



深部充填开采矸石粉煤灰料浆流变特性研究

徐文彬 陈伟 张亚伦 陈波岑

引用本文:

徐文彬, 陈伟, 张亚伦, 等. 深部充填开采矸石粉煤灰料浆流变特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 85–93.
XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun. Research on rheological characteristics of gangue–fly ash slurry in deep filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 85–93.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-0444>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采煤沉陷区治理时高浓度浆液流变时效特性研究

Study on time-dependent characteristics of rheological parameters on high-concentration slurry in treatment of coal mining subsidence area

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 122–127 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8bf25382-6e8e-4ced-9a66-1acb836d2a5c>

水泥粉煤灰基矸石胶结充填体破坏特征及强度形成机制

Failure characteristics and strength formation mechanism of cement–fly ash based cemented gangue backfill

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 36–45 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0794>

非均匀载荷下充填开采岩层连续弯曲移动力学模型

Mechanical model of rock strata continuous bending movement under non-uniform load in backfill mining

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 139–145 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/49939dd9-831d-442b-8c7a-367c425a8176>

矿山绿色充填开采发展现状及展望

Present situation and prospect of green filling mining in mines

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 48–55 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d9c85a30-5f8d-4a8c-abef-e217e8224d49>

红土膏体充填材料及其物理特性试验研究

Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 61–68 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.02.008>

采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望

Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 143–154 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1725>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

徐文彬,陈伟,张亚伦,等.深部充填开采矸石-粉煤灰料浆流变特性研究[J].煤炭科学技术,2023,51(3):85-93.

XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, et al. Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 85-93.

深部充填开采矸石-粉煤灰料浆流变特性研究

徐文彬,陈伟,张亚伦,陈波岑

(中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

摘要:充填开采是煤矿绿色开采技术体系关键环节之一,针对充填过程中的矸石-粉煤灰基充填料浆的输送技术问题,设置了不同质量浓度、粉煤灰掺量、养护温度和时间等参数,开展了温-时耦合效应下矸石-粉煤灰充填料浆流变测试试验,探究各参数对料浆流变特性的影响。通过正交极差分析温度和静置时间对料浆屈服应力影响权重,并建立温-时耦合效应下流变参数回归模型。试验结果表明:质量浓度对料浆的流动性能影响显著,随质量浓度的增加,料浆剪切应力与剪切速率线性相关性降低,质量浓度为78%时兼具较好的流动性和稳定性;粉煤灰掺量增加会提高料浆的剪切应力和剪切增稠的程度,粉煤灰掺量为85%时料浆屈服应力最大,粉煤灰掺量75%次之,粉煤灰掺量65%最小;高温加速了料浆的水化反应速率和增强了粉煤灰的火山灰反应活性,静置120 min时养护温度50 °C时屈服应力较20、35 °C增幅分别为44.5%、37.5%。静置时间对料浆屈服应力的影响程度强于温度,粉煤灰掺量为75%时,温度20 °C条件下料浆静置120 min后屈服应力比静置0 min增加了133.7%;不同温度条件下,料浆屈服应力随静置时间均呈线性增长趋势,拟合度均在0.9以上;最后,建立温-时耦合效应下料浆的屈服应力演化模型。通过理论模型计算结果与试验结果对比,平均误差在5%,拟合效果较好,可为煤矿充填管道输送阻力计算提供参考。

关键词:充填开采;高温;静置时间;流变特性;回归模型

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)03-0085-09

Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining

XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, CHEN Bocen

(School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Filling mining is one of the key links in the green mining technology system of coal mines, in view of the transportation technology of the gangue-fly ash based filling slurry during the filling process, parameters such as different mass concentrations, fly ash content, curing temperature and time were set. The rheological tests of the gangue-fly ash based filling slurry under the temperature-time coupling effect were carried out to explore the influence of various parameters on the rheological properties of the slurry. Through orthogonal range analysis, the influence weight of temperature and standing time on the yield stress of the slurry was analyzed, and the rheology under the temperature-time coupling effect parametric regression model was established. The test results show that the mass concentration has a significant effect on the fluidity of the slurry. With the increase of the mass concentration, the linear correlation between the shear stress of the slurry and the shear rate decreases. When the mass concentration is 78%, it has both good fluidity and stability; The increase of the fly ash content will increase the shear stress and the degree of shear thickening. When the amount of fly ash is 85%, the yield stress of the slurry is the largest, followed by the amount of fly ash of 75%, and the amount of fly ash 65% is the smallest; High temperature accelerates the hydration reaction rate of the slurry and enhances the pozzolanic reactivity of fly ash. The curing temperature at 50 °C increased by 44.5% and 37.5% respectively compared with 20 °C and 35 °C when the fly ash was kept for 120 minutes; The setting time has a stronger

收稿日期:2022-01-05 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0444

基金项目:越崎青年学者资助项目(800015Z1185);国家重点研发计划资助项目(2018YFE0123000);中央高校基本科研业务费资助项目(2022YJSNY06)

作者简介:徐文彬(1985—),男,江西上饶人,副教授,博士。E-mail: xuwb08@163.com

influence on the yield stress of the slurry than that of temperature. When the fly ash content is 75%, the yield stress of the slurry after standing for 120 minutes at a temperature of 20 °C increases by 133.7% compared with that of standing for 0 min; Under different temperature conditions, the yield stress of the slurry increases linearly with standing time, and the degree of fitting is above 0.9. Finally, the yield stress evolution model of the slurry under the temperature-time coupling effect is established. By comparing the calculation results of the theoretical model with the test results, the average error is about 5%, and the fitting effect is good, which can provide a reference for the calculation of the pipeline transportation resistance of the filling pipeline in the coal mine.

Key words: filling mining; high temperature; setting time; rheological properties; regression model

0 引言

煤炭资源是我国的主体能源,在高强度大规模开采后,浅部可采煤炭资源储量急剧减少,采用垮落法采矿引起的上覆岩层变形、地表沉陷等环境问题也日益凸显^[1-2]。深部煤炭开采是未来发展方向,充填开采是实现深部煤炭绿色开采技术体系的关键环节之一,可将智能分选后产生的矸石和燃煤发电后生成的粉煤灰等固体废弃物用于充填采空区,减少地表沉陷造成的环境损害^[3-5]。在煤矿充填开采中,需要布置充填管道输送系统,将煤矸石、粉煤灰等固体废弃物、胶凝材料与水混合后,通过管道将料浆泵送至采空区^[6-7]。随着深部采场温度将逐渐升高,和料浆管道输送距离增长,充填料浆内部不断进行着复杂的物理、化学反应,长距离输送和高地温环境必然会导致固体废弃物充填材料流变性能发生改变,充填料浆能否通过管道安全输送至采空区,对温-时效应下料浆流变特性的研究尤为重要。

国内外学者对充填料浆流变特性开展了大量研究,刘音等^[8]探究了质量分数、粉煤灰及煤矸石等掺量对料浆流动性的影响;马昆林等^[9]研究表明随粉煤灰掺量的增加,料浆的剪切应力与剪切速率线性相关性逐渐降低;谢友均等^[10]指出水泥料浆流变曲线存在剪切变稀和剪切增稠2个阶段,大掺量粉煤灰增强了料浆剪切增稠的程度;徐文彬等^[11]通过开展不同级配骨料、静置时间下煤矸石料浆流变特性试验,发现料浆的流变特性过程是多种模型复合特性的综合体现;刘泉声等^[12]发现料浆在同级剪切速率下的剪切应力均随着静置时间的增加而增加,且温度越高,剪切力增加的幅度越大;钱文勋等^[13]分析了养护温度对粉煤灰水泥浆体水化程度、孔隙结构以及水化产物的影响,探究了其作用机理;XU等^[14-15]通过流变试验,探究了养护温度和水化时间对尾砂

胶结充填料浆流变特性的影响。深部充填开采鉴于其所处环境的特殊性,其内部温-时耦合场对料浆流变的影响不容忽视,然而,当前关于温度-时间耦合作用下固体废弃物充填料浆的流变性能鲜有报道。

通过开展不同粉煤灰掺量-研石充填料浆在温-时效应下的流变试验,揭示充填料浆的剪切应力、屈服应力以及黏度等参数演化特征,并分析各流变参数之间的相关性。借助电导率、pH等测试手段表征其内部离子运移规律,通过正交极差方法,分析温度和静置时间对屈服应力的影响权重,并建立考虑温度和时间耦合作用下充填料浆屈服应力回归模型。结合试验结果,以期为煤炭深部充填开采料浆管道安全输送以及充填工程系统设计提供指导。

1 流变试验

1.1 试验原材料及配合比

试验主要材料为煤矸石、粉煤灰、水泥和水。煤矸石取自新阳某煤矿矸石山,其化学成分见表1,主要成分为CaO和Al₂O₃,矿物成分由高岭石、石英、方解石、黄铁矿以及云母等组成。粉煤灰是燃煤在电厂高温燃烧后的产物,比表面积456 m²/kg,其化学成分见表2,主要成分为Al₂O₃和SiO₂,二者总质量占粉煤灰的46.08%。按照化学成分指标计算公式,对表2中化学成分进行分析,可得粉煤灰的碱度系数0.1,属酸性材料,活性系数为0.3。水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积344 m²/kg,其化学组分见表3。煤矸石主要是采掘作业出矸和煤矸分离后的产物,其颗粒粒径较大,需使用破碎装置进行破碎处理,破碎后的粒径均小于10 mm,其中小于2.5 mm的占50%,2.5~5.0 mm的占35%,5~10 mm占15%。配合比设计中保持胶凝材料总质量不变,粉煤灰分别等质量取代65%,75%,85%的水泥进行,依次用FA65%,FA75%,FA85%表示。

表1 煤矸石的化学成分

Table 1 Chemical composition of coal gangue

化学成分	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	C	Fe	S	水分	烧失量
质量分数/%	21.92	19.20	3.29	0.76	13.45	4.67	4.80	1.75	28.98

表 2 粉煤灰的化学成分
Table 2 Chemical composition of fly ash

化学成分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	C	Fe	K	水分	烧失量
质量分数/%	34.01	12.07	3.54	0.59	14.44	3.37	0.91	0.74	16.79

表 3 水泥的化学成分
Table 3 Chemical composition of cement

化学成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂	烧失量
质量分数/%	20.34	3.11	64.78	5.02	0.35	1.09	2.20	0.10	0.26	2.75

1.2 试验方法

试验主要考虑温度-静置时间耦合作用对料浆流变参数的影响, 具体测试方法如下: 按照表 4 试验配比方案制备砾石充填料浆, 分别称取定量的煤矸石、粉煤灰、水泥和水, 将固体物料混合均匀, 缓慢加水制得给定浓度的料浆, 然后用电动搅拌机搅拌 5 min, 确保充分搅拌均匀后倒入 500 mL 烧杯中。按照试验要求在恒温养护箱(相对湿度 95%±1%, 温度分别为 20、35、50 °C)下养护 0、30、60 和 120 min。试验仪器为 Rheolab QC 型旋转流变仪, 采用控制剪切速率的方式进行剪切试验, 剪切速率从 0 增加到 120 s⁻¹, 测定料浆在各剪切速率下的剪切应力, 多次配浆取均值以减小误差, 对数据拟合分析得到相应流变方程以及流变参数。

表 4 试验配合比
Table 4 Experimental mix proportion

A	温度/°C	质量分数/%	静置时间/min	粉煤灰掺量/%
4/5	20	78	0, 30, 60, 120	65, 75, 85
4/5	35	78	0, 30, 60, 120	65, 75, 85
4/5	50	78	0, 30, 60, 120	65, 75, 85
4/5	20	76	60	65, 75, 85
4/5	20	78	60	65, 75, 85
4/5	20	80	60	65, 75, 85

注: A 为胶凝材料与煤矸石质量比, 胶凝材料为水泥和粉煤灰的总称。

不同流体模型的流变特性曲线如图 1 所示, 高质量分数料浆流变模型可近似地用 Herschel-Bulkley 模型来描述, 简称 H-B 模型, 其流变方程为

$$\tau = \tau_0 + \eta \gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, Pa; η 为塑性黏度, Pa·S; γ 为剪切速率, s⁻¹; n 为流态性指数。当 $n=1$ 时 $\tau_0=0$ 时, 为牛顿流体; 当 $n>1$, $\tau_0>0$ 时, 为宾汉姆流体; 当 $n>1$ 时, 为膨胀流体; 当 $n<1$ 时, 为伪塑性流体。

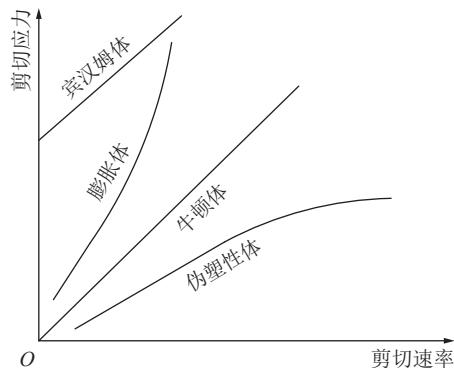


图 1 不同流体模型的流变特性
Fig.1 Rheological characteristics of different fluid models

2 流变试验结果与讨论

2.1 质量分数对料浆流变特性的影响

试验选取质量分数为 76%、78% 和 80% 的料浆进行流变试验。图 2 为静置 60 min 时不同质量分数料浆流变特性曲线, 粉煤灰掺量为 75% 时砾石料浆剪切应力与剪切速率关系曲线如图 2a 所示, 从图中可看出剪切速率相同时, 料浆质量分数越大, 剪切应力越大, 质量分数从 76% 增加到 80%, 屈服应力增加了 345.5%。图 2b 表示砾石料浆屈服应力与粉煤灰掺量关系曲线, 由图中可知, 各粉煤灰掺量下, 质量分数为 80% 砾石料浆的屈服应力明显高于质量分数为 78% 和 76%。这是由于料浆溶液体系中固体颗粒增加, 同时水分减少, 颗粒间润滑膜厚度减小, 摩擦力和附着力等作用力加剧^[16], 料浆产生变形时受到的阻力增大, 从而导致屈服应力增大。

表 5 所示为不同质量分数料浆的屈服应力和塑性黏度等流变参数采用宾汉姆模型拟合的流变方程, 由表 5 和图 2a 可知, 料浆剪切应力随剪切速率的增加呈显著的线性关系, 但随质量分数的增加, 料浆线性相关性系数逐渐降低。通过试验可知, 砾石料浆的流动性能随质量分数的增加显著降低, 料浆质量

分数为76%时,易发生固液分离,离析沉降现象严重,不适合矿井充填;当质量分数为80%时,料浆屈服应力过高,流动性差,不满足输送要求;质量分数为

78%时,兼具较好的流动性和稳定性。故主要选择质量分数为78%料浆进行流变试验,探究温-时耦合作用下料浆的流变特性。

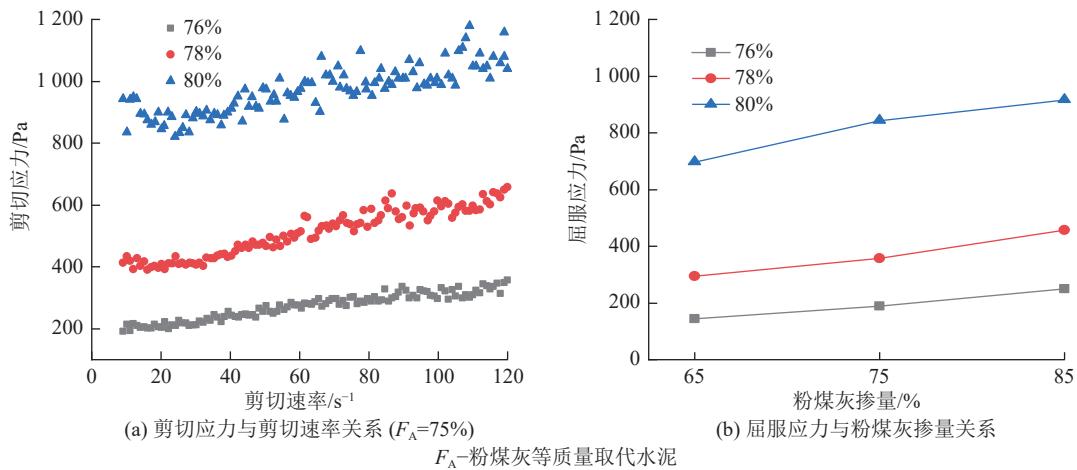


图2 不同质量分数料浆流变特性

Fig.2 Rheological characteristic of slurry with different mass concentrations

表5 静置60 min时料浆流变参数与质量浓度相关性

Table 5 Correlation between rheological parameters and mass concentration of slurry after 60 minutes

料浆质量分数/%	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	流变方程	相关系数
76	189.19	1.284 4	$\tau=189.19+1.284 4\gamma$	0.919 8
78	356.78	2.252 0	$\tau=356.78+2.252 0\gamma$	0.917 5
80	842.88	1.966 9	$\tau=842.88+1.966 9\gamma$	0.706 0

2.2 粉煤灰掺量对料浆流变特性的影响

图3所示为20℃时不同粉煤灰掺量条件下料浆静置60 min时的流变特性曲线。从图3a中可以看出,不同粉煤灰掺量下料浆剪切应力都随着剪切速率的增大呈线性增大趋势,料浆随剪切速率增大

出现剪切增稠现象,粉煤灰的大量掺入增加了料浆剪切增稠的程度^[10]。

表观黏度表示某一剪切速率下,剪切应力与剪切速率的比值,可用于评价浆体流动性质量指标。从图3b中可知:随着剪切速率的增加,料浆的表现

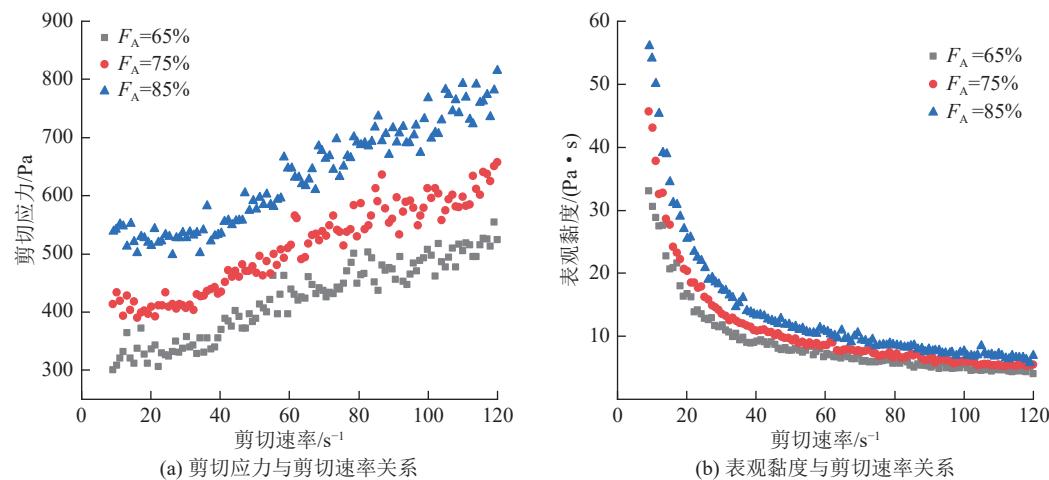


图3 不同粉煤灰掺量料浆流变特性

Fig.3 Rheological characteristic of slurry of different fly ash content

黏度先急剧减小,后稳定。这是由于当料浆受到外力作用时,内部的絮网结构随时间动态变化,剪切诱导下结构被拉断、破坏,但同时由于颗粒间的相互作用,结构又不断的搭接、修复,料浆内部絮网结构破坏与修复速率一直保持动态竞争,直至其达到稳定状态,即表观黏度保持不变^[17]。

屈服应力与充填材料物理化学性质相关,材料内部不同电荷颗粒分子之间因作用力吸附在一起形成絮凝网状结构,屈服应力等于在外力作用下使料浆产生流动和变形的临界值。塑性黏度与料浆体系浓度、颗粒的粒径和比表面积等因素有关,塑性黏度可以表征料浆流动过程中的稳定性,料浆的塑性黏度小,则料浆流动过程中稳定性好,有效减少泌水和离析等不良现象。由图4可以看出随粉煤灰掺量的增加,料浆屈服应力和塑性黏度皆增大。其原因主要有2个方面:①粉煤灰表面有大量的孔隙结构,增加了粉煤灰的比表面积,颗粒表面吸附更多的水,导

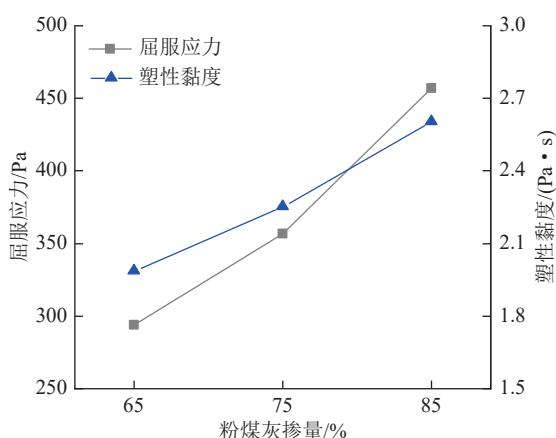
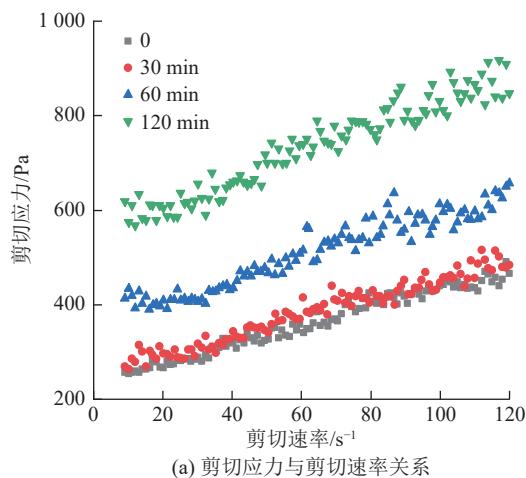


图4 屈服应力、塑性黏度与粉煤灰掺量关系曲线

Fig.4 Relationship of yield stress and viscosity with fly ash content



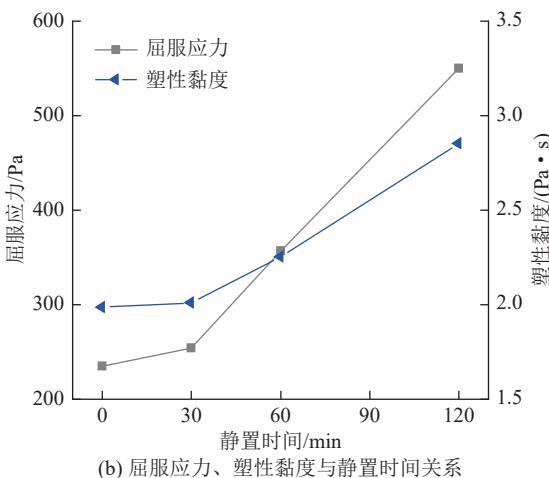
(a) 剪切应力与剪切速率关系

致颗粒间起润滑作用的自由水将减少,形成的水化产物流动性差。②粉煤灰的质量小于水泥颗粒,等质量替代水泥时,会增加浆体中粉体体积,粒径较小的粉煤灰颗粒填充到煤矸石和水泥颗粒之间,起到了密实填充作用,从而导致料浆的屈服应力和塑性黏度增大。

2.3 静置时间对料浆流变特性的影响

20℃时粉煤灰掺量为75%条件下料浆流变特性曲线,如图5a所示,料浆剪切应力随静置时间的延长而增大。静置时间为0、30、60和120min时,料浆屈服应力分别为235.15、254.39、356.78和549.66Pa。静置120min后屈服应力比静置0min增加了133.7%,料浆在长时间静置下水化作用时间延长,生成更多胶凝物质(如水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,钙矾石(AFt),氢氧化钙(CH)),彼此之间相互搭接形成致密的网状结构,料浆的微观结构更加稳定,被水化产物包裹着的颗粒之间摩擦阻力增加,剪切过程中不易发生相对滑动,导致料浆屈服应力与塑性黏度相应提高。

图6为料浆pH与静置时间关系曲线,从图6可以看出料浆pH随静置时间的增加逐渐下降,由表2可知,粉煤灰的化学成分主要为SiO₂和Al₂O₃,粉煤灰取代部分水泥与水泥和水形成共同溶液时,溶液体系pH在12左右,这主要是由于水泥溶于水后生成Ca(OH)₂,溶液中存在大量OH⁻,显强碱性。随水化时间的延长,在碱性环境中激发了粉煤灰的火山灰效应,生成大量水化硅酸钙和水化铝酸钙等胶凝物质,消耗OH⁻,导致pH下降。水化产物彼此之间相互连接形成具有抵抗机械破坏力的絮凝网状结构,从而增加了料浆的黏聚力,剪切应力随时间逐渐增加,这与图5中料浆剪切应力变化规律相互验证。



(b) 屈服应力、塑性黏度与静置时间关系

图5 不同静置时间下料浆流变特性

Fig.5 Rheological characteristic of slurry after different setting time

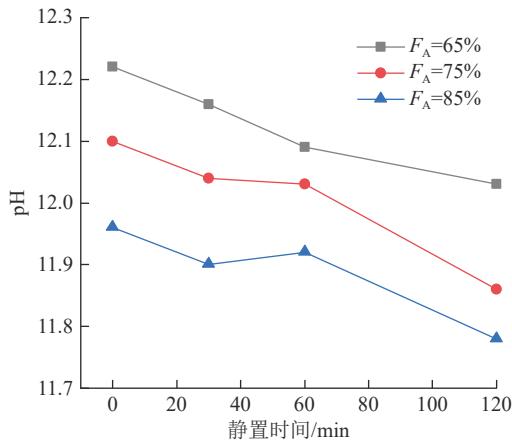


图 6 pH 与静置时间关系

Fig.6 Relationship between pH and setting time

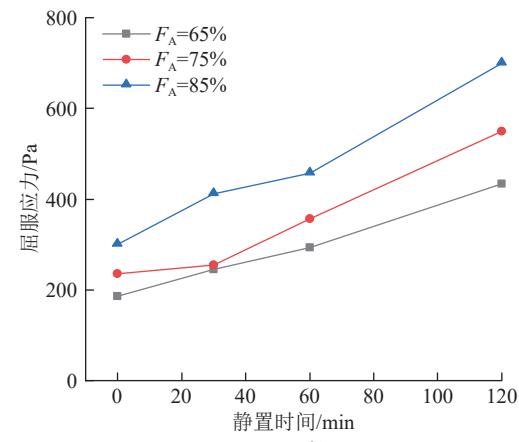
2.4 温度对料浆流变特性的影响

图 7 为 20、35、50 ℃ 所对应的料浆流变特性,由图 7 可知,不管温度如何变化,粉煤灰掺量为 85% 时料浆的屈服应力数值和增幅最大。养护温度为 20 ℃ 和 35 ℃ 时,料浆屈服应力变化趋势相似,即粉煤灰掺量为 85% 时料浆屈服应力最大,粉煤灰掺量 75% 次之,粉煤灰掺量 65% 最小。这主要是由粉煤灰的“比表面积效应”和密实填充作用决定,在低温时粉煤灰活性较低,研石充填料浆水化反应速率缓慢,粉煤灰和水泥的物理作用是造成屈服应力增大的主要原因^[18]。

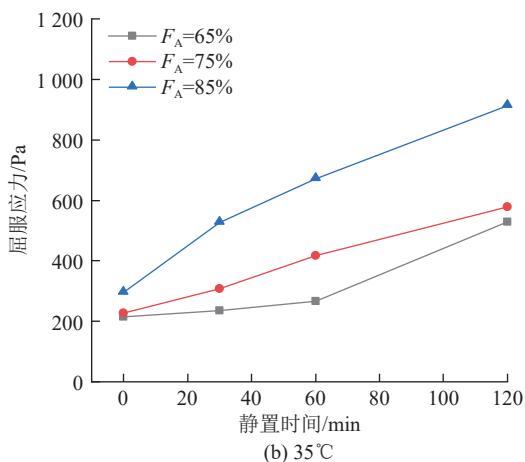
从图 7c 可以看出,前期时粉煤灰掺量为 65% 和 75% 时料浆屈服应力相差不大,但高温养护后期,粉煤灰掺量 65% 时料浆屈服应力高于粉煤灰掺量为 75%。这可以归因于粉煤灰替代率为 65% 时料浆中水泥含量相对较高,温度升高提高了胶凝材料的活性,加速了料浆水化反应速率^[19],同时生产更多的水化产物,此时化学反应起主要决定性作用,从而导致粉煤灰掺量较低时料浆具有更高的屈服应力。温度对煤矸石料浆流变特性的影响主要是通过改变水泥水化反应速率、粉煤灰火山灰反应速率和水化产物生成量,进而导致流变参数的变化。

3 温-时耦合作用对料浆流变特性的影响

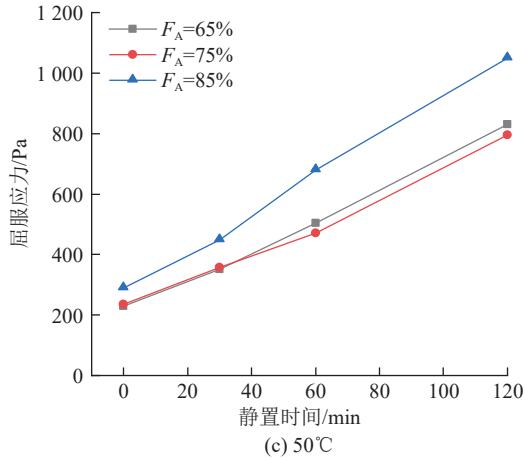
图 8 所示为粉煤灰掺量 75% 时温度-时间耦合作用下料浆流变特性,从图 8 可知,料浆屈服应力都随温度和静置时间的增加而显著增大,静置 120 min 时,温度为 20、35 和 50 ℃ 时料浆屈服应力比静置 0 时分别增长了 133.7%、154.1% 和 236.4%,温度越大屈服应力增长幅度越大。静置 120 min 时养护温度 50 ℃ 时较 20 ℃、35 ℃ 增幅分别为 44.5%、37.5%。



(a) 20℃



(b) 35℃



(c) 50℃

图 7 不同温度下料浆流变特性

Fig.7 Rheological characteristic of slurry cured at different temperature

表明温度-时间耦合作用下加速水泥水化和火山灰反应速率,同时生成更多水化产物,料浆抗剪能力增强,从而屈服应力增大。

电导率可以用来描述溶液中电荷流动难易程度,主要通过水泥溶解的离子实现传输,可以表征水泥水化反应速率。粉煤灰掺量为 75% 时温度-时间耦合作用下料浆电导率与静置时间关系如图 9 所示,

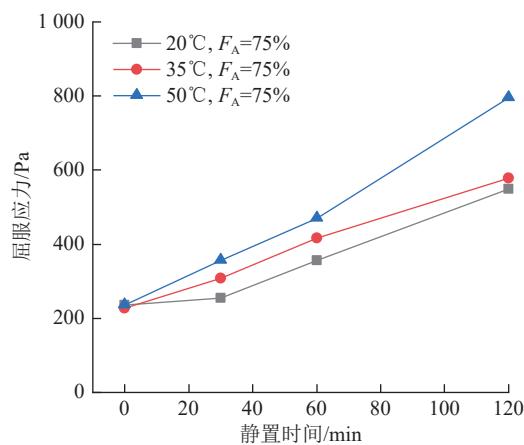


图 8 屈服应力与静置时间关系

Fig.8 Relationship between yield stress and setting time

不同温度下电导率均随静置时间的增加而上升。这是由于在水化初始阶段,水泥处于溶解期,水泥与水混合后,胶结在水泥颗粒表面的 Na^+ 和 K^+ 离子迅速释放,随着水化反应的进行,料浆中形成了大量的 Ca^{2+} 、 OH^- 等离子^[20],温度升高会加速水泥的溶解,导致溶液体系中离子浓度升高,同时加剧电子运动,从而电导率值随静置时间推移不断增强。

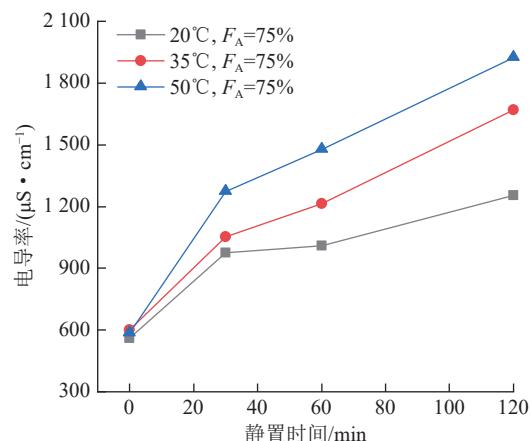


图 9 电导率与静置时间关系

Fig.9 Relationship between conductivity and setting time

4 温-时耦合效应下料浆屈服应力演化模型

4.1 极差分析

正交极差分析是处理多因素耦合作用下影响权重的主要方法之一,其分析结果直观易懂,根据极差大小顺序可以判断各因素对试验结果的影响主次。设计 2 因素 3 水平,2 个因素分别为温度 A 、静置时间 B ,每个因素设计 3 个水平, A 因素的 3 个水平分别为 20、35 和 50 °C, B 因素的 3 个水平为 30、60、120 min,试验采用 $L_9(3^2)$ 正交表,试验中各因素、水

平及试验结果见表 6。

由表 6 极差分析结果可知,静置时间对料浆屈服应力的影响明显较强,相比之下,温度的影响则比较微弱。从图 10 屈服应力-温度-静置时间变化曲面中可以直观看到温度和静置时间对料浆屈服应力的影响,料浆短时间静置时不同温度对屈服应力影响不明显,但高温长时间静置使三维曲面出现尖点突变现象,且温度会显著影响其突变程度。从料浆输送的角度来讲,这种情况下应加大料浆的泵送压力,以免出现堵管等风险。由以上分析结果可得到各因素在不同阶段对屈服应力影响程度,进而从宏观上判定料浆在不同温-时耦合作用中其变化幅度,也可为流变参数模型的选择提供依据。

表 6 正交极差分析

Table 6 Orthogonal range analysis

试验编号	温度/°C	静置时间/min	屈服应力/Pa
1	20	30	254.39
2	20	60	356.78
3	20	120	549.66
4	35	30	307.67
5	35	60	416.69
6	35	120	577.76
7	50	30	356.63
8	50	60	470.04
9	50	120	794.51
K_1	386.94	306.23	
K_2	434.04	414.50	
K_3	540.39	640.64	
极差 R	153.45	334.41	

注: K_i ($i=1,2,3$) 为 i 水平对应试验指标均值。

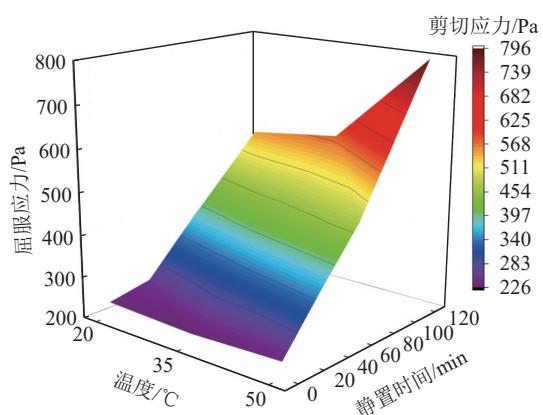


图 10 屈服应力-温度-静置时间变化

Fig.10 Change of yield stress, temperature and setting time

4.2 屈服应力回归模型

固体废弃物充填开采是实现煤矿绿色开采技术体系的关键环节之一,其能否安全泵送至井下采空区对充填作业至关重要。鉴于深井长距离管道输送充填矿井中,研石充填料浆将处于温度-时间耦合场中,其流变性能势必会发生改变。如果在料浆管道输送时不全面考虑温度和时间的耦合作用,可能会导致输送过程中发生堵管、爆管等风险。若能建立温度-时间效应下料浆流变参数回归模型,可以降低输送风险,促进料浆管道输送性能的研究。

不同温度下,料浆屈服应力随静置时间均呈线性增长,线性相关性较高,拟合曲线如图11所示,其关系式可表示为

$$\tau_0(T,t) = \tau_0(T,0) + \Delta\tau_0 t \quad (2)$$

其中: $\tau_0(T,t)$ 为某温度时间下料浆屈服应力; $\tau_0(T,0)$ 为新拌料浆屈服应力; T 为料浆养护温度; t 为输送时间; $\Delta\tau_0$ 为与温度相关的一个变量,服从指数函数关系,其可表示为

$$\Delta\tau_0 = \alpha \exp(-T/\beta) \quad (3)$$

式中: α, β 为试验常数,可对不同温度下料浆屈服应力与静置时间线性回归曲线斜率用指数函数拟合得出。

将式(1)和式(2)联立,可得温度-时间耦合作用下屈服应力表达式为

$$\tau_0(T,t) = \tau_0(T,0) + \alpha \exp(-T/\beta) t \quad (4)$$

将拟合结果代入式(3)中,则某温度时间下料浆屈服应力可表示为

$$\tau_0(T,t) = 217.02 + (2.74 + 1.27 \times 10^{-3} e^{T/6.83}) t$$

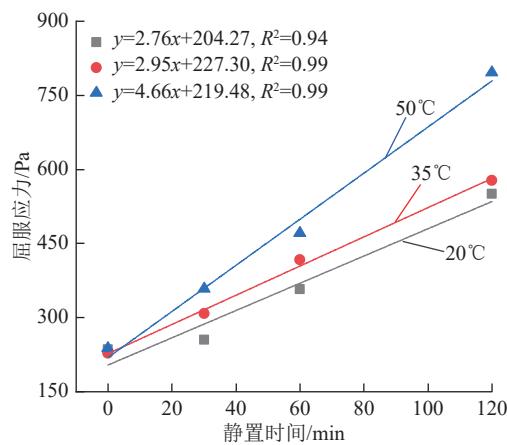


图 11 不同温度下屈服应力与静置时间拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of yield stress and setting time at different temperature

将表7相关数据代入屈服应力计算模型中,则可得出不同温度时间下的理论计算值,与试验结果

相比,平均误差在5%,表中个别数据误差较大,主要是由于煤矸石料浆中矸石粒径较大,分布不均匀且长时间会自然沉降造成,但其计算模型仍可以为料浆管道输送提供指导。

表 7 不同温度-时间下料浆屈服应力

Table 7 Slurry yield stress at different temperature and setting time

粉煤灰掺量/%	温度/°C	时间/min	试验值 τ_0/Pa	理论值 τ_0/Pa	误差/%
20	0	0	235.15	217.02	7.70
		30	254.39	299.93	17.90
		60	356.78	382.84	7.31
		120	549.66	548.67	0.18
75	35	0	227.41	217.02	4.57
		30	307.67	305.62	0.67
		60	416.69	394.23	5.39
		120	577.76	571.44	1.09
50	0	0	236.21	217.02	8.12
		30	356.63	356.80	0.05
		60	470.04	496.57	5.64
		120	794.51	776.12	2.31

5 结 论

1)高浓度煤矸石料浆流变曲线可以采用宾汉姆模型进行描述,浓度对料浆流变性能影响显著,随着浓度增加,料浆的剪切应力也随之增大,质量分数从76%增加到80%,屈服应力增加了345.5%,剪切应力与剪切速率的线性相关性逐渐降低。

2)随剪切速率的增大,相同粉煤灰掺量下料浆的表观黏度先急剧下降,后趋于稳定,表现出明显的剪切稀化行为。随粉煤灰掺量的增加,料浆的剪切增稠程度增大,粉煤灰的“比表面积效应”和密实填充作用是造成料浆屈服应力和塑性黏度增大的主要原因。

3)高温加速了料浆的水化反应速率和粉煤灰的火山灰反应活性,生成更多水化产物,提高了料浆的抗剪能力。在粉煤灰掺量为65%和75%条件下,较低温度时粉煤灰和水泥的物理作用是造成料浆屈服应力增大的主要原因,但随着温度升高,料浆中水化反应逐渐占据主导地位。

4)温度-时间耦合效应下静置时间对料浆屈服应力的影响程度强于温度,高温长时间静置作用下屈服应力大幅增长。不同温度条件下,屈服应力随静置时间均呈线性增长趋势,对不同条件下料浆的流变特性进行研究,建立了温度-时间耦合效应下屈

服应力的计算模型,与试验结果相比,平均误差在5%,拟合效果较好。

参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].*中国矿业大学学报*,2003,32(4):5~10.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green mining technology of coal mine[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2003, 32(4): 5~10.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2803~2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803~2813.
- [3] 谢和平,高 峰,鞠 杨,等.深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J].*煤炭学报*,2017,42(3):547~556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 547~556.
- [4] 许家林,朱卫兵,李兴尚,等.控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J].*采矿与安全工程学报*,2006,23(1):6~11.
XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, et al. Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2006, 23(1): 6~11.
- [5] 郭振兴,李 刚,赵 帅,等.新阳煤矿砾石粉煤灰充填开采技术[J].*煤炭科学技术*,2013,41(S2):43~45.
GUO Zhenxing, LI Gang, ZHAO Shuai, et al. Technology of backfill mining waste and ash in Xinyang Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(S2): 43~45.
- [6] 杨 捷,武继龙,晋俊宇.砾石-粉煤灰高浓度料浆砾石颗粒悬浮性研究[J].*矿业科学学报*,2019,4(2):127~132.
YANG Jie, WU Jilong, JIN Junyu. Study on the suspended properties of gangue particles with high concentration of gangue and fly ash[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(2): 127~132.
- [7] 汪 涛,王志文,王三云,等.煤矿高浓度胶结充填料浆管道输送特性研究[J].*煤炭科学技术*,2014,42(S1):50~52.
WANG Tao, WANG Zhiwen, WANG Sanyun, et al. Study on flowing features of mine high density cemented filling slurry in pipeline[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(S1): 50~52.
- [8] 刘 音,王 凯,李 浩,等.大掺量粉煤灰浆体充填材料流动特性研究[J].*矿业研究与开发*,2019,39(5):110~114.
LIU Yin, WANG Kai, LI Hao, et al. Study on flow characteristics of slurry filling material with large amount of fly ash[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(5): 110~114.
- [9] 马昆林,冯 金,龙广成,等.水泥-粉煤灰浆体流变特性及其机理研究[J].*铁道科学与工程学报*,2017,14(3):465~472.
MA Kunlin, FENG Jin, LONG Guangcheng, et al. Rheological characteristic and its mechanism of cement-fly ash paste[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(3): 465~472.
- [10] 谢友均,陈小波,马昆林,等.粉煤灰对水泥浆体的剪切变稀和剪切增稠作用[J].*硅酸盐学报*,2015,43(8):1040~1046.
XIE Youjun, CHEN Xiaobo, MA Kunlin, et al. Effects of fly ash on shearing thinning and thickening of cement paste[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(8): 1040~1046.
- [11] 徐文彬,杨宝贵,杨胜利,等.砾石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2016,47(4):1282~1289.
XU Wenbin, YANG Baogui, YANG Shengli, et al. Experimental study on correlativity between rheological parameters and grain grading of coal gauge backfill slurry[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2016, 47(4): 1282~1289.
- [12] 刘泉声,卢超波,刘 滨,等.考虑温度及水化时间效应的水泥浆液流变特性研究[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(S2):3730~3740.
LIU Quansheng, LU Chaobo, LIU Bin, et al. Research on rheological behavior for cement grout considering temperature and hydration time effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3730~3740.
- [13] 钱文勋,蔡跃波,张燕迟,等.养护温度对高掺量粉煤灰水泥浆体水化的影响[J].*建筑材料学报*,2013,16(1):33~36,75.
QIAN Wenxun, CAI Yuebo, ZHANG Yanchi, et al. Influence of curing temperature on hydration of cement paste adding high volume of fly ash[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1): 33~36,75.
- [14] XU W B, CHEN W, TIAN M M, et al. Effect of temperature on time-dependent rheological and compressive strength of fresh cemented paste backfill containing flocculants[J]. *Construction and Building Materials*, (2020-10-18) [2021-10-12] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121038>.
- [15] XU W B, ZHANG Y L, ZUO X H, et al. Time-dependent rheological and mechanical properties of silica fume modified cemented tailings backfill in low temperature environment[J]. *Cement and Concrete Composites*, (2020-10-17) [2021-07-09] <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103804>.
- [16] JIANG H Q, FALL M, LIANG C. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: Experimental results[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 92: 141~150.
- [17] PANCHAL S, DEB D, SREENIVAS T. Variability in rheology of cemented paste backfill with hydration age, binder and superplasticizer dosages[J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(9): 2211~2220.
- [18] 李虹燕,丁 铸,邢 锋,等.粉煤灰、矿渣对水泥水化热的影响[J].*混凝土*,2008(10):54~57.
LI Hongyan, DING Zhu, XING Feng, et al. Effect of fly ash and slag on hydration heat evolution of cement[J]. *Concrete*, 2008(10): 54~57.
- [19] 王志亮,丁庆军,黄修林.两种表征粉煤灰-水泥复合浆体整体水化程度方法对比研究[J].*武汉理工大学学报*,2014,36(1):17~23.
WANG Zhiliang, DING Qingjun, HUANG Xiulin. Comparative study on characterization methods of integrate hydration degree of fly ash and cement composite blend pastes[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(1): 17~23.
- [20] 徐文彬,田喜春,邱 宇,等.胶结充填体固结全程电阻率特性试验[J].*中国矿业大学学报*,2017,46(2):265~272,344.
XU Wenbin, TIAN Xichun, QIU Yu, et al. Experiment of the resistivity characteristic of cemented backfill mass during the whole consolidation process[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(2): 265~272,344.