

脱硫石膏基自流平砂浆的制备与性能研究

戴民,丁笠轩,赵明宇

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 以脱硫石膏为主要胶凝材料,通过优化材料组成制备出主要性能满足相关标准要求的石膏基自流平砂浆。**方法** 将脱硫石膏、水泥、细砂、减水剂和缓凝剂等组分按不同比例混合,以力学性能、30 min 流动度为考查指标,设计单因素试验,探讨各组分用量对自流平砂浆性能的影响。**结果** 随水灰比的增加,脱硫石膏净浆流动度增加,力学性能降低;减水剂掺量增加会使脱硫石膏净浆的30 min 流动度提高,力学性能降低;掺入普通硅酸盐水泥能明显提高净浆30 min 流动度以及抗折、抗压强度;随细砂掺量的增加,脱硫石膏基自流平砂浆的30 min 流动度降低,抗折强度明显降低,抗压强度在细砂掺量为40%后明显降低。**结论** 经优化后配制出的脱硫石膏基自流平砂浆的力学性能和30 min 流动度满足《石膏基自流平砂浆》要求。

关键词 脱硫石膏;自流平砂浆;流动度;强度

中图分类号 TU528

文献标志码 A

引用格式:戴民,丁笠轩,赵明宇. 脱硫石膏基自流平砂浆的制备与性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):938-944. (DAI Min, DING Lixuan, ZHAO Mingyu. Preparation and performance study of self-leveling mortar for desulfurization gypsum [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5):938-944.)

Preparation and Performance Study of Self-leveling Mortar for Desulfurization Gypsum

DAI Min, DING Lixuan, ZHAO Mingyu

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168)

Abstract: With desulfurized gypsum as the main cementing material, gypsum based self-leveling mortar whose main properties meet the requirements of relevant standards was prepared by optimizing the composition of the material. Desulphurized gypsum, cement, fine sand, water reducing agent and retarder were mixed in different proportions, and a single factor test was designed to investigate the influence of the amount of each component on the performance of self-leveling mortar with mechanical properties and 30 min fluidity as the test index. The experimental results show that with the increase of water-cement ratio, the fluidity of desulfurized gypsum slurry increases and the mechanical properties decrease. The 30 min fluidity of desulfurized gypsum slurry

收稿日期:2023-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52278266)

作者简介:戴民(1973—),男,副教授,主要从事高性能混凝土及外加剂等方面研究。

is increased and the mechanical properties are decreased with the increase of water reducing agent content. The addition of Portland cement can obviously improve the 30 min fluidity, flexural and compressive strength of the paste. With the increase of the content of fine sand, the 30 min fluidity of desulfurized gypsum self-leveling mortar decreases, the bending strength decreases obviously, and the compressive strength decreases obviously when the content of fine sand is 40%. The mechanical properties and 30min fluidity of the optimized desulfurized gypsum self-leveling mortar meet the G20 grade requirements of "Gypsum based self-leveling compound for floor" (JC/T1023-2021).

Key words: desulfurized gypsum; self-leveling mortar; fluidity; strength

脱硫石膏是石灰-石灰石粉浆液吸收燃煤燃油烟气后得到的工业副产品,烟气脱硫产物——脱硫石膏中含有大量重金属离子、氯离子、硫酸根离子、亚硫酸根离子等成分,如果直接排放,不但占用土地,而且会污染空气、水体与土地,造成环境恶化^[1]。发达国家已经解决了脱硫石膏改性、应用等技术性难题^[2],开发出多种脱硫石膏产品,作为建筑材料、填充材料等广泛用于建筑业、医药化工、农业等众多领域。脱硫石膏制备出的材料不仅造价低廉,而且还大大降低了天然石膏矿的开采量,保护了资源,有力地促进了循环经济发展^[3]。以水泥为主要胶凝材料的传统自流平砂浆用于地面找平时,强度增加缓慢,养护条件要求较高,容易因收缩而产生开裂^[4]。石膏不仅具有良好的流动性,而且可以在水化后产生微膨胀,强度增长迅速,因而早期强度高^[5],同时它无需特殊养护,又具有更好的吸音、隔热和湿度调节功能^[6],更适合作自流平砂浆。权刘权等^[7]以脱硫石膏为主要胶凝材料,辅以转晶剂制备出了脱硫石膏基自流平砂浆,发现脱硫石膏中掺入烷基苯磺酸钠与硫酸铝可以获得具有较好力学性能的半水石膏产品。施卫平等^[8]发现添加少量硅微粉和水泥可以提高脱硫石膏基和磷石膏基自流平砂浆的强度和软化系数,但掺量过高,反而使强度降低,同时会带来流动度下降和膨胀开裂问题。廖仕雄等^[9]发现将矿渣硅酸盐水泥和钢渣粉按1:1的质量比复配后加入磷石膏基自流平材料

中,有利于减少30 min流动度损失,同时对强度也有提升作用。王坤等^[10]发现相较于其他减水剂,聚羧酸减水剂对自流平石膏的分散作用更好,但也更容易出现泌水现象,引入适量纤维素醚可有效抑制泌水的发生。李青霄等^[11]以 α 、 β 石膏、铁尾矿砂为主要原料,配合外加剂进行改性,结合微观分析发现短柱状与厚片状结构的增加可以使石膏自流平砂浆的抗压与抗折强度提高。

现有研究表明以脱硫石膏为主要胶凝材料,辅以不同的功能组分可以制备出技术性能满足工程要求的石膏基自流平砂浆,以其硬化速度快、微膨胀不开裂的优势越来越多地应用在室内地面工程。笔者以脱硫石膏为主要胶凝材料,研究了石膏、水、水泥、细砂、减水剂的比例对自流平砂浆性能的影响,制备出强度、流动度满足《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)要求的脱硫石膏基自流平砂浆。

1 试验

1.1 原材料

脱硫石膏为市售春秋牌脱硫石膏,成分见表1。

表1 脱硫石膏三相分析主要指标

| desulfurized gypsum | | | % |
|---------------------|---------|---------|---|
| w(可溶性无水石膏) | w(半水石膏) | w(二水石膏) | |
| 1.81 | 70.78 | 6.08 | |

水泥标号为P·O42.5,沈阳冀东水泥有限公司生产,化学组成见表2。缓凝剂为市

售柠檬酸类石膏缓凝剂;减水剂为市售粉末状聚羧酸减水剂,减水率32%;砂子细度模

数为1.6;试验用水为自来水。

表2 P·O42.5水泥的化学组成

Table 2 Chemical composition of P·O 42.5 cement

%

| w(CaO) | w(SiO ₂) | w(Al ₂ O ₃) | w(Fe ₂ O ₃) | w(MgO) | w(TiO ₂) | w(SO ₃) | w(K ₂ O) | w(Na ₂ O) | w(烧失量) |
|--------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------|
| 59.23 | 21.5 | 6.12 | 4.48 | 2.71 | 0.51 | 1.62 | 0.84 | 0.23 | 2.76 |

1.2 样品制备与性能测试

将脱硫石膏在45℃下烘干后备用。按比例称取脱硫石膏、水泥、砂、减水剂、缓凝剂和水,依次加入胶砂搅拌机中搅拌成料浆,将料浆浇注在40 mm×40 mm×160 mm的模具中,在标准条件下养护至规定龄期。按照《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)要求测试脱硫石膏基自流平砂浆的30 min流动度和不同龄期的强度。

2 脱硫石膏净浆性能的影响因素分析

2.1 水灰比

在无任何外加剂掺入的条件下,石膏净浆出现了凝结过快的现象,基本无流动性,故在试验中统一加入了占脱硫石膏质量分数0.2%的柠檬酸缓凝剂。图1为不同水灰比下的净浆流动度,图2和图3分别为抗折、抗压强度试验结果。由图1可知,随着水灰比的提高,脱硫石膏净浆的流动度明显提高,但是如果水的掺入量过高,会使整个体系保水性下降,导致浆体出现明显泌水现象。

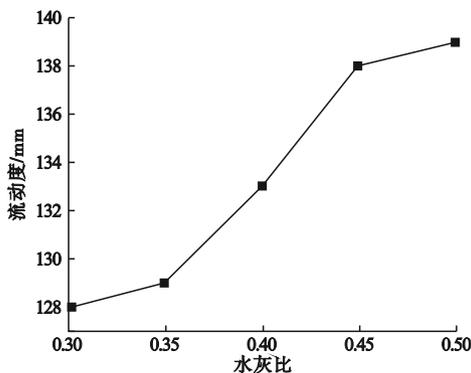


图1 水灰比对脱硫石膏净浆流动度的影响

Fig. 1 Effect of water-cement ratio on the fluidity of desulfurized gypsum

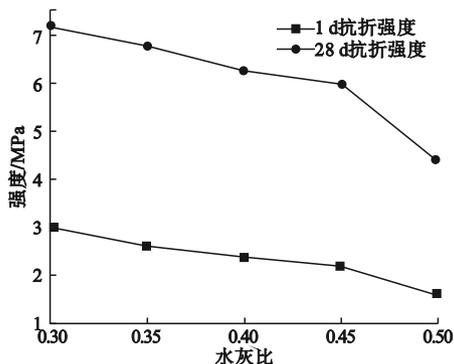


图2 水灰比对抗折强度的影响

Fig. 2 Effect of water-cement ratio and flexural strength

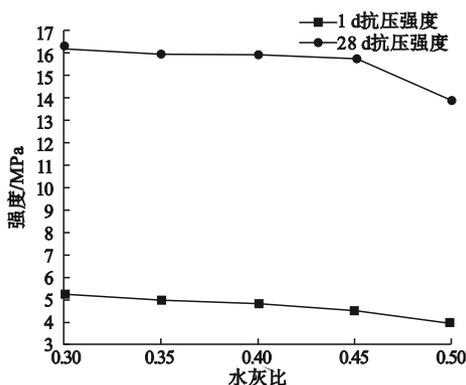


图3 水灰比对抗压强度的影响

Fig. 3 The influence of the water-cement ratio on compressive strength

由图2和图3可知,随水灰比的增加,脱硫石膏净浆硬化体的抗折和抗压强度随之降低。综合分析可得,水灰比为0.45时最佳,此时,30 min流动度达到139 mm,1 d抗折强度与抗压强度分别为2.2 MPa和4.5 MPa,28 d绝干抗折强度和抗压强度分别为6 MPa和15.8 MPa。

2.2 减水剂

减水剂是自流平砂浆的重要组成部分^[12],可以降低用水量,进而降低试件的孔

隙率,使自流平材料内部结构更加密实,也是提高自流平材料强度的有效办法,有研究表明聚羧酸减水剂可有效提高石膏基材料的密实度与强度^[13]。保持水灰比0.45,分别调节减水剂掺量为0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、和0.30%,考察其对脱硫石膏净浆性能的影响。图4、图5和图6分别为聚羧酸减水剂掺量对脱硫石膏净浆30 min流动度与抗折强度、抗压强度的影响。

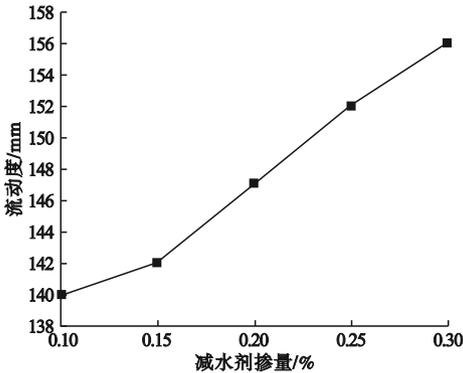


图4 不同减水剂掺量对30 min流动度的影响
Fig. 4 Effect of water reducing agent content on 30 min fluidity

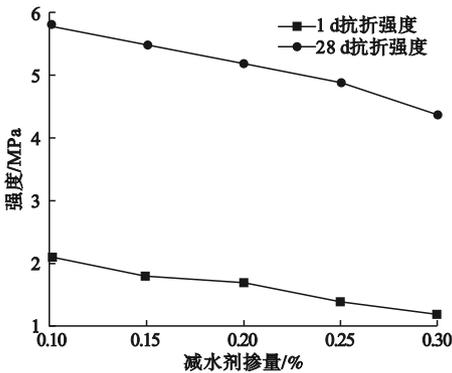


图5 不同减水剂掺量对抗折强度的影响
Fig. 5 Effect of water reducing agent content on flexural properties

由图4可知,脱硫石膏净浆的30 min流动度随减水剂掺量的增大而增大,是因为聚羧酸减水剂在脱硫石膏颗粒表面产生吸附,空间位阻作用促进了脱硫石膏颗粒的分散,释放出更多的自由水,从而使净浆产生较大流动度^[14]。由图5、图6可知,随着聚羧酸减水剂掺量的增加,脱硫石膏净浆的强度随之降

低,产生这一现象的原因可能是由于聚羧酸减水剂的引气作用^[15],以及吸附造成的脱硫石膏水化不充分的结果^[16]。综合分析得出减水剂掺量0.15%时性能最佳,30 min流动度能达到142 mm,1 d抗折强度、抗压强度分别为1.8 MPa和3.9 MPa,28 d绝干抗折强度和抗压强度分别为5.5 MPa和14.5 MPa。

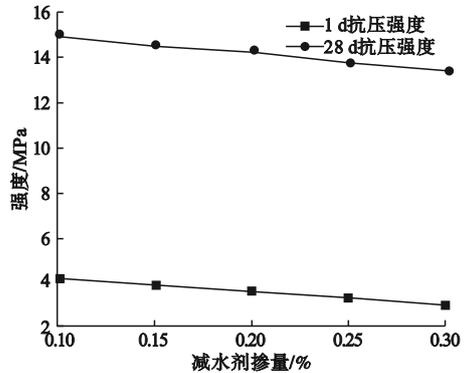


图6 不同减水剂掺量对抗压强度的影响
Fig. 6 The effect of water reducing agent content on compressive performance

2.3 水泥

由上述试验可知,虽然可通过调整水灰比、加入减水剂来满足石膏自流平材料流动度的要求,但力学性能较差,即使在较小水灰比时也不能满足标准中G20要求,有研究表明掺入水泥可提高石膏基自流平材料的力学性能^[17]。分别以10%、20%、30%、40%的比例水泥取代等质量脱硫石膏,图7、图8和图9为净浆30 min流动度以及抗折强度和抗压强度测试结果。

由图7可知,随着水泥取代率的持续增加,自流平石膏的流动度不断增加,由图8、图9可知,其不同龄期的抗压、抗折强度也随之增加。强度的提升主要是因为普通硅酸盐水泥水化产生的氢氧化钙使体系pH值升高,有利于脱硫石膏迅速形成网状结构^[18],并使其孔结构优化,大大提高了体系密实度,从而使其强度增加。但当水泥取代脱硫石膏比例达到40%时,自流平石膏浆体稳定性变差,试块出现了明显的泌水现象,28 d后试

块开裂。综合分析得出,水泥取代率为30%时净浆性能最佳,此时30 min 流动度为146 mm,1 d 抗折强度和抗压强度分别为4.2 MPa 和6.6 MPa,28 d 绝干抗折强度和抗压强度分别为8.3 MPa 和25.3 MPa。

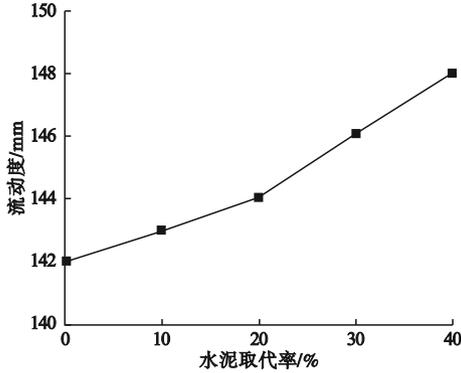


图7 不同水泥掺量对流动度的影响

Fig. 7 Effect of different cement content on the 30 min fluidity of self-leveling mortar

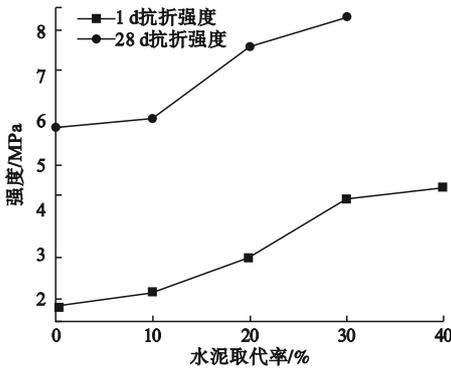


图8 不同水泥掺量对抗折强度的影响

Fig. 8 Effect of different cement content on flexural strength of self-leveling mortar

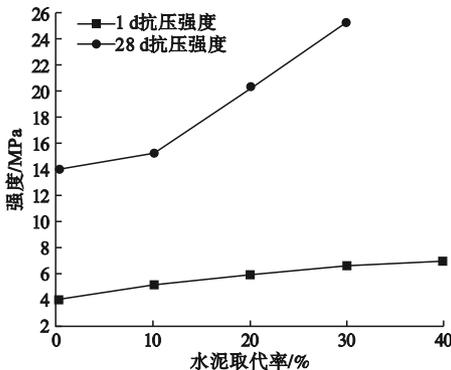


图9 不同水泥掺量对抗压强度的影响

Fig. 9 Effect of cement content on compressive strength of self-leveling mortar

2.4 细砂

在自流平砂浆中加入砂子,不但可以降低材料成本,而且可以提高自流平砂浆的耐磨性与耐水性,有利于自流平砂浆获得更好的体积稳定性^[19]。将细砂按胶凝材料质量的10%、20%、30%和40%外掺,不同细砂掺量对脱硫石膏基自流平砂浆性能的影响如图10、图11和图12所示。

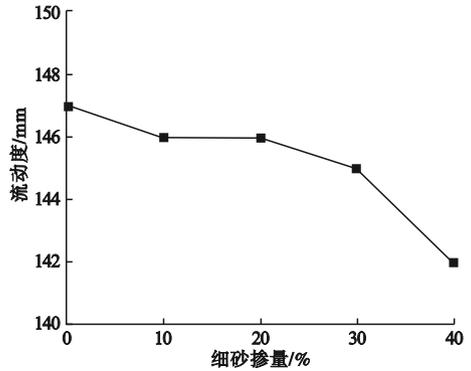


图10 不同细砂掺量对流动度的影响

Fig. 10 Effect of different fine sand content on gypsum-based self-leveling mortar

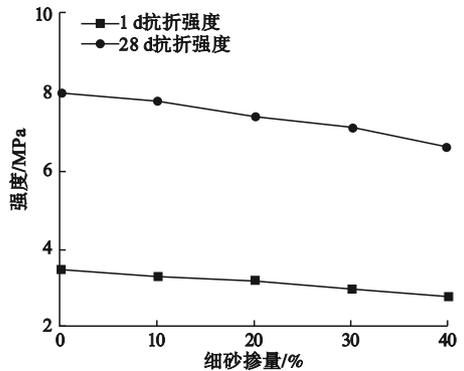


图11 不同细砂掺量对抗折强度的影响

Fig. 11 Effect of different fine sand content on flexural strength

由图10可知,30 min 流动度随细砂掺量的增加而降低。由图11、图12可知,随着细砂掺入量的增加,自流平砂浆的抗折强度明显降低,但抗压强度只有当细砂掺量达到40%时才有明显降低。细砂掺量为30%时,30 min 流动度为145 mm,1 d 抗折强度和抗压强度分别为3 MPa 和6.1 MPa,28 d 绝干抗折强度和抗压强度分别为7.1 MPa 和

24.8 MPa,可以满足《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)中 G20 等级要求。

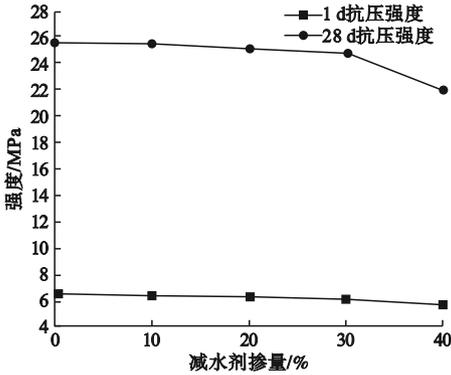


图 12 不同细砂掺量对抗压强度的影响

Fig. 12 Effect of different fine sand content on compressive strength

3 XRD 图谱分析

图 13 为脱硫石膏基自流平砂浆的 XRD 图谱。脱硫石膏基自流平砂浆的水化产物以二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、无水石膏 (CaSO_4) 和水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶为主,此外还含有少量的钙矾石 (AFt)。脱硫石膏中的二水石膏从饱和溶液中析出,结晶形成结构骨架,使浆体凝结硬化,提供早期强度^[20];水泥发生水化反应,生成 C-S-H 凝胶和少量的 AFt,二水石膏、水泥水化产物与细砂胶结,完善了网络结构骨架,对材料的强度和耐水性的提高也有一定贡献^[21]。

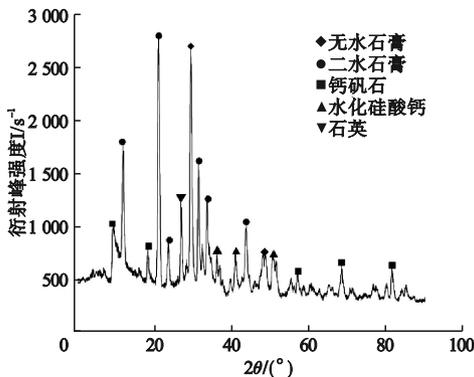


图 13 脱硫石膏基自流平砂浆 XRD 图谱

Fig. 13 XRD atlas of self-leveling materials

4 结 论

(1)净浆 30 min 流动度随水灰比的增大而增大,净浆试块的凝结时间变长,导致强度不达标;水灰比为 0.45、聚羧酸减水剂掺量为 0.15% 时能有效改善浆体的流动性,继续掺入会导致凝结后力学性能降低。

(2)水泥掺入可以改善试件的抗压与抗折强度,水泥掺量为 30% 时效果最佳;细砂的掺入量与力学性能起反作用,但却能极大改善试块的耐磨性与耐水性,同时可降低成本,最终确定细砂掺入量为 30%。

(3)以石膏、水、水泥、细砂、减水剂的比例为 700:450:300:300:1.5 时,脱硫石膏基自流平砂浆性能达到最优,30 min 流动度为 145 mm,1 d 抗压、抗折强度分别为 6.1 MPa 和 3 MPa,28 d 抗压、绝干抗折强度分别为 24.8 MPa 和 7.1 MPa,满足《石膏基自流平砂浆》(JC/T1023—2021)中 G20 要求。

参考文献

- [1] 马双忱,温佳琪,万忠诚,等.中国燃煤电厂脱硫废水处理技术研究进展及标准修订建议[J].洁净煤技术,2017,23(4):18-28.
(MA Shuangchen, WEN Jiaqi, WAN Zhongcheng, et al. Treatment progress and standard modification suggestion for FGD wastewater from coal-fire power plants in China [J]. Journal of clean coal technology, 2017, 23(4): 18-28.)
- [2] 李恒,张晖,钟晋,等.无水Ⅱ型石膏活性激发及应用研究现状[J].化工矿物与加工,2023,52(5):1-8.
(LI Heng, ZHANG Hui, ZHONG Jin, et al. Research status on activation and application of II-anhydrite gypsum [J]. Industrial minerals processing, 2023, 52(5): 1-8.)
- [3] 刘林程,左海滨,许志强.工业石膏的资源化利用途径与展望[J].无机盐工业,2021,53(10):1-9.
(LIU Lincheng, ZUO Haibin, XU Zhiqiang. Resource utilization approach of industrial gypsum and its prospect [J]. Inorganic chemicals industry, 2021, 53(10): 1-9.)
- [4] 王剑,刘仕琪,程铠,等.磷石膏自流平保温砂浆试验研究及工程应用[J].新型建筑材料,2023,50(3):95-99.
(WANG Jian, LIU Shiqi, CHENG Kai, et al. Experimental study and engineering application of phosphogypsum self-leveling thermal

- insulation mortar [J]. *New building materials*, 2023, 50(3): 95 - 99.)
- [5] 董泽, 翟延波, 任志威, 等. 磷石膏建材资源化利用研究进展[J]. *无机盐工业*, 2022, 54(4): 5 - 9.
(DONG Ze, ZHAI Yanbo, REN Zhiwei, et al. Research progress on phosphogypsum utilization in building materials [J]. *Inorganic chemicals industry*, 2022, 54(4): 5 - 9.)
- [6] 马玺. 石膏自流平技术在地面找平施工中的应用[J]. *四川水泥*, 2022(4): 158 - 160.
(MA Xi. Application of gypsum self-leveling technology in ground leveling construction [J]. *Sichuan cement*. [J]. 2022, (4): 158 - 160.)
- [7] 权刘权, 李东旭. 用脱硫石膏配制自流平材料的研究[J]. *金属矿山*, 2008(1): 60 - 63.
(QUAN Liuquan, LI Dongxu. Study on preparation of self-leveling material with FGD gypsum [J]. *Metal mine*, 2008(1): 60 - 63.)
- [8] 施卫平, 屠浩驰, 李辉. 石膏基自流平砂浆的耐水性改善研究[J]. *住宅产业*, 2022(9): 76 - 79.
(SHI Weiping, TU Haochi, LI Hui. Study on the improvement of water resistance of gypsum-based self-leveling mortar [J]. *Housing industry*, 2022, (9): 76 - 79.)
- [9] 廖仕雄, 吴磊, 全思臣, 等. 磷建筑石膏基自流平砂浆的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(11): 137 - 140.
(LIAO Shixiong, WU Lei, QUAN Sichen, et al. Study on the performance of gypsum-based self-leveling mortar for phosphorus construction [J]. *New building materials*, 2022, 49(11): 137 - 140.)
- [10] 王坤, 黄凯, 蔡永岳. 外加剂对水泥基自流平材料泌水现象和性能的影响[J]. *广东建材*, 2022, 38(7): 4 - 6.
(WANG Kun, HUANG Kai, CAI Yongyue. Effect of admixtures on water leakage and properties of cement-based self-leveling materials [J]. *Guangdong building materials*, 2022, 38(7): 4 - 6.)
- [11] 李青霄, 张心会, 徐开东, 等. α 石膏、 β 石膏、铁尾矿砂制备自流平砂浆及其性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(9): 149 - 153.
(LI Qingxiao, ZHANG Xinhui, XU Kaidong, et al. Study on self-leveling mortar prepared by α , β gypsums and iron tailings sand and its properties [J]. *New building materials*, 2022, 49(9): 149 - 153.)
- [12] 李晶辉, 刘兆爽, 赵文杰. 石膏基自流平地面材料的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(11): 3587 - 3593.
(LI Jinghui, LIU Zhaoshuang, ZHAO Wenjie. Research development of gypsum based self-leveling materials of floor [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2016, 35(11): 3587 - 3593.)
- [13] SUPAPORN W, PORAMET C, WANANURAT S. Water resistant blended cements containing flue-gas desulfurization gypsum, Portland cement and fly ash for structural applications [J]. *Cement and concrete composites*, 2019, 103: 134 - 148.
- [14] ZHI Zhenzhen, MA Baoguo, TAN Hongbo, et al. Effect of competitive adsorption between polycarboxylate superplasticizer and hydroxypropylmethyl cellulose on rheology of gypsum paste [J]. *Journal of materials in civil engineering*, 2018, 30(7): 04018141.
- [15] 李华彬, 卢玉婷, 莫晓红, 等. 建筑添加剂对脱硫石膏基自流平砂浆性能的影响研究[J]. *广东建材*, 2023, 39(2): 22 - 24.
(LI Huabin, LU Yuting, MO Xiaogong, et al. Study on the effect of building additives on the performance of desulfurized gypsum-based self-leveling mortar [J]. *Guangdong building materials*, 2023, 39(2): 22 - 24.)
- [16] 李鹏, 王立坤, 孟秋燕. α -半水石膏对水泥砂浆性能的影响与水化机理研究[J]. *无机盐工业*, 2023, 55(3): 98 - 103.
(LI Peng, WANG Likun, MENG Qiuyan. Study on effect of α -hemihydrate gypsum on performance of cement mortar and its hydration mechanism [J]. *Inorganic chemicals industry*, 2023, 55(3): 98 - 103.)
- [17] WANG Qiang, ZHUANG Shiyu, JIA Ruiquan. An investigation on the anti-water properties of phosphorus building gypsum (PBG)-based mortar [J]. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2019, 136(4): 1575 - 1585.
- [18] 左祥龙, 左坤, 侯宁, 等. 脱硫石膏-粉煤灰流态轻质土宏观力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(10): 3722 - 3731.
(ZUO Xianglong, ZUO Kun, HOU Ning, et al. Macroscopic and microscopic mechanical properties of desulfurization gypsum fly ash flowable lightweight soil [J]. *Journal of the Chinese ceramic society*, 2023, 42(10): 3722 - 3731.)
- [19] 王艺霖, 王顺尧, 李广宁. 压型钢板石膏基混凝土组合板的正截面抗弯承载力研究[J]. *混凝土*, 2022(1): 156 - 160.
(WANG Yilin, WANG Shun Yao, LI Guangning. Study on the normal section flexural bearing capacity of the profiled steel sheet gypsum-based concrete composites labs [J]. *Concrete*, 2022, (1): 156 - 160.)
- [20] 向仁科, 石宗利. 石膏基自流平材料的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(6): 28 - 31.
(XIANG Renke, SHI Zongli. Study on properties of gypsum-based self-leveling materia [J]. *New building materials*, 2022, 49(6): 28 - 31.)
- [21] 姜浙江, 肖诗豪, 廖正毅, 等. 掺合料对泡沫脱硫建筑石膏性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(12): 24 - 29.
(JIANG Zhejiang, XIAO Shihao, LIAO Zhengyi, et al. Influence of admixtures on properties of foam desulfurized building gypsum [J]. *New building materials*, 2023, 50(12): 24 - 29)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)