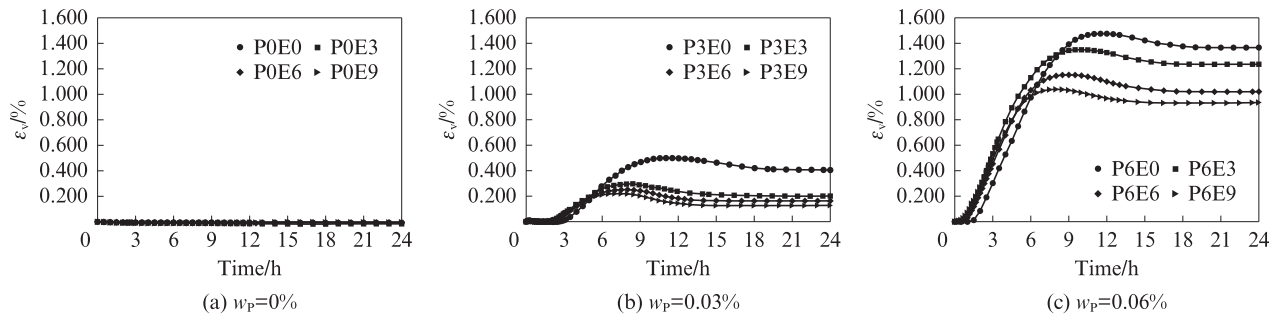


图 4 不同膨胀剂组合下风电灌浆料 24 h 内 ϵ_v 发展曲线

Fig. 4 Development curves of ϵ_v of grouting material under different dosages of composite expansive agent within 24 h

表 4 不同膨胀剂组合下风电灌浆料 24 h 内 ϵ_v 和流动度特征参数

Table 4 ϵ_v and fluidity characteristic parameters of grouting material under different dosages of composite expansive agent within 24 h

Specimen	Initial fluidity/mm	30 min fluidity/mm	$\epsilon_{v-max}/\%$	$\Delta\epsilon_v/\%$	t_{ev-max}/h	$t_{\Delta\epsilon_v}/h$	$\epsilon_{v-3}/\%$	$\epsilon_{v-24}/\%$	$\epsilon_{v-(24-3)}/\%$
P0E0	292	289					-0.004	-0.007	-0.003
P0E3	288	287					-0.008	-0.016	-0.008
P0E6	306	295					-0.006	-0.006	0.000
P0E9	301	284					-0.010	-0.004	0.007
P3E0	310	300	0.499	0.072	11.5	6.0	0.013	0.405	0.392
P3E3	300	292	0.297	0.083	8.4	6.0	0.065	0.201	0.137
P3E6	292	292	0.252	0.086	8.0	6.0	0.063	0.163	0.100
P3E9	293	288	0.220	0.089	7.5	6.0	0.051	0.128	0.077
P6E0	293	289	1.476	0.107	11.5	7.5	0.302	1.367	1.065
P6E3	297	297	1.349	0.112	10.0	7.5	0.533	1.236	0.703
P6E6	300	288	1.152	0.124	9.0	7.5	0.454	1.021	0.567
P6E9	299	287	1.039	0.105	8.0	7.5	0.492	0.936	0.444

2.3.2 1~7 d 内竖向膨胀/收缩变形的发展

不同膨胀剂组合下风电灌浆料 1~7 d 竖向膨胀率曲线如图 5 所示. 由图 5 可见: (1) 未掺和掺 3% HP-CSA 膨胀剂的风电灌浆料均处于持续收缩

发展状态. 掺 0.03% PEA 与 0.06% PEA 膨胀剂的风电灌浆料竖向自收缩发展规律几乎相同, 但与未掺 PEA 时差异明显. 这说明, 即使在 1~7 d 内, PEA 的掺入对 HP-CSA 膨胀效能的发挥仍然有一定的协

同促进作用,但当PEA掺量超过0.03%后,此促进作用已不明显。(2)随HP-CSA掺量增加,风电灌浆料自收缩逐渐减小,且发展速率变缓,当HP-CSA掺量为9%时,P3E9和P6E9组在1~2 d内先经短暂明显膨胀后再进入轻微自收缩阶段。(3)从7 d龄期来看,HP-CSA掺量达到6%及以上时,可保证1~7 d内风电灌浆料无净收缩。可见,PEA和HP-CSA组合后,可较好地调控风电灌浆料初期24 h以及1~7 d内的竖向膨胀或收缩的发展,PEA主要在24 h内发挥作用,HP-CSA则在0~7 d内都能发挥微膨胀调节作用。此二者在时间上有一定的“接力膨胀”效应,在产生1~7 d的膨胀变形上有一定的协同效应。但从本研究P6E9的1~7 d竖向变形曲线发展趋势来看,风电灌浆料发生持续、缓慢的收

缩变形,掺入HP-CSA并不能抑制28 d全时段的自收缩^[21-23]。MgO系膨胀剂在室温下反应速率较慢,可长期持续反应产生膨胀变形^[24-25],对7 d后自收缩变形的补偿作用将优于HP-CSA膨胀剂。未来,为获得28 d全龄期持续发展微膨胀的风电灌浆料,采用PEA、HP-CSA和MgO三元组合是值得进一步探索的方向^[26-27]。

综合前文,PEA掺量在0.03%~0.06%之间、HP-CSA掺量不低于6%时,二者组合即可制备出7 d内初期显著塑性膨胀而后微膨胀的全膨胀风电灌浆料,从而可显著提高风电灌浆料抵抗收缩开裂的性能。复掺适宜掺量的PEA和HP-CSA,可按需实现对风电灌浆料0~24 h、1~7 d内竖向膨胀率发展的分阶段、可设计性调控。

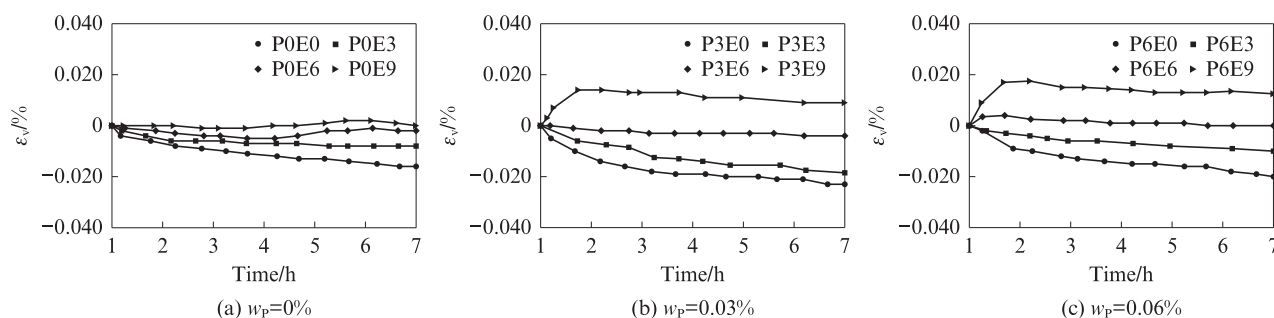


图5 不同膨胀剂组合下风电灌浆料1~7 d内 ϵ_v 的发展曲线

Fig. 5 Development curves of ϵ_v of grouting material under different dosages of composite expansive agent within 1-7 d

2.4 不同膨胀剂组合对风电灌浆料流动度、力学强度的影响

不同膨胀剂组合对风电灌浆料流动度的影响如图6所示。由图6可见,膨胀剂组合掺量变化对风电灌浆料的流动度无明显影响,初始流动度均不小于290 mm,30 min流动度均不小于260 mm,满足灌浆料国标对Ⅲ类灌浆料流动度的要求。

不同膨胀剂组合对风电灌浆料各龄期抗压、抗折强度的影响如图7、8所示。由图7可见:(1)单掺PEA时,风电灌浆料抗压强度随PEA掺量增加而降

低;当PEA掺量从0%增加到0.03%时,风电灌浆料28 d抗压强度降低8.4%;当PEA掺量达到0.06%时,其抗压强度进一步降低,较不掺时下降20.5%。

(2)单掺HP-CSA对风电灌浆料早期强度有利。HP-CSA掺量为3%、6%、9%时,较不掺时的1 d抗压强度分别提升159.0%、200.7%、180.1%。(3)复掺PEA与HP-CSA时,一方面,PEA 发泡引起物理膨胀,在初期1 d内即可增大风电灌浆料的孔隙率而降低其强度;另一方面,HP-CSA的水化产物可逐渐填充这些孔隙,从而提高初期强度^[28]。此外,单位质量的

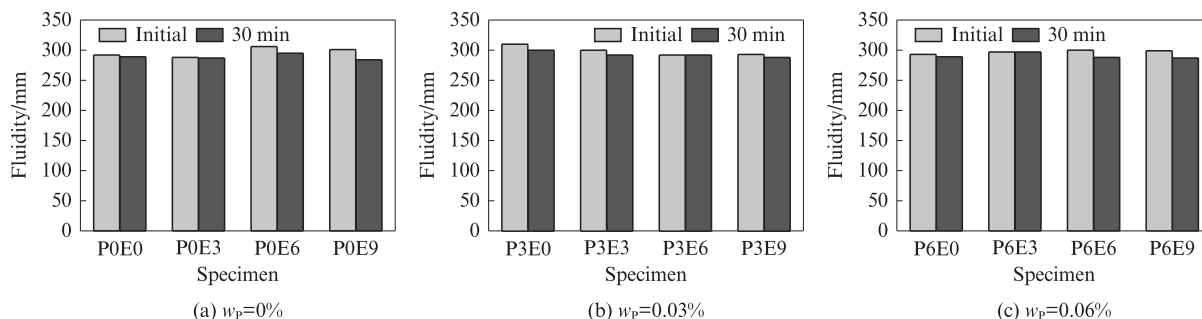


图6 不同膨胀剂组合对风电灌浆料流动度的影响

Fig. 6 Effects of different dosages of composite expansive agent on fluidity of grouting material

HP-CSA水化需水量大于胶凝材料本体,其早期反应活性较高,可提高初期强度,但其强水分竞争效应在低水胶比、高强的风电灌浆料体系中可引起水泥后期综合水化度的下降.总体上,随组合膨胀剂掺量增大,风电灌浆料28 d抗压强度呈现先增大后减小的趋势^[29].无论是PEA还是HP-CSA,过量掺加对风电灌浆料的力学性能都是不利的,也是不经济的.

在复掺条件下,P3E3各龄期抗压强度相对最高,其1、3、7、28 d抗压强度依次为25.32、69.64、83.71、112.73 MPa.但从抗压强度和早期7 d膨胀性调控两方面综合来看,P6E6为相对最优的组合.由图8可见,风电灌浆料28 d抗折强度随不同膨胀剂掺量变化表现出与抗压强度大致相同的变化规律.

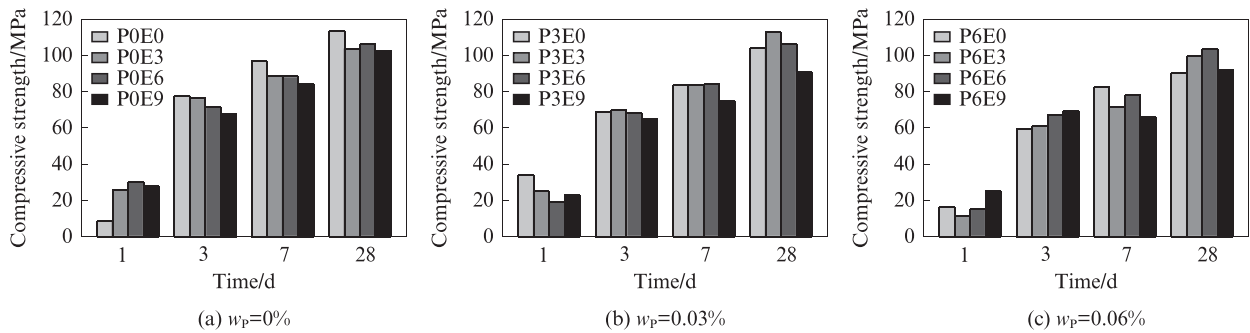


图7 不同膨胀剂组合对风电灌浆料28 d抗压强度的影响

Fig. 7 Effects of different dosages of composite expansive agent on 28 d compressive strength of grouting material

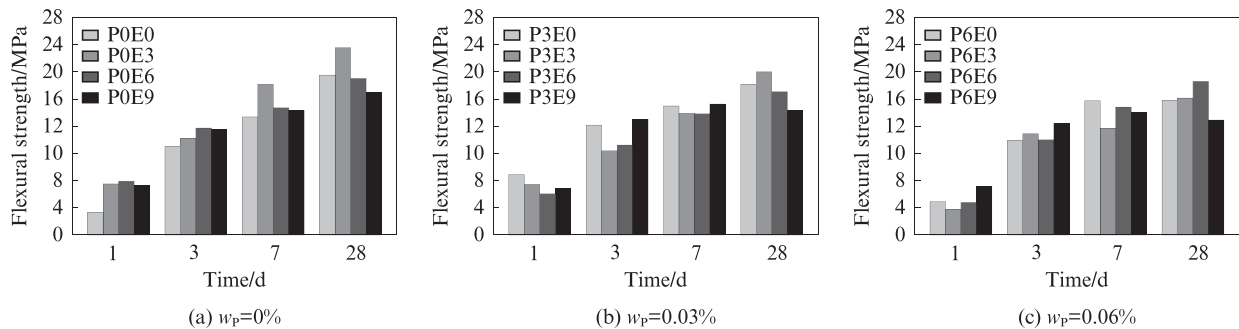


图8 不同膨胀剂组合对风电灌浆料28 d抗折强度的影响

Fig. 8 Effects of different dosages of composite expansive agent on 28 d flexural strength of grouting material

3 结论

(1)对现行灌浆料国标规定的竖向膨胀率测试方法进行了改进,试验得到了高强风电灌浆料前7 d内竖向膨胀率随龄期发展全曲线.高强风电灌浆料0~24 h竖向膨胀率曲线服从“四阶段”模式,即潜伏期、加速发展期、短暂回落期、平稳期.

(2)微珠和硅灰总掺量为20%时,随硅灰掺量增大,其增黏、促凝、早强作用将使高强风电灌浆料初始流动度减小;竖向膨胀率峰值及其与回落平衡值的差值均先增大后减小,且均在微珠与硅灰质量比为1:1时达到最大值;竖向膨胀率峰值时刻与回落结束时刻均提前.

(3)在塑性膨胀剂PEA的基础上复掺氧化钙-硫铝酸钙双源膨胀剂HP-CSA,可使高强风电灌浆料竖向膨胀率峰值下降,峰值时刻和回落结束时刻均提前,还可补偿1~7 d的竖向自收缩变形.当PEA

掺量为0.03%~0.06%、HP-CSA掺量不低于6%时,二者组合可使0~7 d内高强风电灌浆料塑性阶段显著膨胀、硬化后微膨胀.PEA对高强风电灌浆料24 h内的竖向膨胀率发展起主要作用,且0.03%掺量即可促进1~7 d内HP-CSA膨胀效能的发挥.2种膨胀剂存在一定的接力膨胀、协同膨胀的效应.复掺适宜掺量的PEA和HP-CSA可实现对高强风电灌浆料0~24 h、1~7 d内竖向膨胀率的分阶段、可设计性调控.

(4)随组合膨胀剂掺量增大,高强风电灌浆料初始和30 min流动度无明显变化,28 d抗压强度先增大后减小.在本文研究范围内,综合高强风电灌浆料早期膨胀性能调控效果、流动度和力学强度,PEA掺量0.06%+HP-CSA掺量6%是最优组合.基于试验结果,可合理推测PEA掺量0.03%~0.06%与HP-CSA掺量3%~6%之间应存在合理组合,可使得高强风电灌浆料3 h竖向膨胀率以及24 h与3 h竖

向膨胀率之差两个指标同时满足现行灌浆料国标技术要求。

参考文献:

- [1] 夏中升, 沙建芳, 郭飞, 等. 超高强水泥基灌浆材料力学性能尺寸效应[J]. 混凝土, 2021(10):17-22.
XIA Zhongsheng, SHA Jianfang, GUO Fei, et al. Size effect of mechanical properties of ultra-high strength cement-based grouting materials[J]. Concrete, 2021(10):17-22. (in Chinese)
- [2] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8):1070-1078.
HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. Influence of pre-wetted lightweight aggregate on early-age shrinkage of high strength concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(8):1070-1078. (in Chinese)
- [3] ZHANG J, HAN Y D, GAO Y, et al. Integrative study on the effect of internal curing on autogenous and drying shrinkage of high-strength concrete[J]. Drying Technology, 2013, 31(5):565-575.
- [4] HUA C, ACKER P, EHRLACHER A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I. Modelling at macroscopic scale [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1457-1468.
- [5] 韩宇栋. 现代混凝土收缩调控研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
HAN Yudong. Studies and controls on shrinkage of modern concrete[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 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.
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. (in Chinese)
- [8] 杨允晰. 浅谈风电场工程C80灌浆施工技术[J]. 技术与市场, 2019, 26(5):165.
YANG Yunxi. Discussion on C80 grouting construction technology of wind farm project[J]. Technology and Market, 2019, 26(5):165. (in Chinese)
- [9] 韩宇栋, 谢月, 岳清瑞, 等. 水泥基灌浆材料应用研究评述[J]. 工业建筑, 2024, 54(1):31-45.
HAN Yudong, XIE Yue, YUE Qingrui, et al. A review on applications of cementitious grouting materials [J]. Industrial Construction, 2024, 54(1):31-45. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for application of cementitious grout:GB/T 50448—2015[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 荏引引. 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.
CHI Yinyin. Effect of expansion agent on properties of cement-based grout[D]. Xi'an:Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [12] ZHANG G F, QIU D W, WANG S X. Effects of plastic expansive agent on the fluidity, mechanical strength, dimensional stability and hydration of high performance cementitious grouts [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243:340-346.
- [13] 胡超凡. 水泥基灌浆料膨胀性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
HU Chaofan. Research on expansion performance of cementitious grout[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [14] 胡超凡, 钱晓倩, 方明晖, 等. 水泥基灌浆料膨胀指标与凝结时间的关联性研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(11):130-133.
HU Chaofan, QIAN Xiaoqian, FANG Minghui, et al. Research on the correlation between expansion index and setting time of cementitious grout[J]. New Building Materials, 2020, 47(11):130-133. (in Chinese)
- [15] 丁成. 超高性能海上风电灌浆料试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
DING Cheng. Experimental research on ultra-high performance grouting for offshore wind power[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用套筒灌浆料:JG/T 408—2018[S].
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Cementitious grout for sleeve of rebar splicing: JG/T 408—2018[S]. (in Chinese)
- [17] 叶显, 吴文选, 侯维红, 等. 膨胀剂对高强灌浆料体积稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):950-955.
YE Xian, WU Wenxuan, HOU Weihong, et al. Influence of expansive agent on the volume stability of high-strength grouting materials [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):950-955. (in Chinese)
- [18] 卢佳林, 陈景, 甘戈金, 等. 新型高性能水泥基无收缩灌浆料的研制[J]. 材料导报, 2016, 30(2):123-129.
LU Jialin, CHEN Jing, GAN Gejin, et al. Study on the preparation of new type high capability and none shrinkage cement-based grouting material[J]. Materials Review, 2016, 30(2):123-129. (in Chinese)
- [19] 刘云霄, 荏引引, 田威, 等. 不同膨胀剂对水泥基灌浆料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):307-313.
LIU Yunxiao, CHI Yinyin, TIAN Wei, et al. Effect of different expanders on properties of cement based grouting material[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):307-313. (in Chinese)
- [20] ZHAO H T, LI J H, SUN G Y, et al. Effects of pre-soaked zeolite and CaO-based expansive agent on mechanical properties and autogenous deformation of early-age concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 261:1037-1047.
- [21] NOCUN-WCZELIK W, KONIK Z, STOK A. Blended systems

- with calcium aluminate and calcium sulphate expansive additives [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2):939-943.
- [22] ZHANG Y J, YU P, PAN F, et al. The synergistic effect of AFt enhancement and expansion in Portland cement-aluminate cement-FGD gypsum composite cementitious system [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190:985-994.
- [23] NAGATAKI S, GOMI H. Expansive admixtures (mainly ettringite)[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20(2): 163-170.
- [24] 曹丰泽. MgO膨胀剂的作用机理及在补偿收缩水泥基材料中的应用[D]. 北京:清华大学, 2021.
- CAO Fengze. Expansive mechanism of MgO expansive agent and its application in the shrinkage-compensating cementitious materials[D]. Beijing:Tsinghua University, 2021. (in Chinese)
- [25] MO L W, DENG M, TANG M S. Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(3):437-446.
- [26] DUNG N T, UNLUER C. Improving the performance of reactive MgO cement-based concrete mixes[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126:747-758.
- [27] GAO P W, XU S Y, CHEN X, et al. Research on autogenous volume deformation of concrete with MgO[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40:998-1001.
- [28] 韩宇栋, 李威, 岳清瑞, 等. 内养护剂和膨胀剂组合对混凝土收缩的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(6):604-611.
- HAN Yudong, LI Wei, YUE Qingrui, et al. Effect of internal curing agent and expansion agent on concrete shrinkage [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(6):604-611. (in Chinese)
- [29] 史艳娜. CSA膨胀剂在压浆料中的应用及作用机理分析[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(11):134-137.
- SHI Yanna. Application and mechanism analysis of CSA expansion agent in grouting material[J]. *New Building Materials*, 2020, 47(11):134-137. (in Chinese)