

文章编号:1007-9629(2023)02-0172-07

硅铝型铁尾矿粉的无熟料固结性能及水化机理

安树好¹, 刘娟红^{1,2,3,*}, 张月月¹, 王洪江¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 北京科技大学 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 北京科技大学 城镇化与城市安全研究院, 北京 100083)

摘要:为探究磨细铁尾矿粉在无熟料体系中的固结性能,以硅铝型铁尾矿为主体材料,掺配钙、硫、硅校正材料,在磨细比表面积约为 1 000 m²/kg 时,使铁尾矿粉获得无熟料高强度固结效果.利用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、差示扫描同步热分析仪(DSC-TG)测试技术及化学滴定方法,分析了固结体中水化产物的种类、含量及微观形貌,研究了无熟料固结材料的水化机理.结果表明:当钙、硫、硅校正材料总占比为 40%,且三者之间质量比为 20:5:15 时,利用铁尾矿细磨过程中矿物表面晶格畸变形成的非晶质层成分与校正材料之间的水化反应及产物协同效应,能够获得 28 d 强度为 52.08 MPa 的固结体;水化过程中,钙矾石(Aft)的快速生成为硬化浆体提供了早期强度,水化硅酸钙(C-S-H)是稳定固结体后期强度的保证,1/7~1/5 的晶胶比确保了固结体强度的持续发展.

关键词:铁尾矿粉;无熟料固结;非晶质层;水化机理;晶胶比

中图分类号:TB321

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.009

Non-clinker Consolidation Performance and Hydration Mechanism of Silicon Aluminum Iron Tailing Powder

AN Shuhao¹, LIU Juanhong^{1,2,3,*}, ZHANG Yueyue¹, WANG Hongjiang¹

(1. College of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Urbanization and Urban Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the consolidation performance of iron tailing powder in clinker free system, a clinker-free high-strength consolidation material with ground iron tailing powder as the main material was prepared. Using scanning electron microscope(SEM), X-ray diffraction(XRD), differential scanning synchronous thermal analyzer(DSC-TG) and chemical titration methods, the type, content and micro morphology of hydration products in the consolidated body were analyzed, and the hydration mechanism of the non-clinker consolidated material was studied. The results show that when the total proportion of calcium, sulfur and silicon is 40% and the ratio between them is 20:5:15, the consolidated body with a strength of 52.08 MPa at 28 d can be obtained by using the hydration reaction between the amorphous layer formed by lattice distortion on the surface of iron tailing powder and the correction material by its product synergistic effect. Ettringite (Aft) provides the early strength of the paste, calcium silicate hydrate(C-S-H) is the guarantee for stabilizing the later strength, and the ratio of crystal to gel within 1/7 - 1/5 is the key factor in ensuring the continuous development of strength.

收稿日期:2021-12-25; 修订日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51834001)

第一作者:安树好(1972—),男,河南许昌人,北京科技大学博士生. E-mail:anxin1102@sin.com

通讯作者:刘娟红(1966—),女,江苏苏州人,北京科技大学教授,博士生导师,博士. E-mail:juanhong1966@hotmail.com

Key words: iron tailing powder; non-clinker consolidation; amorphous layer; hydration mechanism; ratio of crystal to gel

中国现存有207亿t金属尾矿^[1],尾矿堆储不仅占用土地资源、污染环境,还存在安全隐患.金属尾矿中的主要矿物为石英、长石等硅酸盐矿物,化学成分主要是SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃等化合物. Young等^[2-3]利用铁尾矿替代部分黏土质生料组分制备硅酸盐水泥熟料,发现铁尾矿中的硅铝成分能够提高生料的易烧性,降低熟料矿物的烧成温度,改善熟料的烧成质量及水化性能.朴春爱等^[4-6]利用机械力活化方法,制备出具有火山灰活性的铁尾矿粉并研究了其在水泥基材料中的活性表现,结果表明,粉磨2.0 h的铁尾矿粉中无序物质增多,具有火山灰活性,活化铁尾矿粉的掺入可以促进水泥中铝酸盐的二次水化,显著提高浆体的胶凝活性. Cheng等^[7]用磨细铁尾矿粉作矿物掺合料制备混凝土,研究了掺加磨细尾矿粉对混凝土力学性能及耐久性的影响,结果表明,随着磨细尾矿粉的掺加,混凝土的抗渗、抗冻等耐久性能得到显著改善.事实上,在细磨过程中,铁尾矿中矿物表面的晶体结构受到机械力作用,粉体表面结晶度逐步降低,形成非晶质层,使矿物表面成分出现一些化学性质上的变化^[8]. Liu等^[9]对比研究了铁尾矿石和石灰石作粗骨料时混凝土力学强度和微观结构的不同,结果表明,铁尾矿表面的断键部位在适当条件下能够与Ca(OH)₂发生化合反应,生成了含铝的水化硅酸钙(C-(A)-S-H),

而石灰石表面没有这一现象,这是铁尾矿骨料混凝土的强度和结构密实度均明显高于石灰石骨料混凝土的主要原因.基于此,刘娟红等^[10-11]利用超细尾砂表面硅铝氧矿物晶格缺陷的特性,研究了全尾砂无水泥充填方案的可行性,充填体28 d抗压强度达到3.35 MPa,完全满足矿山充填的需求,为深度开发超细尾砂的利用价值拓宽了方向.

硅铝型铁尾矿中富含SiO₂和Al₂O₃,但水化生成水化硅酸钙(C-S-H)及钙矾石(Aft)所需的Ca(OH)₂和CaSO₄不足.鉴于此,本文以硅铝型铁尾矿为主要组分,借助机械力活化方法来增加铁尾矿表面晶格缺陷浓度,同时选用富含Ca(OH)₂、CaSO₄和非晶态SiO₂的工业副产品为校正材料,配制出铁尾矿粉无熟料固结材料,并研究影响该固结体强度的因素及水化机理.

1 试验

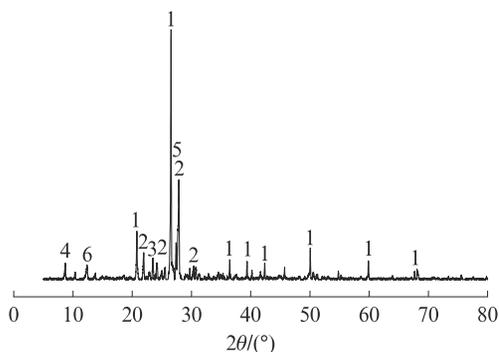
1.1 原材料

铁尾矿源于密云维克铁尾矿,主要矿物成分为石英、长石及云母等矿物.钙、硫、硅3种校正材料均选用工业副产品.原材料的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水固比等除特别注明外均为质量分数或质量比)见表1.铁尾矿的XRD图谱见图1.

表1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of raw materials

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	IL	Total
Iron tailing	61.07	9.15	13.38	2.90	2.78	2.14	2.29	1.25	—	94.96
Calcium correction material	2.18	1.16	0.72	66.92	1.43	0.02	0.24	0.48	26.23	99.38
Sulfur correction material	2.16	1.14	0.64	33.69	0.57	0.66	0.72	41.42	18.67	99.67
Siliceous correction material	38.84	8.33	0.37	36.73	12.48	0.27	0.18	0.92	1.37	99.49



1—Quartz; 2—Albite; 3—Aluminum oxide; 4—Biotite; 5—Microperthite; 6—Anorthite

图1 铁尾矿的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of iron tailing

1.2 试验方案及方法

1.2.1 抗压强度试验

以磨细石英砂试件为参照组,铁尾矿粉无熟料固结试件的抗压强度试验方案及结果见表2.先采用 $\phi 305 \times 305$ mm的球磨机按照表2中的配合比将试样粉磨3~6 h,制成比表面积约为1 000 m²/kg的粉体;然后用净浆搅拌机以0.30的水固比将粉体试样加水搅拌成净浆,倒入30 mm×30 mm×30 mm的试模中制备得到净浆试件;最后置于(20±1)℃、相对湿度不低于95%的养护室中养护至规定龄期.

1.2.2 化学分析方法测定Aft含量

由文献[12-13]可知,乙二醇-甲醇(体积比1:3)

表2 铁尾矿粉无熟料固结试件的强度试验方案及结果

Table 2 Strength test scheme and results of iron tailing powder non-clinker consolidation specimens

Code	$w(\text{iron tailing power})/\%$	$w(\text{quartz sand})/\%$	$w(\text{correction material})/\%$			Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Median particle size(D_{50})/ μm	Compressive strength/MPa			
			Calcium	Sulfur	Siliceous			3 d	7 d	14 d	28 d
QL2000	0	80	20	0	0	978	9.670	1.06	1.38	1.87	2.05
QG2005	0	75	20	5	0	993	9.731	1.27	1.61	2.16	2.37
QS2515	0	60	20	5	15	965	6.734	8.13	19.06	25.38	28.74
FL2000	80	0	20	0	0	984	9.669	3.48	4.68	5.97	6.85
FG2005	75	0	20	5	0	1016	8.584	11.46	15.27	16.43	16.75
FS2515	60	0	20	5	15	985	10.026	26.97	37.55	46.52	52.08

混合溶剂能够将AFt从水泥浆体中精准萃取出来。试验采用CuSO₄返滴法测定出萃取液中的Al₂O₃含量,根据AFt的一般化学式3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O,计算出Al₂O₃的质量分数为8.13%,由此化学方法即可测定换算出浆体中AFt的含量。

1.2.3 微观试验

使用FEI Quanta 250扫描电镜(SEM)观察试样的微观结构。使用TTR III X-射线衍射仪(XRD)测试试样的水化产物,仪器参数为:管电流120 mA、管电压40 kV、扫描角度5°~65°,扫描速率6(°)/min。使用Discovery 差示扫描同步热分析仪(DSC-TG),N₂作为保护气体,将磨细的净浆粉末以10 °C/min的速率从室温加热至1100 °C,得到DSC-TG曲线。

将破型后的净浆试件立即用无水乙醇终止水化,按试验需求制成SEM测试用块状试样,以及XRD、DSC-TG测试用75 μm(200目)粉体试样。需要说明的是,由于试件FL2000的3 d抗压强度偏低,浆体结构疏松,导致其在SEM测试时抽真空时间过长,因此本文所有微观早龄期试样均选用养护龄期为7 d的FL2000试件,其他试验的早龄期测试选用养护龄期为3 d的试件。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

由表2可以看出:(1)磨细石英砂组试件QL2000和QG2005的各龄期强度均很低, QS2515的各龄期强度有很大提升。(2)铁尾矿粉组试件FL2000、FG2005和FS2515均能产生较高的力学强度。其中只掺入20%钙质校正材料可使固结体产生3.48 MPa(3 d)、6.85 MPa(28 d)的基础强度;在此基础上掺入5%硫质校正材料后,硬化浆体的早后期强度均得到显著提升;再掺入15%硅质校正材料后,试件FS2515中钙、硫、硅3种校正材料总占比为40%,且三者的质量比为20:5:15,该比例使试件FS2515的强度大幅度提升,较试件FL2000的3、28 d抗压强

度提高6倍,28 d抗压强度可达52.08 MPa。另外,试件FS2515各龄期抗压强度均大于试件FG2005与QS2515相应龄期抗压强度之和,说明硅质校正材料在铁尾矿粉组试件中具有显著的协同效应。(3)各铁尾矿粉组试件的抗压强度增长率存在较大差异——试件FL2000的3~14 d抗压强度增长率稳定合理,但抗压强度值较低;试件FG2005各龄期抗压强度虽有较大提升,但其7、14 d抗压强度增长过快,14 d以后的抗压强度基本不再增长;试件FS2515无论是各龄期的强度值还是早后期的强度比值均比较合理。综上所述,在磨细石英砂组试件中,复掺钙、硫校正材料无法有效提高固结体的强度,而掺入硅质校正材料可以产生明显强度,同样掺量和比例的3种校正材料使铁尾矿粉组试件产生了较高的固结强度,并且硅质校正材料的强度贡献在铁尾矿粉组中更具有协同效应。

2.2 微观形貌

图2为铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体的微观形貌。由图2可以看出:(1)试件FL2000水化7、28 d后,在硬化浆体中仅有C-S-H生成,7 d时C-S-H基本上呈箔片状(I)和网状(II),尚不能将铁尾矿颗粒固结起来(图2(a));水化28 d的硬化浆体中水化产物增多,出现大量等大粒子状C-S-H(III),浆体密实度提高(图2(b))。(2)试件FG2005水化3 d后,硬化浆体中有丰富的C-S-H和AFt,其中C-S-H呈箔片状(I)、网状(II)和等大粒子状(III),AFt直径在1~2 μm之间,C-S-H和AFt相互穿插,将铁尾矿颗粒紧密地连接在一起,试件强度显著增大(图2(c));水化28 d后,硬化浆体中箔片状C-S-H(I)数量减少,等大粒子C-S-H(III)数量增加,浆体变得致密,视野内仍有丰富的AFt(图2(d))。(3)试件FS2515水化3、28 d后,硬化浆体中AFt的比例与试件FG2005相比明显减少,C-S-H数量明显增加,并且等大粒子状C-S-H(III)数量明显增多,箔片状(I)和网状(II)C-S-H比例减少,视野内几乎找不到明显的AFt,硬化浆体的密实度提高,试件强度最高(图2(e)、(f))。

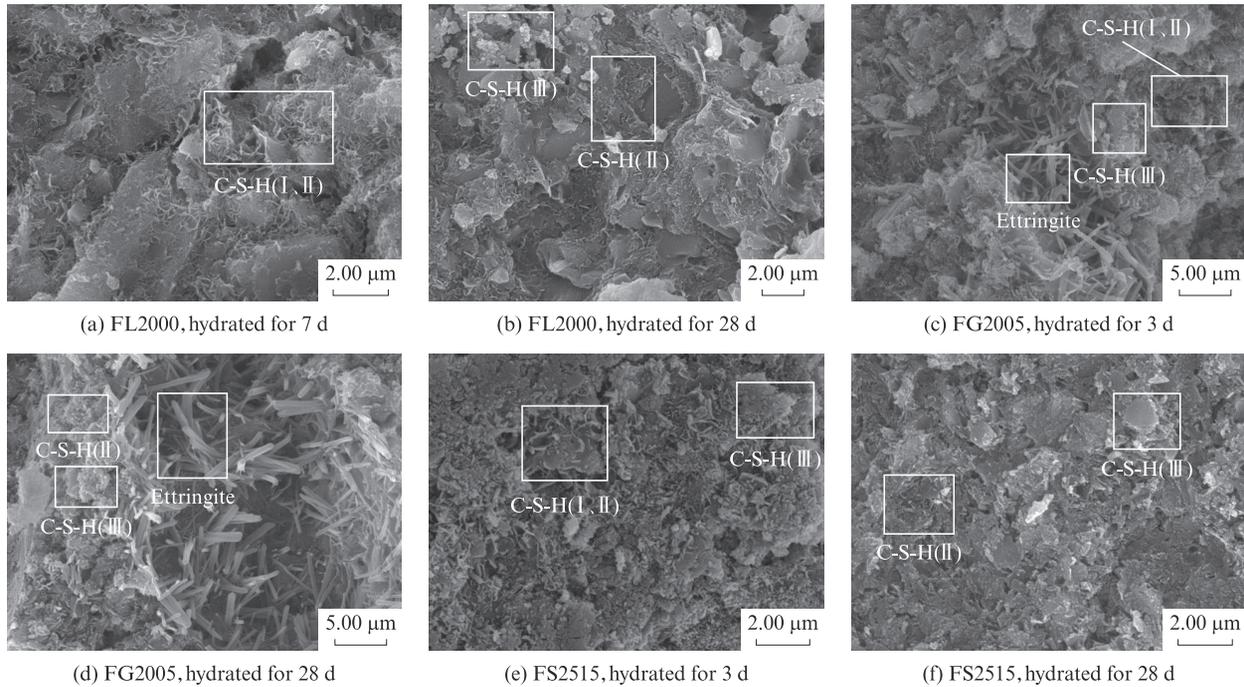


图2 铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体的微观形貌

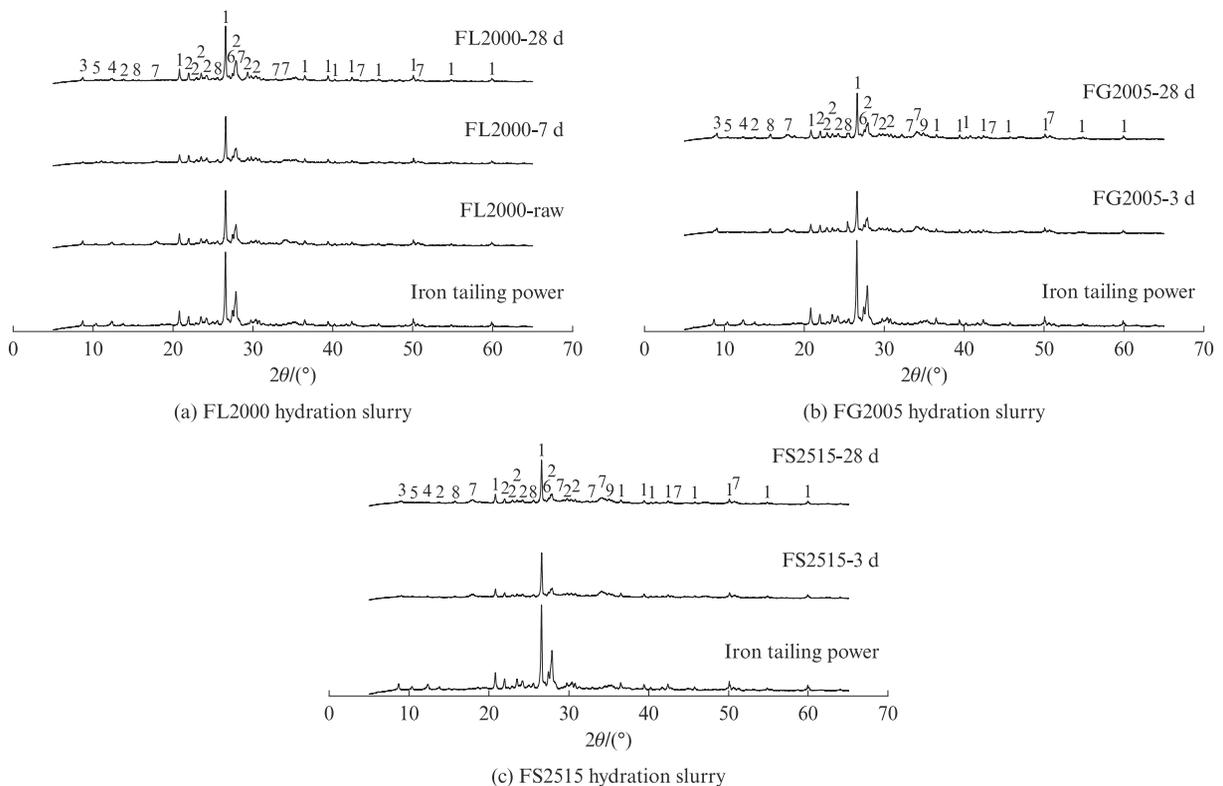
Fig. 2 Micro morphology of hardened paste of iron tailing powder non-clinker consolidation materials

2.3 水化产物的分析与计算

2.3.1 XRD分析

图3为铁尾矿粉无熟料固结材料水化前后的

XRD图谱.由图3可见:(1)FL2000未水化时出现了Ca(OH)₂的特征峰,这是钙质校正材料引入的Ca(OH)₂所致;FL2000水化7、28 d时Ca(OH)₂特征



1—Quartz;2—Albite;3—Muscovite;4—Clinochlore;5—Cordierite;6—Microcline;
7—Portlandite;8—Ettringite;9—Calcium carbonate

图3 铁尾矿粉无熟料固结材料水化前后的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of iron tailing powder non-clinker consolidation materials before and after hydration

峰减弱且部分消失,说明试样在液相体系中发生了化合反应,消耗了Ca(OH)₂;另外,水化试样中长石峰值减弱,也说明在液相中与Ca(OH)₂通过化合反应消耗掉的非晶态SiO₂大部分来自于长石矿物。(2)FG2005水化3 d时出现了AFt和石膏的特征峰,水化28 d时AFt的特征峰强度没有明显变化,石膏和Ca(OH)₂的峰值减弱,说明粉体表面因断键产生的硅铝低聚体中的Al₂O₃与校正材料中的Ca(OH)₂、CaSO₄发生了化合反应,生成了AFt。(3)与FG2005相比,FS2515水化后AFt的峰值略有减弱,表明体系中AFt比例减少。

由图3还可见,硅铝型尾矿粉无熟料固结体中除了由校正材料本身引入的部分Ca(OH)₂、CaSO₄、CaCO₃,以及新生成的AFt之外,没有其他新的物相出现。这说明固结材料中不含任何经过煅烧生成的水硬性硅酸盐水泥矿物成分。

2.3.2 化学分析方法测定AFt含量

图4为铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体中的

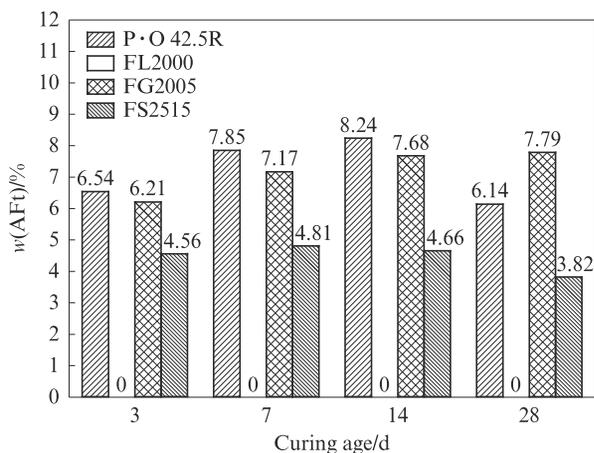


图4 铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体中的AFt含量
Fig.4 Ettringite content in hardened paste of iron tailing powder non-clinker consolidation materials

AFt含量.由图4可见:普通硅酸盐水泥(P·O 42.5R)硬化浆体中AFt含量在14 d时达最大值,14 d后含量减少且趋于平缓,与文献[13]结果一致;FL2000硬化浆体中未测出AFt含量;FG2005硬化浆体中AFt含量与普通硅酸盐水泥浆体接近,但在14 d后仍呈增长趋势,将影响后期强度的稳定增长^[14-15];FS2515水化3 d的硬化浆体中AFt含量为4.56%,7 d时略有增加,28 d时则减少至3.82%,这可能是体系中参与反应的非晶质SiO₂有所增加,消耗掉更多的Ca(OH)₂和H₂O所致。

2.3.3 DSC-TG分析

图5为铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体的DSC曲线和TG曲线.由图5可以看出:(1)试件FL2000水化7、28 d硬化浆体的DSC曲线仅在128 °C附近位置出现明显的C-S-H脱水吸热峰,未出现AFt的吸热特征峰;试件FG2005和FS2515水化3、28 d硬化浆体的DSC曲线在90 °C附近位置均出现明显的AFt脱水吸热峰,未出现C-S-H脱水吸热峰,但TG曲线中显示这2个试件在130 °C附近有明显的失重现象,说明水化样中有C-S-H生成。(2)380~480 °C时,3个试件水化3 d(7 d)和28 d硬化浆体的DSC曲线均出现了明显的Ca(OH)₂脱羟分解吸热峰,表明本试验方案中各试件所掺入的钙质校正材料是足量的,能够满足体系化合所需。(3)在845 °C附近,试件FG2005和FS2515硬化浆体的DSC曲线中均出现了吸热特征峰,并且在TG曲线中伴有失重现象,这是石膏成分在此温度下分解产生的吸热特征峰;试件FL2000硬化浆体的DSC曲线和TG曲线在这个温度附近没有特征峰和失重现象,这说明试件FG2005和FS2515中石膏组分充足,能够确保硬化浆体中的AFt晶型稳定。

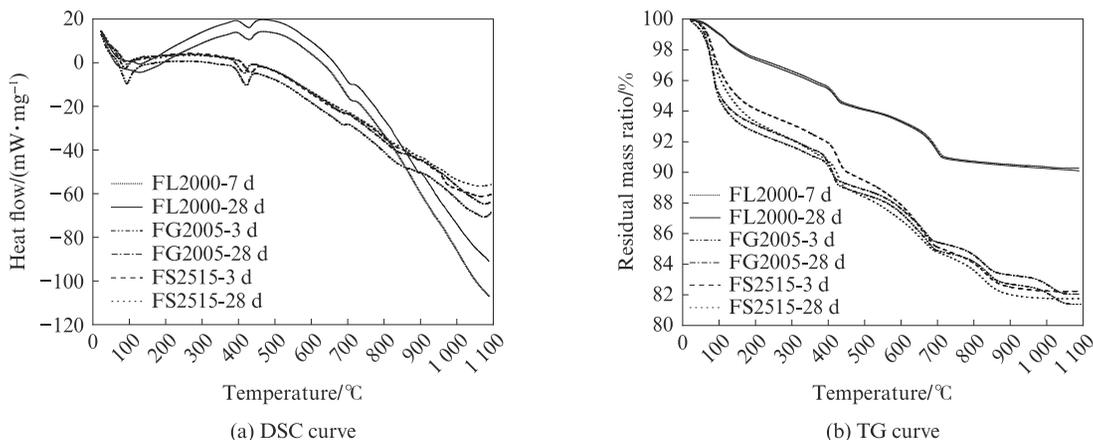


图5 铁尾矿粉无熟料固结材料硬化浆体的DSC曲线和TG曲线

Fig.5 DSC curves and TG curves of hardened pastes of iron tailing powder non-clinker consolidation materials

2.3.4 采用DSC曲线和TG曲线计算C-S-H含量

通过图5(b)中各试件TG曲线的特征峰可半定量计算出C-S-H的含量.AFt和C-S-H的吸热特征峰主要出现在60~180℃处,由于试件FG2005和FS2515的DSC曲线中AFt和C-S-H的脱水吸热峰

存在重叠掩盖现象,可将60~180℃区间吸热峰起止温度之间的失重比例近似视为AFt和C-S-H的脱水总和,根据试样中AFt含量及其结构水的质量分数(45.9%),计算出AFt含量所占的脱水比例 H_{AFt} ,由上述二者的脱水总和减去 H_{AFt} ,得出C-S-H含量,结果见表3.

表3 硬化浆体中C-S-H含量半定量计算结果
Table 3 Semi quantitative calculation results of content of C-S-H in hardened pastes

Code	Age/d	Initial temperature/℃	Final temperature/℃	Mass loss ratio/%	$w(\text{AFt})/\%$	$H_{\text{AFt}}/\%$	$w(\text{C-S-H})/\%$
FL2000	7	105.7	150.0	0.84	0	0	6.26
	28	104.9	151.5	1.26	0	0	9.37
FG2005	3	60.0	149.9	4.59	6.21	2.85	12.97
	28	60.9	149.3	5.57	7.79	3.58	14.87
FS2515	3	59.4	161.5	4.68	4.56	2.09	19.23
	28	59.8	160.8	5.31	3.82	1.75	26.45

3 硅铝型尾铁尾矿粉无熟料固结机理分析

石英和长石均属于架状硅酸盐结构,在细磨化过程中比层状结构的矿物更容易形成表面断键^[16].文献[17]研究表明,中值粒径(D_{50})为4.8 μm的石英微粉表面因晶格缺陷形成的非晶态 SiO_2 相对质量为26.3%.由于长石矿物中铝氧键的键能比硅氧键低,铝氧键容易在机械力作用下断裂^[18].因此与纯石英相比,含有长石矿物的铁尾矿在细磨过程中粉体表面会产生更多的悬空键并形成晶格畸变.本试验铁尾矿试样颗粒的 D_{50} 在7~10 μm之间,表面矿物已经形成一定厚度的非晶质层,层中的 SiO_2 、 Al_2O_3 发生了化学性质的改变^[8],在有 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 存在的液相环境中,极易生成C-S-H和AFt^[8,19].矿物中的晶态成分仍是稳定态,不参与水化.早期AFt在硬化浆体中搭建骨架结构,随后生成的C-S-H继续细密胶结,使浆体结构致密化,产生力学强度.这是铁尾矿粉组比磨细石英砂组试件强度显著提高的主要原因.由于磨细石英砂组试件中非晶质 SiO_2 含量较低且没有 Al_2O_3 ,因此强度很低.磨细石英砂组试件的强度结果也说明在没有足量非晶质 SiO_2 、 Al_2O_3 时,仅有钙、硫校正材料也无法形成高强度固结体.

普通硅酸盐水泥净浆中的C-S-H含量在35%~45%之间^[20],AFt含量在6%~8%之间^[12-13].如果硬化浆体后期AFt含量过高,会造成体积膨胀,从而导致强度降低^[19].由表3可见,试件FG2005中3、28 d的AFt含量分别为6.21%、7.79%,C-S-H含量分别为12.97%、14.87%,对应龄期的强度大幅度提高.但当AFt与C-S-H的质量比为1/2左右时,试件后期强度

增幅不大;试件FS2515中15%硅质校正材料的掺入,以缓释方式补充了体系水化生成C-S-H所需的非晶质 SiO_2 ,使C-S-H含量显著提高,3、28 d时分别为19.23%、26.45%,对应龄期的AFt含量有所降低,3、28 d时分别为4.56%、3.82%.合理调控水化产物的晶胶比到1/7~1/5,接近于普通硅酸盐水泥硬化浆体中的晶胶比,试件强度大幅度增加,并保证了后期强度的稳定增长.

4 结论

(1)全部采用工业废料,通过合理有效的钙、硫、硅校正配料,并采用机械力粉磨,使粉体材料的比表面积达到1 000 m^2/kg 左右时,可以获得硅铝型铁尾矿粉的无熟料高强度固结效果,固结体的28 d强度值可达52.08 MPa.

(2)铁尾矿粉表面晶格畸变提供了能够有效参与水化反应的非晶态 SiO_2 和 Al_2O_3 ,生成的主要水化产物为C-S-H和AFt.在水化过程中,仅铁尾矿粉表面非晶质层提供的有效非晶态 SiO_2 、 Al_2O_3 才能与外掺的钙、硫校正材料发生水化反应,水化速率快,矿物中的晶态成分不参与水化.

(3)采用化学分析方法测定硬化浆体中的AFt含量,结合DSC曲线和TG曲线,近似计算出C-S-H的含量.通过掺入15%的硅质校正材料,显著提高了硬化浆体中C-S-H的含量,将硬化浆体中的晶胶比调控为1/7~1/5,可有效确保固结体强度的持续稳定发展.

参考文献:

[1] 王海军,王伊杰,李文超,等.全国矿产资源节约与综合利用报

- 告(2019)[M].北京:地质出版社,2020:19-20.
- WANG Haijun, WANG Yijie, LI Wenchao, et al. National report on conservation and comprehensive utilization of mineral resources(2019)[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2020: 19-20. (in Chinese)
- [2] YOUNG G, YANG M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 152-156.
- [3] WANG Q, YAO G, ZHU X N, et al. Preparation of Portland cement with gold ore tailings[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 1-9.
- [4] 朴春爱,王栋民,张力冉,等. 化学-机械耦合效应对铁尾矿粉胶凝活性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1100-1109.
- PIAO Chun'ai, WANG Dongmin, ZHANG Liran, et al. Influence of chemical mechanical coupling effect on iron ore tailings cementitious activity[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1100-1109. (in Chinese)
- [5] YANG M J, SUN J H, DUN C Y, et al. Cementitious activity optimization studies of iron tailings powder as a concrete admixture [J]. Construction and Building Materials, 2020, 265(6): 120760.
- [6] 宋军伟,朱街禄,刘方华,等. 铜尾矿粉对复合胶凝体系强度和微结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6): 846-852.
- SONG Junwei, ZHU Jieli, LIU Fanghua, et al. Influence of copper tailing powder on the compressive strength and microscopic structure of complex binder[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6): 846-852. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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: 174-190, 449-473.
- YANG Nanru. Non-tradition cementitious materials chemistry [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018: 174-190, 449-473. (in Chinese)
- [9] LIU J H, ZHOU Y C, WU A X, et al. Reconstruction of broken Si—O—Si bonds in iron ore tailings (IOTs) in concrete [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2019, 26(10): 1329-1336.
- [10] 刘娟红,周在波,吴爱祥,等. 低浓度拜耳赤泥充填材料制备及水化机理[J]. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1457-1464.
- LIU Juanhong, ZHOU Zaibo, WU Aixiang, et al. Preparation and hydration mechanism of low concentration Bayer red mud filling materials[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42 (11): 1457-1464. (in Chinese)
- [11] 刘倩影,刘娟红,张月月,等. 细粒级全尾砂膏体充填材料性能调控研究[J]. 金属矿山, 2021, 544(10): 51-60.
- LIU Qianying, LIU Juanhong, ZHANG Yueyue, et al. Study on performance control of fine grained tailings paste filling material [J]. Metal Mine, 2021, 544(10): 51-60. (in Chinese)
- [12] SHI T, YAO Y M. Quantitative analysis of ettringite formed in the hydration products of high-alite cements[J]. Advances in Cement Research, 2015, 27 (9) : 497-505.
- [13] 梁文泉. 固硫渣混合水泥的研究及钙矾石相的定量分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 1994, 27(5): 492-499.
- LIANG Wenquan. Study on pozzolanic Portland cement with sulphur-fixed ash and quantitative analysis of AfT[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1994, 27(5): 492-499. (in Chinese)
- [14] 赵德强,张昺榴,朱文尚,等. 道路基层复合胶凝材料的性能调控[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1137-1143.
- ZHAO Deqiang, ZHANG Bingliu, ZHU Wenshang, et al. Performance regulation of road base composite binder[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1137-1143. (in Chinese)
- [15] BIZZOZERO J, GOSELIN C, SCRIVENER K L. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56(2): 190-202.
- [16] 陆现彩,尹琳,赵连泽,等. 常见层状硅酸盐矿物的表面特征[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(1): 60-65.
- LU Xiancai, YIN Lin, ZHAO Lianze, et al. Surface characteristics of general phyllosilicate minerals[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(1): 60-65. (in Chinese)
- [17] 蔡红,王贞尧,张干诚,等. 石英微粉表面结构对硬硅钙石中空二次粒子形貌的影响[J]. 无机材料学报, 1999, 14(3): 431-436.
- CAI Hong, WANG Zhenyao, ZHANG Gancheng, et al. Effect of surface morphology of fine quartz on the hollow secondary particles of xonotlite[J]. Journal of Inorganic Materials, 1999, 14 (3): 431-436. (in Chinese)
- [18] 王燕,朱一民,谢瑞琦,等. 钠长石的晶体化学基因特征及其可浮性预测[J]. 金属矿山, 2020, 528(6): 81-86.
- WANG Yan, ZHU Yimin, XIE Ruiqi, et al. Crystal chemical genes characteristics of albite and prediction of its floatability[J]. Metal Mine, 2020, 528(6): 81-86. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 肖万,马鸿文. 矿渣微细粉掺量对水泥水化产物的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(6): 882-888.
- XIAO Wan, MA Hongwen. The influences of slag ultrafine powder on the cement hydration products[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(6): 882-888. (in Chinese)