

文章编号:1007-9629(2022)03-0307-07

不同膨胀剂对水泥基灌浆料性能的影响

刘云霄, 荏引引, 田 威*, 侯英杰, 张嘉航

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:研究了不同种类及掺量的膨胀剂对水泥基灌浆料早期收缩、流动度、硬化后强度等性能的影响。结果表明:硫铝酸盐膨胀剂掺入后,水泥基灌浆料后期膨胀效果较好,但其早期膨胀效果不理想;氧化钙膨胀剂掺入后,水泥基灌浆料早期与后期膨胀效果均较好,但对其流动度与强度有明显不利的影响;塑性膨胀剂能够显著提高浆体塑性阶段的竖向膨胀率,但对水泥基灌浆料早期强度影响较大;在掺有塑性膨胀剂的水泥基灌浆料中掺入消泡剂,在保证膨胀性的前提下,可有效细化水泥基灌浆料的孔隙,改善其孔隙结构,同时对其强度提升作用明显,具有较好的综合技术效果。

关键词:灌浆料;收缩;膨胀剂;消泡剂

中图分类号: TU528.44

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.013

Effect of Different Expanders on Properties of Cement Based Grouting Material

LIU Yunxiao, CHI Yinyin, TIAN Wei*, HOU Yingjie, ZHANG Jiahang

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The effects of different types and dosages of expanders on the early shrinkage, fluidity, and strength after hardening of cement based grouting material were studied. The results show that after adding sulphoaluminate expander, the late expansion effect of cement based grouting material is better, but its early expansion effect is not ideal. After the calcium oxide expander is incorporated, both early and late expansion effects are improved, but it has adverse effects on its fluidity and strength. Plastic expander can significantly increase the vertical expansion rate of slurry in the plastic stage, but has a great influence on the early strength of cement based grouting material. Adding defoaming agent into the cement based grouting material with the plastic expander can effectively reduce the size of air bubbles and improve its pore structure on the premise of ensuring the expansibility, and it also has a great effect on improving the strength and achieving a better comprehensive technical effect.

Key words: grouting material; shrinkage; expander; defoaming agent

水泥基灌浆料流动性好、早期强度高、密实性好,可广泛应用于水电、隧道、构件安装以及裂缝修补等工程中^[1],也是中国推进建筑工业化、推广装配式混凝土结构中节点连接的重要材料,这是由于装配式混凝土的结构稳定性、耐久性和质量关键在于节点部位灌浆的优劣^[2-3]。水泥基灌浆料浇筑成型后,因水泥水化和外界环境等变化会引起材料失水,导

致材料表层毛细管负压增大,并出现收缩开裂^[4]。水泥基灌浆料在塑性和硬化阶段出现的收缩开裂,轻则引起灌浆料黏结部位接触不良,造成钢筋锈蚀,重则影响其结构强度和耐久性^[5]。

减小由材料失水造成的灌浆料在塑性和硬化阶段收缩的主要手段是掺入膨胀剂,且不同品种膨胀剂的膨胀机理及膨胀发挥作用的阶段均有所不同。

收稿日期:2021-02-07; 修订日期:2021-05-06

基金项目:陕西省重点研发计划(2020SF-360)

第一作者:刘云霄(1976—),女,河北盐山人,长安大学高级工程师,硕士生导师,博士。E-mail:liuyunxiao@chd.edu.cn

通讯作者:田 威(1981—),男,陕西西安人,长安大学教授,博士生导师,博士。E-mail:tianwei@chd.edu.cn

硫铝酸盐膨胀剂(S)是由硫铝酸盐熟料、明矾石、石膏等组成,其水化生成的钙矾石可以作为膨胀源补偿水泥基材料的收缩.钙矾石的主要形状为六方柱体或针状结晶,形成时要结合和吸附32个水分子,使固相体积增大,宏观体积膨胀^[6-7].氧化钙膨胀剂(CaO)的作用机理是氧化钙与水反应生成氢氧化钙,且氧化钙比表面积大,反应活性高,水化速率相对较快,氢氧化钙的生成速率高于其转移速率,从而使体系产生宏观膨胀^[8].塑性膨胀剂(P)则是在浆体塑性阶段产生膨胀,通过在浆体内部释放氮气,产生大量的微细气泡而引发塑性膨胀,补偿浆体的早期收缩^[9].

本文研究了不同掺量硫铝酸盐膨胀剂、氧化钙膨胀剂、塑性膨胀剂及复合消泡剂对水泥基灌浆料的膨胀作用、产生作用的时间以及硬化后力学性能的影响,以期减少灌浆料在塑性阶段的收缩,并具有一定的膨胀性能,为不同膨胀剂在水泥基灌浆料中的应用提供技术数据.

1 试验

1.1 原材料

水泥为冀东P·O 42.5水泥;石英粉粒径小于75 μm,纯度¹⁾大于99%;硅灰为河南郑州某厂家生产,平均粒径为0.1~0.3 μm,pH值为4.5~6.5;膨胀剂为天津伟合科技发展有限公司生产的硫铝酸盐膨胀剂、氧化钙膨胀剂、塑性膨胀剂;聚羧酸减水剂的减水率为20%;增稠剂为羟甲基丙基纤维素醚,20万黏度;消泡剂为广东中联邦精细化工有限公司生产的B-346.

1.2 配合比设计

固定水胶比为0.44, $m(\text{胶凝材料}):m(\text{石英砂}):m(\text{减水剂}):m(\text{增稠剂})=100.00:70.00:0.50:0.03$,胶凝材料中硅灰的用量为5%,膨胀剂的掺量均以水泥的质量计.掺硫铝酸盐水泥基灌浆料(CS组)中硫铝酸盐膨胀剂为内掺,其掺量 $w_s=8\%、10\%、12\%$,分别记为CS-8、CS-10、CS-12;掺氧化钙水泥基灌浆料(CaO组)中氧化钙膨胀剂为内掺,其掺量 $w_{CaO}=3\%、5\%、7\%$,分别记为CaO-3、CaO-5、CaO-7;掺塑性膨胀剂水泥基灌浆料(CP组)中塑性膨胀剂为外掺,其掺量 $w_p=0.02\%、0.04\%、0.06\%、0.08\%、0.10\%、0.12\%$,分别记为CP-2、CP-4、CP-6、CP-8、CP-10、CP-12;未掺加膨胀剂的水泥基灌浆料记为C-0.

1.3 试验方法

根据GB/T 50448—2008《水泥基灌浆材料应用

技术规范》,分别对水泥基灌浆料进行流动度、强度和竖向膨胀率(ϵ_v)的测试.竖向膨胀率采用架设百分表的方法,仪器设备符合GB 50119—2013《混凝土外加剂应用技术规范》中附录C的有关规定,其计算公式为:

$$\epsilon_v=(h_t-h_0)/h\times 100\% \quad (1)$$

式中: h_0 为试件高度的初始读数,mm; h_t 为龄期为 t 时的试件高度读数,mm; h 为试件基准高度,取100 mm.

采用蔡司立体光学显微镜观察塑性膨胀剂水泥基灌浆料内部孔隙分布;日立S-4800扫描电子显微镜(SEM)观察28 d水泥基灌浆料微观形貌并进行分析.

2 结果与讨论

2.1 不同膨胀剂对水泥基灌浆料竖向膨胀率的影响

不同膨胀剂对水泥基灌浆料竖向膨胀率的影响见图1.由图1可见:C-0在水化早期出现明显收缩,CS组早期收缩均略小于C-0,且随着硫铝酸盐膨胀剂掺量的增大逐渐减小,收缩现象的出现是因为水泥水化导致体系内自由水含量降低,毛细孔内失水形成负压,产生收缩应力^[10-11],而早期钙矾石的生成速率小于水化耗水速率,因此早期表现为收缩,随着水化反应的进行,生成了较多数量的钙矾石来填充孔隙并产生一定的膨胀^[12];C-0的3 h竖向膨胀率(ϵ_3)为一0.01%,加入硫铝酸盐膨胀剂后,灌浆料竖向膨胀率增大,且硫铝酸盐膨胀剂掺量越大,后期的膨胀效果越好;CaO组早期没有出现收缩现象,但随着氧化钙膨胀剂掺量的增大,灌浆料早期膨胀率逐渐增大;与CS组相比,CaO组3 h前的膨胀率较高,且硬化后膨胀曲线能够保持上升趋势,考虑是因为氧化钙膨胀剂水化速率相对较快,氢氧化钙的生成速率高于其转移速率,从而引起结构体积增大;与C-0相比,CP组早期的竖向膨胀率显著提高;对CP组,塑性膨胀剂产生膨胀主要发生在16 h前,16 h之后曲线趋于平缓稳定,且塑性膨胀剂掺量越大,早期膨胀速率越快,这是因为塑性膨胀剂在塑性阶段产生的氮气能在浆体内部形成大量微细孔来作为早期膨胀源,且掺量越大,生成氮气越多,膨胀效果越好.

根据GB/T 50448—2008,水泥基灌浆料3 h竖向膨胀率需达到0.10%以上,且3、24 h竖向膨胀率之差应在0.02%~0.50%.由图1还可见:对CS组,其 ϵ_3 均小于0.10%,不满足规范要求;对CaO组,仅当

1) 文中涉及的纯度、水胶比等均为质量分数或质量比.

$w_{\text{CaO}}=7\%$ 时,满足规范要求;对 CP 组,当 $w_p=0.04\%$ 、 0.06% 时,满足规范要求。

3.2 不同膨胀剂对水泥基灌浆料流动度及强度的影响

不同膨胀剂对水泥基灌浆料流动度及强度的影响见图 2。

由图 2(a)可见:与 C-0 相比,CS 组的初始流动度和 30 min 流动度均略减小;当 $w_s=8\%$ 、 12% 时,灌浆料的初始流动度分别降低了 0.70% 、 3.15% ,但仍在 400.00 mm 以上;当 $w_{\text{CaO}}=3\%$ 时,灌浆料的初始流动

度和 30 min 流动度均在 400.00 mm 以上;当 $w_{\text{CaO}}=7\%$ 时,灌浆料的初始流动度比 C-0 低 81.33 mm ,下降明显,损失率达 19.15% ,且其 30 min 后的流动度已经不能满足 GB/T 50448—2008 中的 II 类要求($\geq 310\text{ mm}$);与 C-0 相比,CP 组初始流动度和 30 min 流动度损失都较小, $w_p=0.02\%$ 、 0.12% 时,其初始流动度损失值分别为 2.33 、 21.33 mm ,30 min 流动度损失值分别为 2.33 、 29.67 mm 。综上,膨胀剂的加入均会导致水泥基灌浆料流动性的降低,其中氧化钙膨胀剂对流动性的影响最大。

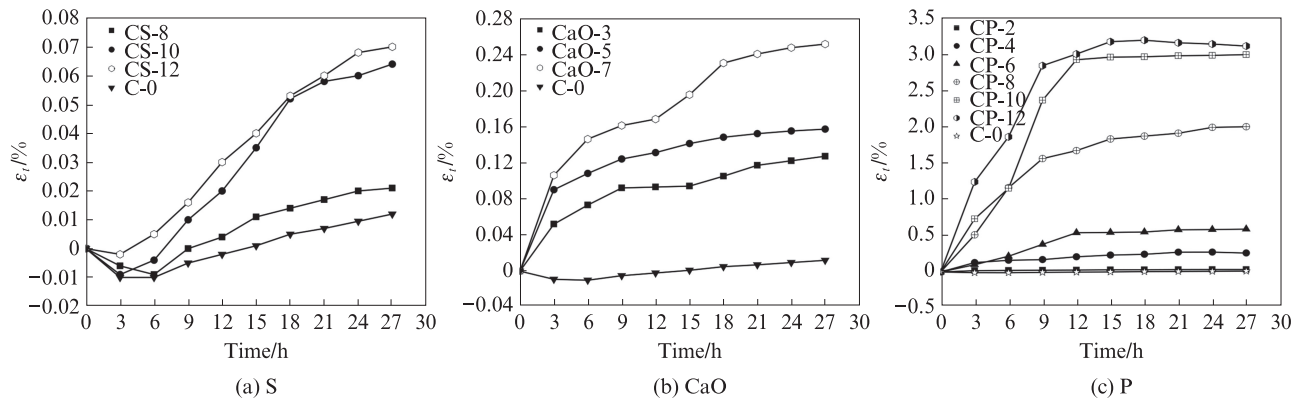


图 1 不同膨胀剂对水泥基灌浆料竖向膨胀率的影响

Fig. 1 Influence of different expanders on ϵ_v of cement grouting materials

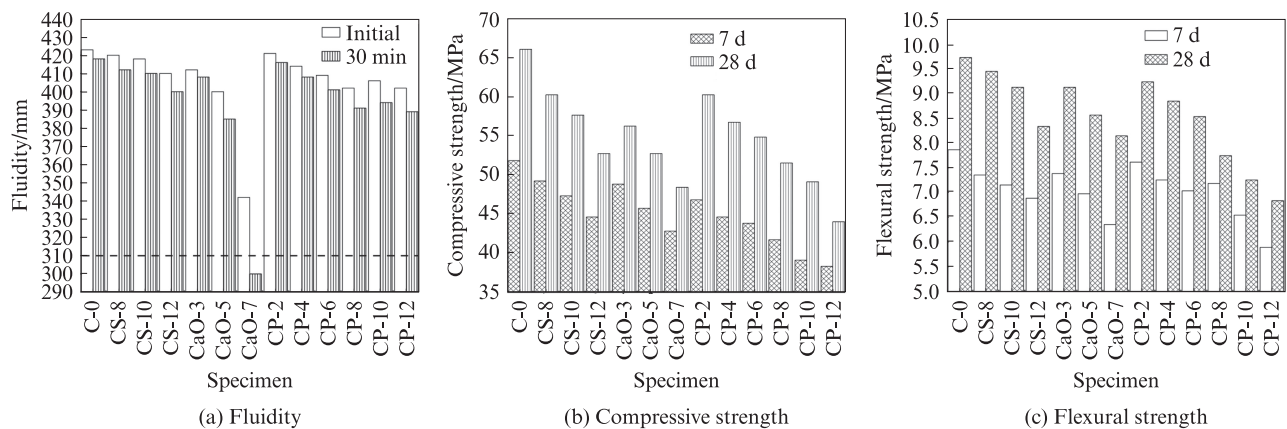


图 2 不同膨胀剂对水泥基灌浆料流动度及强度的影响

Fig. 2 Influence of different expanders on fluidity and strength of cement grouting material

由图 2(b)、(c)可见,3 种膨胀剂掺入后,水泥基灌浆料的强度均有所降低,且随着膨胀剂掺量的增大,其强度损失率逐渐增大。选取 CS 组、CaO 组、CP 组中膨胀性与流动性均较好的水泥灌浆料强度测试结果,来对比分析 3 种膨胀剂对强度的影响程度:与 C-0 相比,CS-10 的 7、28 d 抗压强度损失率分别为 8.69% 、 12.73% ,抗折强度损失率分别为 9.03% 、 6.17% ;CaO-5 的 7、28 d 抗压强度损失率分别为 11.78% 、 20.15% ,抗折强度损失率为分别

11.32% 、 11.93% ;CP-6 的 7、28 d 抗压强度损失率分别为 15.44% 、 16.97% ,抗折强度损失率分别为 10.56% 、 12.24% 。由此可见,7、28 d 抗压、抗折强度损失较大的均为 CP 组、CaO 组,这表明塑性膨胀剂和氧化钙膨胀剂均对水泥灌浆料强度有明显的不良影响。

2.3 掺加不同膨胀剂水泥基灌浆料硬化后微观形貌分析

为进一步研究不同膨胀剂对水泥基灌浆料水化

产物的影响,对掺入不同膨胀剂的水泥基灌浆料水化 28 d 试样进行微观形貌分析,其 SEM 照片见图 3. 由图 3 可见:硫铝酸盐膨胀剂是以钙矾石作为膨胀源,CS-10 以生成的大量针状钙矾石来补偿水泥基材料的收缩并产生膨胀,同时与较多的凝胶相交织,交错联接形成致密结构;CaO-5 中有较多的六方片状晶体,氧化钙膨胀剂与水反应后生成较多的氢氧化钙,使水泥基材料产生膨胀,氧化钙膨胀剂发挥

的作用分为初期氧化钙水化生成胶凝状的氢氧化钙所产生的膨胀、胶凝状的氢氧化钙发生重结晶,从而转化为较大的层状或六方片状晶体的膨胀这 2 个阶段^[13],随着氢氧化钙晶型的转变,水泥基灌浆料产生膨胀;CP-6 内部有大量孔隙,作为浆体早期膨胀源,在孔内可以看到柱状或针状钙矾石晶体富集,这有助于提高结构密实度,也在一定程度上减少了浆体孔隙收缩应力,补偿了浆体硬化阶段的收缩.

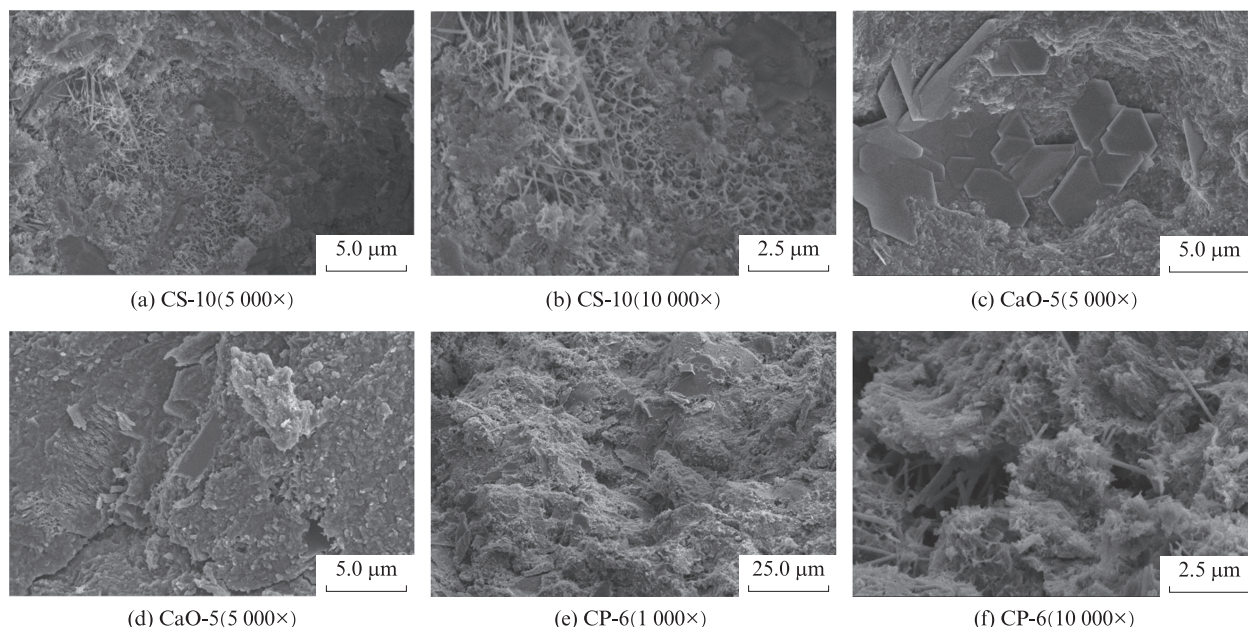


图 3 不同膨胀剂水泥基灌浆料水化 28 d 的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of cement grouting material with different expanders after hydration for 28 d

2.4 塑性膨胀剂与消泡剂复合对水泥基灌浆料性能的影响

加入塑性膨胀剂后,灌浆料在搅拌过程中会产生大量气泡,气泡在提高膨胀率的同时,降低了灌浆料的流动性和强度.为降低塑性膨胀剂的不利影响,在加入塑性膨胀剂的水泥基灌浆料中加入少量消泡剂,以控制塑性膨胀剂气泡的大小及数量,加入方式为水中稀释,均匀搅拌,其掺量为胶凝材料质量的 0.50%.加入消泡剂的 CP 组记为 CP-D 组,且 CP-2-D 表示加入消泡剂的 CP-2 水泥基灌浆料,其他类推.消泡剂对 CP 组水泥基灌浆料性能的影响见图 4,其中 ρ_d 为灌浆料 28 d 的干表观密度.

由图 4(a)可见:消泡剂的掺入对 CP 组流动性影响较小;当 $w_p=0\%\sim 0.06\%$ 时,未加消泡剂的 CP 组灌浆料流动度比加入消泡剂的 CP-D 组略高,其原因是水泥在搅拌过程中会产生气泡,气泡的存在,能降低灌浆料内部颗粒之间的摩擦阻力,加入消泡剂反而会使流动度降低;随着塑性膨胀剂掺量的增大,因其消耗水对

流动度的影响大于气泡滚珠,灌浆料流动度逐渐减小.

由图 4(b)可见:加入消泡剂的 CP-D 组灌浆料 ρ_d 相对增大,结构密实度提高;塑性膨胀剂掺量越多,消泡剂的掺入对 ρ_d 提高的幅度越明显.

由图 4(c)可见,消泡剂的掺入能增加水泥基灌浆料的强度,当 $w_p=0\%\sim 0.08\%$ 时,消泡剂对强度的增强效果较明显.

由图 4(d)可见:消泡剂对水泥灌浆料 3、24 h 的竖向膨胀率基本没有影响.在搅拌过程中目测发现,随着塑性膨胀剂掺量的增大,加入消泡剂的 CP-D 组灌浆料表面大气泡明显减少,微小细泡稍微增多,说明消泡剂对水泥搅拌过程中产生的大气泡有消除作用,对塑性膨胀剂产生的微小细泡影响不大.

为分析消泡剂对掺有塑性膨胀剂水泥基灌浆料气孔结构的影响,采用光学显微镜,在放大 50 倍的条件下,观察新拌状态(加水拌和 15 min)下灌浆料表面和硬化后(28 d 龄期)灌浆料断面的气孔结构,结果见图 5.由图 5 可见:新拌状态(15 min)下 C-0 灌浆料表

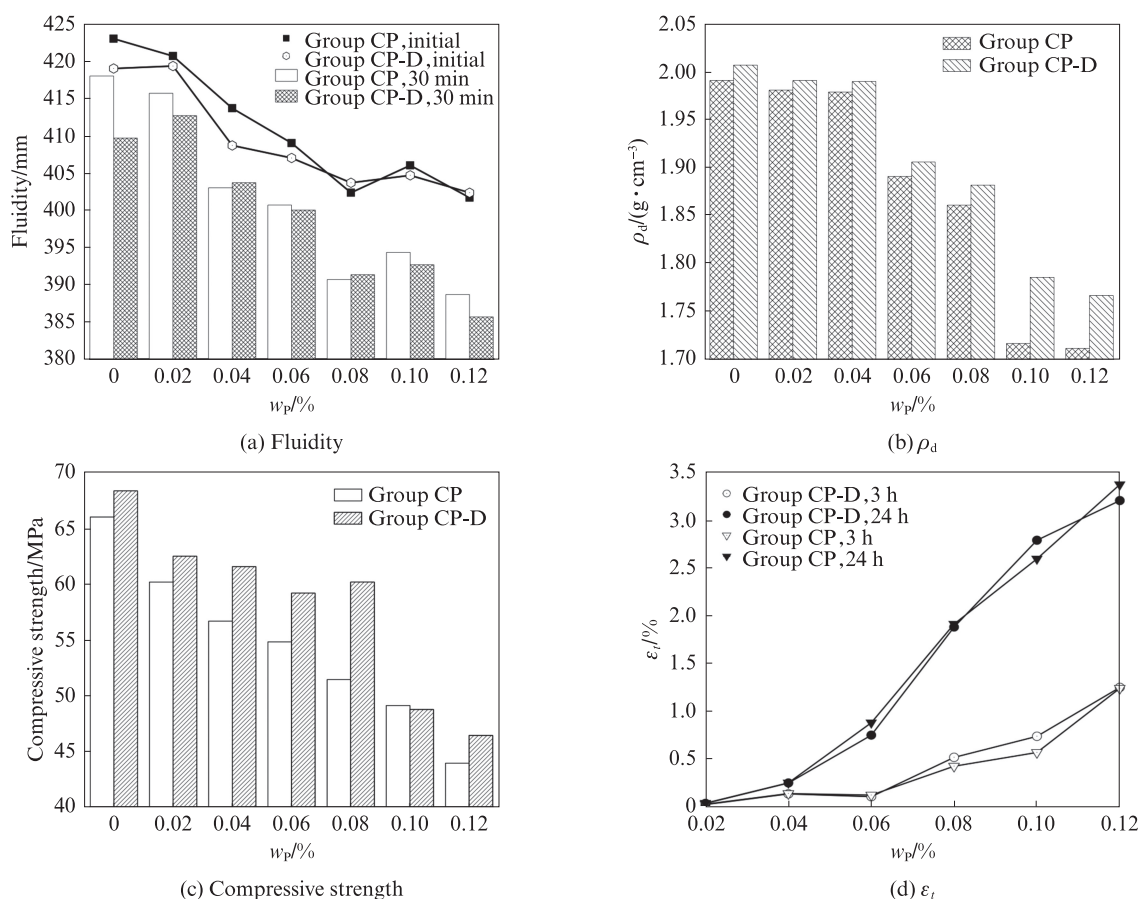


图4 消泡剂对CP组水泥基灌浆料性能影响

Fig. 4 Influence of defoaming agent on properties of cement grouting material in group CP

面气泡较少且分布较均匀;CP-6灌浆料表面气泡数量较多,孔径较大,可以看出塑性膨胀剂发挥作用的时间较早,发挥效果较好;加入消泡剂后,CP-6-D灌浆料表面大气泡变少,微小气泡增多;与新拌状态下CP组相比,CP-D组灌浆料28 d龄期的孔隙尺寸与孔隙分布基本没有变化,这表明随着水化龄期的增长,塑性膨胀剂发挥作用较为稳定,消泡剂的加入能够很好地改善灌浆料的孔隙结构。

为进一步分析塑性膨胀剂与消泡剂对灌浆料气孔结构的影响,用Image-Pro Plus软件分析图5中灌浆料的孔径(d),结果见图6。由图6可见:对比未掺消泡剂的CP组和掺入消泡剂的CP-D组,发现掺入消泡剂后,灌

浆料中未出现 $d > 100 \mu\text{m}$ 的孔隙, $d = 61 \sim 100 \mu\text{m}$ 的孔隙含量明显降低, $d = 21 \sim 60 \mu\text{m}$ 的孔隙含量明显增加, $d < 20 \mu\text{m}$ 的孔隙含量相差不大,这表明消泡剂能够起到细化 $d > 60 \mu\text{m}$ 孔隙的作用;28 d龄期后,灌浆料硬化体中孔隙分布与塑性状态呈现出相同的规律。因此,无论是早期还是硬化后,掺入消泡剂的灌浆料,均呈现出微小孔径增多、结构孔隙分布改善的效果。由图6还可见,随着龄期的增长,CP组 $d > 100 \mu\text{m}$ 孔隙含量增多,CP-D组 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 孔隙含量增多,这表明不论是否掺加消泡剂,随着龄期的增长,掺加塑性膨胀剂的灌浆料中尺寸相对较大的孔隙数量均会增加,这也是塑性膨胀剂发挥膨胀作用的主要表现。

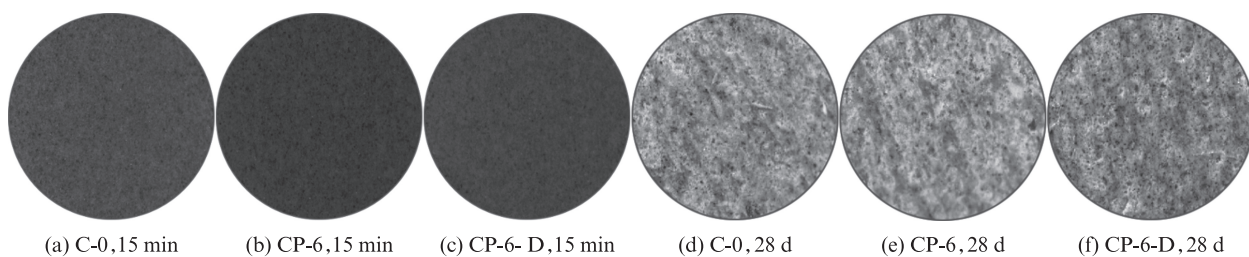


图5 水泥基灌浆料的显微镜观测图

Fig. 5 Microscopic observation of cement grouting material (50×)

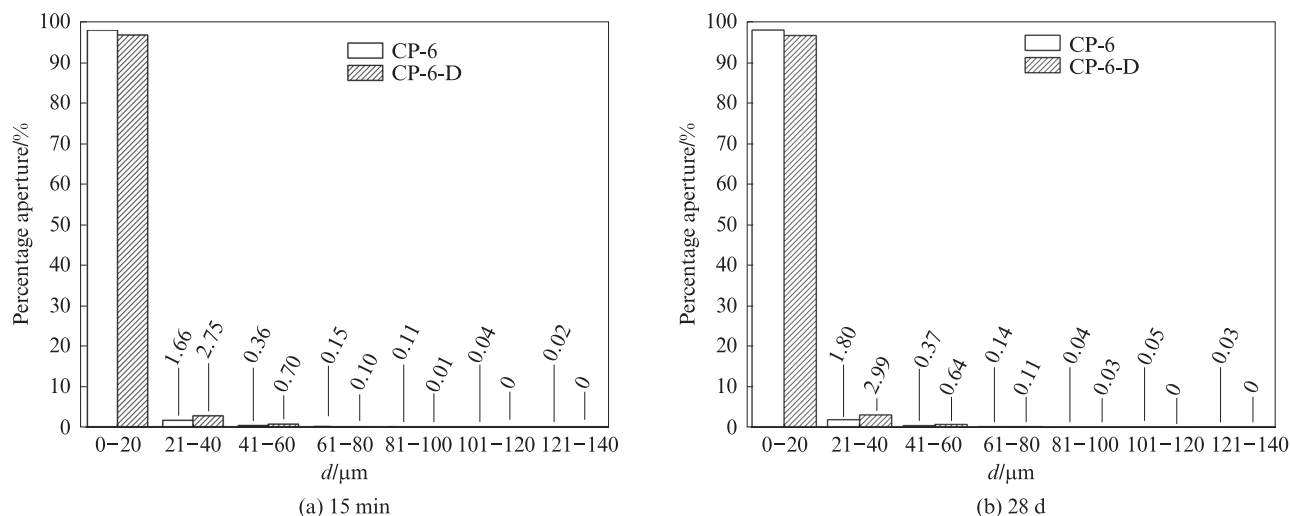


图6 水泥基灌浆料的孔径分布图

Fig. 6 Pore size distribution diagrams of cement grouting material

3 结论

(1) 掺加硫铝酸盐膨胀剂后,水泥基灌浆料先收缩后膨胀,后期膨胀效果较好;随着硫铝酸盐膨胀剂掺量的增加,浆体初始流动度和30 min流动度逐渐减小,强度逐渐降低。

(2) 氧化钙膨胀剂掺入后,灌浆料早期膨胀速率较高,硬化后仍保持较好的膨胀效果;与硫铝酸盐膨胀剂相比,加入氧化钙膨胀剂,膨胀率更高,但浆体流动度与硬化体强度损失率更为明显。

(3) 塑性膨胀剂的掺入显著提高了水泥基灌浆料塑性阶段的竖向膨胀率,因其发挥作用主要在塑性阶段,尤其对早期强度影响较大。

(4) 在掺加塑性膨胀剂的灌浆料中加入消泡剂,对塑性膨胀剂的膨胀效果影响不大,但有效降低了孔隙直径,改善了孔隙分布。塑性膨胀剂复合消泡剂使用,不仅保证了膨胀性,对其他性能的降低幅度也较小,具有较好的综合技术效果。

参考文献:

- [1] 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 expander on volume stability of high-strength grouting material [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 950-955. (in Chinese)
- [2] 吴汝莉.云南省水泥制品行业发展历史回顾及质量状况分析(一)[J].建材发展导向,2019,17(24):28-33.
WU Ruli. Review of the development history and quality situation analysis of Yunnan cement products industry (I)[J]. Development Guide of Building Materials, 2019, 17(24): 28-33. (in Chinese)

- [3] 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.
HONG Bin. Study on preparation and application of sleeving grouting material for assembly-type building [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [4] 马一平,朱蓓蓉,谈慕华.水泥砂浆塑性抗拉强度与收缩开裂的关系[J].建筑材料学报,2003,6(1):20-24.
MA Yiping, ZHU Beirong, TAN Muhua. Relationship between plastic tensile strength and shrinkage cracking of cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(1): 20-24. (in Chinese)
- [5] 李建勋.套筒灌浆料膨胀性能的研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
LI Jianxun. Research on expansion performance of sleeve grouting material [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] 李璐.微膨胀混凝土试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2008.
LI Lu. Experimental research on micro-expansion concrete [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [7] 吴志明.新型膨胀剂在混凝土中限制膨胀率的影响因素研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
WU Zhiming. Study on the influencing factors of the new expansive agent to limit expansion rate in concrete [D]. Beijing: Beijing Jianzhu University, 2017. (in Chinese)
- [8] 肖文慧.膨胀剂组分对水泥浆性能影响的研究[J].当代化工,2017,46(6):1065-1068.
XIAO Wenhui. Study on the influence of expansion agent components on the properties of cement slurry [J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(6): 1065-1068. (in Chinese)
- [9] 程平阶,宋小婧,李北星,等.塑性膨胀剂对预应力孔道压浆料体积变形与亚微观结构的影响[J].硅酸盐通报,2014,33(6):1329-1335.
CHENG Pingjie, SONG Xiaojing, LI Beixing, et al. Effect of plastic expansion agent on volume deformation and submicrostructure of prestressed prelude grouting [J]. Chinese Journal of Ceramics, 2014, 33(6): 1329-1335. (in Chinese)

- [10] 张利锋. 水泥基材料早期收缩研究及数值模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
ZHANG Lifeng. Research and numerical simulation of early shrinkage of cement-based materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [11] 张巍, 杨全兵. 混凝土收缩研究综述[J]. 低温建筑技术, 2003(5): 4-6.
ZHANG Wei, YANG Quanbing. Summary of concrete shrinkage research[J]. Cryogenic Building Technology, 2003(5): 4-6. (in Chinese)
- [12] 何涛, 赵青林, 徐奇威, 等. 高水灰比超细灌浆材料抗离析性能及干缩性能研究[C]//第三届全国商品砂浆学术交流会议论文集. 武汉:[s.n.], 2009: 276-280.
HE Tao, ZHAO Qinglin, XU Qiwei, et al. Study on anti-segregation and dry-shrinkage properties of ultrafine grouting materials with high water-cement ratio[C]//Proceedings of the 3rd National Commodity Mortar Academic Exchange Conference. Wuhan:[s.n.], 2009: 276-280. (in Chinese)
- [13] 骆菁菁. 新型生态混凝土膨胀剂的制备及性能表征[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
LUO Jingjing. Preparation and performance characterization of a new ecological concrete expansion agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

(上接第299页)

- WANG Lan, WANG Zihao, LI Chao. Low temperature performance of polyphosphoric acid asphalt based on viscoelastic theory[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 322-328. (in Chinese)
- [7] BÜCHNER J, WISTUBA M P, REMMLER T. et al. On low temperature binder testing using DSR 4 mm geometry [J]. Materials and Structures, 2019, 52(6): 113.
- [8] SUI C, FARRAR M J, TUMINELLO W H, et al. New technique for measuring low-temperature properties of asphalt binders with small amounts of material [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(2179): 23-28.
- [9] SUI C, FARRAR M J, HARNSBERGER P M, et al. New low-temperature performance-grading method: Using 4 mm parallel plates on a dynamic shear rheometer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011(2207): 43-48.
- [10] 王超. 沥青结合料路用性能的流变学研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
WANG Chao. Rheological characterization on paving performance of asphalt binder[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 李峰, 黄颂昌, 石小培. 沥青路面加热型密封胶的低温黏弹性模型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(6): 54-58.
LI Feng, HUANG Songchang, SHI Xiaopei. Low-temperature viscoelastic model for hot-poured sealant of asphalt pavement[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(6): 54-58. (in Chinese)
- [12] Determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR): AASHTO T313-12[S].