

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.072



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



机械粉磨对岩土固化用无熟料胶凝材料性能的影响

周永祥^{1,2}, 刘倩^{2,3}, 王祖琦², 郝彤³, 冷发光²

(1. 北京工业大学城市建设学部 北京 100124; 2. 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013;
3. 郑州大学土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 利用稻壳灰、CFB 脱硫灰、钢渣协同制备一种无熟料水硬性无机胶凝材料, 可替代水泥用于岩土固化。为提高这种胶凝材料的活性及其他性能, 研究经机械粉磨后胶凝材料的性能变化及其机理。结果表明: 随着粉磨时间增加, 胶凝材料的粒度分布曲线由多峰分布转变为单峰分布, 标准稠度用水量减少, 凝结时间缩短; 水化诱导期的结束时间和第 2 放热峰出现时间明显提前, 累积放热量增加; 砂浆试件的早期抗压强度和自收缩显著增加; 采用无熟料胶凝材料制备流态固化土, 其初始流动扩展度随粉磨时间增加而增加, 经时损失加快; 机械粉磨对固化土的早期强度影响不显著, 后期强度则呈现先增加后降低的趋势。采用该无熟料胶凝材料制备流态固化土, 能满足一般回填工程的强度要求。

关键词: 无熟料胶凝材料; 机械粉磨; 粒度分布; 水化热; 抗压强度; 固化土

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0160-08

Effect of mechanical grinding on properties of the cementitious materials without clinker for soil solidification

ZHOU Yongxiang^{1,2}, LIU Qian^{2,3}, WANG Zuqi², HAO Tong³, LENG Faguang²

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: A hydraulic cementitious material was prepared by using rice husk ash, CFB desulfurization ash and steel slag, which can replace cement for soil solidification. In order to improve the activity and other properties of this cementitious material, the performance change and mechanism of the clinkerless cementitious material after mechanical grinding were studied. The results show that with the increase of grinding time, the particle size distribution curve of the cementitious materials changes from multi-peak distribution to single-peak distribution, the water consumption of standard consistency decreases and the setting time shortens. The end time of the hydration induction period and the appearance time of the second exothermic peak were significantly advanced, and the cumulative heat release increased. The early compressive strength and autogenous shrinkage

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1101002)

作者简介: 周永祥(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事固废利用、混凝土、岩土固化研究, E-mail: xiangzizhou2006@126.com。

Received: 2022-03-22

Foundation item: National Key R & D Program of China (No. 2018YFD1101002)

Author brief: ZHOU Yongxiang (1979-), PhD, research fellow, main research interests: solid waste utilization, concrete, geotechnical solidification, E-mail: xiangzizhou2006@126.com.

of mortar specimens increased significantly. The initial flow expansion degree of the fluidized solidified soil prepared by the cementitious materials increases with the increase of grinding time, and the time-dependent loss accelerates. Mechanical grinding had no significant effect on the early strength of the solidified soil, while the later strength increases first and then decreases. Using this cementitious material without clinker to prepare fluidized solidified soil can meet the strength requirements of general backfill projects.

Keywords: cementitious material without clinker; mechanical grinding; particle size distribution; hydration heat; compressive strength; solidified soil

在资源消耗压力持续上升和环境污染日益严重的今天,固体废弃物在建材行业的资源化利用已成为研究热点,但稻壳灰、脱硫灰、钢渣等低品质固废综合利用率低^[1-3]。露天堆放不但占用土地,还会造成大气污染,同时固体废弃物中可溶性金属元素也可能造成土壤和地下水污染。

利用多种固废间的协同效应制备胶凝材料是提高固废利用率的有效方式。赵计辉^[4]研究了钢渣与几种常见掺合料的协同作用发现:钢渣与矿渣复合微粉具有超叠加效果;钢渣与粉煤灰的叠加效应稍弱;钢渣与硅灰的复合叠加效应在硅灰掺量较低时产生。孙睿等^[5]探究了矿相调整、化学激发对钢渣-脱硫灰基全固废胶凝材料协同水化反应的影响机制。Liu等^[6]将钢渣与硅灰混合研磨制备复合矿物掺合料,发现研磨后的钢渣颗粒上吸附一层硅灰,硅灰消耗了大量的Ca(OH)₂并增强钢渣颗粒与周围的C-S-H凝胶连接,复合矿物掺合料的活性随着硅灰掺量的增加而提高。作者早期试验也表明,胶凝材料中稻壳灰的掺量为10%,(CFB)脱硫灰为60%,钢渣为30%,辅以硫酸盐、碱性盐作为激发剂,可获得一种生产工艺简单的水硬性无机胶凝材料。这种胶凝材料活性低、需水量大且可能存在安定性不良的风险,因此,不适用于水泥混凝土和砂浆。岩土工程中需要大量胶凝材料进行岩土固化,目前最为常见的胶凝材料是硅酸盐类水泥。一方面,水泥不仅成本高昂,且碳排放量高;另一方面,土是一个具有很大包容性的体系,可高效消纳各种固体废弃物,甚至对于存在安定性不良的胶凝材料也可能进行化害为利的应用^[7]。近年来,在市政与建筑工程采用流态固化土技术,具有广泛的应用前景。将上述多种固废协同的胶凝材料用于流态固化土,既克服这类胶凝材料纯度低、活性低的劣势,又能利用体系中的高碱、高硫及其水化特性,为岩土固化提供必要的环境,协调水化产物生成顺序^[8-9],从而发挥这种胶凝材料在岩土固化中的优势。

机械粉磨作用是通过机械能诱发材料的微观晶体结构、物理化学性质变化,促使矿物晶体产生

缺失、畸变、扭曲、位错,形成亚稳态的无定形相,提升反应活性^[10-12]。为研究机械作用对多固废协同胶凝材料性能的影响,笔者通过SM-500研磨机对稻壳灰、CFB脱硫灰、钢渣复合形成的无熟料胶凝材料进行不同时间的粉磨,研究不同粉磨细度下胶凝材料的粒度分布曲线、标准稠度用水量、凝结时间、水化热、微观形貌等性能特征,以期为流态固化土提供一种基于多固废协同的低碳胶凝材料,同时有效提高固体废弃物的综合利用水平。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用无熟料胶凝材料的质量组成:稻壳灰:(CFB)脱硫灰:钢渣=1:6:3,并外掺8%的激发剂,化学成分见表1,矿物组成见图1。激发剂主要是石膏、碱性盐与必要的表面活性剂。

表1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials

样品	成分/%					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
稻壳灰	88.25	0.47	2.80	1.13	0.18	0.53
脱硫灰	42.50	31.47	8.06	7.70	0.46	6.75
钢渣	13.63	5.61	47.29	18.13	4.73	4.31
水泥	22.80	4.55	60.34	2.82	2.74	2.92

水泥:普通硅酸盐水泥(P·O42.5),化学组成见表1。

页岩土:主要成分为SiO₂、Al₂O₃,其中SiO₂+Al₂O₃达到80%,塑限为15.35%,液限为26.98%,含水率为2.27%。

1.2 试验方法

采用欧美克激光粒度仪测试胶凝材料的粒径分布;标稠用水量、凝结时间按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)进行测试;固化土的流动扩展度参考ASTM D6103测试。

水化热:水胶比为0.5,胶凝材料与水拌和后放入TAM air等温微量量热仪通道中测试浆体的水化放热速率和放热量。

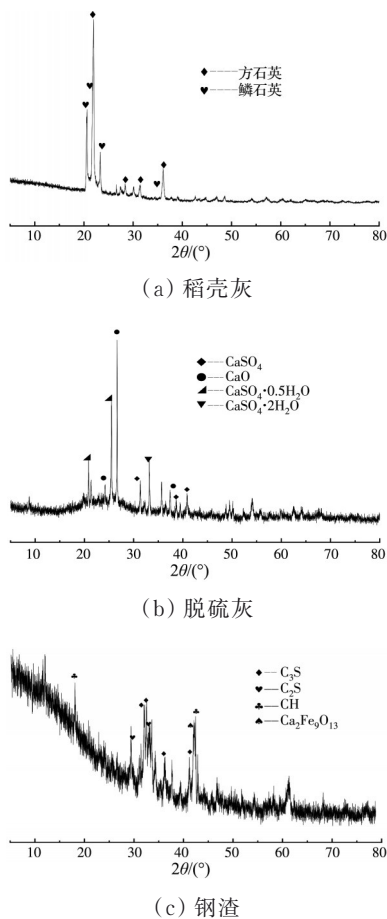


图1 原材料的XRD谱

Fig. 1 XRD spectra of raw materials

砂浆自收缩:参考 ASTM C1698 标准,采用特制的波纹管与非接触探头相结合,将砂浆拌合物装入波纹管中(见图2),波纹管(内径为60 mm,外径为80 mm,长度为450 mm)两端用堵头密封,将波纹管一端固定在钢支架,另一端在支架上自由移动,采用传感器对自由端的位移进行实时监测。

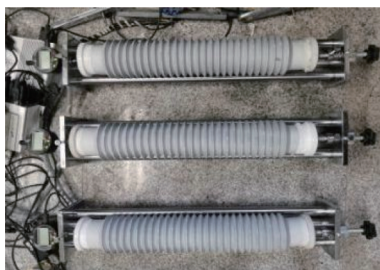


图2 波纹管装置图

Fig. 2 Figure of bellows device

1.3 试验方案及样品制备

表2为砂浆自收缩、砂浆强度、固化土试验配合比设计。

样品制备:称取5 kg无熟料胶凝材料,采用无锡建仪仪器机械有限公司的SM-500研磨机粉磨,粉磨时间分别为0、30、60、90 min,粉磨后测得胶凝

表2 试验方案

Table 2 Test Scheme

试验项目	试验配合比
砂浆自收缩	无熟料胶凝材料(SW0、SW60):石英砂=1:3,水胶比0.35,添加聚羧酸减水剂
砂浆强度	无熟料胶凝材料:砂:水=1:3:0.6
固化土试验	水泥、无熟料胶凝材料分别外掺页岩土的15%,水固比0.345

材料的45 μm筛余量分别为7.1%、2.6%、1.3%、1.5%,对应的编号依次为SW0、SW30、SW60、SW90。

砂浆自收缩:按照配合比称取粉料,置于立式砂浆搅拌机干拌1 min,加水,慢搅2 min,停拌30 s,快速搅拌2 min后结束。将拌合物分4层装入波纹管,每层用捣棒插捣10下。填装完成后,将波纹管放置振动台振动至内壁无气泡附着,密封。试验在恒温(20±2)°C环境中进行,同时在该条件下测试砂浆试样的初凝时间,以初凝时刻作为砂浆自收缩测试的初始。

砂浆试样、固化土试样:根据配合比称取粉料,置于行星式搅拌机中干拌1 min,加水,慢搅2 min,停拌15 s,快速搅拌2 min后结束。将拌合物注入40 mm×40 mm×160 mm棱柱体试模,成型后自然养护至48 h后脱模,脱模后标准养护[温度(20±2)°C、相对湿度不低于95%]到相应龄期,参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)测试抗压强度。

2 无熟料胶凝材料的性能

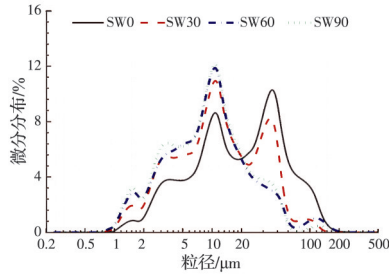
2.1 物理性质

2.1.1 颗粒尺寸及粒度分布曲线

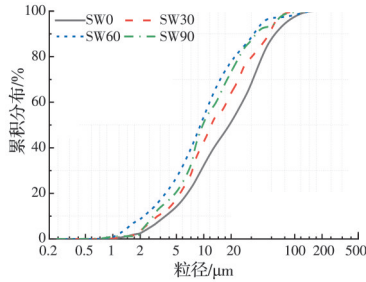
不同粉磨细度下无熟料胶凝材料的粒径分析结果见图3。结果显示,粉磨使得胶凝材料颗粒细化且引起粒度分布曲线变化。随着粉磨时间增加,粒度分布曲线由原来的多峰分布转变为单峰分布,累积分布曲线向左移动。无熟料胶凝材料粉磨60 min后,粒度分布曲线几乎不再变化。这是由于前期的粗颗粒含量高,机械粉磨效率高,细颗粒含量得到了快速增长,在未掺入助磨剂的情况下,粉磨至60 min后继续粉磨引起颗粒的团聚,“团聚效应”使得颗粒粒径开始增大。

2.1.2 标准稠度用水量和凝结时间

表3为不同粉磨细度下无熟料胶凝材料的标准稠度用水量和凝结时间的试验结果。由表3可见,随着粉磨时间增加,胶凝材料的标准稠度用水量降



(a) 微分分布图



(b) 累积分布图

图 3 粒度分布曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves

低,粉磨至 60 min,增加粉磨时间对标准稠度用水量无较大影响;而凝结时间随着粉磨时间的增加而明显缩短,粉磨至 90 min,初、终凝时间降幅分别为 54%、47%,究其原因 是细颗粒含量增多,对水分子的吸附及离子溶出能力增强^[13],水化进程加快,宏观上表现为凝结时间缩短。

表 3 无熟料胶凝材料的标准稠度用水量和凝结时间

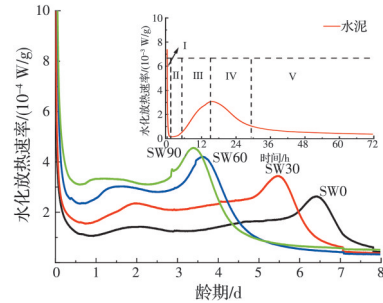
Table 3 Standard consistency water consumption and setting time of the cementitious materials without clinker

无熟料 胶凝材料	标准稠度 用水量/%	初凝时间/ min	终凝时间/ min
SW0	41.6	580	995
SW30	40.0	320	835
SW60	39.0	282	597
SW90	38.6	267	524

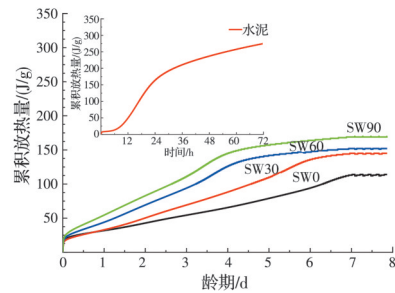
2.2 水化热

无熟料胶凝材料和水泥的水化热曲线见图 4。由图 4 可以看出:水泥水化进程在 30 h 内进入稳定期,而未经粉磨的无熟料胶凝材料的水化持续 7 d 后进入稳定期。与水泥类似,无熟料胶凝材料的水化进程也可分为诱导前期、诱导期、加速、减速、稳定 5 个阶段^[14-16],但它们的水化反应速度、组成及产物的结构是不同的。无熟料胶凝材料与水混合后,出现一个尖锐的瞬态放热峰,这主要是无熟料胶凝材料颗粒在碱性环境下溶解而产生的润湿和溶解热。随后水化作用进入诱导期,无熟料胶凝材料中的 Si-O-Si、Al-O-Al、Si-O-Al 发生断裂^[17-18]。诱导期

中出现的不稳定峰形,可能是由于无熟料胶凝材料中少量的活性成分自胶结反应所产生的放热。



(a) 水化放热速率



(b) 累积放热量

图 4 无熟料胶凝材料水化热曲线

Fig. 4 Hydration heat curves of the cementitious materials without clinker

从图 4(a)可以看出,随着粉磨时间的增加,第 2 放热峰的峰值大幅度增加,诱导期的结束时间和第 2 峰出现时间显著提前。对比 SW0 和 SW90 可知,第 2 放热峰提前 3 d 出现,峰值由 2.61×10^{-4} W/g 升高到 4.51×10^{-4} W/g。这是由于机械粉磨破坏胶凝材料的颗粒表面,改变其晶体结构及表面物理化学性质,同时使矿物的晶体结构发生畸变,部分化学键发生断裂和重组,结晶度开始下降,加速水化反应,使得无熟料胶凝材料提前进入加速期^[19]。

由图 4(b)可知:SW0、SW30、SW60、SW90 在 7 d 内的累积放热量分别为 113、145、152、169 J/g,由此可见,机械粉磨有效增加无熟料胶凝材料的水化放热总量,但粉磨超过一定时间后累积放热量的增长速率逐渐减缓,这一结果较好地解释了砂浆的早期强度随着粉磨时间的增加呈现先快速增长后趋于稳定的变化规律。综上,无熟料胶凝材料水化速率、累积放热量远低于水泥,且粉磨至 60 min,继续增加粉磨时间,水化放热速率、累积放热量增长幅度变缓,即无熟料胶凝材料存在一个最为经济的粉磨时间。

2.3 微观形貌

为分析不同粉磨细度下无熟料胶凝材料水化进程中诱导期缩短的机理,选择图 5 中 SW90、

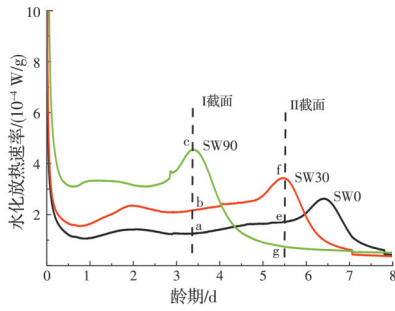


图 5 水化热曲线

Fig. 5 Hydration heat curves

SW30 位于第 2 放热峰峰值时对应的 I 截面(a、b、c)

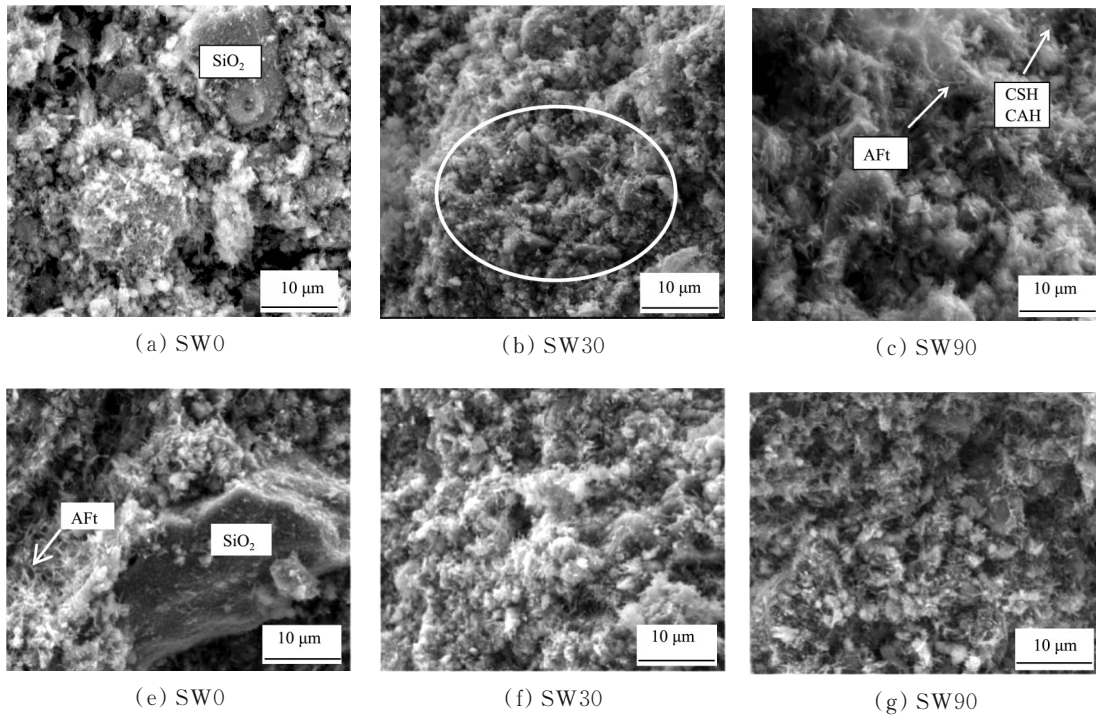


图 6 I、II 截面样品的 SEM 图片

Fig. 6 SEM images of I and II cross-section samples

对比图 6(a)、(e) 可以发现:随着水化进程的持续, SiO₂ 颗粒表面出现溶蚀现象, 少量水化产物堆积在 SiO₂ 的表面, 但 SiO₂ 颗粒部分表面仍清晰光滑。对比图 6(c)、(f) (SW30、SW90 即将进入减速期) 可见, 水化产物与未反应的颗粒相互联结, 但水化产物的数量较少, 尺寸较小, 需进一步发育。图 6(g) 为 SW90 处于稳定期的微观形貌, 随着水化进程的持续, 细针状的钙矾石呈树枝分叉状快速生长, 相互交织。

2.4 砂浆抗压强度

图 7 为不同粉磨细度下砂浆养护 3、7、28 d 的抗压强度试验结果。由图 7 可知, 机械激发对胶凝材料砂浆的 3 d 抗压强度有明显的提升作用, 胶凝材料粉磨 30、60、90 min, 3 d 抗压强度相较于粉磨 0 min 的分别提高 14%、278%、265%。继续养护至 7、28 d,

与 II 截面(e、f、g)进行 SEM-EDS 分析。

图 6 显示不同粉磨细度下无熟料胶凝材料的微观形貌。对比图 6(a)、(b)、(c) 可知, 原状的无熟料胶凝材料颗粒大且形状不规则, 表面较光滑; 粉磨 30 min 颗粒粒径迅速细化, 细颗粒含量的增加, 反应接触面积增大。在机械粉磨过程中, 颗粒表面的化学键破坏, 反应需要的活化能降低, 提高火山灰活性^[20]; 粉磨至 90 min, 凝胶和钙矾石晶体等水化产物提前生成, 这也是无熟料胶凝材料水化热曲线中第 2 放热峰提前出现的原因。

SW30、SW60、SW90 的抗压强度相较于 SW0 均有提升, 但提升幅度较小。综上, 粉磨至 60 min, 砂浆的抗压强度达到最大值; 粉磨至 90 min, 可能由于颗粒的团聚作用影响了颗粒分散, 从而影响了后期强度的发展。

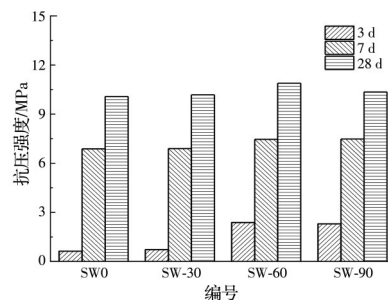


图 7 砂浆试块的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of mortar test block

2.5 砂浆自收缩

考虑到粉磨 60 min 的胶凝材料综合性能较优,选取 SW0、SW60 进行砂浆的自收缩试验。由图 8 可知,在相同条件下,胶凝材料粉磨至 60 min,砂浆的自收缩增加 19%。另外,砂浆的自收缩曲线存在两个明显的膨胀阶段,经机械激发后 SW60 第一个膨胀阶段尤其显著,出现在初凝后 4~12 h 之间,未经粉磨的样品 SW0 的第一膨胀阶段出现在 6~18 h 之间,膨胀幅度小于 SW60;第 2 个膨胀阶段,SW60 出现在 36~48 h 之间,而 SW0 则出现在 54~66 h 之间。两个膨胀阶段的出现可能与钙矾石的生成有关,钙矾石固相体积较大,具有补偿收缩的作用^[21]。第一膨胀阶段与作为激发剂掺入的部分石膏水化反应生成钙矾石有关,而第二膨胀阶段对应水化热曲线中诱导期中不稳定峰形,则是脱硫灰与钢渣在水化过程中自身的含硫、含钙和含铝组分相互反应生成钙矾石。

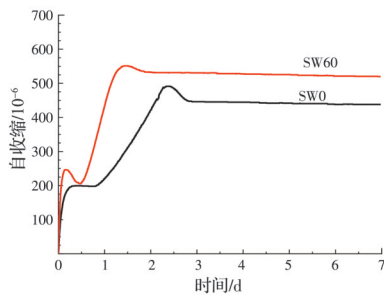


图 8 砂浆自收缩试验结果
Fig. 8 Autogenous shrinkage test results of mortar

3 无熟料胶凝材料制备流态固化土

在城市管道、地下空洞等狭窄空间的回填工程中,回填材料需要具备高流动性、自密实、自硬化等特点^[22]。另外,考虑到市政管道的增设、更换等需二次开挖,回填材料的强度不宜过高。有研究表明^[23]:回填材料的流动扩展度 > 200 mm,适用于狭窄空间的回填;当回填材料的 28 d 无侧限抗压强度在 0.3~1.1 MPa 之间,采用小型开挖机械即可。将水泥、不同粉磨细度的无熟料胶凝材料用于制备拌合物具有较大流动性的流态固化土。

图 9 为固化土的流动扩展度经时损失变化规律,可见水泥固化土的流动扩展度经时损失过快,不利于厂拌法(工厂离施工现场较远)施工方式。由图 9 可知,用水量一定,随着粉磨时间的延长,无熟料胶凝材料固化土初始流动扩展度增加,这与其标准稠度用水量变化规律一致,主要是粉体颗粒细化带来的物理化学效应。但胶凝材料粉磨后,拌合物流动扩展度经时损失加快,这与粉磨后水化反应加快有关,且粉磨 60 min 的固化土流动扩展度损失最快。

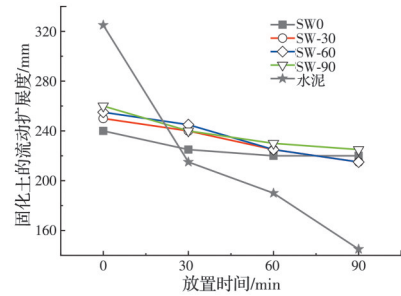


图 9 固化土的流动扩展度经时损失
Fig. 9 Time-dependent loss of flow expansion of solidified soil

图 10 为固化土的无侧限抗压强度试验结果。相较于无熟料胶凝材料固化土,水泥固化土二次开挖困难、工程成本高。另外,由图 10 可见,随着粉磨时间增加,无熟料胶凝材料固化土的早期强度提升不明显,这与砂浆的早期强度规律不一致,主要原因是流态固化土用水量明显高于砂浆,机械激发对无熟料胶凝材料早期水化的促进作用在大用水量的固化土体系中得不到明显的体现。无熟料胶凝材料固化土的 28、90 d 无侧限抗压强度随着粉磨时间的增加呈现先增加后降低的趋势,且粉磨时间为 60 min 时,固化土的 28、90 d 无侧限抗压强度分别提高了 18%、38%。由于黏土颗粒环境中无熟料胶凝材料水化硬化行为的复杂性,固化土的强度发展机理尚需进一步研究。从固化土试验结果看,无熟料胶凝材料按照页岩土质量的 15% 掺入制备流态固化土,28、90 d 的抗压强度可稳定达到 0.4、0.5 MPa,满足一般回填工程的强度要求。

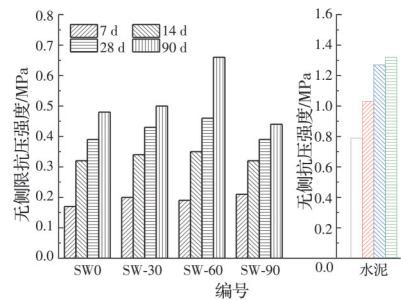


图 10 固化土的无侧限抗压强度
Fig. 10 Unconfined compressive strength of solidified soil

4 结论

- 1) 无熟料胶凝材料经机械粉磨后,粒度分布曲线呈现多峰分布变为单峰分布的趋势,细颗粒含量增加,标准稠度用水量降低,凝结时间缩短,存在一个合理粉磨时间,约为 60 min。
- 2) 粉磨加快无熟料胶凝材料的水化进程,诱导期的结束时间和第 2 放热峰的出现时间明显提前,第 2 放热峰峰值增加。SEM-EDS 显示,诱导期缩短实质是细颗粒含量增加,凝胶和钙矾石晶体等水化

产物提前生成。

3)随着粉磨时间增加,砂浆早期抗压强度和自收缩显著增加;粉磨 60 min,砂浆的抗压强度最大,自收缩提高 19%。

4)采用无熟料胶凝材料制备的流态固化土,拌合物初始流动扩展度随着粉磨时间增加而增加,经时损失加快;机械粉磨对固化土的早期强度影响不显著,后期强度随着粉磨时间的增加呈现先增加后降低的趋势。采用无熟料胶凝材料制备流态固化土,可以满足一般回填工程的强度要求。

参考文献

- [1] CHEN R F, CONGRESS S S C, CAI G J, et al. Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123219.
- [2] 赵立杰, 张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. *材料导报*, 2020, 34(Sup 2): 1319-1322, 1333. ZHAO L J, ZHANG F. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Sup 2): 1319-1322, 1333. (in Chinese)
- [3] 解晓宁, 刘凤源, 杨黛竹. 干法脱硫灰综合利用现状与分析[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(8): 65-69. XIE X N, LIU F Y, YANG D Z. Status and analysis on comprehensive utilization of dry flue gas desulfurization ash [J]. *New Building Materials*, 2021, 48(8): 65-69. (in Chinese)
- [4] 赵计辉. 钢渣的粉磨/水化特征及其复合胶凝材料的组成与性能[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015. ZHAO J H. Grinding and hydration characteristics of steel slag and composition and properties of composite cementitious materials containing steel slag powder [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2015. (in Chinese)
- [5] 孙睿, 王栋民, 房中华, 等. 钢渣: 脱硫灰基全固废胶凝材料及其砂浆界面过渡区的研究[J]. *金属矿山*, 2022 (1): 41-52. SUN R, WANG D M, FANG Z H, et al. Study on the steel slag-desulfurized ash based solid waste cementitious materials and its mortars interface transition zone [J]. *Metal Mine*, 2022(1): 41-52. (in Chinese)
- [6] LIU J, WANG D M. Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete [J]. *Powder Technology*, 2017, 320: 230-238.
- [7] 周永祥, 王继忠. 预拌固化土的原理及工程应用前景[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(10): 117-120. ZHOU Y X, WANG J Z. Principle of ready-mixed solidified soil and its prospects for engineering application [J]. *New Building Materials*, 2019, 46(10): 117-120. (in Chinese)
- [8] 牛晨亮, 黄新, 李战国, 等. 利用工业废渣固化软土的试验研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(10): 1871-1874. NIU C L, HUANG X, LI Z G, et al. Experimental research on utilization of industrial wastes to stabilize soft soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(10): 1871-1874. (in Chinese)
- [9] 戴蕾, 李战国, 黄新. 利用工业废渣制备软土固化剂的可行性探讨[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(3): 56-60. DAI L, LI Z G, HUANG X. Feasibility of soil stabilizer production with industrial wastes [J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(3): 56-60. (in Chinese)
- [10] 杨南如. 机械力化学过程及效应(I): 机械力化学效应[J]. *建筑材料学报*, 2000, 3(1): 93-97. YANG N R. Processes and effects of mechanochemistry (I): Chemical effects of mechanochemistry [J]. *Journal of Building Materials*, 2000, 3(1): 93-97 (in Chinese)
- [11] LI J J, NI W, WANG X, et al. Mechanical activation of medium basicity steel slag under dry condition for carbonation curing [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104123.
- [12] 张永娟, 张雄. 胶凝材料体系颗粒群特征分析理论与方法研究进展[J]. *重庆建筑大学学报*, 2002, 24(1): 49-54, 64. ZHANG Y J, ZHANG X. Advance in study of theory and method for analyzing characteristics of particle group of binding material system [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2002, 24(1): 49-54, 64. (in Chinese)
- [13] GHIASVAND E, RAMEZANIANPOUR A A, RAMEZANIANPOUR A M. Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 53: 547-554.
- [14] 刘志勇, 张云升, 孙国文, 等. 电阻率法研究早期水泥净浆孔结构的演变过程[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(5): 148-153. LIU Z Y, ZHANG Y S, SUN G W, et al. Resistivity method for monitoring the early age pore structure evolution of cement paste [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34 (5): 148-153. (in Chinese)
- [15] KRSTULOVIĆ R, DABIĆ P. A conceptual model of the cement hydration process [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5): 693-698.
- [16] 官敏, 胡匡艺, 于涛, 等. 水泥矿物体系诱导期的水化进程及机理的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(7): 2129-2137. GUAN M, HU K Y, YU T, et al. Research progress on understanding hydration process and its mechanism of

- cement mineral system during induction period [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2129-2137. (in Chinese)
- [17] SHI C J, DAY R L. Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(3): 439-447.
- [18] LYU X J, YAO G, WANG Z M, et al. Hydration kinetics and properties of cement blended with mechanically activated gold mine tailings [J]. Thermochimica Acta, 2020, 683: 178457.
- [19] 杨南如. 非传统胶凝材料化学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018: 50-70.
YANG N R. Non-traditional cementitious materials chemistry[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018: 50-70. (in Chinese)
- [20] CHENG Y H, HUANG F, LI W C, et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 164-170.
- [21] 张之路. 复合激发剂对碱矿渣胶结材水化进程与收缩性能影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- ZHANG Z L. Study on effects of activator mix proportions on hydration process and shrinkage behavior of alkali-activated slag binder [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [22] 魏建军, 张金喜, 王建刚. 建筑垃圾细料生产流动化回填材料的性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3): 96-103.
WEI J J, ZHANG J X, WANG J G. Properties of flowable backfill materials using recycled fine aggregates of brick and concrete waste [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38 (3): 96-103. (in Chinese)
- [23] 邹培林. 流动化处治土的强度特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
ZOU P L. Research on strength properties of flowable treated soil [D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese)

(编辑 胡玲)