半干法脱硫灰膏体制备流态填筑材料及其机制

左泽明康[1]，周文波[2]，潘国泰[2]，张瀚文[1]，雷国元[1]
（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 福建三钢闽光股份有限公司，福建 三明 365000）

摘要：针对填埋到湖底的脱硫灰含水量较高，脱水干燥后再利用可行性差的问题，本文直接利用填埋半干法脱硫灰膏体制备全固废流态填筑料。研究“半干法脱硫灰－钢渣微粉－粉煤灰”全固废胶凝材料，考察原料配比对抗压强度的影响，通过 XRD、FT-IR、SEM 等分析手段研究胶凝机制，考察流态填筑料强度的影响因素。结果表明：原料最佳配比为脱硫灰∶粉煤灰∶钢渣微粉＝40∶20∶40，28 d 抗压强度可以达到 13.37 MPa；复合胶凝材料水化产物除常规的水化硅酸钙（C—S—H）凝胶和钙矾石外，还存在少量的 $C_3A—CaSO_3—11H_2O$，其由脱硫灰中的 $CaSO_3·0.5H_2O$和体系中的水化铝酸钙（C—A—H）反应生成；当固化剂掺量为 8%～20% 时，所制备的流态填筑料 28 d 抗压强度为 1.18～2.47 MPa；三乙醇胺可以增加流态填筑料各龄期的抗压强度，最佳用量为固化剂质量的 0.04%。

关键词：半干法；脱硫灰；粉煤灰；复合胶凝材料；流态填筑材料
中图分类号：X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）04－0114－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.066

Preparation and mechanism of fluid filling materials using semidry desulfurization ash paste system

ZUO Zemingkang[1], ZHOU Wenbo[2], PAN Guotai[2], ZHANG Hanwen[1], LEI Guoyuan[1]
（1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Fujian Sangang Minguang Co., Ltd., Sanming 365000, Fujian, China）

Abstract: In view of the high water content of desulfurized ash buried at the bottom of the lake and the poor feasibility of reuse after dehydration and drying. In this study, the natural properties of semi-dry desulphurized ash paste were directly used to prepare full-solid waste fluid filling material. The “semi-dry desulfurization ash, steel slag powder and fly ash” full-solid waste cementification material was studied. The effect of raw material ratio on compressive strength was investigated. The gelling mechanism was studied by means of XRD, FT-IR, SEM and other analysis methods, and the influencing factors on the strength of fluid filling material were investigated. The results show that, the optimal ratio of raw materials is desulfurization ash: fly ash: steel slag powder = 40∶20∶40, and the compressive strength of 28 d can reach 13.37 MPa. In addition to the conventional C—S—H gel and ettringite, there is also a small amount of hexagonal-shaped crystal $C_3A—CaSO_3—11H_2O$, which are generated by the reaction of $CaSO_3·0.5H_2O$ in desulfurization ash and C—A—H in the system. When the ratio of curing agent is in the range of 8%～20%, the 28 d compressive strength of the prepared fluid fill is 1.18～2.47 MPa. Triethanolamine can improve the compressive strength of the fluid filling at different ages. The best results can be obtained when the dosage is 0.04% of the curing agent mass. When the dosage of curing agent is 8%, the main index of the prepared fluid filling material meets the standard requirements and the feasibility is good.

Key words: semidry process; desulfurization ash; fly ash; composite cementitious material; fluid filling material

收稿日期：2023－07－21；**修回日期**：2023－10－08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（41701624）
作者简介：左泽明康（1998—），男，硕士研究生，从事固废综合利用及环境工程研究。
通信作者：雷国元（1964—），男，教授，博士，从事固体废物处理处置与资源化、环境友好材料研究。

半干法脱硫灰缺乏有效的综合利用途径，许多企业一直采用堆存或填埋处置[1]，造成环境污染和资源浪费[2]。近年来，国内外研究者利用半干法脱硫灰制备水泥掺合料[3]、免烧砖[4]、土壤改良剂[5]等材料，掺量较低。传统观点认为半干法脱硫灰中的亚硫酸钙是有害成份，需要氧化成硫酸钙才能利用[6]，而预氧化增加了工艺的复杂性。由于以上原因，半干法脱硫灰规模化消纳利用问题一直没有得到很好的解决。

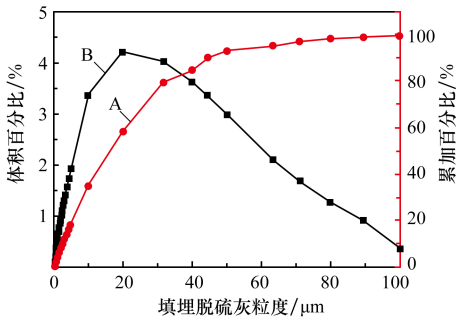
随着环保要求的日益提高，部分填埋到湖中的半干法脱硫灰需要清淤并另行处置，由此产生的脱硫灰膏体含水率高、细度大、脱水困难，常规综合利用方式难以实现再利用。2022 年 6 月，国务院常务会议强调："地下综合管廊是城市'里子'工程，投资潜力大、带动能力强，是一举多得的代表性项目"。管廊工程建设需要大量的回填材料。基槽回填空间狭窄、回填深度较大时，流态填筑材料具有很大的优势。

流态填筑材料采用再生的粉料或骨料作为主要原料，并加固化剂和水混合配制而成[7]。本研究拟以清淤产生的半干法脱硫灰膏体为主要原料，在自然含水率条件下，加入少量的钢渣微粉和粉煤灰，制备全固废流态填筑料，以解决存量脱硫灰规模化消纳问题。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

原料主要化学成分如表 1 所示。表 1 中，半干法脱硫灰膏体取自某脱硫灰填埋处，比表面积为 434 m^2/kg，含水率为 38%。粒径分布如图 1 所示。脱硫灰膏体去除附着水后，根据文献[8]所提供的方法，测定 $CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$、$Ca(OH)_2$、$CaCO_3$ 的质量分数，结果分别为 20.30%、30.42%、14.81%、11.42%；钢渣微粉取自某钢铁厂，比表面积为 339 m^2/kg，主要



A—累加百分比；B—体积百分比。

图 1　填埋脱硫灰粒度分布

Fig. 1　Particle size distribution of landfill desulfurization ash

矿物成分为硅酸三钙（C_3S）、硅酸二钙（C_2S）及少量铝酸三钙（C_3A）；粉煤灰取自某火电厂，比表面积为 400 m^2/kg；激发剂为三乙醇胺，用量以其与固化剂的百分比计。

1.2　试验方法

1.2.1　胶凝材料研究

胶凝材料净浆的试验（通过净浆试验确定固化剂配方）：按照设定的配合比，称取相应质量的脱硫灰、钢渣微粉、粉煤灰，混合后加入水，水灰比为 0.375，搅拌均匀后，浇筑到模具（30 mm × 30 mm × 30 mm）中；脱模后，在标准养护[温度为（20 ± 2）℃，相对湿度≥95%）]条件下养护至相应龄期，测定无侧限抗压强度，评定胶凝材料性能。

胶凝机理研究：通过原料与净浆试验 28 d 样品对比的分析研究胶凝机制。利用 X 射线衍射仪（XRD）进行矿物成分分析；利用傅立叶红外光谱（FT-IR）分析仪进行官能团分析；利用扫描电子显微镜（SEM）分析观察水化产物形貌。

1.2.2　流态填筑材料试验方法

条件试验中，将一定量的固化剂、激发剂直接加入半干法脱硫灰膏体中，补加水使水灰比为 0.375，使流动性达到施工要求；搅拌均匀后，将浆体浇筑到模具（30 mm × 30 mm × 30 mm）中，脱

表 1　原料主要化学成分（质量分数）

Table1　Main chemical compositions of raw materials　　%

原料名称	CaO	Fe_2O_3	MgO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl
脱硫灰膏体	59.91	2.12	0.988	2.36	0.837	0.430	0.171	30.10	1.23
钢渣微粉	49.11	21.63	6.740	18.18	1.050	—	—	—	—
粉煤灰	4.97	4.78	0.510	45.83	35.710	0.66	0.250	—	—

模后自然养护至相应龄期，测定无侧限抗压强度；按照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)规定的方法测定流动度。

综合条件试验时，根据条件试验所获得的最佳工艺参数，将相应质量的钢渣微粉、粉煤灰、激发剂直接加入到脱硫灰膏体中，加水搅拌后制备流态填筑料。

2 试验结果与讨论

2.1 胶凝材料试验结果分析

根据固废物性特点，脱硫灰中 $Ca(OH)_2$ 可以激发钢渣微粉、粉煤灰的活性，故脱硫灰的掺量维持在 40%；根据文献[9]，粉煤灰对钢渣微粉取代量不宜过高，取代率在 30% 内变化；将水泥熟料替代钢渣微粉进行试验，以考察配制无熟料固化剂的可能性。净浆试验的原料配比及各龄期的抗压强度如表 2 所示。

表 2 净浆试验原料配合比及各龄期强度性能

Table 2 Blending ratio of raw materials slurry testing and strength properties of various age

组别	原料配合比(质量分数)/%				抗压强度/MPa		
	脱硫灰	粉煤灰	钢渣微粉	水泥熟料	7 d	14 d	28 d
A1	40	0	60	0	1.96	6.72	7.93
A2	40	10	50	0	2.36	10.60	11.32
A3	40	20	40	0	2.64	10.86	13.37
A4	40	30	30	0	2.17	8.64	9.87
B1	40	20	0	40	3.46	11.21	14.46

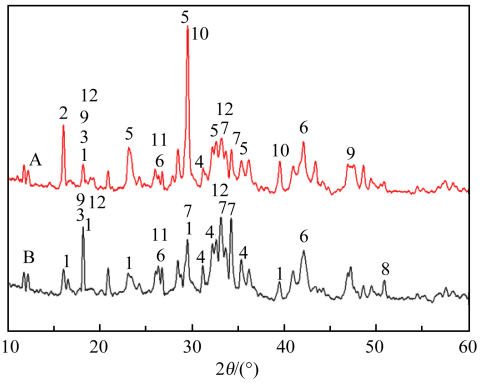
由表 2 可知，A1 ~ A4 中，A3 配比下各龄期的抗压强度都最大，说明粉煤灰对钢渣微粉的最佳取代率为 20%。这主要是因为：粉煤灰掺量过低时，体系中没有足够的 SiO_2、Al_2O_3 与 $Ca(OH)_2$ 反应；粉煤灰掺量过高时，钢渣微粉掺量过低，C_3S、C_2S、C_3A 含量减少；此外，$Ca(OH)_2$ 被消耗过多，不利于形成持久的碱性环境，粉煤灰玻璃体外壳无法被侵蚀，很多粉煤灰颗粒会附着在表面无法参与反应，导致体系强度会降低[10]。

同时，从 A3 与 B1 的试验结果可以看出：二者 28 d 抗压强度相近，说明全固废原料配制固化剂具有可行性；在无熟料存在的情况下，由于脱硫灰、粉煤灰、钢渣微粉三者之间具有协同性，基本达到水泥熟料存在时的胶凝效果。

2.2 胶凝机制研究

2.2.1 XRD 分析

由于 A3 固化剂效果最佳，因此对 A3 净浆试验原料及 28 d 水化样品进行 XRD 对比分析，结果如图 2 所示。



A—28 d 水化样品；B—原料。

1—$CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$；2—AFt；3—C_3A；4—C_2S；5—C—S—H；6—RO；7—C_3S；8—$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$；9—$Ca(OH)_2$；10—C_3A—$CaSO_3$—$11H_2O$；11—SiO_2；12—A_3S_2。

图 2 A3 净浆试验原料及 28 d 样品 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectra of A3 slurry test raw materials and 28 day samples

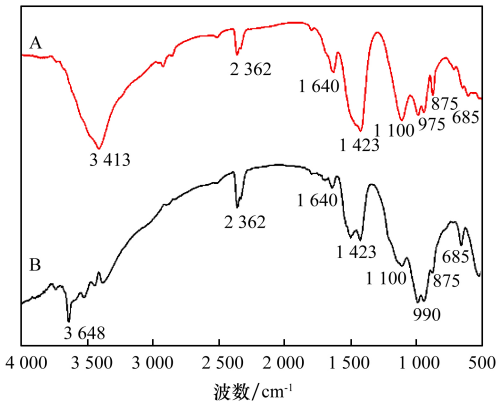
由图 2 可以看出：原料中矿物项主要为 $CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$、C_2S、C_3S、C_3A、SiO_2、$Ca(OH)_2$、莫来石(A_3S_2)和二价金属固溶体(RO)。

与原料特征峰相比，28 d 样品的特征峰中 C_3S、C_2S、C_3A、$Ca(OH)_2$、SiO_2、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$、A_3S_2、$CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$ 的特征峰减弱明显。此外，新出现了水化硅酸钙(C—S—H)、钙矾石(AFt)晶体和 C_3A—$CaSO_3$—$11H_2O$(AFm)[11]的特征峰。由此可以推测，水化硅酸钙(C—S—H)的生成源于 C_2S、C_3S 的水化反应以及 SiO_2 与 $Ca(OH)_2$ 之间的火山灰反应；C_3A 的水化产物、Al_2O_3 与 $Ca(OH)_2$ 之间的火山灰反应产物，二者与 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$、$CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$ 之间反应，生成 AFt、AFm；RO 项特征峰几乎不变，原因是 RO 项很难发生水化。

2.2.2 FT-IR 分析

A3 组原料、养护 28 d 试样的 FT-IR 分析结果

如图 3 所示。



A—28 d 水化样品；B—原料。

图 3　原料与养护 28 d 试样的 FT-IR 图谱

Fig. 3　FT-IR spectrum of raw materials and curing 28 d samples

分析图 3 可以发现：28 d 试样中 3 640 ~ 3 300 cm^{-1}处的波谱带较宽，其原因可能是随着试块不断发生水化反应，水化产物 AFt 晶体、C—S—H凝胶、$C_3A—CaSO_3—11H_2O$ 晶体的含量也不断增加；原料中 3 648 cm^{-1}左右的吸收峰是与$Ca(OH)_2$相关的羟基(X—OH)的特征峰[12]，水化 28 d 后样品的特征峰更加平滑，说明 $Ca(OH)_2$ 深度参与了水化反应；原料谱线中 1 100 cm^{-1}处吸收峰对应 SO_4^{2-} 不对称拉伸振动，经过 28 d 水化后吸收峰锐化，说明大量的 Ca^{2+}、Al^{3+} 与 SO_4^{2-} 结合形成了钙矾石[12]；原料谱线波数 990 cm^{-1}处所观察到的特征峰与 SO_3^{2-} 的对称拉伸振动相关，28 d 产物谱线中迁移至波数 975 cm^{-1}处，表明 SO_3^{2-} 的存在形式发生改变，即 $CaSO_3·0.5H_2O$ 参与了水化反应生成了 $C_3A—CaSO_3—11H_2O$ 晶体[13]；875 cm^{-1}处的吸收峰是 Si—O 键的不对称伸缩振动峰，28 d水化后吸收峰锐化加深，表明 C—S—H 凝胶中硅氧四面体以 $(SiO_3)^{2-}$ 和 $(SiO_4)^{4-}$形式存在[14]；685 cm^{-1}吸收峰为铝氧四面体中 Al—O 键的吸收峰，水化 28 d 样品中吸收峰消失，这充分表明铝氧四面体在水化过程中逐渐解聚[15]，形成了 AFt、$C_3A—CaSO_3—11H_2O$ 等水化产物；1 640 cm^{-1}处的吸收峰是结晶水的弯曲振动峰，该峰在 28 d 产物谱线中加深，原因是水化后生成胶凝产物，增加了结晶水含量；在 1 423 cm^{-1}处的峰与 CO_3^{2-} 的不对称拉伸振动有关，与原料相比，水化28 d 产物谱线中该峰锐化，可能是制品养护过程中碳化所致[16]。

2.2.3　SEM 电镜分析

对 A3 净浆试验水化 28 d 样品进行 SEM 分析，结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出：产物中存在大量的 C—S—H 凝胶，少量的针状 AFt 晶体和六方形状的 $C_3A—CaSO_3—11H_2O$晶体[13]；各类水化产物交错形成较为致密的结构。可见，XRD、FT-IR 分析的结果与 SEM 观察结果一致。

MOTZET 等[13]研究表明，脱硫灰中的 $CaSO_3·0.5H_2O$与铝酸钙发生水化反应可以生成 $C_3A—CaSO_3—11H_2O$（AFm），类似于钙矾石(AFt)的形成。由于 A3 配方中粉煤灰掺量较低，所以水化产物中 AFt、AFm 量较少，主体胶凝相为 C—S—H 凝胶。

2.2.4　水化反应分析

根据 XRD、FT-IR 和 SEM 的分析结果，说明体系中发生了如下水化反应：

(1) 钢渣微粉中的 C_3S、C_2S、C_3A 水化反应生成水化硅酸钙(C—S—H)和水化铝酸钙(C—A—H)。

$$2(3CaO·SiO_2)+6H_2O=3CaO·2SiO_2·3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (1)$$

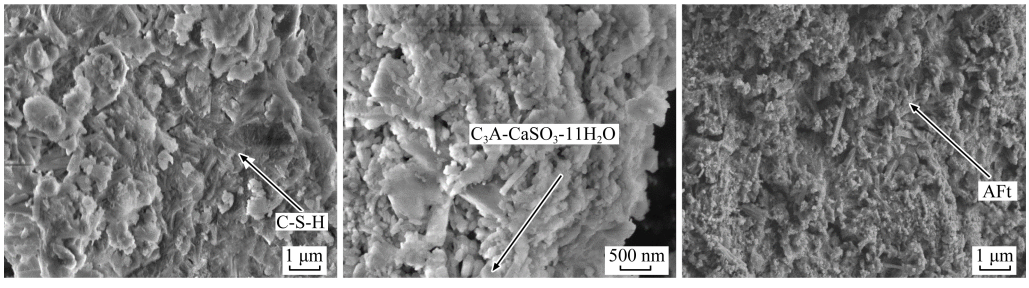


图 4　A3 净浆 28 d 水化产物 SEM 图谱

Fig. 4　SEM of 28 d hydration products of A3 pure pulp

$$2(2CaO\cdot SiO_2)+4H_2O=3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3+6H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O \quad (3)$$

（2）粉煤灰提供的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 和体系中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成水化硅酸钙（C—S—H）和水化铝酸钙（C—A—H），$Ca(OH)_2$ 源于脱硫灰原料和钢渣微粉的水化：

$$mCa(OH)_2+SiO_2+nH_2O\rightarrow mCaO\cdot 2SiO_2\cdot(m+n)H_2O \quad (4)$$

$$3Ca(OH)_2+Al_2O_3+3H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O \quad (5)$$

（3）C—A—H 分别与脱硫灰中的 $CaSO_4\cdot 2H_2O$、$CaSO_3\cdot 0.5H_2O$ 反应生成 AFt 和 C_3A—$CaSO_3$—$11H_2O$：

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O+3CaSO_4+25H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O \quad (6)$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O+CaSO_3+5H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_3\cdot 11H_2O \quad (7)$$

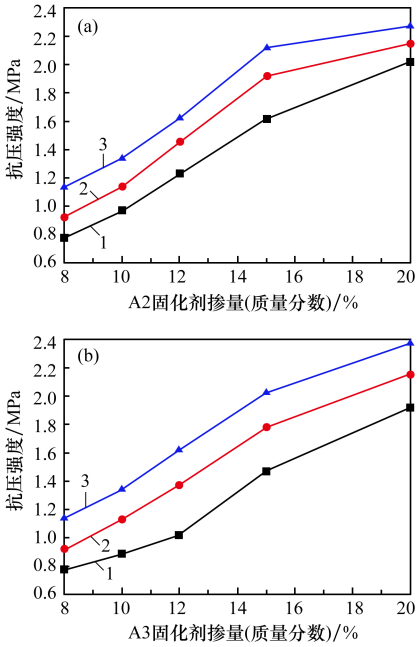
以上水化反应说明半干法脱硫灰、粉煤灰、钢渣微粉具有协同作用；半干法脱硫灰中的 $Ca(OH)_2$、$CaSO_4\cdot 2H_2O$ 和 $CaSO_3\cdot 0.5H_2O$ 都是胶凝产物的合成原料。

3 胶凝材料制备流态填筑材料研究

3.1 固化剂掺量对无侧限抗压强度的影响

A2 组固化剂（脱硫灰∶粉煤灰∶钢渣微粉 = 40∶10∶50）和 A3 组固化剂（脱硫灰∶粉煤灰∶钢渣微粉 = 40∶20∶40）固化脱硫灰膏体，制备流态填筑材料，固化剂掺量对样品的抗压强度影响如图 5 所示。

由图 5 可以看出：同一养护龄期内，流态填筑料的抗压强度随固化剂用量的增加而增加。原因是随着固化剂含量的增加，胶凝产物生成量增加，使样品的抗压强度上升。当两种固化剂掺量均为 20% 时，虽然填筑料在养护 14 d、28 d 抗压强度差别不大，但 7 d 抗压强度差别较大。原因是 A3 固化剂中粉煤灰含量较多，钢渣微粉含量较少，在氢氧化钙充足的情况下，较多的粉煤灰能提供更多 Al_2O_3，利于钙矾石的形成[17]，提高早期强度；A2 固化剂中粉煤灰含量较少，钢渣微粉



养护龄期/d：1—7；2—14；3—28。

脱硫灰、粉煤灰、钢渣微粉配比：（a）40∶10∶50；（b）40∶20∶40

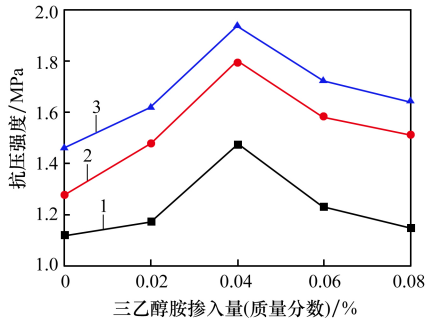
图 5 固化剂掺量对流态填筑料抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of dosage of curing agent on compressive strength of Fluid filling material

含量较多，钢渣微粉水化速度较慢，早期强度低，后期强度增长较快。因此，可以适当调整体系中粉煤灰掺量，提升流态填筑料早期抗压强。

3.2 三乙醇胺用量对无侧限抗压强度的影响

三乙醇胺对火山灰反应有一定的激发作用。在固化剂配方为 A3，掺量为 12% 的条件下，三乙醇胺剂量对于样品各龄期抗压强度影响如图 6 所示。



养护龄期/d：1—7；2—14；3—28。

图 6 三乙醇胺添加量对流态填筑料抗压强度影响

Fig. 6 Influence of triethanolamine dosage on compressive strength of Fluid filling material

从图 6 可以看出，添加三乙醇胺可增加各龄期的抗压强度，其最佳用量为 0.04%。三乙醇胺可以络合粉煤灰中的 Fe、Al 相，促进粉煤灰颗粒表面的腐蚀，使粉煤灰由表及里逐步破坏，释放出更多的活性 Al_2O_3 和 SiO_2，加速了火山灰反应，增加了抗压强度。三乙醇胺掺量过高时，快速形成的水化产物包裹在未水化颗粒的表面，降低了水化反应速度，使抗压强度下降[18]。

4　综合条件试验

实际生产中，以半干法脱硫灰膏体为主要原料，制备流态填筑料的工艺流程如图 7 所示。根据工艺流程，固化剂配方选用 A3，按照固化剂配比和固化剂掺量为 8% 的要求，直接将相应量的钢渣微粉和粉煤灰加入到半干法脱硫灰膏体中，并加入最佳剂量的三乙醇胺，加少量的水，搅拌均匀后制备流态填筑料，其各项性能指标如表 3 所示。由此看出，产品主要质量指标达到《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA001—2019) 规定的要求。

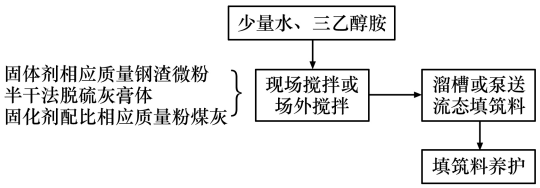


图 7　工艺流程

Fig. 7　Process flow chart

表 3　流态填筑料各项性能指标

Table 3　Performance index of fluid filling material

性能指标	28 d 抗压强度/MPa	流动度/mm	收缩率
标准值	0.5 ~ 10.0	>150	—
实测值	1.13	195 ± 10	2%

5　可行性分析

按照综合试验的工艺参数，流态填筑料成本概算如表 4 所示。由表 4 可知，根据固化剂配方、脱硫灰膏体的含水率，实际生产中将 1.6 份粉煤灰、3.2 份钢渣微粉加入到 166.45 份脱硫灰膏体中，制备流态填筑料。流态填筑料密度约为 1 600 kg/m^3，含水率为 37.5%，制备 1 m^3 流态填筑料，钢渣微粉、粉煤灰、半干法脱硫灰膏体用量分别为 0.030、0.015、1.555 t；半干法脱硫灰膏体外委处置费为 30 元/t，市场上流态固化土价格为 170 元/m^3，参照此价格，产品净收益为 198.60 元/m^3。所以，该技术利用填埋半干法脱硫灰膏体的自然属性，免脱水直接利用，工艺简便，经济效益和社会效益显著，可行性好。

表 4　成本概算

Table 4　Cost estimates

项目	单价	数量/m^3	成本/(元·m^{-3})
脱硫灰膏体	−30 元/t	1.555 t	−46.65
钢渣微粉	160 元/t	0.030 t	4.80
粉煤灰	150 元/t	0.015 t	2.25
外加剂	6 元/m^3	1	6.00
人工、机械	5 元/m^3	1	5.00
总成本			−28.60
市场销售价格			170.00

6　结　论

(1) 用半干法脱硫灰可以配制全固废胶凝材料，最佳配方为脱硫灰∶粉煤灰∶钢渣微粉 = 40∶20∶40，28 d 抗压强度达到 13.37 MPa。其固化填埋脱硫灰膏体制备流态填筑料，掺量为 8% ~ 20% 时，流态填筑料 28 d 抗压强度为 1.18 ~ 2.47 MPa；三乙醇胺可以增加流态填筑料各龄期的抗压强度，最佳剂量为固化剂质量的 0.04%。

(2) 理论分析表明："脱硫灰 − 钢渣微粉 − 粉煤灰"全固废胶凝材料水化产物除常规的水化硅酸钙(C—S—H)凝胶和钙矾石(AFt)外，还发现 $C_3A—CaSO_3—11H_2O$(AFm)，其由脱硫灰中的 $CaSO_3·0.5H_2O$ 和体系中的水化铝酸钙(C—A—H)反应生成。

(3) 当固化剂掺量为 8% 时，所制备的流态填筑料，其主要指标达到《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA001—2019) 规定的要求，收益为 198.60 元/m^3，可行性好。

参考文献：

[1] 苏航，邵久刚，毛瑞，等. 烧结半干法脱硫灰资源化利用研究与实践[J]. 烧结球团，2023，48(1)：36 − 43.
SU Hang，SHAO Jiugang，MAO Rui，et al. Research and practice on resource utilization of sintering semi-dry

desulfurization ash[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(1):36 – 43.

[2] 周茂军,张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析[J]. 烧结球团,2019,44(3):58 – 63.
ZHOU Maojun, ZHANG Daihua. Application and analysis of ultra-low emission technology of sintering flue gas in Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 58 – 63.

[3] 吴金龙. CFB 高钙脱硫灰渣作硫铝酸盐水泥原料及掺合料试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
WU Jinlong. Experimental research on high calcium CFB desulfurization ash as raw material and admixture of sulphoaluminate cement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[4] 马永贤. 半干法脱硫灰制备生态建材及工艺参数优化[D]. 石家庄:河北科技大学,2010.
MA Yongxian. Preparation of ecological building materials from semi-dry desulfurization ash and optimization of process parameters[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2010.

[5] WANG Y, SHI L. The effects of modified flue gas desulfurization residue on growth of sweet potato and soil amelioration[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2015, 226(8):245.

[6] 姚璐,刘清才,方诗惠,等. 半干法烧结烟气脱硫灰的氧化改性[J]. 环境工程学报,2016,10(6):3147 – 3151.
YAO Lu, LIU Qingcai, FANG Shihui, et al. Oxidation modification of semi-dry desulfurization ash from sintering flue gas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(6):3147 – 3151.

[7] 胡平. 综合管廊共构段基坑回填施工工艺及质量控制措施[J]. 工程质量,2020,38(9):66 – 70.
HU Ping. Construction technology and quality control measures of backfilling foundation pit in co-construction section of utility tunnel[J]. Construction Quality, 2020, 38(9):66 – 70.

[8] 康凌晨,卢丽君,李富智,等. 半干法烧结烟气脱硫灰的化学成分分析方法研究[J]. 化学工程与装备,2016(10):210 – 212.
KANG Lingchen, LU Lijun, LI Fuzhi, et al. Study on chemical composition analysis method of semi-dry sintering flue gas desulfurization ash[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016(10):210 – 212.

[9] 李斌,赵旭章,晋强,等. 粉煤灰掺量对钢渣蓄热水泥砂浆耐热性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2021,35(2):85 – 91.
LI Bin, ZHAO Xuzhang, JIN Qiang, et al. Influence of fly ash content on heat resistance of steel slag thermal storage cement mortar[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2021, 35(2):85 – 91.

[10] 邵雁,姜明明,熊敬超,等. 早强剂对钢渣 – 脱硫灰基胶凝材料的强度及水化性能影响[J]. 环境工程,2022,40(12):134 – 141.
SHAO Yan, JIANG Mingming, XIONG Jingchao, et al. Influence of admixtures on strength and hydration performance of steel slag & desulfurization ash based cementitious materials[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12):134 – 141.

[11] LAGOSZ A, MALOLEPSZY J. Tricalcium aluminate hydration in the presence of calcium sulfite hemihydrate[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 333 – 339.

[12] 李云云,梁文特,倪文,等. 钢渣尾泥 – 矿渣 – 脱硫石膏三元体系水化硬化特性[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):536 – 544.
LI Yunyun, LIANG Wente, NI Wen, et al. Characteristics of hydration and hardening of steel slag mud-blast furnace slag-desulphurization gypsum system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2):536 – 544.

[13] MOTZET H, PÖLLMANN H. Synthesis and characterisation of sulfite-containing AFm phases in the system $CaO—Al_2O_3—SO_2—H_2O$[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7):1005 – 1011.

[14] 汪坤,李颖,张广田. 含钢渣的低熟料混凝土耐久性及水化机理研究[J]. 中国冶金,2020,30(10):92 – 97.
WANG Kun, LI Ying, ZHANG Guangtian. Study on durability and hydration mechanism of low clinker concrete containing steel slag[J]. China Metallurgy, 2020, 30(10):92 – 97.

[15] 崔孝炜,倪文,任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应机理[J]. 材料研究学报,2017,31(9):687 – 694.
CUI Xiaowei, NI Wen, REN Chao. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials based on steel slag and blast furnace slag[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(9):687 – 694.

(下转第 129 页)

Engineering,2017,17(3):565 – 570.

[15] 张继新,李秋菊,周仓,等. 不锈钢酸洗污泥碳还原过程中的物相变化及元素迁移行为[J]. 钢铁研究学报,2021,33(9):920 – 928.
ZHANG Jixin, LI Qiuju, ZHOU Cang, et al. Mineral phase change and element transfer behavior during stainless steel sludge reduction with carbon[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(9):920 – 928.

[16] 张芳,安胜利,罗果萍,等. 包钢低硅烧结矿铁酸钙生成特性的影响因素[J]. 钢铁研究学报,2012,24(2):24 – 28.
ZHANG Fang, AN Shengli, LUO Guoping, et al. Influencing factors in formation characteristics of SFCA for low silica sinters of Baogang[J]. Journal of Iron and Steel Research,2012,24(2):24 – 28.

[17] 肖海平,周俊虎,曹欣玉,等. $CaSO_4$ 在不同气氛下分解特性的实验研究[J]. 动力工程,2004,24(6):889 – 892.
XIAO Haiping, ZHOU Junhu, CAO Xinyu, et al. Experimental study of decomosition behavior of $CaSO_4$ in different atmospheres[J]. Power Engineering, 2004, 24(6):889 – 892.

[18] 冀岗,李强,吴明,等. 烧结机算条腐蚀损耗原因分析及改进措施[J]. 烧结球团,2020,45(1):25 – 28.
JI Gang, LI Qiang, WU Ming, et al. Cause analysis and improvement measures for corrosive bured-out of sinter machine grate bar[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(1):25 – 28.

(上接第 120 页)

[16] 倪文,李颖,许成文,等. 矿渣 – 电炉还原渣全固废胶凝材料的水化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2342 – 2351.
NI Wen, LI Ying, XU Chengwen, et al. Hydration mechanism of blast furnace slag-reduction slag based solid waste cementing materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10):2342 – 2351.

[17] 余中华,叶正茂,程新. 少熟料钢渣复合胶凝材料水化产物的特性[J]. 济南大学学报(自然科学版),2013,27(2):111 – 117.
YU Zhonghua, YE Zhengmao, CHENG Xin. Characteristics of hydration products of clinker-poor steel slag complex binding material[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology),2013,27(2):111 – 117.

[18] 汤青青,张丽娟,孙国文,等. 三乙醇胺 – 氢氧化钙对大掺量粉煤灰水泥胶凝体系早期活性激发[J]. 硅酸盐通报,2018,37(9):2737 – 2742.
TANG Qingqing, ZHANG Lijuan, SUN Guowen, et al. Early activity of triethanolamine-calcium hydroxide activates to high volume fly ash in cement-gel system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9):2737 – 2742.