

文章编号:1007-9629(2021)05-0930-07

快硬硫铝酸盐水泥在3D打印材料中的应用

楚宇扬¹, 徐金涛¹, 刘 焯², 张 普¹, 汤 意³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 将快硬硫铝酸盐水泥(R·SAC)掺加到普通硅酸盐水泥(P·O)中得到混合水泥, 以改善P·O 3D打印材料凝结时间长、早期强度低的缺点, 系统研究了R·SAC掺量对其凝结时间、力学性能、流动性和堆积性的影响。结果表明: 当R·SAC掺量为14%~20%时, 促凝效果明显, 有效降低了混合水泥净浆、砂浆的凝结时间, 混合水泥净浆的初凝时间可以控制在40~70 min, 满足3D打印的要求; 掺加R·SAC可以提高材料的流动性, 当R·SAC掺量为20%时, 混合水泥砂浆的流动度比P·O砂浆提高了11 mm, 稠度提高了15 mm; 当混合水泥砂浆的流动度在160~175 mm时, 可以满足3D打印材料的堆积性要求; 掺加少量R·SAC对混合水泥砂浆的早期强度有一定的提升, 但是其后期强度有所降低。

关键词: 3D打印; 硫铝酸盐水泥; 凝结时间; 流动性; 堆积性; 力学性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.005

Application of Rapid Hardening Sulphoaluminate Cement in 3D Printing Material

CHU Yuyang¹, XU Jintao¹, LIU Ye², ZHANG Pu¹, TANG Yi³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By adopting the method of mixing rapid hardening sulphoaluminate cement (R·SAC) with ordinary Portland cement (P·O) to improve the shortcomings of long setting time and low early strength of P·O 3D printing material, the effect of the R·SAC content on its setting time, mechanical property, fluidity and stacking performance was systematically studied. The results show that when the R·SAC content is 14%–20%, R·SAC has obvious effect of accelerating setting, and the setting time of cement paste and mortar has been effectively reduced, the initial setting time of the mixed cement paste can be controlled between 40–70 minutes, which meets the requirements of 3D printing. At the same time, the addition of R·SAC can improve the fluidity of the material. When the R·SAC content is 20%, the fluidity of the mixed cement mortar can be increased by 11 mm and the consistency by 15 mm compared to the P·O mortar. The fluidity of mixed cement mortar can meet the stacking performance requirements of 3D printing materials within 160–175 mm. The addition of a small amount of R·SAC has a certain improvement in the early strength of the mixed cement mortar, but its later strength has been reduced.

Key words: 3D printing; sulphoaluminate cement; setting time; fluidity; stacking performance; mechanical property

收稿日期: 2020-05-31; 修订日期: 2020-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1904177); 交通部重点研发项目(2018-MS5-136); 河南省交通运输科技计划项目(2018J2, 2019J-2-10, 2020J-2-7)

第一作者: 楚宇扬(2000—), 男, 河南鹿邑人, 郑州大学本科生. E-mail: chuyuyang2000@163.com

通讯作者: 张 普(1982—), 男, 河南周口人, 郑州大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhpu@zzu.edu.cn

3D打印技术具有安全、环保、智能化、精准化、施工效率高等优点,在建筑领域有着广泛的应用前景^[1-3].但是,3D打印技术在材料方面有着较高的要求,需要有适宜的流动性、堆积性、较快的凝结时间以及较高的早期强度,使材料能够顺利地从打印机中挤出并堆积成建筑结构^[4].另外,由于3D打印建筑中缺少钢筋骨架的支撑,所采用的胶凝材料需要具有较高的强度,以承受外界的荷载^[5].常规3D打印材料如光敏树脂、工程塑料、金属陶瓷等,由于成本、技术和实用性的问题,不适用于建筑领域.硅酸盐水泥基胶凝材料作为正在使用的一大类建筑材料,强度高、耐久性好、自凝性好、成本低,具有通过轮廓技术打印成型的潜力^[1,6].

传统普通硅酸盐水泥(P·O)凝结时间过长,难以满足3D打印材料所需要的快凝特性.快硬硫铝酸盐水泥(R·SAC)具有快硬、早强的优点,但产量少,价格昂贵,且凝结时间过快,作为打印材料时通常需要添加缓凝剂.由此可见,2种水泥单独作为打印材料使用时,均存在较为明显的缺陷.结合2种水泥材料各自的特点,通过混合制备的方式调节其凝结时间逐渐引起了学者的关注.目前,已有一些研究通过混合P·O和R·SAC来制备具有较短凝结时间、良好和易性和较高强度的复合胶凝砂浆,并将其用于工程修补.研究表明,R·SAC与P·O混合可以加快水化速度,缩短凝结时间,降低收缩率,但力学性能会随着R·SAC掺量(质量分数,文中涉及的泌水率、水胶

比等除特别说明外均为质量分数或质量比)的增加而降低^[7-11].当R·SAC掺量小于20%时,混合水泥的凝结时间显著降低,对力学性能影响不大,甚至可能会有所提升;当R·SAC掺量大于20%时,随着R·SAC掺量的增加,混合水泥凝结时间的降低并不明显,力学性能也会逐渐下降^[8,11].

由此可见,少量R·SAC与P·O混合应用于3D打印中具有一定的可行性.本文通过在P·O中掺加适量的R·SAC,形成一种凝结时间快、早期强度高的3D打印水泥基材料,实现混合水泥凝结时间的可控.对不同R·SAC掺量的混合水泥进行凝结时间与力学性能测试,探究适宜3D打印的R·SAC掺量,并通过流动性和堆积性试验确定合适的混合水泥砂浆流动度.同时,针对减水剂对混合水泥砂浆流动性的影响进行了分析.

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为42.5普通硅酸盐水泥与42.5快硬硫铝酸盐水泥,其物理力学性能与化学组成见表1.2.砂子采用天然细河砂.掺和料为1 600~1 700 kg/m³的硅微粉.流变剂为10万黏度的羟丙基纤维素(HPMC),以减少打印材料的泌水率,提高材料层与层之间的黏结强度^[12].减水剂(WRA)采用减水率大于30%聚羧酸系高效减水剂,呈粉红色粉末态,用于调节打印材料的工作性能.PVA纤维长度为12 mm,直径为15 μm.

表1 P·O和R·SAC的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of P·O and R·SAC

Cement	Water requirement of normal consistency (by mass)/%	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
			Initial	Final	1 d	3 d	1 d	3 d
P·O	28.0	363	223	347	5.7			28.9
R·SAC	24.6	350	13	17	6.3	7.2	32.3	45.3

表2 P·O和R·SAC的化学组成
Table 2 Chemical compositions of P·O and R·SAC

Cement	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	IL
P·O	23.60	5.47	3.32	56.86	3.62	2.16		2.60
R·SAC	8.82	30.85	1.02	44.98	1.61	8.92	1.85	0.22

1.2 凝结时间

参考GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》,使用维卡仪测定混合水泥净浆的初凝与终凝时间.2种水泥的配比如表3所示,其中编号中的数字为混合水泥中的R·SAC掺

量.砂浆凝结时间测试参考GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》.

表3 混合水泥净浆配比
Table 3 Mix proportions of mixed cement pastes

Test number	R-0	R-5	R-8	R-11	R-14	R-17	R-20	R-23	R-26	R-29
R·SAC	0	5	8	11	14	17	20	23	26	29
P·O	100	95	92	89	86	83	80	77	74	71

1.3 力学性能

力学性能测试参考GB/T 17671—1999《水泥胶

砂强度检验方法(ISO法)》.将材料放进胶砂搅拌机内进行搅拌,每组试验浇筑3块尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的试件,振捣完成后常温养护,1 d后脱模并放入水中养护至7、14、28 d龄期,分别测试其力学性能.

1.4 流动性

砂浆稠度、净浆流动度和胶砂流动度都可以用来表征水泥基材料的流动性.就不同水灰比而言,净浆流动度结果的差异很小,难以有效区分,表征效果一般.砂浆稠度和胶砂流动度的结果区分度高,表征效果较好^[13].因此,本试验采用砂浆稠度和胶砂流动度来测试打印材料的流动性.流动度测试参考GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》,稠度测试参考JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》.

1.5 堆积性

堆积性能反映打印材料承受其自重以及上部打印材料压力的性能.本试验采用胶枪(见图1)手动挤压的方式来模拟打印过程,喷嘴的尺寸为15 mm×41 mm.

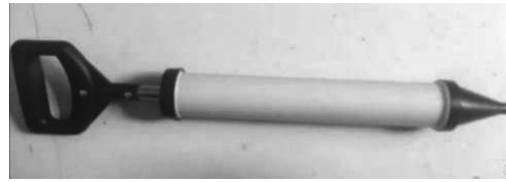


图1 打印胶枪
Fig. 1 Print glue gun

通过测定承受压力最大的第1层的变形量来衡量堆积性.首先挤出1层打印材料,测量事先选定的3个断面的平均宽度 d_1 ;之后在1 min内快速堆叠4层打印材料,间隔5 min后再次测量第1层选定断面的平均宽度 d_2 ,并根据式(1)计算出底层材料的相对变形量 D .

$$D = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \times 100\% \quad (1)$$

砂浆凝结时间、力学性能、流动性和堆积性试验所用砂浆配合比见表4.其中减水剂掺量以胶凝材料总质量(水泥+硅微粉)计,其余以水泥质量计.

表4 砂浆配合比
Table 4 Mix proportions of mortars

Test number	w(R·SAC)/%	w(P·O)/%	Other	Test number	w(WRA)/%	Other
M-1	0	100		W-1	0	
M-2	5	95	w(silicon powder)=11.00%;	W-2	0.05	m(R·SAC):
M-3	8	92	w(water)=41.00%;	W-3	0.10	m(P·O)=14:86;
M-4	11	89	w(sand)=89.00%;	W-4	0.15	w(silicon powder)=11.00%;
M-5	14	86	w(HPMC)=0.20%;	W-5	0.20	w(water)=41.00%;
M-6	17	83	w(WRA)=0.30%;	W-6	0.25	w(sand)=89.00%;
M-7	20	80	w(PVA)=0.20%	W-7	0.30	w(HPMC)=0.20%;
				W-8	0.35	w(PVA)=0.20%
				W-9	0.40	

2 结果与分析

2.1 混合水泥净浆凝结时间

图2为10组水泥净浆在标准稠度用水量下的凝结时间.由图2可见:(1)掺加R·SAC可以有效地缩短水泥净浆的凝结时间.这是由于R·SAC中的硫铝酸钙促进了水泥中钙矾石(Aft)和铝胶的生成,同时又消耗掉了Ca(OH)₂,降低了水泥浆体的碱度,加快了P·O中C₃S和C₂S水化生成C-S-H的速度,从而促进了水泥的水化进程,缩短了凝结时间^[8].(2)当R·SAC掺量小于20%时,随着R·SAC掺量的增加,混合水泥净浆的初凝时间与终凝时间逐渐缩短,凝结硬化逐渐加快,R·SAC掺量为20%时凝结最快,初凝时间为39 min,终凝时间为63 min.(3)当R·

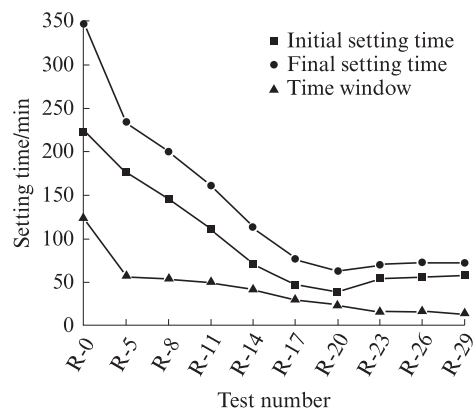


图2 水泥净浆的凝结时间
Fig. 2 Setting time of cement paste

SAC掺量大于20%时,混合水泥净浆的初凝和终凝时间均有所增加.随着R·SAC掺量的增加,时间窗

口^[1](终凝和初凝时间的差值)逐渐减小,当R·SAC掺量大于23%时,时间窗口趋于稳定.R·SAC在混合水泥中可以起到同速凝剂一样的效果,缩短水泥从开始失去塑性到完全失去塑性的时间.

目前,3D打印水泥基材料的凝结时间尚未形成统一要求.一般认为,凝结时间越短,3D打印的建造速度也就越快.Lin等^[1]通过向P·O中加入速凝剂以及向R·SAC中加入缓凝剂,将水泥浆体初凝时间控制在10~90 min.蔺喜强等^[6]则通过向R·SAC中添加速凝剂与缓凝剂,将水泥初凝时间控制在20~60 min.这些研究成果都在3D打印中得到了应用.将混合水泥净浆中的R·SAC掺量控制在14%~20%,可以将初凝时间控制在40~70 min,满足3D打印的要求.

2.2 混合水泥砂浆凝结时间

运用贯入阻力测试法测定M-1~M-7等7组砂浆的凝结时间,结果如图3所示.由图3可见:砂浆凝结时间明显大于净浆,除测试方法不同外,主要原因

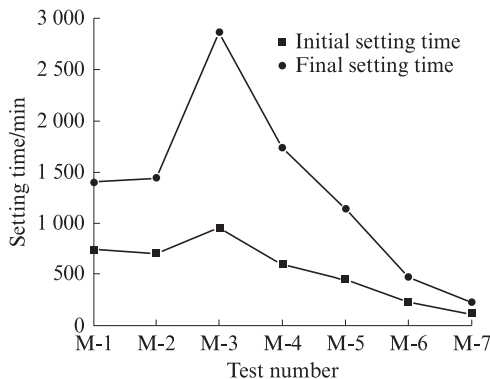


图3 水泥砂浆的凝结时间

Fig. 3 Setting time of cement mortar

在于砂浆中掺有用于调节打印材料流动性和堆积性的减水剂与流变剂,延缓了水泥的凝结硬化^[12,14];与纯P·O砂浆(M-1)相比,当R·SAC掺量小于8%时,混合水泥砂浆凝结时间有所增加,而当R·SAC掺量大于8%时,混合水泥砂浆凝结时间随着R·SAC掺量增加而逐渐降低.其中M-5、M-6和M-7(R·SAC掺量为14%~20%)的初凝时间分别为443、227、114 min,与M-1相比,降低了41%~85%,终凝时间降低了19%~84%,在同等R·SAC掺量条件下,混合水泥净浆的初凝时间降低了68%~83%,终凝时间降低了67%~81%.由此可以看出:当R·SAC掺量较小时,由于外加剂的影响,R·SAC的促凝效果变差;随着R·SAC掺量的增加,外加剂对R·SAC促凝效果的影响逐渐变小;在R·SAC掺量为20%时,R·SAC对砂浆的促凝效果与净浆相同.

2.3 混合水泥砂浆力学性能

图4为R·SAC掺量对混合水泥砂浆力学性能的影响.由图4可见:(1)1 d龄期时,混合水泥砂浆的强度大于纯P·O(M-1)砂浆.这是由于R·SAC与P·O混合能促进AFt的生成,从而加快早期强度的发展^[8,15].(2)对于28 d龄期,当R·SAC掺量小于5%时,混合水泥砂浆的抗压强度相较于纯P·O砂浆有所增加;但当R·SAC掺量大于5%时,混合水泥砂浆的抗压强度小于P·O砂浆;当R·SAC掺量大于8%时,混合水泥砂浆的28 d抗折强度也小于P·O砂浆.这是由于随着R·SAC掺量的增加,水化产物中AFt的含量也随之增加,而AFt在Ca(OH)₂的环境中易产生膨胀^[10,15].当AFt含量较少时,能有效减小收缩率^[9],使得材料更加致密,强度有所提升.但是当AFt含量较大时,其膨胀将导致试块中微观裂缝的产生,从而使力学性能下降^[10].当R·SAC掺量大于8%时,混合水泥砂浆的强度并没有随着R·SAC掺量的增加而稳定下降,可能由于R·SAC掺量在20%以内时,AFt含量少,其膨胀产生的微裂缝较少并且不相互连通,对力学性能影响不大.众多学者^[8,10-11]的研究结果也表明,当R·SAC掺量小于20%时,混合水泥砂浆的强度变化不大;当R·SAC掺量大于20%时,混合水泥砂浆的力学性能才会有显著而稳定的降低.

对比符合3D打印凝结时间要求的试验组(M-5~M-7)可以发现:混合水泥砂浆的1 d抗压强度平均提高了24%,1 d抗折强度平均提高了20%,具有一定的早强效果;28 d抗压强度从34.0 MPa降低到31.2 MPa,最大降幅8%,28 d抗折强度最大从9.8 MPa降低到9.2 MPa,降低了6%,这也说明R·SAC掺量小于20%时,AFt膨胀产生的微裂缝较少,不足以导致强度的大幅下降.因此,从力学性能上看,R·SAC掺量在14%~20%的混合水泥砂浆可以应用于3D打印中.

2.4 混合水泥砂浆流动性

图5为R·SAC掺量对混合水泥砂浆流动性的影响.由图5可见,混合水泥砂浆的流动性随着R·SAC掺量的增加逐渐提高,R·SAC掺量为20%的砂浆流动度(173 mm)比纯P·O砂浆流动度(162 mm)增大了11 mm,稠度提高了15 mm,流动性提高效果明显.这是由于R·SAC的比表面积与标准稠度用水量均小于P·O,R·SAC的掺入导致混合水泥的比表面积变小,需水量减少.因此,掺加R·SAC可以增加混合水泥砂浆的流动性,从而减少打印材料中调节工作性能组分的用量,降低成本,同时可以在保持流动度

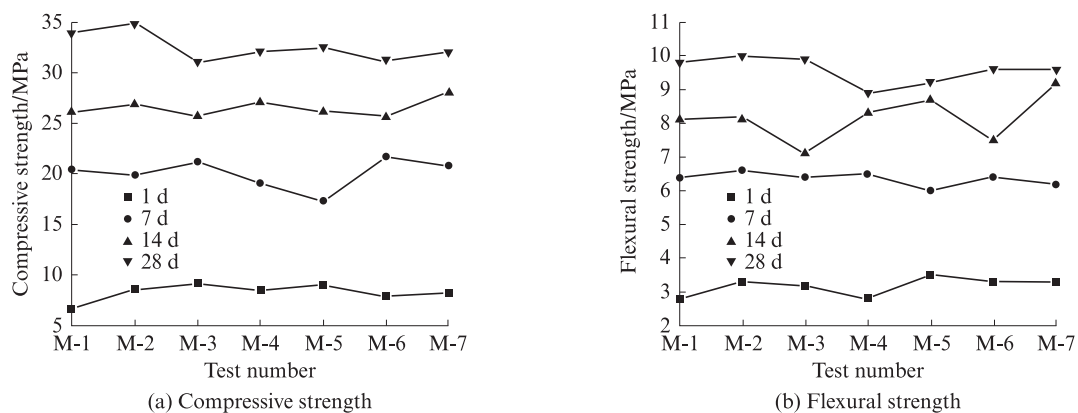


图4 R·SAC掺量对混合水泥砂浆力学性能的影响
Fig. 4 Effect of R·SAC content on mechanical property of mixed cement mortar

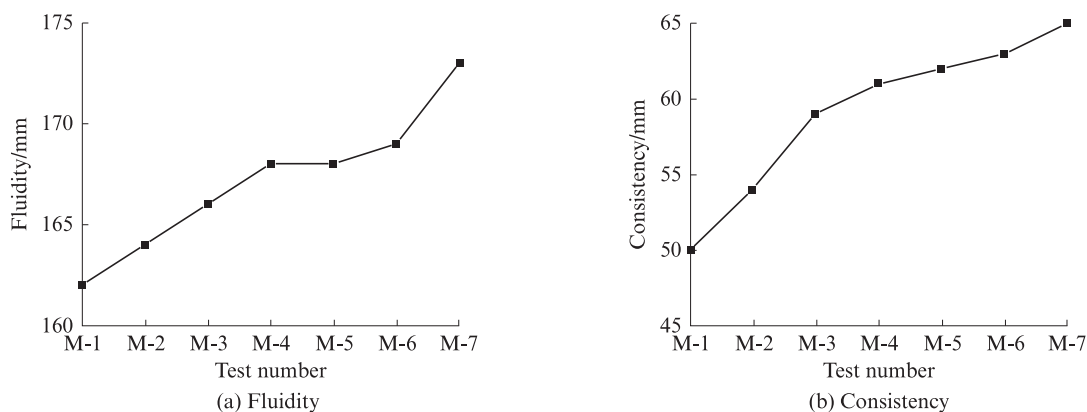


图5 R·SAC掺量对混合水泥砂浆流动性的影响
Fig. 5 Effect of R·SAC content on fluidity of mixed cement mortar

相同情况下,减小水胶比,提高强度。

蒯喜强等^[16]认为3D打印适宜的初始砂浆流动度为170~190 mm.调整流动度的主要方式一般是改变水胶比、胶砂比或添加减水剂等,其中减水剂是3D打印混凝土材料常用的外加剂,其主要作用是增大打印材料的流动度,以弥补材料的流动性不足,其次也可以抑制打印材料孔隙的产生,增加层间黏结强度^[5].本试验通过向R·SAC掺量为14%的混合水泥

砂浆中添加不同掺量的减水剂,研究减水剂对混合水泥砂浆流动性的影响,结果如图6所示.由图6可见:减水剂对混合水泥砂浆的流动度和稠度都有明显的提高作用,当减水剂掺量小于0.40%时,减水剂掺量与混合水泥砂浆的流动性呈现良好的线性关系,减水剂平均每增加0.05%,流动度增加8 mm,稠度增加11 mm;当减水剂掺量为0.30%时,混合水泥砂浆W-7的流动度比不参加减水剂

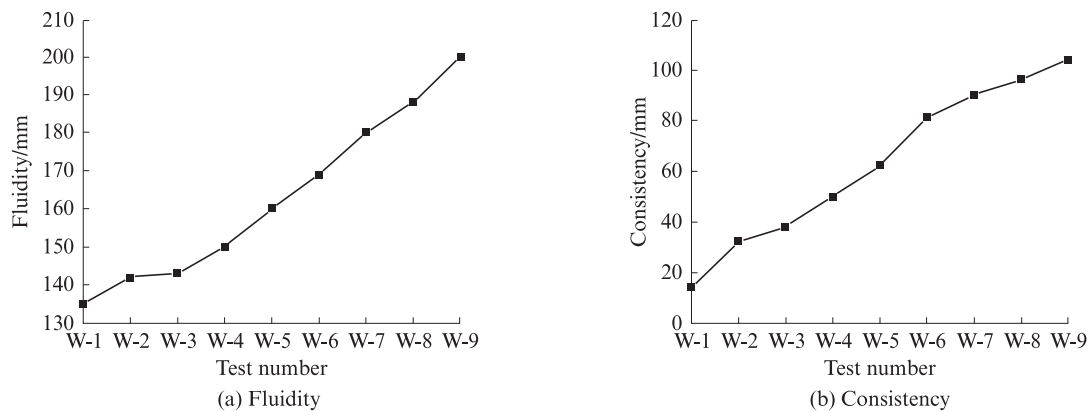


图6 减水剂掺量对混合水泥砂浆流动性的影响
Fig. 6 Effect of water reducing agent content on fluidity of mixed cement mortar

(W-1)时提高了45 mm,稠度提高了76 mm,可以在较大范围内调节3D打印材料的流动性。

2.5 混合水泥砂浆堆积性

根据上述研究结果,并且结合蒯喜强等^[16]推荐的流动度,选取W-4~W-9等6组混合水泥砂浆进行堆积性试验,测量其底部变形量,研究砂浆流动度对堆积性能的影响,进而更好地确定混合水泥砂浆的适宜流动度,结果如图7所示。由图7可见,混合水泥砂浆的变形量随着流动度的增加而增加,W-4砂浆(流动度为151 mm)打印后第1层的变形量为2.5%,W-7砂浆(流动度为175 mm)的变形量为22.3%,而W-8砂浆(流动度为186 mm)的变形量骤增至91.8%,第1层的宽度扩大了接近1倍。

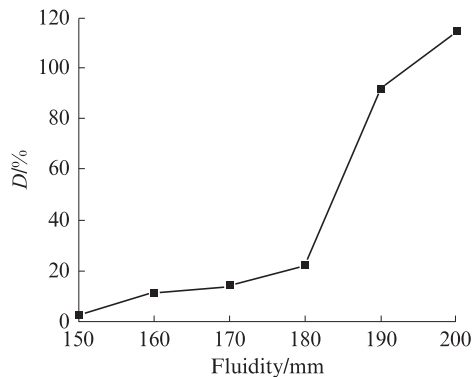


图7 不同流动度下底层材料的相对变形量

Fig. 7 Relative deformation of bottom layer material under different fluidities

图8给出了不同配比混合水泥砂浆的打印效果。由图8可见:流动度为162 mm(W-5)和175 mm(W-7)时打印出的混合水泥砂浆成型良好;流动度为186 mm(W-8)时打印出的混合水泥砂浆不能成型,变形量过大;当流动度降低至151 mm(W-4)时,混合水泥砂浆挤出较为困难且打印出的材料有明显的裂

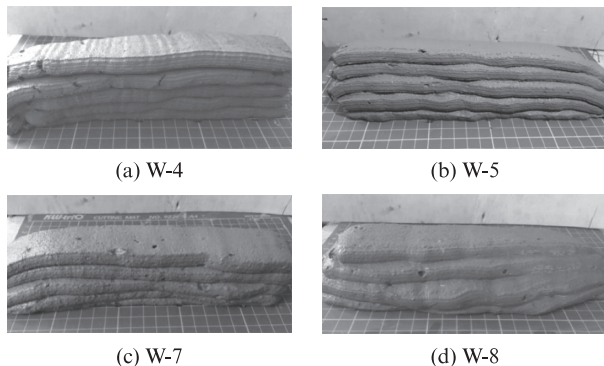


图8 不同流动度下混合水泥砂浆的打印情况

Fig. 8 Printing situation of mixed cement mortar under different fluidities

痕,打印效果较差。因此,混合水泥砂浆的建议打印流动度为160~175 mm。

3 结论

(1)当R·SAC掺量为14%~20%时,混合水泥净浆的初凝时间可有效控制在40~70 min,符合3D打印的要求。与纯P·O砂浆相比,混合水泥砂浆的凝结时间缩短了41%~85%,1 d抗压强度与抗折强度提高了20%,28 d强度降幅小于10%。

(2)掺加R·SAC可以提高材料的流动性,当R·SAC掺量为14%~20%时,混合水泥砂浆的流动度提高6~11 mm,稠度提高12~15 mm。减水剂对流动度的影响呈线性关系,其掺量平均每增加0.05%,混合水泥砂浆的流动度增加8 mm,稠度增加11 mm,可以在较大范围内调节混合水泥打印材料的流动性,便于工程应用。

(3)混合水泥砂浆的建议打印流动度为160~175 mm。

参考文献:

- [1] LIN J C, WU X, YANG W, et al. Application of P·O and R-SAC mortar for 3D printing in construction[C]//2nd International Conference on New Material and Chemical Industry. Sanya: IOP Publishing, 2018: 012070.
- [2] 朱艳青,史继富,王雷雷,等.3D打印技术发展现状[J].制造技术与机床,2015(12):50-57.
ZHU Yanqing, SHI Jifu, WANG Leilei, et al. Current status of the three-dimensional printing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(12): 50-57. (in Chinese)
- [3] LONG W J, TAO J L, LIN C, et al. Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing microcrystalline cellulose for 3D-printing[J]. Journal of Cleaner Production, 2019: 118054.
- [4] 刘晓瑜,杨立荣,宋扬.3D打印建筑用水泥基材料的研究进展[J].华北理工大学学报(自然科学版),2018,40(3):46-50.
LIU Xiaoyu, YANG Lirong, SONG Yang. Research progress of 3D printing cement-based materials for construction[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 40(3): 46-50. (in Chinese)
- [5] 雷斌,马勇,熊悦辰,等.3D打印混凝土材料制备方法研究[J].混凝土,2018(2):145-149,153.
LEI Bin, MA Yong, XIONG Yuechen, et al. Study on shaping performance of 3D printing concrete material[J]. Concrete, 2018(2): 145-149, 153. (in Chinese)
- [6] 蒯喜强,张涛,霍亮,等.水泥基建筑3D打印材料的制备及应用研究[J].混凝土,2016(6):141-144.
LIN Xiqiang, ZHANG Tao, HUO Liang, et al. Preparation and application of 3D printing materials in construction[J].

- Concrete, 2016(6): 141-144. (in Chinese)
- [7] 王复生, 杨海艳, 汤仕发. 复合硫铝酸盐水泥的试验研究[J]. 山东建材, 1997(6): 6-8.
WANG Fusheng, YANG Haiyan, TANG Shifa. Experimental research on compound sulphoaluminate cement[J]. Shandong Building Materials, 1997(6): 6-8. (in Chinese)
- [8] 陈娟, 李北星, 卢亦焱. 硅酸盐-硫铝酸盐水泥混合体系的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 121-124.
CHEN Juan, LI Beixing, LU Yiyang. Experimental study on the properties of OPC-SAC mixed cement [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(4): 121-124. (in Chinese)
- [9] 聂光临, 孙诗兵, 姚晓丹, 等. 普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥复配砂浆性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(3): 10-13.
NIE Guanglin, SUN Shibing, YAO Xiaodan, et al. Study on properties of compound mortar of ordinary portland cement and fast-hardening sulphoaluminate cement [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(3): 10-13. (in Chinese)
- [10] 杨林, 严云, 胡志华, 等. 硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥复配性能研究[J]. 水泥, 2012(7): 7-10.
YANG Lin, YAN Yun, HU Zhihua, et al. Study on compound performance of sulphoaluminate cement and Portland cement[J]. Cement, 2012(7): 7-10. (in Chinese)
- [11] 李国卫, 廖宜顺, 魏小胜, 等. P·O与R·SAC复合水泥砂浆的强度与电阻率研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(1): 47-50.
LI Guowei, LIAO Yishun, WEI Xiaosheng, et al. Research on strength and electrical resistivity of cement mortars compounded with P·O and R·SAC[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science), 2009, 26(1): 47-50. (in Chinese)
- [12] 薛龙. 3D打印水泥基材料的制备与性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
XUE Long. Research on preparation and performance of 3D printing cement-based materials[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 刘致远, 王振地, 王玲, 等. 3D打印水泥基材料工作性分析与表征[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(6): 5-10.
LIU Zhiyuan, WANG Zhendi, WANG Ling, et al. Analysis and characterization of 3D printing cement-based materials workability [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(6): 5-10. (in Chinese)
- [14] 姜晓妮, 刘征涯, 高桂波. 混凝土外加剂组分对水泥凝结时间的影响[J]. 21世纪建筑材料, 2009, 1(4): 38-40.
JIANG Xiaoni, LIU Zhengya, GAO Guibo. Effect of admixture components of concrete on setting time of cement[J]. 21st Century Building Materials, 2009, 1(4): 38-40. (in Chinese)
- [15] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1569-1581.
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1569-1581. (in Chinese)
- [16] 蔺喜强, 张涛, 霍亮, 等. 快硬早强混凝土3D打印施工方法及应用[J]. 混凝土, 2018(7): 141-144, 152.
LIN Xiqiang, ZHANG Tao, HUO Liang, et al. 3D printing construction method and application of fast hardening and early strength concrete [J]. Concrete, 2018(7): 141-144, 152. (in Chinese)