

文章编号:1007-9629(2023)08-0922-09

低收缩早强型灌浆料的制备与微观机理

张岩¹, 高青宇¹, 纪欢乐², 都秀红³, 潘慧敏^{1,*}

(1.燕山大学 城市固废无害化协同处置及利用河北省工程研究中心,河北 秦皇岛 066004;
2.天津交通职业学院 路桥工程学院,天津 300380;3.河北建材职业技术学院 河北省绿色高性能建
材应用技术协同创新中心,河北 秦皇岛 066000)

摘要:采用硫铝酸盐水泥-硅酸盐水泥-石膏三元复合体系制备了低收缩早强型灌浆料,探究了其微观结构形成机理.结果表明:根据最优配合比制备的灌浆料1、3 d抗压强度分别为60.1、75.5 MPa,3 d自收缩率为 351.39×10^{-6} ,28 d干燥收缩率为 239.75×10^{-6} ,均高于国家标准;灌浆料水化产物中的钙矾石(Aft)晶体相互交错搭接,构成了致密的网状骨架,使灌浆料具有较高的早期强度,而水化硅酸钙凝胶则促进了灌浆料后期强度的发展;Aft表现出的微膨胀作用使灌浆料的收缩变形逐渐变小,进一步保障了其早强与低收缩特性.

关键词:灌浆料;早期强度;收缩变形;配合比;微观机理

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.013

Preparation and Microscopic Mechanism of Low Shrinkage and Early Strength Grouting

ZHANG Yan¹, GAO Qingyu¹, JI Huanle², DU Xiuhong³, PAN Huimin^{1,*}

(1. Hebei Province Engineering Research Center for Harmless Synergistic Treatment and Recycling of Municipal Solid Waste, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Road and Bridge Engineering, Tianjin Transportation Technical College, Tianjin 300380, China; 3. Hebei Green High-Performance Building Material Application Technology Collaborative Innovation Center, Hebei Construction Materials Vocational and Technical College, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: A grouting material using ternary composite system including sulphoaluminate cement, Portland cement and gypsum was prepared, which featured low shrinkage and early strength. The formation mechanism of the microstructure of the obtained grouting material was explored. The results show that the grouting material prepared according to the optimal mix proportion exhibits 1 d and 3 d compressive strengths of 60.1 MPa and 75.5 MPa, and 3 d autogenous shrinkage and 28 d drying shrinkage of 351.39×10^{-6} and 239.75×10^{-6} , respectively. All of them are higher than those of national standard requirements. Ettringite(Aft) crystals in the hydration products of the grouting material overlap to form a compacted network skeleton, resulting in the high early strength of the grouting material. At the same time, calcium silicate hydrate gel in the hydration products promotes the later strength development of the grouting material. Furthermore, the micro-expansion effect of Aft gradually reduces the shrinkage deformation of the grouting material, ensuring its early strength and low shrinkage characteristics.

Key words: grouting material; early strength; shrinkage deformation; mix proportion; microscopic mechanism

水泥基灌浆料加水拌和后具有流动性好、黏聚性强、承载力高和微膨胀等特性,是一种优异的结构

收稿日期:2022-10-21; 修订日期:2023-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608469)

第一作者:张岩(1996—),男,河北唐山人,燕山大学硕士生.E-mail:1758877836@qq.com

通讯作者:潘慧敏(1978—),女,河北卢龙人,燕山大学教授,博士生导师,博士.E-mail:panhuimin@ysu.edu.cn

修补填充材料^[1-2].灌浆料的收缩特性直接关系到混凝土结构的耐久性与抗震性^[3].传统普通硅酸盐水泥基灌浆料的早期水化热较高,固化收缩量大,易产生开裂,且早期强度偏低^[4-5],在一定程度上制约了其在工程中的应用.

探索降低灌浆料收缩变形并保证其早期强度的途径已迫在眉睫.卢佳林等^[6]采用普通硅酸盐水泥制备微膨胀水泥基灌浆料,解决了灌浆料早期收缩大的问题,但其1 d抗压强度仅为26 MPa,后期强度也较低.李伟等^[7]研究发现,当硫铝酸盐水泥掺量为15 %时,灌浆料28 d抗压强度仅为66 MPa,后期强度太低,无法保障其正常使用.Zhang等^[8]发现,掺入0.15 %塑性膨胀剂可以使灌浆料的竖向膨胀率大幅提高,体积稳定性有所增强,但同时也会使固化浆料的干缩率增加.刘云霄等^[1]认为,塑性膨胀剂可以弥补灌浆料塑性阶段的收缩变形,增加其竖向膨胀率,但掺入0.06 %的塑性膨胀剂却使其7、28 d抗压强度分别降低15 %和17 %.

由此可见,低收缩和早强、高强难以兼顾的问题在传统灌浆料中仍比较突出.鉴于此,本文采用硫铝酸盐水泥(CSA)–硅酸盐水泥(P·Ⅱ)–石膏(G)三元复合体系,制备低收缩早强型灌浆料,探索水泥复配比例 $m_{\text{CSA}}/m_{\text{P·Ⅱ}}$ (质量分数,文中涉及的掺量、含量、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比)、复合掺合料(COAD)细度(以比表面积表示)和石膏掺量等参数对灌浆料性能的影响规律,并对其配合比进行优化.采用扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)和X射线衍射仪(XRD)等探究灌浆料的微观结构形成机理,以期低收缩早强型灌浆料的制备提供一定的理论依据和技术支持.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用42.5级硫铝酸盐水泥和P·Ⅱ 42.5级硅酸盐水泥.石膏中CaSO₄含量不低于90 %.复合掺合料由优质粉煤灰(比表面积820 m²/kg)与磨细大理石粉(比表面积700 m²/kg)按质量比1:3、2:2、3:1和4:0调配而成,比表面积分别为730、760、790、820 m²/kg.硅灰(SF)中SiO₂含量97 %,比表面积17 300 m²/kg.胶凝材料的化学组成如表1所示.细骨料采用连续级配机制砂,由3个粒径范围组成,分别为0.15~0.30、0.30~0.60、0.60~1.18 mm.聚羧酸减水剂(WRA)的减水率为30 %.消泡剂(DE)为P803型白色粉末.拌和水为城市自来水.

表1 胶凝材料的化学组成
Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	w/%							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
CSA	39.70	13.80	27.30	3.51	2.23	0.64	10.90	1.08
P·Ⅱ	62.80	21.70	5.45	3.41	2.19	1.50	2.29	0.28
G	46.40	1.32	1.83	2.27	0.62	0.12	46.52	0.27
COAD	12.60	44.81	30.51	4.83	1.84	1.68	1.38	1.40
SF	0.77	97.00	0.36	0.65	0.42	0.48	0.15	0.16

1.2 试验设计与方法

根据前期探索性试验,确定水胶比0.2,胶砂比1.1,复合掺合料总掺量45.0 %,石膏掺入形式为外掺.依据密实堆积理论并通过试验优化途径确定灌浆料的基准配合比,如表2所示.

表2 灌浆料的基准配合比
Table 2 Basic mix proportions of grouting materials

Sample No.	Mix proportion/%						$m_{\text{CSA}}/m_{\text{P·Ⅱ}}$	Specific surface area of COAD/(m ² ·kg ⁻¹)
	CSA	P·Ⅱ	G	SF	WRA	DE		
A0	0	55.0	0	0	4.0	0.1	0:10	790
A1	5.5	49.5	0	0	4.0	0.1	1:9	790
A2	11.0	44.0	0	0	4.0	0.1	2:8	790
A3	16.5	38.5	0	0	4.0	0.1	3:7	790
B1	5.5	49.5	0	0	4.0	0.1	1:9	730
B2	5.5	49.5	0	0	4.0	0.1	1:9	760
B3	5.5	49.5	0	0	4.0	0.1	1:9	790
B4	5.5	49.5	0	0	4.0	0.1	1:9	820
C1	5.5	49.5	1.0	0	4.0	0.1	1:9	790
C2	5.5	49.5	3.0	0	4.0	0.1	1:9	790
C3	5.5	49.5	5.0	0	4.0	0.1	1:9	790
C4	5.5	49.5	7.0	0	4.0	0.1	1:9	790
C5	5.5	49.5	9.0	0	4.0	0.1	1:9	790
D0	5.5	49.5	0	5.0	4.0	0.1	1:9	790

首先以硫铝酸盐水泥和硅酸盐水泥构建 CSA+P·II 二元体系,分析水泥复配比例对灌浆料性能的影响,以此为基础确定复合掺合料的最优细度;再掺入石膏,形成 CSA+P·II+G 三元复合体系,分析石膏掺量对灌浆料性能的影响;最后确定灌浆料的最优配合比.硅灰具有较高的活性,对提高灌浆料的早期强度有益^[9],为体现石膏的性能优势,本试验还以硅灰替代石膏进行了对比分析.

灌浆料的各项性能测试依据 JG/T 408—2019《钢筋连接用套筒灌浆料》进行.对最优配合比灌浆料取样进行 SEM-EDS 和 XRD 测试,以分析灌浆料的微观结构形成机理.

2 结果与讨论

2.1 灌浆料的凝结时间

凝结时间是灌浆料能否成功应用的前提条件,表3为灌浆料的凝结时间.由表3可见:

(1)掺入硫铝酸盐水泥使灌浆料的凝结时间大幅缩短,尤其当水泥复配比例为2:8(试样A2)和3:7(试样A3)时,其初凝时间、终凝时间均分别低于30、50 min.表明随着硫铝酸盐水泥占比的提高,复配水泥水化逐渐加快,因此凝结时间均低于未掺硫铝酸盐水泥的灌浆料.

(2)复合掺合料细度对灌浆料初凝时间和终凝时间的影响较小;随着石膏掺量的增大,灌浆料的凝结时间逐渐缩短;试样C3的初凝时间和终凝时间分别为96、123 min,而以相同掺量的硅灰替代石膏(试样D0)后,灌浆料的初凝时间和终凝时间缩短至70、100 min,其原因在于硅灰的颗粒极细,火山灰活性较高,水化迅速,从而导致灌浆料的凝结时间缩短.

表3 灌浆料的凝结时间

Table 3 Setting time of grouting materials

Sample No.	Setting time/min		Sample No.	Setting time/min	
	Initial	Final		Initial	Final
A0	450	540	B4	93	117
A1	99	124	C1	102	129
A2	28	44	C2	97	126
A3	19	32	C3	96	123
B1	88	115	C4	89	121
B2	90	119	C5	84	115
B3	99	124	D0	70	100

2.2 灌浆料的工作性

2.2.1 水泥复配比例的影响

图1为水泥复配比例对灌浆料工作性的影响.由

图1可见:随着硫铝酸盐水泥占比的提高,灌浆料的初始流动度逐渐降低,30 min流动度下降幅度较大;当水泥复配比例为2:8(试样A2)、3:7(试样A3)时,灌浆料的经半时损失较大,仅为255、240 mm,低于 JG/T 408—2019 的指标值(260 mm);当水泥复配比例为1:9(试样A1)时,灌浆料的初始流动度和30 min流动度与试样A0接近,均能达到指标值以上.这是由于硫铝酸盐水泥自身凝结硬化快,过量硫铝酸盐水泥使灌浆料的初始流动度降低、经半时损失变大.

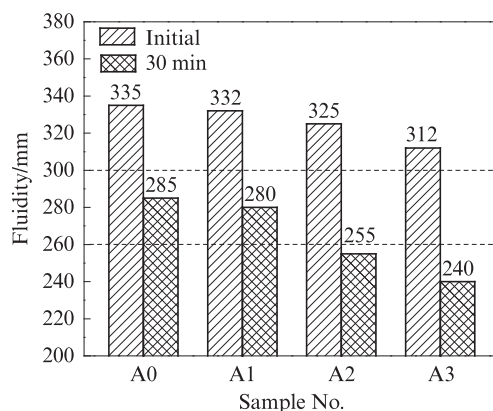


图1 水泥复配比例对灌浆料工作性的影响

Fig. 1 Effect of cement compounding ratio on workability of grouting materials

2.2.2 复合掺合料细度的影响

图2为复合掺合料细度对灌浆料工作性的影响.由图2可见:随着复合掺合料比表面积的增加,灌浆料的初始流动度和30 min流动度均逐渐增大,且未出现离析泌水现象;除试样B1的30 min流动度略低外,其他3种灌浆料的30 min流动度均满足 JG/T 408—2019 的指标值.其原因在于复合掺合料的比表面积越大,其颗粒粒径越小,细小颗粒可以填充水泥粗颗粒间的空隙,释放自由水,进而提高灌浆料的流动性.同时,复合掺合料中优质粉煤灰的形态效应得

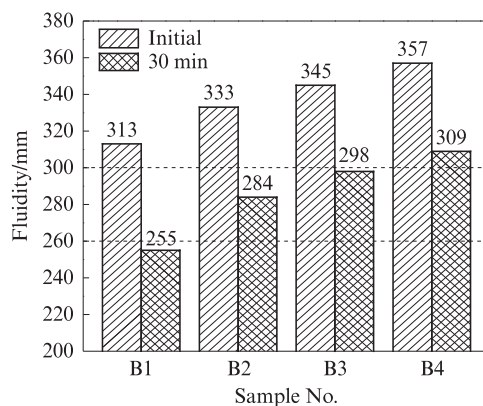


图2 复合掺合料细度对灌浆料工作性的影响

Fig. 2 Effect of fineness of composite admixture on workability of grouting materials

以充分发挥,进一步改善了灌浆料的工作性^[10].

2.2.3 石膏和硅灰掺量的影响

图3为石膏和硅灰掺量对灌浆料工作性的影响.由图3可见:6种石膏掺量下,灌浆料的初始流动度均能达到340 mm以上,30 min流动度也均超过260 mm,经半时损失较小;试样C3的初始流动度和30 min流动度分别达到350、305 mm;以相同掺量的硅灰替代石膏(试样D0)后,灌浆料的初始流动度和30 min流动度急剧降低,表明硅灰对灌浆料流动性的影响较大.由于硅灰是一种比表面积很大的颗粒材料,其平均粒径只有 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$,具有极强的吸水性,当颗粒表面吸附灌浆料中的大量自由水后,会增

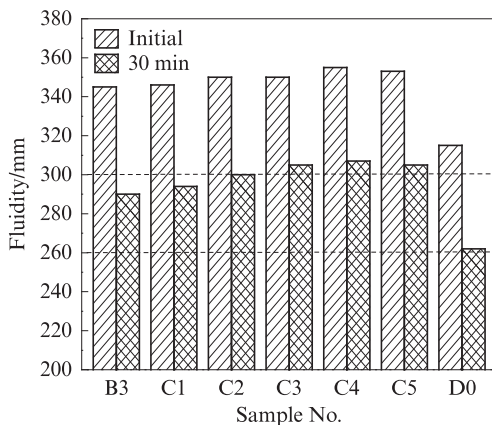
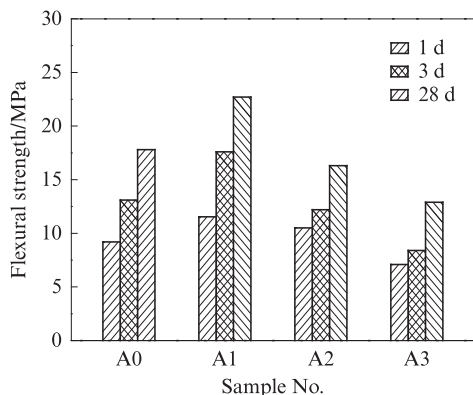
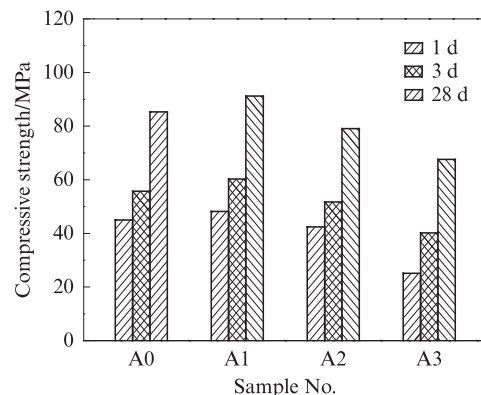


图3 石膏和硅灰掺量对灌浆料工作性的影响
Fig. 3 Effect of gypsum and silica fume content on workability of grouting materials



(a) Flexural strength



(b) Compressive strength

图4 水泥复配比例对灌浆料力学性能的影响

Fig. 4 Effect of cement compounding ratio on mechanical property of grouting materials

2.3.2 复合掺合料细度和硅灰的影响

图5为复合掺合料细度和硅灰对灌浆料力学性能的影响.由图5可见:

(1)随着复合掺合料比表面积的增大,灌浆料各龄期的抗折强度先升高后降低,早期抗压强度呈下降趋势,后期抗压强度则先升高后降低;随着龄期的

大灌浆料的黏度,使其流动性下降^[11].此外,尽管硅灰的加入能够改善水泥基材料的性能,但由于其粒径极小,在浆体中很容易发生团聚^[12],且水胶比越低,团聚体越不易分散,可能会对灌浆料的工作性带来不利影响.

2.3 灌浆料的力学性能

2.3.1 水泥复配比例的影响

图4为水泥复配比例对灌浆料力学性能的影响.由图4可见:

(1)随着硫铝酸盐水泥占比的增加,灌浆料各龄期的抗折强度与抗压强度均呈先上升后降低的趋势;当水泥复配比例为1:9(试样A1)时,其1、3、28 d抗折强度与抗压强度均高于试样A0,且满足JG/T 408—2019的指标值.

(2)与试样A1相比,当水泥复配比例超过1:9时,试样A2和试样A3的抗折强度与抗压强度骤降,表明水泥复配比例对灌浆料各龄期的力学性能影响显著.其原因在于硫铝酸盐水泥的掺入提高了浆体早期的水化速率,形成了大量的钙矾石(AFT).同时,由于水化反应及所生成的胶体物质吸水,导致体系的耗水速率加快.当硫铝酸盐水泥占比过大时,由于体系失水较快,原水占据的空间未能被固相物质及时填充,形成了较多的孔隙.此外,体系的pH值也会因为硫铝酸盐水泥的掺入而降低,对粉煤灰的二次水化反应不利^[13].因此,当水泥复配比例超过1:9时,灌浆料的强度骤降.

增长,复合掺合料的火山灰效应得以充分发挥,灌浆料的后期强度逐渐提高.

(2)以5.0%硅灰替代石膏降低了灌浆料的强度,试样D0的28 d抗压强度较试样B3降低约10 MPa.研究表明^[14-15],水胶比越大,火山灰反应持续时间越长,硅灰的火山灰反应程度越高.本试验

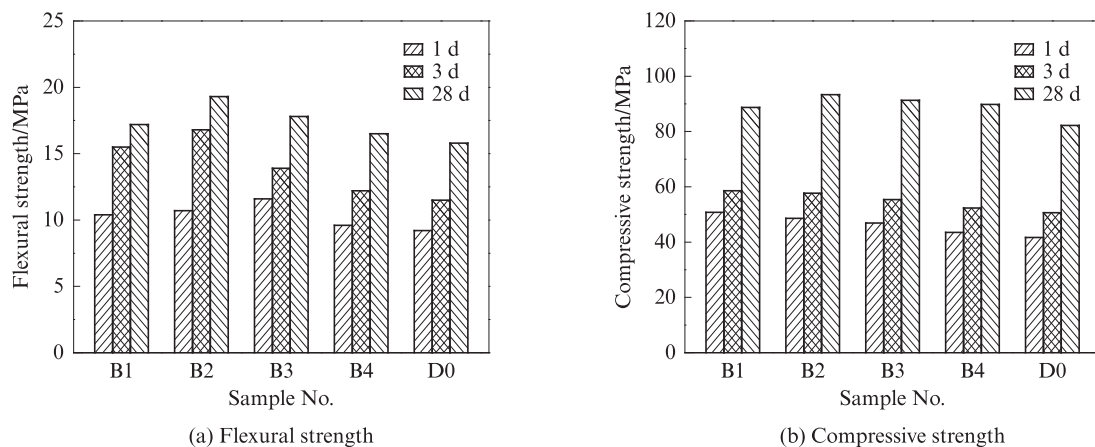


图5 复合掺合料细度和硅灰对灌浆料力学性能的影响

Fig. 5 Effect of fineness of composite admixture and silica fume on mechanical property of grouting materials

的水胶比较低,不能为硅灰反应提供更多的水,火山灰反应的持续时间较短,其反应程度受到了一定的阻碍.此外,硅灰的加入降低了灌浆料的流动性,也会使灌浆料基体的密实程度有所下降.因此,在本试验条件下,以5.0%硅灰替代石膏并未能使灌浆料的强度得到有效提高.

2.3.3 石膏掺量的影响

图6为石膏掺量对灌浆料力学性能的影响.由图6可见:

(1)随着石膏掺量的增加,灌浆料的抗折强度与抗压强度先升高后降低.当石膏掺量为5.0%(试样C3)时,灌浆料的1、3 d抗折强度分别达到12.5、

20.9 MPa,1、3 d抗压强度分别达到60.1、75.5 MPa,均满足JG/T 408—2019的指标值.表明适量石膏的掺入加速了复合体系的早期水化反应^[16],体系内生成的大量针棒状AFt晶体相互交错搭接,构成了网状骨架,对灌浆料强度的稳定发展有利.

(2)当石膏掺量超过5.0%(试样C4和试样C5)时,灌浆料的28 d强度明显下降.这是因为过量石膏的掺入会导致AFt的生成量增加并迅速积聚在一起,所形成的浆体结构不利于灌浆料强度的发展.尤其当石膏在早期不能完全反应时,后期还会生成延迟AFt及二次石膏,使得灌浆料的抗压强度降低^[17].

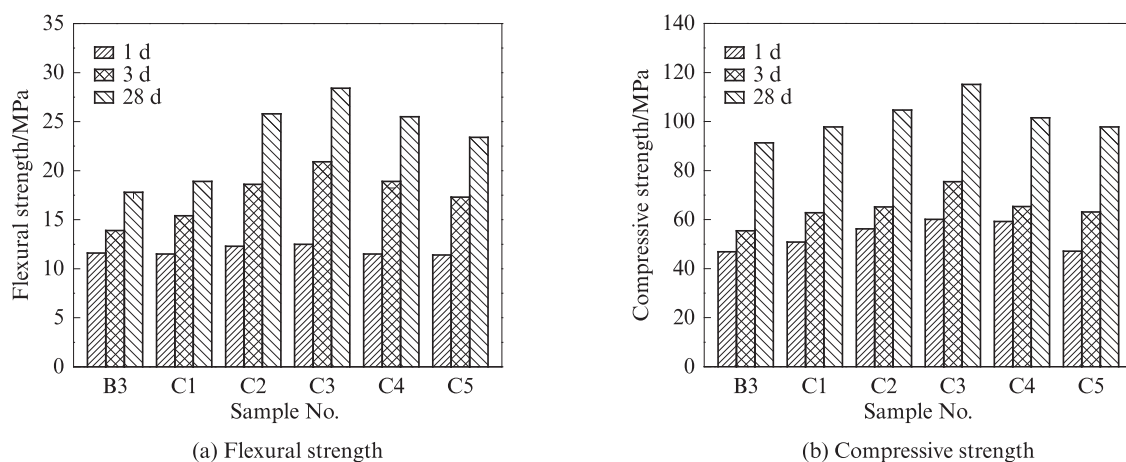


图6 石膏掺量对灌浆料力学性能的影响

Fig. 6 Effect of gypsum content on mechanical property of grouting materials

2.4 灌浆料的收缩性能

2.4.1 水泥复配比例的影响

图7为水泥复配比例对灌浆料收缩性能的影响.由图7可见:随着硫铝酸盐水泥占比的提高,灌浆料的自收缩率和干燥收缩率均逐渐减小;试样A0的自收缩率和干燥收缩率最大,尤其是其10 d内自收缩

率和干燥收缩率的涨幅较大.综合考虑水泥复配比例对灌浆料凝结时间、工作性、力学性能和收缩性能的影响,确定灌浆料最优配合比中硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥的复配比例为1:9.

2.4.2 复合掺合料细度的影响

图8为复合掺合料细度对灌浆料收缩性能的影响

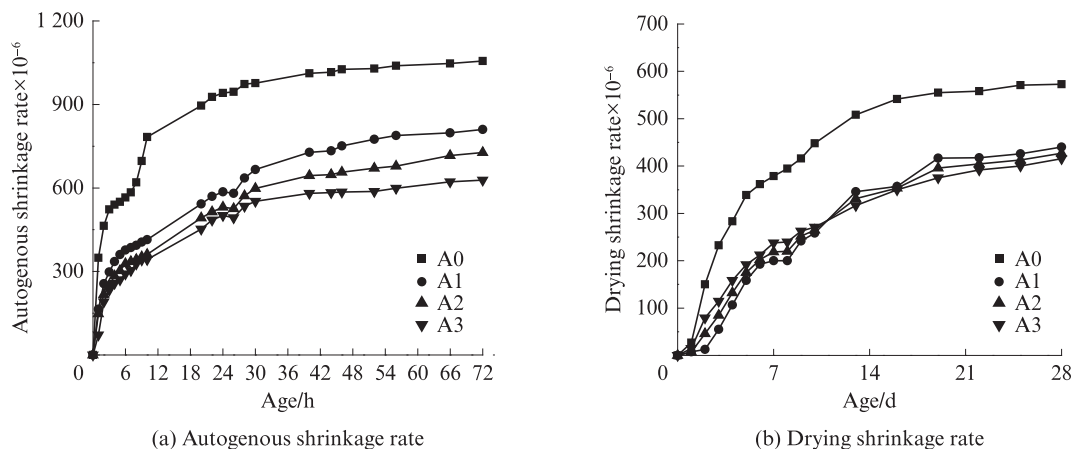


图7 水泥复配比例对灌浆料收缩性能的影响

Fig. 7 Effect of cement compounding ratio on shrinkage characteristics of grouting materials

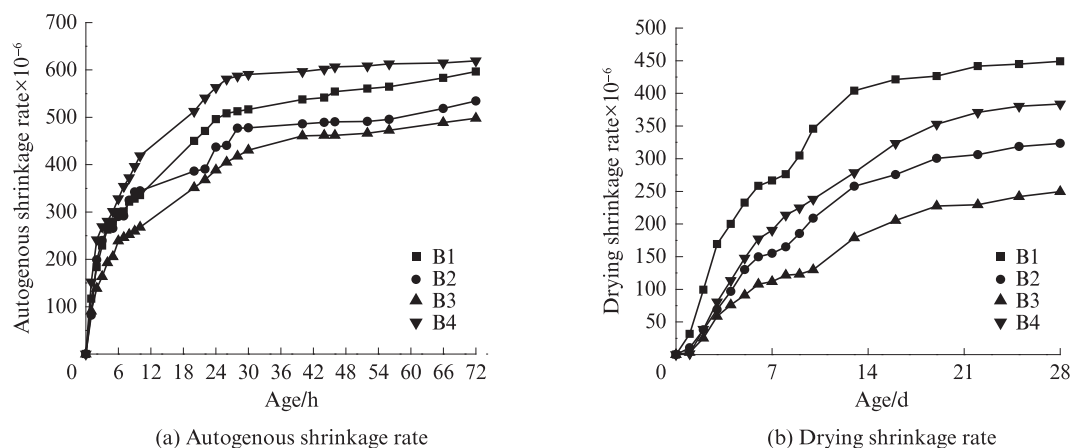


图8 复合掺合料细度对灌浆料收缩性能的影响

Fig. 8 Effect of fineness of composite admixture on shrinkage characteristics of grouting materials

响.由图8可见:灌浆料的自收缩率和干燥收缩率均随复合掺合料比表面积的增加先降低再升高;比表面积为 $790 \text{ m}^2/\text{kg}$ 时,灌浆料的自收缩率和干燥收缩率最低,表明复合掺合料存在一个最优细度.适宜细度的优质粉煤灰与磨细大理石粉可以充分发挥微集料效应,改善灌浆料的孔结构,使灌浆料的收缩率大幅降低,但当其比表面积过高时也会带来负面效应.综合考虑灌浆料的各项性能,确定灌浆料最优配合比中复合掺合料的比表面积为 $790 \text{ m}^2/\text{kg}$.

2.4.3 石膏和硅灰掺量的影响

图9为石膏和硅灰掺量对灌浆料收缩性能的影响.由图9可见:

(1)随着石膏掺量的增加,灌浆料的自收缩率先降低后升高,石膏掺量为 5.0% (试样C3)时灌浆料的自收缩率最小,3 d自收缩率仅为 351.39×10^{-6} ,较试样C1降低了 41.5% .其原因在于适量石膏水化反应生成的AFt晶体吸水产生微膨胀,在一定程度上减小了灌浆料的自收缩^[18].但当石膏掺量超过 5.0% (试样C4和试样C5)后,灌浆料的自收缩率反而增大,这

是由于过量石膏发生了团聚现象,未能充分水化生成AFt晶体,导致灌浆料的自收缩变大.石膏掺量对灌浆料的干燥收缩影响较小,当石膏掺量为 5.0% (试样C3)时,灌浆料的28 d干燥收缩率为 239.75×10^{-6} .

(2)试样D0的自收缩率和干燥收缩率较大,其3 d的自收缩率和28 d的干燥收缩率分别为 855.36×10^{-6} 和 603.92×10^{-6} ,表明以 5.0% 硅灰替代石膏增大了灌浆料的收缩率.原因可能在于硅灰颗粒极细,其巨大的比表面积能够为水化产物提供更多的成核表面,从而对胶凝体系的水化反应产生一定的促进作用^[19],水化反应越快,浆体的自收缩和干燥收缩越大.综合分析硅灰对凝结时间、工作性、力学性能和收缩性能的影响,可见硅灰的负面效应较高.考虑到灌浆料的制备成本,确定其最优配合比中的石膏掺量为 5.0% ,不掺硅灰.

综合以上各因素对灌浆料凝结时间、工作性、力学性能和收缩性能的影响,确定试样C3的配合比为三元复合体系制备低收缩早强型灌浆料的最优配合比.

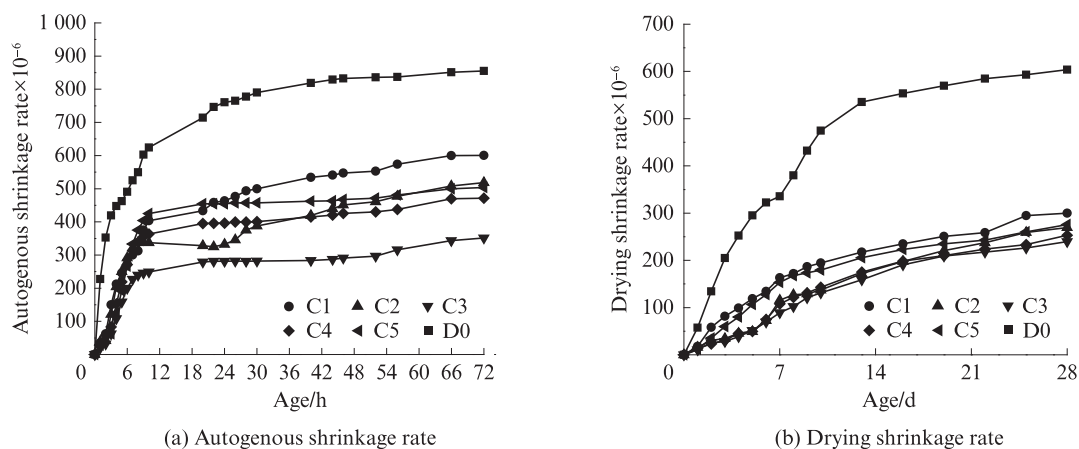


图9 石膏和硅灰掺量对灌浆料收缩性能的影响

Fig. 9 Effect of gypsum and silica fume content on shrinkage characteristics of grouting materials

2.5 灌浆料的微观结构形成机理

2.5.1 SEM-EDS分析

最优配合比灌浆料的SEM图像如图10所示。由图10可见:水化1 d时,大量短棒状AFt晶体和絮凝状水化硅酸钙(C-S-H)凝胶稳定生长,水化产物结构较疏松;水化3 d时,短棒状AFt晶体逐渐长成针棒状,且明显变得粗大,C-S-H凝胶也持

续增长,两者交叉连接形成致密结构,其与同时生成的片状Ca(OH)₂晶体保障了浆体的早期强度不断提高;水化28 d时,灌浆料内部生成了大量异向分布的细针状AFt,晶体形状更为细长,且相互交错搭接构成致密的晶体骨架,硬化浆体中的残余水分减少,AFt的微膨胀作用使灌浆料的收缩变形逐渐变小。

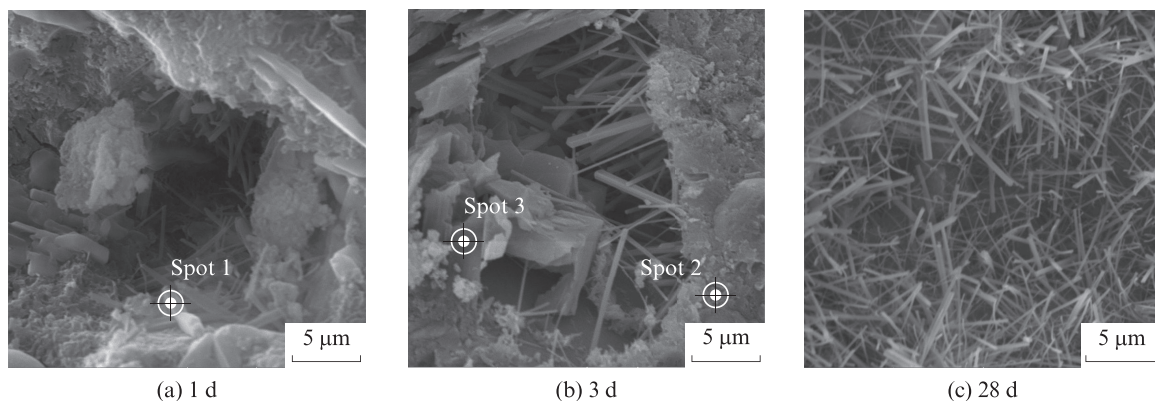


图10 最优配合比灌浆料的SEM图像

Fig. 10 SEM images of grouting material with optimal mix proportion

硫铝酸盐水泥水化较快,在适量石膏作用下生成大量的AFt晶体,提供了灌浆料的早期强度。此外,本试验采用较低的水胶比,胶凝材料在最优颗粒级配的条件下可达到物理填充的均匀密实状态,水化生成的C-S-H凝胶填充于AFt晶体骨架中,使灌浆料的结构更加致密,促进并保证了后期强度的增长。AFt作为硫铝酸盐水泥主要的水化产物,具有一定的微膨胀性,其在很大程度上抑制了灌浆料的收缩变形。

对图10中的点1、2、3进行EDS分析,探测点的元素组成如表4所示(表中 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 为钙硅比)。由表4可见:点1所在的针棒状晶体为AFt;点2包含的

表4 探测点的元素组成

Table 4 Elemental compositions of detected spots

Spot	At/%					$n(\text{Ca})/n(\text{Si})$
	O	Al	Si	S	Ca	
1	63.72	6.46	4.99	4.71	16.76	3.34
2	69.13	2.79	9.20	2.23	14.51	1.58
3	75.58	0	0	0	23.34	0

主要元素有O、Ca和Si,其 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})=1.58$,由于C-S-H凝胶的 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 值在0.8~1.7之间^[20],并结合出现的较多无定形簇状凝胶产物的元素种类和含量可知,该物相为C-S-H凝胶;点3包含的主要元素有O和Ca,可确定该片状晶体产物为Ca(OH)₂。

2.5.2 XRD分析

图11为水化28 d时最优配合比灌浆料的XRD图谱.由图11可见,灌浆料的水化产物主要有AFt和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,以及无定形的C-S-H凝胶.当三元复合体系中有适量石膏存在时,反应生成AFt晶体骨架,水泥熟料水化后生成的C-S-H凝胶填充在晶体骨架中,形成致密和低孔隙率的灌浆料基质.针棒状的AFt与片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体紧密结合,相互交织形成致密的网状结构,使得灌浆料具有较高的早期强度,而持续生成的C-S-H凝胶保障了后期强度的发展.AFt的微膨胀作用可以使硬化浆体内部的收缩降低,从而使灌浆料具备早强、高强和低收缩特性.

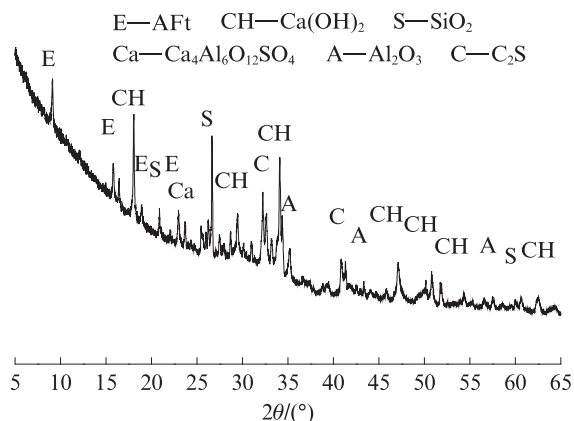


图11 水化28 d时最优配合比灌浆料的XRD图谱

Fig. 11 XRD pattern of grouting material with optimal mix proportion hydrated for 28 d

3 结论

(1)灌浆料的最优配合比:水胶比0.2、胶砂比1.1、硫铝酸盐水泥掺量5.5%、硅酸盐水泥掺量49.5%、石膏掺量5.0%(外掺)、复合掺合料掺量45.0%(比表面积 $790 \text{ m}^2/\text{kg}$)、减水剂掺量4.0%、消泡剂掺量0.1%.

(2)根据最优配合比制备的灌浆料1、3 d抗压强度为60.1、75.5 MPa,3 d自收缩率为 351.39×10^{-6} ,28 d干燥收缩率为 239.75×10^{-6} ,同时达到了低收缩和早强的要求.以5.0%硅灰替代石膏后,灌浆料的强度降低,收缩增大,呈现出明显的负面效应.

(3)钙矾石(AFt)和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的稳定生长使灌浆料具有较高的早期强度,C-S-H凝胶还能促进灌浆料后期强度的发展.针棒状的AFt与片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体紧密结合,AFt的微膨胀作用使灌浆料的收缩变形逐渐变小,进一步保障了其早强、高强和低收缩特性.

参考文献:

- [1] 刘云霄, 在引引, 田威, 等. 不同膨胀剂对水泥基灌浆料的性能影响[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)
- [2] 叶显, 吴文选, 候维红, 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 material[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 950-955. (in Chinese)
- [3] 张勇, 田文丽, 马超然, 等. 我国水泥基灌浆料材料研究进展[J]. 混凝土, 2018(6): 124-126.
ZHANG Yong, TIAN Wenli, MA Chaoran, et al. Research progress of cement-based grouting materials in China[J]. Concrete, 2018(6): 124-126. (in Chinese)
- [4] 芦令超, 常钧, 叶正茂, 等. 硫铝酸盐与硅酸盐矿物合成高性能水泥[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 57-62.
LU Lingchao, CHANG Jun, YE Zhengmao, et al. Synthesis of high performance cement by using silicate and sulphoaluminate minerals[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1): 57-62. (in Chinese)
- [5] ZHOU F, SUN W B, SHAO J L, et al. Experimental study on nano silica modified cement base grouting reinforcement materials[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 20(1): 67-73.
- [6] 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(3): 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 Report, 2016, 30(3): 123-129. (in Chinese)
- [7] 李伟, 王高明, 江芸, 等. 硅酸盐-硫铝酸盐复合水泥体系物理性能及水化机理研究[J]. 材料导报, 2014, 28(2): 407-409.
LI Wei, WANG Gaoming, JIANG Yun, et al. Research of physical properties and hydration mechanism of silicate-sulphoaluminate cement compound system[J]. Materials Report, 2014, 28(2): 407-409. (in Chinese)
- [8] ZHANG G F, QIU D W, WANG S X, et al. 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: 118204.
- [9] WU Z M, KAMAL K H, SHI C J. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105786.
- [10] GAO Y, JING H W, FU G P, et al. Studies on combined effects of graphene oxide-fly ash hybrid on the workability, mechanical performance and pore structures of cementitious grouting under high W/C ratio[J]. Construction and Building Materials, 2021,

- 281;122578.
- [11] 柯杨,李天水,谷倩,等.高性能水泥基灌浆料配合比设计的实践与验证[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3154-3160,3172.
KE Yang, LI Tianshui, GU Qian, et al. Practice and verification of mix proportion design of high performance cement-based grouting material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(10): 3154-3160, 3172. (in Chinese)
- [12] 赵雯.硅灰对水泥基材料水化及微观结构影响的模拟研究[D].长沙:湖南大学,2019.
ZHAO Wen. Study on the effect of silica fume on hydration and microstructure of cementitious materials by numerical simulation [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [13] 宋帮红,闵凡路,张建峰,等.三乙醇胺和快硬硫酸盐水泥对盾构壁后注浆浆体性能的影响[J].硅酸盐学报,2022,50(11):2886-2896.
SONG Banghong, MIN Fanlu, ZHANG Jianfeng, et al. Influence of triethanolamine and rapid hardening sulfoaluminate cement on performance of backfill grouting in shield engineering [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(11): 2886-2896. (in Chinese)
- [14] 李凯,赵雯,史才军.计算机模拟在水泥水化及微观结构演化研究的应用进展[J].硅酸盐学报,2022,50(2):533-543.
LI Kai, ZHAO Wen, SHI Caijun. Review on modeling of hydration process and microstructure development of cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2): 533-543. (in Chinese)
- [15] WANG X Y. Properties prediction of ultra high performance concrete using blended cement hydration model[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 1-10.
- [16] WU J, LIU L, DENG Y F, et al. Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 909-921.
- [17] 霍世金.硅酸盐水泥-铝酸盐水泥-石膏三元复合胶凝材料试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
HUO Shijin. Experimental study on the ternary composite cementing material of Portland cement-aluminate cement-gypsum [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] 王培铭,孙磊,徐玲琳,等.硅酸盐水泥与铝酸盐水泥混合体系的研究和应用[J].材料导报,2013,27(1):139-143.
WANG Peiming, SUN Lei, XU Linglin, et al. Research and application of blends of Portland cement and calcium aluminate cement [J]. Materials Report, 2013, 27(1): 139-143. (in Chinese)
- [19] PAPADAKIS V G. Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 79-86.
- [20] ZARZUELA R, LUNA M, CARRASCOSA L M, et al. Producing C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 130: 106008.