

煤矸石-脱硫石膏-粉煤灰膏体料浆制备及性能研究*

许宏图¹, 刘树龙², 石大庆², 宋新涛², 王贻明², 苏凤波¹, 李敏¹, 原新宇¹

(1.赤峰中色白音诺尔矿业有限公司, 内蒙古赤峰市 025450;

2.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:为保证煤矸石膏体复合充填料浆满足矿山管道输送性能要求,利用煤矸石、脱硫石膏、粉煤灰开发膏体复合充填材料,以细矸率、煤矸石掺量、粉煤灰掺量为研究对象,通过开展三因素四水平的正交试验,探究料浆流动性能、和易性能及流变性能的变化规律,采用 Hershel-Bulkley 模型拟合煤矸石膏体复合充填料浆流变参数,相关系数 R^2 均为 0.999,模型拟合精度高,可靠性强。研究结果表明,料浆塌落度、扩散度、流动度、稠度和泌水率随细矸率的增加呈先升高后降低的趋势,当细矸率为 40% 时,料浆可泵性最优;煤矸石掺量对料浆管道输送性能影响不显著,但煤矸石中的高岭土相会吸附少量的自由水,导致料浆流动性能变差;粉煤灰在膏体料浆体系中发挥滚珠润滑作用和微集料作用,释放大量的自由水,颗粒表面的水膜变厚,改善了料浆的管道输送性能,但粉煤灰掺量超过 35% 时,细颗粒的粉煤灰团聚现象严重,增强了料浆抵御剪切变形的能力,削弱了料浆的流动性能和流变性能。

关键词:膏体充填;煤矸石;粉煤灰;流动性;流变性能

中图分类号:TD853

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)06-0156-09

0 引言

随着科学技术的迅猛发展和开采水平的不断提高,矿山开采力度呈现逐年上升的趋势,这不但消耗大量的矿产资源,而且容易诱发山体开裂、采空区塌陷、围岩变形等多重灾害,对人类生活福祉和生态文明建设造成严重影响^[1-5]。煤矸石是煤炭生产过程中排出的固体废弃物。据不完全统计,我国煤矸石累积堆存量超过 60 亿 t,年增长量约 3 亿 t^[6-9]。大量的煤矸石得不到有效处置而被堆存在地表,不仅占用大量耕地,而且经过雨水淋滤后,还会严重破坏周围土壤和水体^[10-15]。

目前,针对煤矸石资源化和高值化应用,科研院所和矿山企业诸多学者开展了广泛且深入的研究。

贾敏等^[16]采用高温煅烧的方式提取煤矸石中的 Al_2O_3 ,研究发现,将在煅烧温度 600 °C、煅烧时间 200 min 条件下煅烧过的煤矸石与盐酸混合反应, Al_2O_3 溶出率达 94.09%,有效解决了铝土矿资源短缺的瓶颈。金彪等^[17]提出了以煤矸石、城市污泥和页岩制备烧结砖的方法,当煤矸石掺量为 40%、污泥掺量为 10%、页岩掺量为 50% 时,通过 1050 °C 高温焙烧 6 h,可获得强度为 MU15 等级烧结砖。张宇航等^[18]研究发现,将煤矸石应用于盐碱地,不仅可以实现煤矸石的资源化利用,还具有改良盐碱土壤质量的潜力。程春宏等^[19]借助高温烧结手段,制备了满足《发泡陶瓷隔墙板》(T/CBCSA 12—2019)要求的发泡陶瓷。凌陈月等^[20]将煤矸石应用于水处理研究领域,研究发现,通过煤矸石制备的聚合硫酸铝铁 PFASS 絮凝剂去污效果明显。湛玲丽等^[21]以煤矸石为主要材料研发了微晶玻璃,研究表明,在微晶玻璃体系中,煤矸石消纳量高至 70%,能够实现煤矸石的大宗量消纳。陈琦琦、张卫清等^[2,22]通过球磨原状煤矸石的方法,制备了煤矸石地质聚合物。白国良等^[23]将煤矸石作为粗骨料,探究了不同煤矸石取代率、不同水灰比条件下煤矸石基混凝土的性能变化规律。王川等^[24]以煤矸石和矿粉为主要原料,基于碱激发活性理念,制备了满足路用性能要求的路基材料。然而,上述研究多面临消纳量低、运输距离长、成本高昂等问题,这极大地限制了煤矸石的大规模应用。

为响应“绿水青山就是金山银山”的号召以及固废资源化处置的倡议,越来越多的专家将煤矸石应用于充填采空区。张庆松等^[25]研究了煤矸石粒度分布对充填材料抗压强度、泌水率、流动度及微观结构演化的影响。邱继生等^[26]通过机械粉磨煤矸石至 600 目,采用煤矸石粉替代部分粉煤灰制备了煤矸石基充

* 收稿日期:2023-07-03

作者简介:苏凤波(1984—),男,内蒙古赤峰人,工程师,主要研究方向为采矿工程和测绘工程,E-mail:274402905@qq.com。

通信作者:刘树龙(1996—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为膏体充填及固废处置,E-mail:ustblsl@163.com。

填材料。孙启明^[27]通过机械-化学-热活化煤矸石,联合建筑垃圾固废制备了膏体充填材料。舒安东等^[28]研究发现当煤矸石:细砂B:细砂A:水泥为1.5:1.5:2:5时,煤矸石能有效改善充填骨料密实度。周翔等^[29]采用煤矸石作为骨料,以粉煤灰和水泥作为胶结剂,通过正交试验的方法,确定了粉煤灰:水泥为1:3,煤矸石:水泥为1:7,料浆质量分数为75%时,充填料浆塌落度和强度性能最优。然而充填料浆的流动性能、和易性能和流变性能直接关系到料浆的管道输送特性,结合以往的科研成果,将煤矸石作为骨料,采用当地粉煤灰、脱硫石膏、水泥作为胶凝材料,制备煤矸石石膏体复合充填料浆,以煤矸石细矸率、煤矸石掺量、粉煤灰掺量为影响因素,以膏体复合料浆塌落度、扩散度、流动度、稠度、分层度、泌水率、流变参数为考察指标,构建三因素四水平的正交试验,考察膏体充填料浆可输送性能的变化规律,以期煤矸石矿山充填的应用研究提供理论依据和技术支撑。

1 试验

1.1 试验材料

试验原材料包括煤矸石、脱硫石膏、粉煤灰、水

泥、外加剂和水。煤矸石取自山东莱芜某煤矿,外观呈灰黑色尖块状,如图1所示。煤矸石采用实验室颚式破碎机和球磨机联合破碎至颗粒状,依据《土工试验规程》(SL 237—1999)分析其密度为2.53 g/cm³,堆积密度为1.56 g/cm³。以煤矸石颗粒粒径5 mm为界限,通过筛分法控制颗粒+5 mm为粗骨料,-5 mm为细骨料。借助ZSX100e型X射线荧光光谱仪分析其化学成分,结果见表1。从表1可以看出,主要化学成分从高到低依次为SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃,分别占总质量的52.68%、12.75%和9.82%,CaO含量仅占5.93%。采用脱硫石膏作为硫酸盐激发剂,主要成分为二水石膏,为水化体系提供Ca²⁺和SO₄²⁻,密度为2.37 g/cm³,比表面积为350 m²/kg。粉煤灰采用山东淄博某燃煤电厂排放的F级粉煤灰,外观呈红褐色,密度为2.18 g/cm³,比表面积为450 m²/kg,烧失量为2.6%,Al₂O₃含量为36.93%。水泥采用当地市售的P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,密度为3.08 g/cm³,比表面积为356 m²/kg,标准稠度用水量为25.5%。外加剂采用1.5 M的水玻璃溶液作为碱激发剂。水采用市政自来水。

表1 试验材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of test materials

试验材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	MnO	%
煤矸石	52.68	12.75	5.93	0.26	0.78	9.82	0.04	0.02	0.11	
脱硫石膏	1.13	0.98	39.02	0.11	0.72	0.13	48.85	0.03	0.08	
粉煤灰	44.36	36.93	5.02	0.26	0.77	8.63	1.05	0.21	0.73	
水泥	21.56	4.69	63.79	0.12	1.25	4.82	1.83	0.06	0.11	



图1 煤矸石外观形态

Fig.1 Appearance of coal gangue

1.2 试验设计

为了探明煤矸石-脱硫石膏-粉煤灰膏体复合料浆流动性能及各组分对流变性能的影响规律,固

定料浆质量浓度为70%,灰砂比为1:6,外加剂掺量为6%。在此基础上,选取细矸率、煤矸石掺量、粉煤灰掺量为研究对象,以料浆塌落度、扩散度、流动度、稠度、分层度、泌水率、流变参数为考察指标。在分析原材料物理化学特性的基础上,设计三因素四水平的正交试验方案,即细矸率为20%、30%、40%和50%,煤矸石掺量为35%、40%、45%和50%,粉煤灰掺量为25%、30%、35%和40%,共开展16组配比试验,正交试验因素与水平见表2。

表2 正交试验因素与水平设计

Table 2 Orthogonal test factors and level design

水平	细矸率/%	煤矸石掺量/%	粉煤灰掺量/%
一	20	35	25
二	30	40	30
三	40	45	35
四	50	50	40

1.3 试验流程

按照试验配合比准备原材料,将煤矸石、脱硫石膏、粉煤灰和水泥在 60 °C 条件下烘干除湿,采用电子天平精确称量原材料,倒入搅拌桶中低速干混搅拌 3 min,然后加入水玻璃溶液和水,继续搅拌 5 min,得到均匀料浆。取部分料浆开展塌落度和扩散度测试,测试装置采用上口直径为 100 mm,下口直径为 200 mm,高度为 300 mm 的锥形塌落度筒。试验过程中,将塌落度筒放置在水平光滑地面上,然后将搅拌均匀的料浆分 3 次倒入,采用捣棒沿筒壁混合压实,采用刮刀将上筒口处理平整,清除筒壁周围多余料浆,在 5~10 s 内垂直提起塌落度筒,测量料浆塌落后的最大垂直高度与筒顶之间的距离即为料浆塌落度,料浆塌落后的最大半径即为扩散度。同样地,通过流动度测试反映料浆的可泵性,测试仪器选择上口直径为 36 mm,下口直径为 60 mm,高度为 60 mm 的金属锥形模具。此外,取少部分料浆进行稠度、分层度和泌水率测试,稠度采用 SC-145 型数显砂浆稠度仪进行测试,两次测试后的稠度差即为分层度,泌水率为料浆静置 1 h 后析出水分与原料浆含水量的比值。借助 R/S-SST 型软固体流变测试仪开展料浆流变性能测试,将料浆浇注至容量 400 mL 烧杯的 3/4 处,移动转子(高为 20 mm,直径为 40 mm)直至被料浆全部淹没,设置剪切速率为 100 s^{-1} ,预剪切 30 s 后,控制剪切速率线性降低至 0,剪切时间为 100 s,记录不同剪切速率下料浆的剪切应力和表观黏度变化。

2 结果分析与讨论

2.1 流动性能分析

不同影响因素作用下的膏体料浆塌落度、扩散度试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着影响因素的变化,料浆塌落度和扩散度保持良好的—致性。煤矸石细矸率从 20% 增加至 50% 的区间内,料浆塌落度和扩散度均呈先增加后快速降低的趋势,塌落度先从 25.6 cm 增加至 27.8 cm,然后降低至 24.4 cm;扩散度先从 45.7 cm 增加至 53.3 cm,然后降低至 40.5 cm,波动幅度较大,表明细矸率是影响煤矸石石膏体料浆流动性能的显著性因素。由图 2(b)可知,随着煤矸石掺量的增加,塌落度和扩散度先降低后增加,且煤矸石掺量 40% 是其流动性能变化的拐点。这是因为煤矸石中含有高岭土矿物相,在料浆搅拌过程中吸附大量自由水,降低了胶凝颗粒的分散性,导致料浆流动性能变差^[30]。继续增

加其掺量,胶凝材料比例相对减少,料浆初期凝结硬化性能较差,大部分颗粒处于分散状态,从而提高了料浆流动性能。观察图 2(c)可以发现,粉煤灰影响料浆流动性能并非掺量越高改善效果越好。粉煤灰掺量从 25% 增加至 40% 的过程中,塌落度分别增加 0.2 cm、0.4 cm、0.1 cm,扩散度分别增加 0.8 cm、1.5 cm、0.4 cm。当粉煤灰掺量提升至 35% 时,塌落度和扩散度分别达最大值 26.8 cm 和 49.6 cm。这是因为粉煤灰微观形态为球状颗粒,在料浆制备过程中,能够发挥“滚珠轴承”作用,降低了颗粒间的摩擦力,从而改善了料浆流动性能^[31-32]。

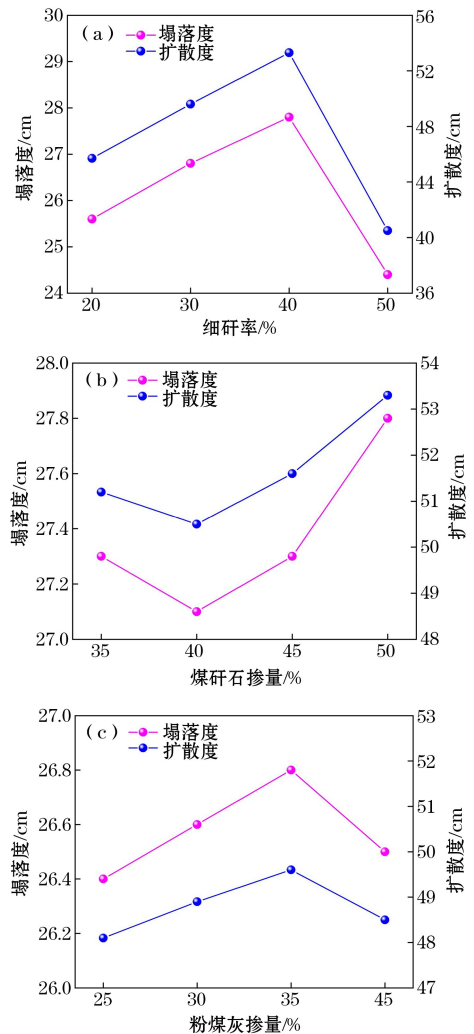


图 2 膏体料浆塌落度和扩散度

Fig.2 Slump and diffusivity of paste slurry

图 3 给出了膏体料浆流动度的测试结果。从图 3 可以看出,流动度的变化趋势与塌落度近似。当细矸率为 40% 时,料浆颗粒级配最优,流动度最高达 21.5 cm;煤矸石掺量为 40% 时,料浆流动度最低,为 20.4 cm;随着粉煤灰掺量的增加,流动度呈

先升高后降低的变化趋势,这是因为粉煤灰掺量过大,料浆中的细颗粒含量增多而产生团聚,团聚效应带来的负面影响超过滚珠润滑作用,因此,过量的粉煤灰会阻碍料浆正常流动。

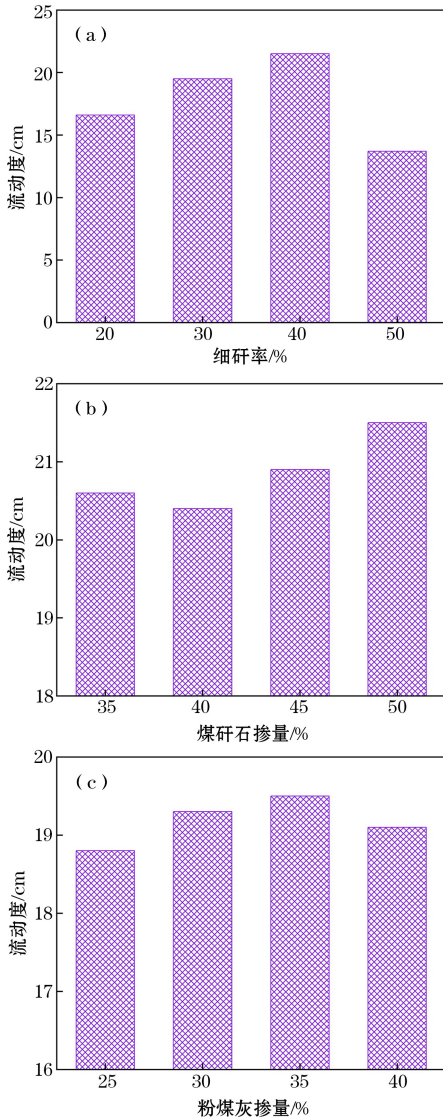


图3 膏体料浆流动度
Fig.3 Fluidity of paste slurry

2.2 和易性能分析

图4和图5给出了膏体料浆和易性能参数测试结果。从图4、图5可以看出,随着细矸率的增大,料浆稠度、分层度和泌水率表现出先升高后降低的变化趋势。这是因为颗粒比表面积增大,可吸附大量游离水,参与水化反应的水含量降低,胶凝产物C-S-H凝胶、钙矾石的产出量减少,削弱了颗粒间的黏结力,提高了料浆的和易性能;另一方面,水化体系中细颗粒含量增多,颗粒微集料效应发挥更充分,料浆密实效果更好;再者,在水化反应过程中,

自由水通过水化反应下沉或者被细颗粒覆盖,难以有水析出,从而显著降低了料浆的泌水率。

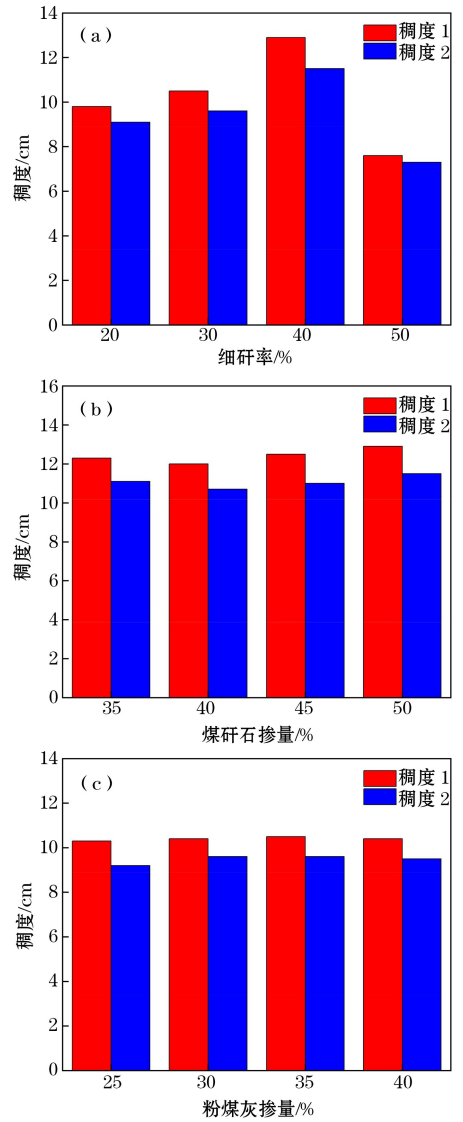


图4 膏体料浆稠度
Fig.4 Consistency of paste slurry

由图4(b)可见,煤矸石掺量对稠度的影响不显著,随着煤矸石掺量的增加,稠度1从12.3 cm增加至12.9 cm,增幅为4.88%;稠度2从11.1 cm增加至11.5 cm,增幅为3.60%。观察图5(b)可知,泌水率随煤矸石掺量的增加而表现为先降低后升高的趋势。这是因为掺入过量的煤矸石,导致体系中的活性硅铝成分较低,削减了水化作用产生的凝结硬化效果,导致粗颗粒煤矸石沉降与料浆分离,大量自由水析出。由图4(c)可知,随着粉煤灰掺量的增加,稠度呈先增后减的变化规律,波动范围较小。观察图5(c)可以发现,粉煤灰掺量超过35%后,料浆泌水率显著降低。造成这一现象的原因在于:一方面,

细颗粒的粉煤灰分散至结构空隙中,提高了浆体密实度;另一方面,粉煤灰与液相中的 OH^- 反应生成大量水化产物,水化产物相互搭接构筑成致密的三维网络结构,将颗粒包裹黏结,切断了自由水的扩散路径,富余的自由水与粉煤灰颗粒发挥润滑作用,从而降低了浆体稠度;同时,粉煤灰水化反应消耗了大量的自由水,自由水转变为水化产物中的结晶水,从而降低了料浆泌水率。

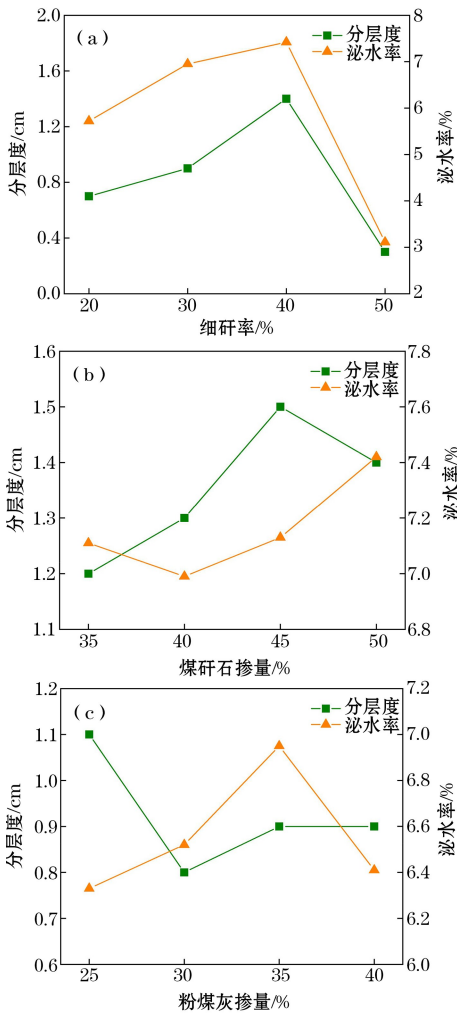


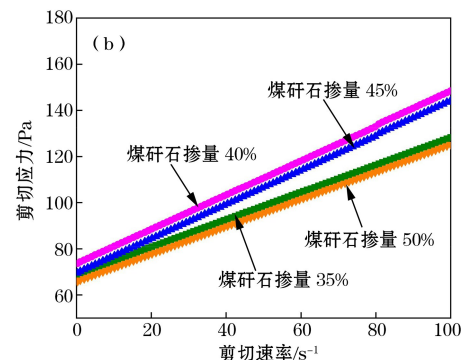
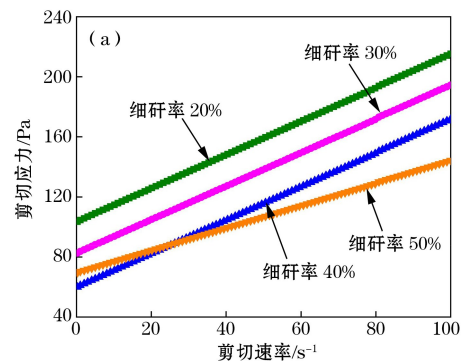
图5 膏体料浆分层度和泌水率

Fig.5 Layering degree and bleeding rate of paste slurry

2.3 流变性能分析

图6和图7分别给出了不同影响因素作用下膏体料浆剪切速率-剪切应力和剪切速率-表观黏度的关系曲线。从图6明显可以看出,随着剪切速率的增加,剪切应力呈线性上升趋势,当剪切速率为0时,剪切应力存在极小值,属于典型的非牛顿体。从图7可以发现,剪切速率从0增加至 20 s^{-1} 的过程中,表观黏度呈快速下降趋势,继续提高剪切速率,

表观黏度平稳变化。这是因为较低的剪切速率难以将料浆的絮凝网状结构打破,胶凝结构对转子的阻碍作用较大,宏观表现为黏度较高。采用 Hershel-Bulkley 模型对各离散点进行非线性回归拟合,获得膏体料浆流变参数及拟合方程,拟合结果见表3。由表3可见,拟合相关系数 R^2 均为 0.999,表明模型拟合精度高,可靠性强。结合图6和表3可以发现,随着细研率的提升,料浆屈服应力呈先降低后升高的趋势,细研率为 20% 时,料浆屈服应力达最大值 103.598 Pa;细研率为 40% 时,料浆屈服应力降低至 60.089 Pa。这是因为当胶凝体系中细颗粒煤矸石含量较少时,大颗粒煤矸石阻碍了转子的转动,料浆润滑效果较差,随着细研率的提升,料浆颗粒级配得到改善,因此,屈服应力不断降低。然而,继续提升细研率,料浆中细颗粒由于含量过多而聚集,相邻颗粒间的碰撞、摩擦概率提高,转子剪切越充分,料浆屈服应力越大。由图6(b)可知,煤矸石掺量对料浆屈服应力影响不显著。随着粉煤灰掺量的增加,料浆屈服应力呈先降低后升高的趋势,这是因为粉煤灰在转子剪切过程中具有“形态效应”,削减了相邻颗粒间的摩擦力和接触面积;另一方面,粉煤灰能够吸附在水泥颗粒表面,阻止胶凝网络结构过早形成,保持水泥颗粒处于分散状态。但随着粉煤灰掺量的继续增加,细颗粒的微集料效应显著,增强了结构抵抗剪切变形的能力,料浆屈服应力呈上升趋势。



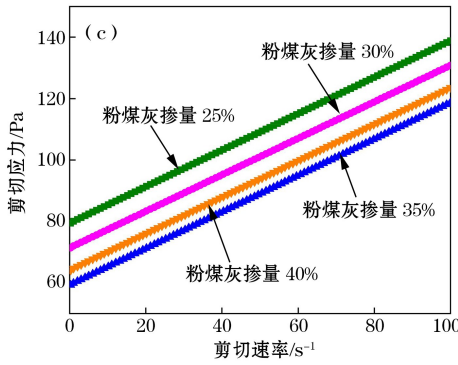


图 6 不同影响因素作用下剪切速率与剪切应力关系
Fig.6 The relationship between shear rate and shear stress under different influencing factors

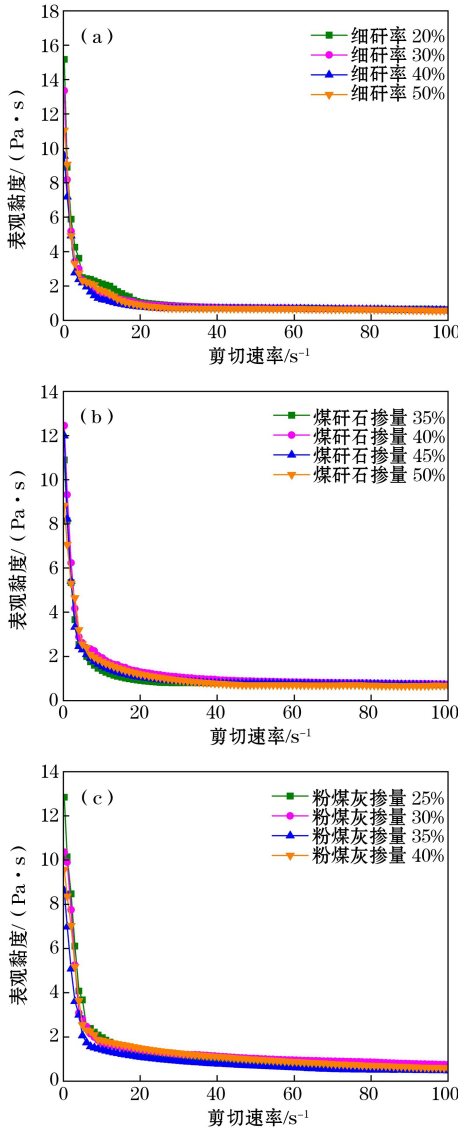


图 7 不同影响因素作用下剪切速率与表观黏度关系
Fig.7 Relationship between shear rate and apparent viscosity under different influencing factors

表 3 膏体料浆流变参数及拟合方程

Table 3 Rheological parameters and fitting equation of paste slurry

影响因素	屈服应力/ Pa	黏度系数/ (Pa·s)	拟合方程	相关系数 (R ²)
细矸率 20%	103.598	1.083	$\tau = 103.598 + 1.083\gamma^{1.01}$	0.999
细矸率 30%	82.692	1.073	$\tau = 82.692 + 1.073\gamma^{1.01}$	0.999
细矸率 40%	60.089	1.074	$\tau = 60.089 + 1.074\gamma^{1.01}$	0.999
细矸率 50%	69.702	0.711	$\tau = 69.702 + 0.711\gamma^{1.01}$	0.999
煤矸石掺量 35%	68.901	0.595	$\tau = 68.901 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999
煤矸石掺量 40%	73.750	0.701	$\tau = 73.750 + 0.701\gamma^{1.01}$	0.999
煤矸石掺量 45%	69.686	0.705	$\tau = 69.686 + 0.705\gamma^{1.01}$	0.999
煤矸石掺量 50%	65.812	0.595	$\tau = 65.812 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999
粉煤灰掺量 25%	79.436	0.595	$\tau = 79.436 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999
粉煤灰掺量 30%	71.372	0.595	$\tau = 71.372 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999
粉煤灰掺量 35%	59.304	0.595	$\tau = 59.304 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999
粉煤灰掺量 40%	64.117	0.595	$\tau = 64.117 + 0.595\gamma^{1.00}$	0.999

注:表中 τ 为剪切应力; γ 为剪切速率。

3 结论

(1) 细矸率是影响膏体复合充填料浆流动性能、和易性能的关键性因素,随着细矸率的提升,料浆塌落度、扩散度、流动度、稠度和泌水率均呈先增强后削弱的趋势。细矸率为 40% 时,料浆可泵性最优。

(2) 煤矸石掺量从 35% 增加至 50% 的过程中,料浆流动性能、和易性能参数呈先降低后上升的趋势,40% 掺量是其性能变化的临界点。

(3) 粉煤灰对膏体复合料浆性能的影响表现出微集料效应和滚珠润滑作用,但粉煤灰掺量过高会导致细颗粒集聚,增大内摩擦力,水膜厚度降低,从而阻碍料浆的正常流动。

(4) 膏体复合充填料浆流变参数符合 Hershel-Bulkley 模型,随着细矸率的提高,优化了颗粒级配,料浆屈服应力和黏度不断降低,继续提高细矸率,细颗粒堆积效果凸显,颗粒间的碰撞、接触面积增大,增加了料浆屈服应力和黏度;煤矸石掺量在 35% ~ 50% 区间内变化时,料浆流变参数波动范围较小;随着粉煤灰掺量的增加,屈服应力和黏度呈先降低后升高的趋势。

参考文献(References):

[1] 马立强,翟江涛,NGO I. CO₂ 矿化煤基固废制备保水开采负碳充填材料试验研究[J].煤炭学报,2022,47(12): 4228-4236.
MA Liqiang, ZHAI Jiangtao, NGO I. Experimental study on preparation of negative carbon filling material for water protection mining by CO₂ mineralization of coal-based solid waste[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4228-4236.

- [2] 陈琦琦, 张大明, 任凤玉. 干粉激发煤矸石基地聚合物混凝土配合比优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 125-129.
CHEN Qiqi, ZHANG Daming, REN Fengyu. Study on mix proportion optimization of dry-powder activated coal gangue based geopolymer concrete [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 125-129.
- [3] 王贻明, 刘树龙, 吴爱祥, 等. 干湿循环下复合激发膏体充填材料宏-细-微观强化与损伤特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 665-676.
WANG Yiming, LIU Shulong, WU Aixiang, et al. Macro-meso-micro strengthening and damage characteristics of composite excitation paste filling material under dry-wet cycle[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2024, 55(2): 665-676.
- [4] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143-154.
ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143-154.
- [5] 何泽全, 巨峰, 肖猛, 等. 煤矸石充填材料在循环载荷作用下的细观变形特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1002-1010.
HE Zequan, JU Feng, XIAO Meng, et al. Characterization of meso-deformation of gangue backfilling materials under cyclic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1002-1010.
- [6] 朱愿愿, 王爱国, 孙道胜, 等. 煅烧煤矸石细骨料特性及其对砂浆性能的提升作用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3657-3669.
ZHU Yuanyuan, WANG Aiguo, SUN Daosheng, et al. Characteristics of coal gangue fine aggregates after calcination and its effects on the improvement of mortar properties[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3657-3669.
- [7] 邱继生, 程坤, 张如意, 等. 质量分数对煤矸石基绿色充填体性能影响研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(3): 22-26.
QIU Jisheng, CHENG Kun, ZHANG Ruyi, et al. Study on the effect of mass fraction on the properties of coal gangue-based green filling body[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(3): 22-26.
- [8] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165-178.
LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165-178.
- [9] 王莹莹, 谢光天, 李泽荃. 煤矸石质似膏体充填胶结料的研制及水化机理研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(12): 141-144.
WANG Yingying, XIE Guangtian, LI Zequan. Research on coal gangue paste-like filling materials and its hydration mechanism[J]. Coal Engineering, 2017, 49(12): 141-144.
- [10] 韩宇峰, 殷志祥, 郭保立. 水泥-煤矸石充填浆体的性能及其充填过程[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 26-28.
HAN Yufeng, YIN Zhixiang, GUO Baoli. Performance and filling process of cement-gangue cemented paste backfill[J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 26-28.
- [11] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 54-66.
WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 54-66.
- [12] 王赵君. 煤矸石基微生物矿化充填材料制备及性能试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
WANG Zhaojun. Experimental study on preparation and properties of coal gangue based microbial mineralized filling materials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 高小艳. 煤矿采空区粉煤灰膏体充填材料性能实验研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2021.
GAO Xiaoyan. Experimental study on filling material properties of powdered coal ash paste in goaf[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2021.
- [14] 宁建国, 刘学生, 史新帅, 等. 矿井采空区水泥-煤矸石充填体结构模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 23-27.
NING Jianguo, LIU Xuesheng, SHI Xinshuai, et al. Study on cement-coal refuse backfill structure model of mining goaf in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 23-27.
- [15] 陈杰, 石莹, 黄庆享. 基于采空区充填材料的煤矸石活化机理研究[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(6): 679-682.
CHEN Jie, SHI Ying, HUANG Qingxiang. Study on coal gangue activation technology based on filling material in goaf area[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(6): 679-682.
- [16] 贾敏, 杨磊. 煤矸石煅烧活化提取氧化铝技术研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2): 140-144.
JIA Min, YANG Lei. Study on technology of alumina extraction from coal gangue activated by calcination[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2): 140-144.
- [17] 金彪, 赵亮, 汪潇, 等. 利用煤矸石、页岩、污泥制备烧结砖的研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(5): 39-41.
JIN Biao, ZHAO Liang, WANG Xiao, et al. Preparation of sintered brick with sludge, shale and gangue[J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(5): 39-41.
- [18] 张宇航, 宋子岭, 孔涛, 等. 煤矸石对盐碱土壤理化性质的改良效果[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 195-204.
ZHANG Yuhang, SONG Ziling, KONG Tao, et al. Amelioration effect of coal gangue on physical and chemical properties of saline-alkaline soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 195-204.

- [19] 程春宏,邢军,仝海伟,等.烧结制度对煤矸石基发泡陶瓷的性能影响[J].中国矿业,2022,31(2):128-134.
CHENG Chunhong, XING Jun, TONG Haiwei, et al. Effect of sintering system on properties of coal gangue foam ceramics[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 128-134.
- [20] 凌陈月,张蕊,牛萌,等.煤矸石制备水处理絮凝剂室内实验研究[J].石油化工应用,2021,40(9):94-98.
LING Chenyue, ZHANG Rui, NIU Meng, et al. Laboratory experimental study on preparation of flocculant for water treatment from coal gangue [J]. Petrochemical Industry Application, 2021, 40(9): 94-98.
- [21] 湛玲丽,韩利雄,李璟玮,等.高掺量煤矸石固废微晶玻璃结构与性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(4):1124-1132.
ZHAN Lingli, HAN Lixiong, LI Jingwei, et al. Structure and performance of glass-ceramics with high content of coal gangue solid waste [J]. Bulletin of the Chinese Silicate Society, 2022, 41(4): 1124-1132.
- [22] 张卫清,柴军,冯秀娟,等.煤矸石基地质聚合物的制备及微观结构[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):539-547.
ZHANG Weiqing, CHAI Jun, FENG Xiujuan, et al. Preparation and microstructure of coal gangue-based geopolymer[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 539-547.
- [23] 白国良,刘瀚卿,朱可凡,等.陕北矿区不同矿源煤矸石混凝土抗压强度试验研究[J].土木工程学报,2023,56(4):30-40.
BAI Guoliang, LIU Hanqing, ZHU Kefan, et al. Experimental study on compressive strength of coal gangue from different ore sources in Northern Shaanxi mining area [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(4): 30-40.
- [24] 王川,刘超,裴文晶,等.活化煤矸石制备路基充填材料的探讨[J].材料科学与工程学报,2022,40(1):97-103.
WANG Chuan, LIU Chao, PEI Wenjing, et al. Discussion on the preparation of roadbed filling material with activated coal gangue [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(1): 97-103.
- [25] 张庆松,李恒天,李召峰,等.不同粒径组合对煤矸石基充填材料性能的影响[J].金属矿山,2020(1):73-80.
ZHANG Qingsong, LI Hengtian, LI Zhaofeng, et al. Influence of different grain size combination on gangue-based filling material[J]. Metal Mine, 2020(1): 73-80.
- [26] 邱继生,程坤,张如意,等.煤矸石粉对矸石基绿色胶结充填体性能的影响[J].矿业研究与开发,2022,42(3):60-65.
QIU Jisheng, CHENG Kun, ZHANG Ruyi, et al. Influence of coal gangue powder on properties of gangue-based green cemented backfill [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 60-65.
- [27] 孙启明.煤矸石-建筑固废混合膏体宏观细观特性及应用研究[D].成都:西华大学,2021.
SUN Qiming. Study on Macro and micro properties and application of gangue-building solid waste mixture paste[D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [28] 舒安东,周雄,邓代强,等.煤矸石充填骨料级配优化实验研究[J].化工矿物与加工,2021,50(7):5-8+13.
SHU Andong, ZHOU Xiong, DENG Daiqiang, et al. Experimental study on the optimization of aggregate gradation with coal gangue filling[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(7): 5-8+13.
- [29] 周翔,齐红军,张笃学,等.煤矸石充填材料配比试验研究[J].采矿技术,2020,20(1):33-35+39.
ZHOU Xiang, QI Hongjun, ZHANG Duxue, et al. Experimental study on ratio of coal gangue filling material [J]. Mining Technology, 2020, 20(1): 33-35+39.
- [30] 张伟刚,邱跃琴,郭延庆,等.基于响应面法的煤矸石胶结充填体抗压强度试验研究[J].矿产保护与利用,2022,42(6):36-44.
ZHANG Weigang, QIU Yueqin, GUO Yanqing, et al. Experimental study on compressive strength of coal gangue cemented backfill based on response surface method [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 36-44.
- [31] 刘树龙,王贻明,吴爱祥,等.赤泥复合充填材料浸出行为及固化机制[J].复合材料学报,2023,40(12):6729-6739.
LIU Shulong, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Leaching behavior and solidification mechanism of red mud composite filling material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6729-6739.
- [32] 尹博.粉煤灰膏体充填材料及其改性与应用研究[D].太原:太原理工大学,2018.
YIN Bo. Research on the fly ash cemented filling materials and its modification and further application [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

Preparation of Coal Gangue-Desulfurization Gypsum-Fly Ash Paste Slurry and Its Properties

XU Hongtu¹, LIU Shulong², SHI Daqing², SONG Xintao², WANG Yiming², SU Fengbo¹, LI Min¹, YUAN Xinyu¹

(1.Chifeng NFC Baiyinnuoer Mining Co. Ltd., Chifeng, Inner Mongolia 025450, China;

2.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to ensure that the coal gangue paste composite filling slurry meets the requirements of mine pipeline transportation performance, coal gangue, desulfurization gypsum and fly ash were used to develop the paste composite filling material. Taking the fine gangue rate, coal gangue content and fly ash content as the research objects, the orthogonal test of three factors and four levels was carried out to explore the changing rules of slurry flow performance, workability and rheological properties. The Hershel-Bulkley model was used to fit the rheological parameters of coal gangue-based paste

composite filling slurry. The correlation coefficient R^2 is 0.999, and the model has high fitting accuracy and strong reliability. The research results show that the slump, diffusivity, fluidity, consistency and bleeding rate of slurry increase first and then decrease with the increase of fine gangue rate. When the fine gangue rate is 40%, the pumpability of slurry is the best. The coal gangue content has no significant effect on the pipeline transportation performance of slurry, but the kaolin phase in coal gangue will adsorb a small amount of free water, resulting in poor flow performance of slurry. Fly ash plays the role of ball lubrication and micro-aggregate in the paste slurry system, releasing a large amount of free water, thickening the water film on the surface of the particles, and improving the pipeline transportation performance of the slurry. However, when the fly ash content exceeds 35%, the agglomeration of fine particles of fly ash is serious, which enhances the ability of the slurry to resist shear deformation and weakens the flow performance and rheological properties of the slurry.

Key words: Paste filling, Coal gangue, Fly ash, Flow performance, Rheological properties