

赤泥-秸秆基轻质砂浆的制备及其性能表征

陈挺娴,郭小雨,樊传刚

(安徽工业大学 材料科学与工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:以拜耳法赤泥、矿渣微粉、水泥(P.O 42.5)和秸秆为原料,制备赤泥-秸秆轻质砂浆试样,并通过X射线衍射和扫描电镜等研究秸秆掺量对试样性能的影响。结果表明:对于由质量分数50%的赤泥和质量分数为50%的水泥和矿渣混合物制备而成的赤泥胶凝材料净浆硬化试样,水泥、矿渣混合物中随着水泥含量减少,试样各龄期抗压强度先提高后降低,且在水泥、矿渣质量比为1:3时,试样的抗压强度最高,为8.05 MPa;在赤泥-秸秆轻质砂浆中加入体积分数为10%的秸秆,试样的抗压强度降低,由无秸秆试样的10.45 MPa降低至7.25 MPa,但随秸秆掺量的继续增加,试样抗压强度降低幅度减小,抗折强度却随之增大,在秸秆掺量体积分数为50%时达1.9 MPa;随着秸秆掺量的增加,试样容重降低幅度不大,但导热系数降低显著,由无秸秆试样的0.63 W/(mK)降低至体积分数50%秸秆试样的0.40 W/(mK)。

关键词:拜耳法赤泥;秸秆;轻质砂浆;性能表征

中图分类号:TU 411.01 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2018.04.005

Preparation and Characterization of Red Mud-Straw Based Lightweight Mortar

CHEN Tingxian, GUO Xiaoyu, FAN Chuangang

(School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The red mud-straw lightweight mortar specimens were prepared, which were based on raw materials of the Bayer red mud, slag powder, cement (P.O 42.5), as well as straw. The effect of straw content on the properties of specimens were characterized by X ray diffraction and scanning electron microscope. The results show that for cement paste hardening specimens prepared with 50% mass fraction of red mud and 50% mass fraction of the mixture of cement and slag powder, with the decrease of cement content in the mixture of cement and slag, the compressive strength of hardening specimen of red mud cementitious material paste at different ages increases at first and then decreases, when the mass ratio of cement to slag is 1:3, the compressive strength of the sample is the highest of 8.05 MPa. When straw with 10% volume fraction is added into red mud-straw lightweight mortar, the compressive strength of the specimens decrease from 10.45 MPa to 7.25 MPa. However, as the straw content continues to increase, the decrease range of compressive strength of the specimen decreases, while the flexural strength increases, and it reaches 1.9 MPa when the volume fraction of straw is 50%. With the increase of straw content, the specific weight of the specimen decreases slightly, but the thermal conductivity decreases significantly, from 0.63 W/(mK) of the specimen without straw powder to 0.40 W/(mK) of the specimen of straw with 50% volume fraction.

Key words: Bayer red mud; straw; lightweight mortar; characterization

收稿日期:2018-09-30

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(41627801)

作者简介:陈挺娴(1993—),女,安徽合肥人,硕士生,主要研究冶金固废的绿色高效资源化。

通信作者:樊传刚(1967—),男,安徽淮南人,博士,教授,主要研究方向为绿色、低碳无机非金属材料。

赤泥是生产氧化铝过程中的工业固废,每吨氧化铝产生的赤泥达1~1.5 t^[1],其强碱性特征除导致赤泥资源化处置的水平极低外,还对环境造成严重影响^[2]。根据生产工艺和铝土矿石品位的不同,赤泥分为烧结法、拜耳法和联合法3种。近年来,学者们对烧结法赤泥和拜耳法赤泥进行了大量研究,文献[3-6]中的研究表明,具有水化胶凝活性的烧结法赤泥(含2CaO·SiO₂)可与粉煤灰、水泥和矿渣等原料结合,用于烧结砖、水泥填土等,且性能优良;文献[7-8]利用烧结法加工出耐水性能良好的赤泥地聚物纤维板和轻质建材。我国赤泥主要为拜耳法赤泥,其富含的无胶凝活性硅铝成分及以结合态存在的碱金属化合物需被高温激活才能用作胶凝材料的原料,这不利于其规模化处置^[9]。文献[10]中的研究表明,采用质量分数20%的水玻璃(Na₂SiO₃·9H₂O)作为激发剂,其提供的Na₂O和[SiO₄]⁴⁻能有效激发矿渣和赤泥,可制备出具有较高力学性能的赤泥-碱矿渣基胶凝材料。若将上述方法中的水玻璃用富含3CaO·SiO₂的硅酸盐水泥和矿渣微粉混合物替换,并采用秸秆粉末提供活性含硅铝成分与纤维成分,可使上述赤泥-碱矿渣基胶凝材料易被施工,还能将大量的农作物固废用作建材原料。因此,笔者利用拜耳法赤泥、秸秆、矿渣微粉、硅酸盐水泥等为原料,制备赤泥胶凝材料及其秸秆轻质砂浆试样,并对其性能进行表征。

1 实验

1.1 原料

拜耳法赤泥,由广西信发铝业有限公司提供,含水率为18.2%(质量分数);S95等级矿渣微粉,为安徽马钢嘉华新型建材有限公司生产;P.O 42.5水泥,为马鞍山海螺有限公司生产;秸秆粉(简称秸秆)、小麦秸秆,取自阜阳某农村秸秆处置中心,秸秆长度≤4 mm。各原料主要化学成分如表1。

表1 实验原料的化学组成, w/%

Tab. 1 Chemical composition of experiment materials, w/%

原料	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
赤泥(干)	13.69	15.97	13.80	20.50	33.30	9.17
矿渣微粉	32.96	7.92	37.71	17.06	0.56	0.85
P.O 42.5水泥	22.00	1.60	59.80	9.60	3.00	0.26
秸秆	39.62	15.97	12.94	10.31	3.01	1.08

1.2 原料配比设计

赤泥胶凝材料由赤泥、矿渣微粉、P.O42.5水泥均匀混合而成。保持水灰比为0.7(水和赤泥胶凝材料粉体的质量之比)和赤泥含量(50%,质量分数)不变,改变矿渣微粉和水泥的比例,探寻赤泥胶凝材料中水泥和矿渣微粉的最优配比。以最优配比的矿渣微粉与水泥为基础,保持其和水灰比0.7不变,改变赤泥含量,优化出最佳的赤泥胶凝材料组成。在此基础上,保持水灰比0.7不变,向赤泥胶凝材料的泥浆中添加不同掺量的秸秆,研究秸秆掺量对赤泥胶凝材料-秸秆轻质砂浆(简称赤泥-秸秆轻质砂浆)试样性能的影响,其中秸秆添加量分别占胶凝材料泥浆容积的0%,10%,20%,30%,40%,50%(体积分数)。

1.3 试样的制备

1.3.1 赤泥胶凝材料净浆硬化试样的制备

将赤泥放入干燥箱中于120℃条件下烘干后,投至球磨机的球磨罐中,用Φ30 mm的氧化铝球球磨0.5 h获得赤泥粉体;按照设计的配比称取一定量的水泥、矿渣微粉、赤泥粉,和少量(约20个)的Φ30 mm氧化铝球(作为搅拌介质)且一并投入球磨机的球磨罐中,在球磨罐中混合0.5 h,混匀原料,获得赤泥胶凝材料;取出赤泥胶凝材料,按照水灰比0.7,在净浆搅拌机中加入水将其搅拌成赤泥胶凝材料净浆。净浆制备的具体步骤为:按照设定水灰比,先将胶凝材料加入搅拌锅内再缓慢加入水,慢搅60 s和快搅90 s,获得拌匀的胶凝材料净浆。将净浆浇注入40 mm×40 mm×160 mm的水泥胶砂三联试模中,通过振捣方法除去净浆中的气泡,静置24 h后脱模,将脱模后的试样放入湿度90%、标准室温(20±2)℃的养护室中养护,获得龄期为3,7,28 d的赤泥胶凝材料净浆硬化试样(简称赤泥净浆硬化试样)。

1.3.2 赤泥-秸秆轻质砂浆试样的制备

按照赤泥-秸秆轻质砂浆试样的配比配料(秸秆预湿),将其加入砂浆搅拌机中干拌2 min,再加入水湿拌3 min(水灰比0.7),制得赤泥-秸秆轻质砂浆。将砂浆浇注入40 mm×40 mm×160 mm的水泥胶砂三联试模

中,通过振捣方法去除搅拌时带入砂浆中的气泡,静置24 h后脱模,将脱模后的试样放入湿度90%、标准室温(20±2)℃的养护室中养护,获得龄期为3,7,28 d的赤泥-秸秆轻质砂浆试样。

1.4 性能表征

采用X射线荧光光谱分析仪(XRF, ARL ADVANT'X Intellipower™ 3600型,德国布鲁克公司生产)分析原料的化学组成;采用MTS Exceed E44电子万能试验机(MTS系统(中国)公司生产)测试各龄期试样的抗折和抗压强度及软化系数(软化系数为试样在水饱和状态和干燥状态下无侧限抗压强度之比);试样容重、吸水率按照GB/50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》要求进行测试;采用稳态法测试试样的导热系数,试样尺寸为Φ135 mm×40 mm, YBF-3型导热系数测定仪,杭州大华仪器制造有限公司制造;使用日本电子公司生产的JSM-6490LV型扫描电子显微镜(SEM)观察试样截面的显微形貌。

2 实验结果与讨论

2.1 赤泥胶凝材料的力学性能

赤泥胶凝材料的组成为质量分数50%的赤泥+质量分数50%的水泥与矿渣,改变水泥与矿渣含量、赤泥含量不变,赤泥胶凝材料净浆硬化试样各龄期抗压强度的变化趋势如图1。从图1可看出,随着水泥掺量的降低,试样的抗压强度呈先提高后降低的趋势。这是因为:当水泥与矿渣质量比在一定范围内减小时,尽管水泥含量有所降低,但只要水泥中的碱含量足够激发矿渣的活性,就会使试样强度随着水泥含量降低(即矿渣含量增大)而增大;随着水泥含量的进一步降低,其对矿渣的碱激发效果减弱,导致试样的强度随之降低,其中水泥与矿渣质量比为1:3时试样的抗压强度最大,3,7,28 d龄期的抗压强度分别达4.3,6.5,8.0 MPa。

水泥与矿渣配比(质量比为1:3)不变,赤泥加入量对赤泥净浆硬化试样各龄期抗压强度的影响如图2。从图2可看出:随着赤泥量的增加,试样的抗压强度随之降低,表明赤泥中SiO₂、Al₂O₃和Na₂O成分处于被结合和惰性状态^[11],故在赤泥胶凝材料的赤泥-水泥-矿渣三元组成中,增加赤泥含量会降低赤泥净浆硬化试样的力学性能,其中赤泥质量分数为30%时,试样3,7,28 d龄期的抗压强度分别达6.0,8.6,10.5 MPa,其胶结性能可满足(使用量最大的)普通建材的力学性能要求。JC/T 862—2008“粉煤灰混凝土小型空心砌块”标准中,要求非承重的建筑围护和隔断墙材的抗压强度≥3.5MPa^[12]。因此,本研究在赤泥胶凝材料的基础上,采用秸秆作为轻集料,制备赤泥-秸秆轻质砂浆试样,该砂浆浇注成型后可被加工成轻质砌块、墙板等自保温墙材。

2.2 赤泥-秸秆轻质砂浆的力学性能

2.2.1 抗压强度

图3为秸秆掺量对各龄期赤泥-秸秆轻质砂浆试样抗压强度的影响。从图3可看出:随着秸秆掺

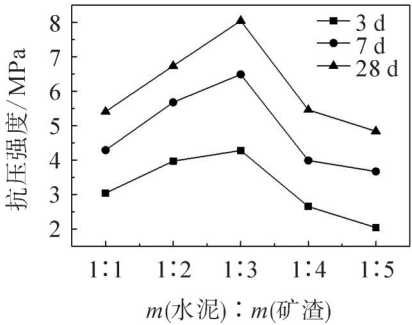


图1 水泥与矿渣比对赤泥净浆硬化试样抗压强度的影响
Fig. 1 Effect of cement-slag mass ratio on the compressive strength of hardened specimens of red mud paste

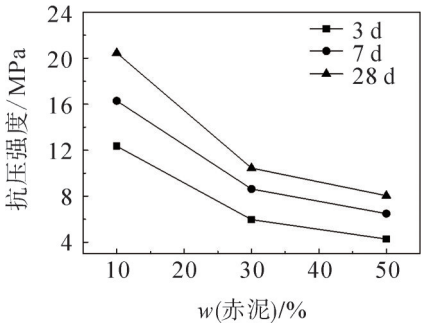


图2 赤泥含量对赤泥净浆硬化试样抗压强度的影响
Fig. 2 Effect of red mud content on the compressive strength of hardened red mud paste specimens

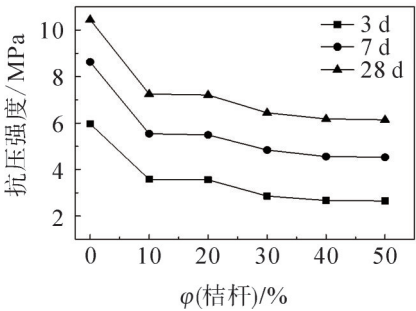


图3 秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样抗压强度的影响
Fig. 3 Effect of straw content on the compressive strength of red mud-straw lightweight mortar specimens

量的增加,试样各龄期抗压强度均逐渐降低,秸秆体积分数为10%时,试样的3,7,28 d抗压强度相对于不掺加秸秆试样均大幅降低,其中试样28 d抗压强度为7.3 MPa,与不掺加秸秆时的10.5 MPa相比,强度降低了30.6%,这是由于掺入秸秆带入的大量空隙所致。但是当秸秆体积分数为10%,20%时,试样的抗压强度相近,而后随着秸秆掺量的增加,试样的抗压强度开始降低,但降低幅度不大,表明试样中秸秆粉末的活性含硅铝成分具备参加水化反应的活性,从而有效弥补了因引入秸秆(弱结构)集料所导致的强度降低。

2.2.2 抗折强度

图4为秸秆掺量对各龄期赤泥-秸秆轻质砂浆试样抗折强度的影响。从图4可以看出:随着秸秆掺量的增加,试样的3,7,28 d抗折强度均增大。其中:秸秆体积分数由0增加到30%时,试样的28 d抗折强度增加缓慢,仅增加0.22 MPa;随着秸秆掺量的继续增加,试样的抗折强度增加明显,秸秆体积分数为50%时试样的抗折强度最大,为1.9 MPa。随着秸秆掺量增加,试样体内的纤维和活性含硅铝成分的数量会同步增多,使得均匀分布在胶凝材料硬化基体内的秸秆纤维具有一定的承载能力和较高的延性;秸秆中活性含硅铝的成分会强化秸秆与基体结合处(及邻近区域)结构,有利于增强基体材料的韧性,从而导致试样的抗折强度随着秸秆量的增加而提高。

2.2.3 软化系数

赤泥-秸秆轻质砂浆试样的遇水稳定性可用软化系数来衡量,图5为秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样软化系数的影响。从图5可看出:随着秸秆掺量的增加,试样28 d的软化系数先增大后减小;未掺加秸秆时,试样的软化系数为0.93,当秸秆掺量增加至30%(体积分数)时,试样的软化系数达最大,为0.97;继续增加秸秆掺量,体积分数至50%时,试样的软化系数却随之降低。这是由于:秸秆体积分数不超过30%时,随着秸秆掺量的增加,秸秆提供硅铝成分逐渐增多,生成的C—S—H凝胶,C—A—H凝胶及其碳化产物CaCO₃等耐水性产物^[13]可将不耐水的秸秆颗粒有效包裹,致使试样的软化系数随秸秆量的增加而增大;随着秸秆量的继续增加,体系中产生的耐水性产物不足于将不耐水的秸秆颗粒有效包裹,从而导致试样的软化系数随秸秆量的继续增加而降低。掺加秸秆的试样软化系数均高于未掺加秸秆试样,表明秸秆中的无机组分参与水化反应会提高试样结构的遇水稳定性。

2.3 赤泥-秸秆轻质砂浆的其他物理性能

2.3.1 容重和导热系数

图6为秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样容重和导热系数的影响曲线。从图6可看出:随着秸秆掺量的增加,试样的容重逐渐降低,但降低幅度较小,由无秸秆掺量时的1.54 g/cm³逐渐降低至秸秆体

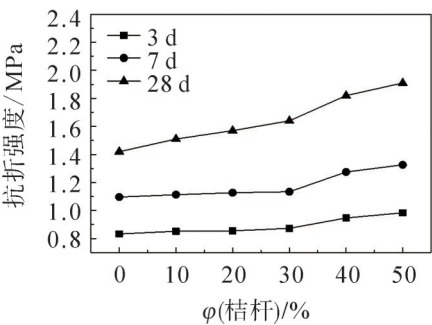


图4 秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样抗折强度的影响
Fig. 4 Effect of straw content on the flexural strength of red mud-straw lightweight mortar specimens

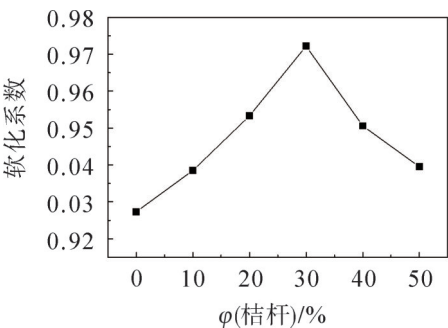


图5 秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样软化系数的影响
Fig. 5 Effect of straw content on the softening coefficient of red mud-straw lightweight mortar specimens

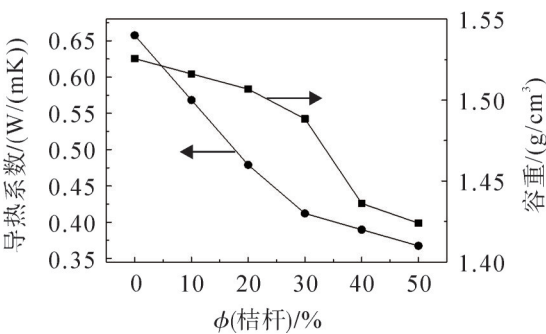


图6 秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样容重和导热系数的影响
Fig. 6 Effect of straw content on the specific weight and thermal conducting coefficient of red mud-straw lightweight mortar specimens

积分数 50% 时的 1.41 g/cm^3 , 减小了约 8.44%; 随着秸秆掺量的增加, 试样的导热系数降低, 且秸秆体积分数在 30%~40% 时降低速率增大, 当秸秆体积分数由 0 增加至 50% 时, 试样的导热系数 λ 由 0.63 W/(mK) 下降至 0.40 W/(mK) , 说明秸秆的轻质疏松结构(秸秆内部的孔隙较多, 平均孔隙率可达 83.5%^[14]) 中夹带的空气对试样的热阻增大起到促进作用; 秸秆体积分数为 50% 时, 试样已具备一定实用性的保温隔热效果, $\lambda=0.40\text{ W/(mK)}$ 。

2.3.2 吸水率

图 7 为秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样吸水率的影响。从图 7 可看出: 随着秸秆掺量的增加, 试样的 48 h 吸水率先减小后增加, 最低吸水率为 13.9% (秸秆体积分数为 30%); 秸秆体积分数由 0 增加至 30% 时, 试样的吸水率下降幅度较大, 下降约 10%; 秸秆掺量继续增加时, 试样的吸水率又随之增大, 但增幅不大。导致上述现象和秸秆的双重作用有关, 即秸秆量增加导致的空隙量和其提供的活性含硅铝成分含量同步增大, 当空隙量增加对吸水率贡献小于活性含硅铝成分的结构致密作用时, 试样吸水率随秸秆量增加而降低, 反之吸水率随之增大。

2.4 赤泥-秸秆轻质砂浆的微形貌

图 8 为秸秆体积分数为 30% 的赤泥-秸秆轻质砂浆试样截面微形貌的 SEM 照片。从图 8 可看出, 赤泥胶凝材料的水化产物和未反应物形成了较为致密的结构, 且在秸秆纤维的表面出现了明显的水化胶凝产物, 水化胶凝产物可将秸秆纤维紧密包裹。秸秆的这种增强结构可解释秸秆加入赤泥胶凝材料, 其力学性能(尤其是抗折强度)显著提升; 同时秸秆表面的析出产物也给秸秆中的无机成分作为活性胶凝组分参与水化反应提供了有力证据。

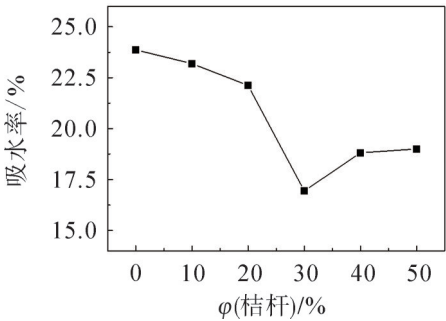


图 7 秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样吸水率的影响
Fig. 7 Effect of straw content on the water absorption of red mud-straw lightweight mortar specimens

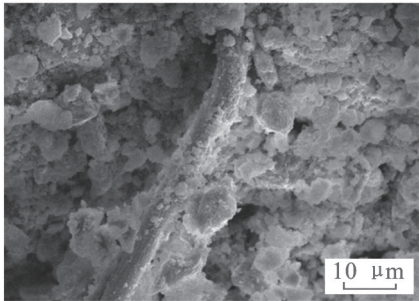


图 8 赤泥-秸秆轻质砂浆试样截面 SEM 照片
Fig. 8 SEM photo of cross-section of red mud-straw lightweight mortar specimen

3 结 论

以拜耳法赤泥、矿渣微粉、水泥(P.O42.5)和秸秆为原料, 制备赤泥胶凝材料及赤泥-秸秆轻质砂浆试样, 研究秸秆掺量对赤泥-秸秆轻质砂浆试样性能的影响, 得出以下主要结论。

- 1) 由质量分数为 50% 的赤泥和质量分数为 50% 的水泥、矿渣制备赤泥胶凝材料时, 随着水泥、矿渣混合物中水泥含量的减少, 胶凝材料净浆硬化试样的各龄期抗压强度先增大后降低, 且 $m(\text{水泥})/m(\text{矿渣})=1:3$ 时的 3, 7, 28 d 龄期试样均具最大的抗压强度, 分别为 4.3, 6.5, 8.0 MPa。
- 2) 赤泥胶凝材料中, 加入体积分数为 10% 的秸秆可降低赤泥-秸秆轻质砂浆试样的 3, 7, 28 d 龄期抗压强度, 但秸秆体积分数超过 10%, 赤泥-秸秆轻质砂浆试样的抗压强度随秸秆量增加降低幅度减小; 随着秸秆掺量的增加, 赤泥-秸秆轻质砂浆试样的 3, 7, 28 d 龄期抗折强度均增大, 秸秆体积分数增加至 50% 时, 试样的 28 d 抗折强度为 1.9 MPa; 与无秸秆试样相比, 赤泥-秸秆轻质砂浆试样的软化系数较高。
- 3) 赤泥-秸秆轻质砂浆试样的导热系数随着秸秆掺量增大而降低, 从无秸秆试样的 0.63 W/(mK) 降低至秸秆体积分数为 50% 试样的 0.40 W/(mK) ; 但试样容重随之降低的幅度不大, 仅由无秸秆试样的 1.54 g/cm^3 降低至秸秆体积分数为 50% 试样的 1.41 g/cm^3 。

- [3] 张伟刚,高尚晗,龙新华,等. 机床主轴-滚动轴承系统非线性动力学分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9):72-75
- [4] 吴文镜,刘强. 机床动力学建模的拓展传递矩阵法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21):69-75.
- [5] 林剑峰,马晓波. 数控机床动态特性测试与分析研究[J]. 机械制造, 2016, 48(552):5-8.
- [6] SHAN W, CHEN X, HE Y, et al. A novel experimental research on vibration characteristics of the running high-speed motorized spindles[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(8):2245-2252.
- [7] WANG J, WU B, HU Y, et al. Modeling and modal analysis of tool holder-spindle assembly on CNC milling machine using FEA [C]//International Conference on Mechatronics & Applied Mechanics. Trans Tech Publications, Switzerland, 2012:220-226.
- [8] 谭峰,殷国富,方辉,等. 基于 ANSYS Workbench 的微型数控车床主轴动静态性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(4):29-32.
- [9] 蔡力钢,马仕明,赵永胜,等. 多约束状态下重载机械式主轴有限元建模及模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3):165-173.
- [10] 李高峰,李文斌. 高速磨削机床主轴单元的动态特性仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2012(2):48-50.
- [11] 戴曙. 机床滚动轴承应用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1993:134-140.
- [12] 张定华. 数控加工手册(第2卷) [M]. 北京:化学工业出版社, 2013:187-191.

责任编辑:何莉

(上接第323页)

参考文献:

- [1] ALSHAAL T, DOMOKOS-SZABOLCSY É, MÁRTON L, et al. Phytoremediation of bauxite-derived red mud by giant reed[J]. Environmental Chemistry Letters, 2013, 11(3):295-302.
- [2] LOCKWOOD C L, STEWART D I, MORTIMER J G, et al. Leaching of copper and nickel in soil-water systems contaminated by bauxite residue (red mud) from Ajka, Hungary: the importance of soil organic matter[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14):10800-10810.
- [3] 马龙,李国忠. 发泡剂对赤泥轻质免烧砖性能的影响[J]. 砖瓦, 2014(1):20-22.
- [4] 丁铸,洪鑫,朱继翔,等. 碱激发赤泥-矿渣地聚合物水泥的研究[J]. 电子显微学报, 2018, 37(2):145-153.
- [5] 任根宽. 用改性赤泥为原料制备水泥[J]. 化工环保, 2008, 28(6):526-530.
- [6] 王晓,张磊,罗忠涛,等. 赤泥对道路硅酸盐水泥性能和矿物组成的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5):774-779.
- [7] 黄承好,钟勤. 一种以赤泥为原料的地聚物基纤维板的制备方法:CN 103951332 A[P]. 2014-07-30.
- [8] 姜葱葱. 赤泥改性及其轻质保温墙材应用探讨[D]. 济南:济南大学, 2013:31-35.
- [9] 叶楠. 拜耳法赤泥活化预处理制备地聚物及形成强度机理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016:48-53.
- [10] 王晶. 赤泥基胶凝材料的制备及性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014:24-25.
- [11] 刘万超,闫琨,和新忠. 拜耳法赤泥制备地聚物类无机聚合材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (2):453-457.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 粉煤灰混凝土小型空心砌块:JC/T 862—2008[S]. 北京:中国建材工业出版社, 2008:3.
- [13] 董晶亮,张婷婷,王立久. 碱激发改性矿粉/砷砂岩复合材料[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1):132-141.
- [14] 刘洪凤,俞镇慌. 秸秆纤维性能[J]. 东华大学学报, 2002, 4(28):123-128.

责任编辑:何莉