

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.260

减水剂与粉煤灰对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响

盛宇航^{1,2}, 李广波^{1,2}, 姜海强³

(1. 山东黄金矿业股份有限公司, 济南 250100; 2. 山东黄金矿业科技有限公司充填工程实验室分公司, 山东 莱州 261441; 3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要:全尾砂胶结充填料浆流变性能直接影响其工作性能。采用 Brookfield RST-SST 型流变仪定量分析了聚羧酸(PC)、萘系(PNS)和三聚氰胺系(PMS)3 种类型高效减水剂与粉煤灰单掺和复掺时对料浆流变性能的影响。结果表明:无论减水剂类型,掺入料浆后均可降低其屈服应力和塑性黏度且减水剂掺量越高降低幅度越大,料浆流变性能改善效果越好。3 种类型减水剂对料浆流变性能改善程度存在差异,其中 PC 作用效果最好。减水剂的改性效果随着胶结料的持续水化而出现缓慢退化;随粉煤灰掺量的增加,料浆的屈服应力和塑性黏度呈整体降低趋势,其作用机理主要源于“形态效应”;减水剂与粉煤灰两者在改善料浆流变性能方面具有协同效应,复掺后可显著改善料浆的流变性能,效果明显优于单掺改性效果。

关键词:全尾砂;胶结充填料浆;流变性能;减水剂;粉煤灰

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)04-055-09

Effects of superplasticizers and fly ash on rheological properties of cemented tailings backfill

SHENG Yuhang^{1,2}, LI Guangbo^{1,2}, JIANG Haiqiang³

(1. Shandong Gold Mining Co.Ltd., Jinan 250100, P. R. China; 2. Backfill Engineering Laboratory, Shandong Gold Mining Technology Co.Ltd., Laizhou 261441, Shandong, P. R. China;
3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines
Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China)

Abstract: The workability of cemented tailings backfill (CTB) is significantly affected by its rheological properties. The influence of fly ash and superplasticizers (SPs) including polycarboxylate (PC), polynaphthalenesulfonate (PNS) and polymelaminesulfonate (PMS) on the rheological properties of CTB mixtures was quantitatively analyzed by using Brookfield RST-SST rheometer in this paper. The results show that regardless of SP type, the addition of superplasticizer will reduce the yield stress and plastic viscosity of CTBs, and the rheological properties are improved with increasing SP dosage. PC is found to be the most effective SP in improving the rheological properties of fresh CTB. However, as hydration time

收稿日期:2019-11-15 网络出版日期:2019-12-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604600);国家自然科学基金资助项目(51804063);中国博士后科学基金面上基金资助项目(2019M652426)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China during the 13th Five-Year Plan Period(2018YFC0604600), National Natural Science Foundation of China(51804063) and China Postdoctoral Science Foundation(2019M652426).

作者简介:盛宇航(1988—),男,硕士,工程师,主要从事充填技术方面的研究,(E-mail)syhiacs@163.com。

increases, the effect of SPs on the yield stress and plastic viscosity of CTB decreases. With the increase of fly ash content, the yield stress and plastic viscosity of CTBs also show a decreasing trend, due to “morphological effect” of fly ash. The mixture of SP and fly ash has a synergistic effect on the rheological properties of CTB, the modification effect of which is much better compared to that of single mix of SP or fly ash.

Keywords: full tailings; cemented paste backfill; rheological properties; superplasticizer; fly ash

全尾砂胶结(高浓度或膏体)充填技术因其具有提高采矿回收率、增加尾砂利用率以及改善采场作业环境等优势而受到越来越多的关注和被工业应用^[1-2]。良好的流变性能有利于高浓度或膏体料浆的高效制备与安全输送,对实现其技术优势具有重要意义;另一方面为提高充填体强度、降低充填成本,提高充填料浆浓度是有效途径之一,然而提高料浆浓度必然导致其流动性降低,其屈服应力和塑性黏度将随着浓度的增加而呈现指数关系增长。此时,料浆输送极易出现堵管事故,严重影响矿山的正常生产。料浆流变性能与料浆的工作性能有直接关系。因此,开展改善全尾砂胶结充填料浆流变性能的相关研究是十分必要的。

料浆流变性能受料浆质量浓度、固体物料物化特性、料浆成分以及温度等诸多因素的影响^[3-6]。为改善水泥基浆体的流变性能,国内外学者做了大量的研究工作,取得了许多有益的成果,其中最为有效的料浆流变性能改性剂为减水剂和粉煤灰。减水剂是一种在维持料浆坍落度基本不变的条件下,能减少拌合用水量的化学外加剂。Ouattara 等^[3,7]分析了不同类型减水剂对胶结充填料浆流变性能的影响,发现减水剂的掺入可有效降低胶结充填料浆的流变参数。Huynh 等^[8]向尾砂料浆和尾砂胶结料浆中添加减水剂后,2 种类型料浆的屈服应力均降低。Panchal 等^[9]研究发现,减水剂添加量对胶结充填料浆流变行为有显著影响,在合适添加量下可提高胶结充填料浆的流动性。李宏泉等^[10]等认为减水剂可有效降低膏体屈服应力和塑性黏度,减少膏体的输送阻力。

同时,粉煤灰作为一种常用的矿物掺料,广泛用于改善含水泥基浆体(混凝土、注浆材料)的流变性能。Li 等^[11]将粉煤灰加入水泥浆体中,水泥浆体仍属于宾汉姆流体,且粉煤灰的加入有助于改善浆体的流变性能。Wang 等^[12]通过研究指出,粉煤灰能够改善掺有氧化石墨烯水泥料浆的流变性能。刘宇等^[13]试验结果表明,粉煤灰能够降低胶凝材料浆体的屈服应力和塑性黏度。谢友均等^[14]则从剪切变稀和剪切增稠两个方面分析了粉煤灰掺量对水泥浆体流变行为的影响。而将粉煤灰用于充填料浆以改善其流变性能的研究却较少。目前全尾砂胶结充填料浆改性研究都是基于减水剂,而鲜有粉煤灰单掺以及减水剂与粉煤灰复掺时料浆流变性能变化情况及其时效性方面的研究。

笔者以全尾砂胶结充填料浆为研究对象,采用浆式旋转流变仪减水剂与粉煤灰单掺和复掺时对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响,进一步阐述了减水剂、粉煤灰改善全尾砂胶结充填料浆流变性能的作用机理,相关研究成果可以为全尾砂胶结充填料浆的配比设计和输送管网优化提供借鉴。

1 试 验

1.1 试验材料

1) 全尾砂。试验用全尾砂取自山东黄金某金矿选矿厂,为保证试样均匀性,试验前将取得的尾砂进行脱水烘干。采用 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定尾砂粒级组成,结果如图 1 所示。该尾砂中 $-20\ \mu\text{m}$ 颗粒所占的体积比例为 42.9%,属于中等粒径尾砂。该尾砂比表面积为 $403.8\ \text{m}^2/\text{kg}$,密度为 $2.68\ \text{g}/\text{cm}^3$,不均匀系数为 28.06,曲率系数为 0.74,级配不良。

借助 X 射线衍射分析(XRD)对尾砂晶体物相进行了测试分析(图 2),结果表明该尾砂主要矿物成分有石英、钠长石和云母等。

采用 X 射线荧光光谱(XRF)分析对尾砂主要化学成分进行测定,主要为: $w(\text{SiO}_2)$ (65.21%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (16.24%), $w(\text{K}_2\text{O})$ (8.11%)和 $w(\text{CaO})$ (2.98%),同时还有一些微量成分(见表 1)。

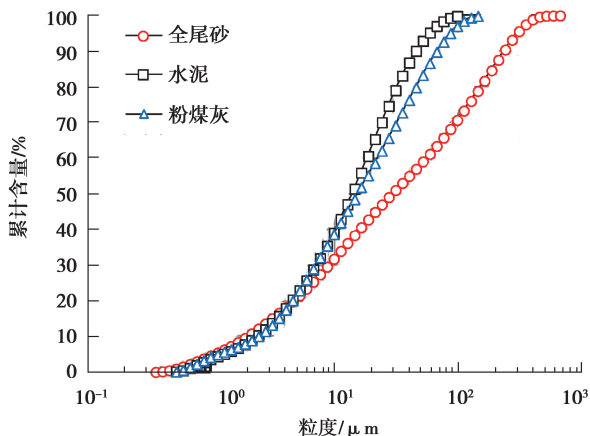


图 1 全尾砂、水泥与粉煤灰粒级组成

Fig. 1 Particle size distribution of the full tailings, cement and fly ash

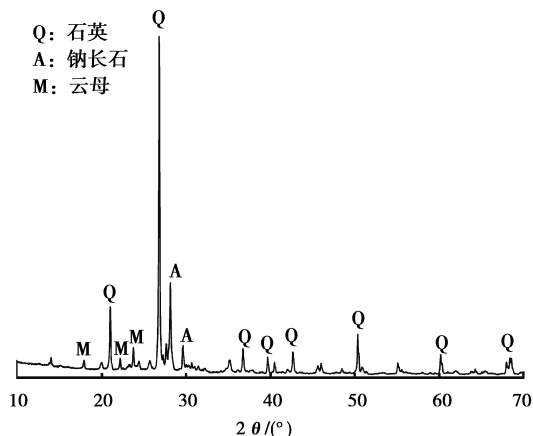


图 2 全尾砂 XRD 分析

Fig. 2 XRD analysis of full tailings

表 1 全尾砂、水泥和粉煤灰化学成分分析

Table 1 Chemical composition of full tailings, cement and fly ash

种类	化学成分/%										
	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(SO ₃)	w(TiO ₂)	w(P ₂ O ₅)	w(Na ₂ O)	w(LOI)
全尾砂	2.98	65.21	16.24	1.72	0.52	8.11	0.45	0.36	0.07	3.07	1.27
水泥	52.72	32.04	9.03	3.11	1.30	0.83	0.26	0.45	0.09	0.03	0.12
粉煤灰	3.94	57.45	30.28	3.82	0.62	2.18	0.06	1.19	0.34	0.03	0.09

2)水泥。水泥选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其粒级组成和化学成分分别如图 1 和表 1 所示。该水泥密度为 3.15 g/cm³,比表面积为 884.5 m²/kg。

3)粉煤灰。粉煤灰选用 I 级粉煤灰,粉煤灰粒级组成与化学成分分别如图 1 和表 1 所示。粉煤灰密度为 2.40 g/cm³,比表面积为 933.3 m²/kg。借助 SEM 对粉煤灰颗粒形貌进行扫描,结果表明该粉煤灰主要为细小球形颗粒,如图 3 所示。

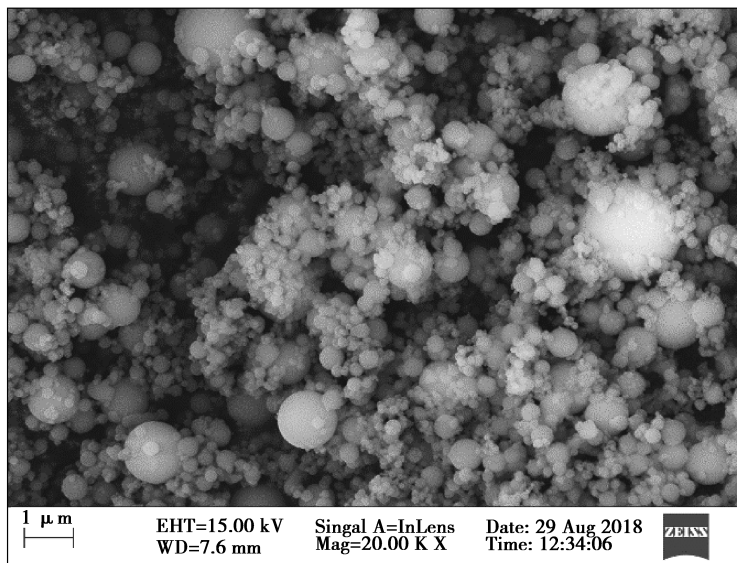


图 3 粉煤灰颗粒 SEM 图片

Fig. 3 SEM micrograph of fly ash particles

4)减水剂与拌合水。试验选用 3 种不同类型的商用高效减水剂,分别为聚羧酸(PC,白色固体粉末)、萘系(PNS,褐色固体粉末)和三聚氰胺系(PMS,白色固体粉末)高效减水剂。试验所用拌合水为自来水,pH 值为 7.1。

1.2 料浆制备

测试减水剂和粉煤灰单掺和复掺下料浆的流变性能,共设计了 36 组试验,具体试验配比参数见表 2。所有料浆的固体(全尾砂+胶凝材料)质量浓度和灰砂比均保持相同,分别为 76%和 1:4。粉煤灰掺量为替代水泥质量的百分数,减水剂的添加量为减水剂质量占胶凝材料质量的百分数。

表 2 试验配比参数
Table 2 Mix proportions of CTB %

类型	w (水泥(粉煤灰))/%	w (减水剂掺量)/%
对照组	100(0)	—
PC	100(0)	0.15,0.20,0.25,0.30,0.35
PNS	100(0)	0.20,0.40,0.60,0.80,1.00
PMS	100(0)	0.20,0.40,0.60,0.80,1.00
FA	90(10),70(30),50(50),30(70),10(90)	—
FA-PC	90(10),70(30),50(50),30(70),10(90)	0.20
FA-PNS	90(10),70(30),50(50),30(70),10(90)	0.60
FA-PMS	90(10),70(30),50(50),30(70),10(90)	0.40

采用水泥净浆搅拌机制备,主要步骤为:先将拌合水倒入搅拌锅中,然后加入混匀后的固体物料(全尾砂、水泥和粉煤灰);将搅拌锅置于搅拌机上,先低速搅拌 180 s,接着在低速下 30 s 内添加减水剂,再在高速搅拌 90 s,以确保料浆的均一性,最后将搅拌好的料浆快速转移至烧杯中进行流变参数测试。

1.3 流变性能测试方法与计算

1.3.1 流变性能测试方法

采用 Brookfield RST-SST 型旋转流变仪对不同龄期(0,30,60,90,120 min)的充填料浆的流变性能进行测试。转子为四叶桨式,直径为 20 mm,高度为 40 mm。基于现场料浆输送工况,并结合前人测试方法,采用以下测试步骤:整个测试时间为 4 min,分为上升段和下降段,其中上升段为 0~2 min 内剪切速率由 0 线性递增至 120 s^{-1} ,接着下降段在 2~4 min 内剪切速率由 120 s^{-1} 线性递减至 0。为消除管壁滑移的影响,转子上下边界、侧边界距离测试容器边界的距离大于 ASTM D4648/D4648M-16 标准中规定的尺寸要求。为了保证试验结果的可重复性和准确性,每组试验重复 3 次。

1.3.2 流变参数计算

采用 Bingham 模型对下降段流变曲线进行拟合^[10,15-16],如式(1)所示,从而获取料浆的流变参数即屈服剪切应力和塑性黏度。料浆屈服应力由料浆内部颗粒间相互作用力而产生,是阻止料浆产生流动的最大应力;料浆塑性黏度是料浆内部结构阻碍流动的性能,其与料浆内部絮凝网状结构数量有关。需要指出的是,本试验中的所有试验数据的 Bingham 模型拟合相关度 R^2 均高于 0.98。

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; η 为黏性系数,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} 。

2 试验结果与分析

2.1 减水剂对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响

不同减水剂类型和掺量下料浆流变性能随时间演化特征如图 4 所示。可以看出,无论减水剂类型,所有料浆的屈服应力和塑性黏度均随时间的增加而增加。这主要是因为随着水泥的持续水化,料浆中起润滑作用的自由水逐渐减少和絮凝网络结构数量逐渐增多^[17];同时絮凝结构会对尾砂产生“网捕”作用(尾砂填充其间进一步强化了料浆内部颗粒间的摩擦阻力),最终表现为料浆屈服阻力和塑性黏度的增加。3 种类型的

减水剂均能够降低料浆的屈服应力和塑性黏度,且均随着添加量的增加逐渐减小。然而,不同类型减水剂其作用效果存在较大差异,如表 3 所示。这主要因为不同减水剂的减水机理存在差别:PNS 和 PMS 会定向吸附在水泥颗粒与尾砂颗粒表面,水泥颗粒表面与尾砂表面因而获得相同的电荷,从而产生静电斥力,使得水泥颗粒间、尾砂颗粒间以及水泥与尾砂颗粒间形成的絮凝网络结构遭到破坏,减少了絮凝网络结构的数量,絮凝网络结构所包裹的水则被释放出来,形成自由水,从而增大了料浆的流动性;而 PC,当其添加料浆后不仅会产生静电斥力作用,由于 PC 分子所具有的特殊“梳型结构”还会产生空间位阻作用,空间位阻作用比静电斥力作用具有更强的分散力,能够破坏结合更强的絮凝网络结构,释放出更多包裹水而成为自由水,因此添加 PC 表现出最好的作用效果。

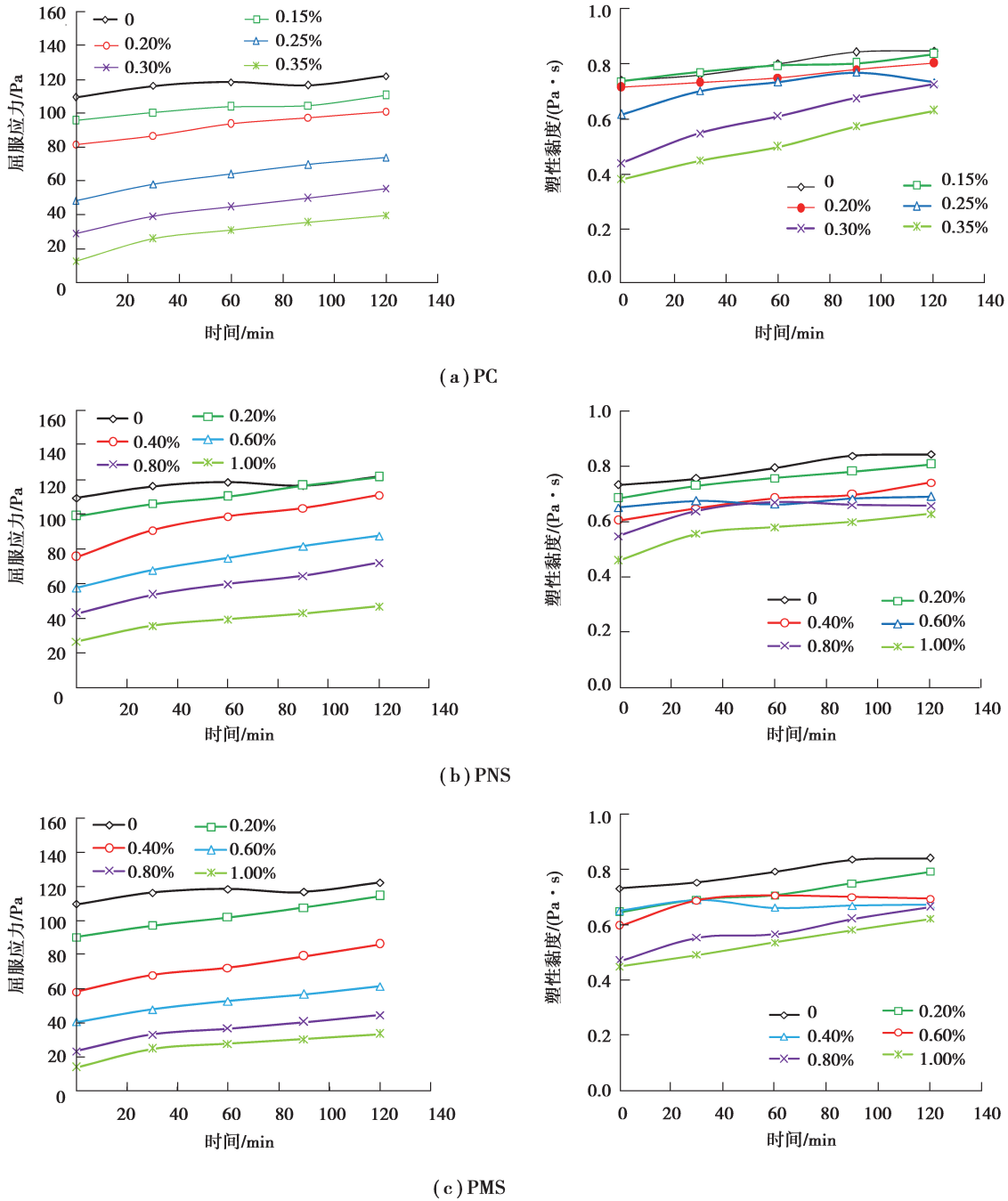


图 4 不同水化时间下,减水剂对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响

Fig. 4 Effect of various SPs on rheological properties of CTB at different hydration time

表 3 相同减水剂掺量下全尾砂胶结充填料浆的流变性能
Table 3 Rheological properties of CTB at the same dosage of SP

类型	w (减水剂掺量)/%	时间/min	τ_0 /Pa	η /(Pa·s)
对照组	0.00	0	109.5	0.731
		60	118.4	0.792
		120	122.1	0.841
PC	0.20	0	81.9	0.708
		60	93.6	0.743
		120	101.1	0.796
PNS	0.20	0	99.0	0.683
		60	110.3	0.755
		120	121.5	0.805
PMS	0.20	0	90.1	0.646
		60	101.9	0.706
		120	114.3	0.798

随着水化时间的增加,减水剂对料浆屈服应力和塑性黏度作用效果均出现小幅退化。究其原因可知,随着水泥水化反应的不断进行,形成的水化产物会将吸附在固体颗粒表面的减水剂覆盖,消耗掉部分减水剂,而新形成的水化产物表面又会产生新的吸附位置,料浆中残留的减水剂继续吸附到水化产物上,如此循环进行,水化反应直至消耗掉全部减水剂,使得改善料浆流变性能的效果逐渐消失。需要指出的是,试验过程中发现当 PC、PNS 和 PMS 添加量达到 0.40%,1.20%和 1.20%时,料浆中尾砂沉降严重,出现明显离析现象,料浆均质性被破坏,这势必影响其安全高效输送,因此减水剂的添加量存在“安全用量”,实际中应通过试验确定合理的减水剂添加量。

2.2 粉煤灰对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响

不同粉煤灰掺量下全尾砂胶结充填料浆流变性能随时间演化特征如图 5 所示。由图 5 可知,料浆掺入粉煤灰后,其屈服应力和塑性黏度均随时间的增加而增加,这主要是由于胶凝材料的水化反应造成的。粉煤灰的掺入有助于改善料浆的流变性能,随着粉煤灰掺量的增加,料浆屈服应力和塑性黏度呈现整体降低趋势,且降低幅度随粉煤灰掺量的增加而增加。分析原因主要源于粉煤灰的“形态效应”^[18]:1)与水泥颗粒和全尾砂颗粒相比,粉煤灰颗粒平均粒径更小,能够填充于水泥颗粒、尾砂颗粒空隙之间,破坏料浆内部絮凝结构,从而释放出其间的包裹水,使固体物料级配更加合理的同时也增大了自由水含量,从而使料浆更易流动;2)水泥颗粒、尾砂颗粒形状具有不规则性,填充其间的球形粉煤灰颗粒能够降低颗粒间的摩擦力,起到“滚珠轴承”作用,有利于料浆中固体颗粒间的相对滑动。此外,随着水化时间的增加,由于胶凝材料持续的水化反应逐渐消耗掉料浆中的自由水,粉煤灰“滚珠轴承”作用逐渐弱化,料浆的屈服应力和塑性黏度的降低幅度缩小。

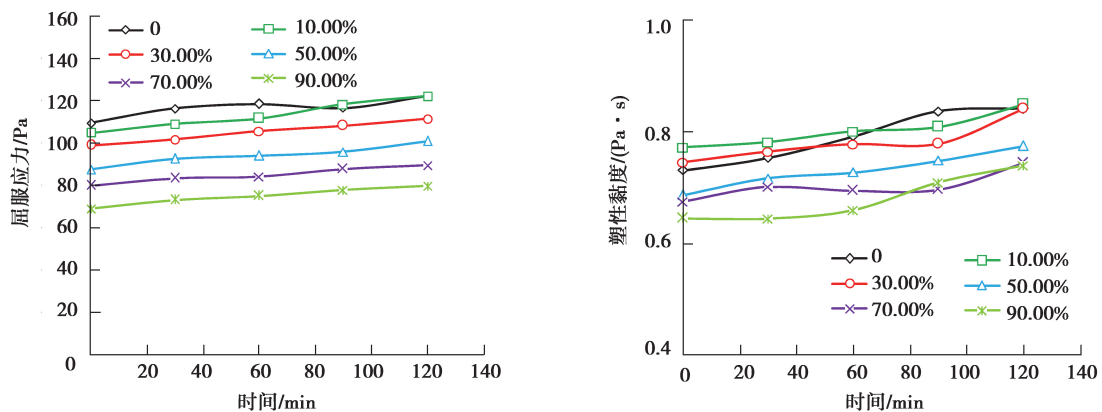


图 5 不同水化时间下,粉煤灰掺量对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响

Fig. 5 Effect of FA dosage on rheological properties of CTB at different hydration time

2.3 减水剂与粉煤灰复掺对全尾砂胶结料浆流变性能的影响

减水剂与粉煤灰复掺下料浆流变性能随时间演化特征如图 6 所示。由图 6 可知,减水剂与粉煤灰复掺后,所有料浆的屈服应力和塑性黏度均随时间的增加而增加。料浆的屈服应力和塑性黏度随着粉煤灰掺量的增加而降低,且降低幅度均大于料浆中单掺减水剂或粉煤灰情况。如表 4 所示,当料浆中仅添加 0.20% 的 PC(见图 1)和 90% 的粉煤灰(见图 5)时,料浆的初始屈服应力降低了 25.24% 和 37.09%,塑性黏度降低了 3.14% 和 11.76%;而料浆中复掺入 0.20% 的 PC 和 90% 的粉煤灰后,料浆的初始屈服应力和塑性黏度分别降低了 70.91% 和 47.88%,料浆屈服应力和塑性黏度降低幅度显著提高,同样复掺 PNS 和粉煤灰、PMS 和粉煤灰也呈现出相同的规律。

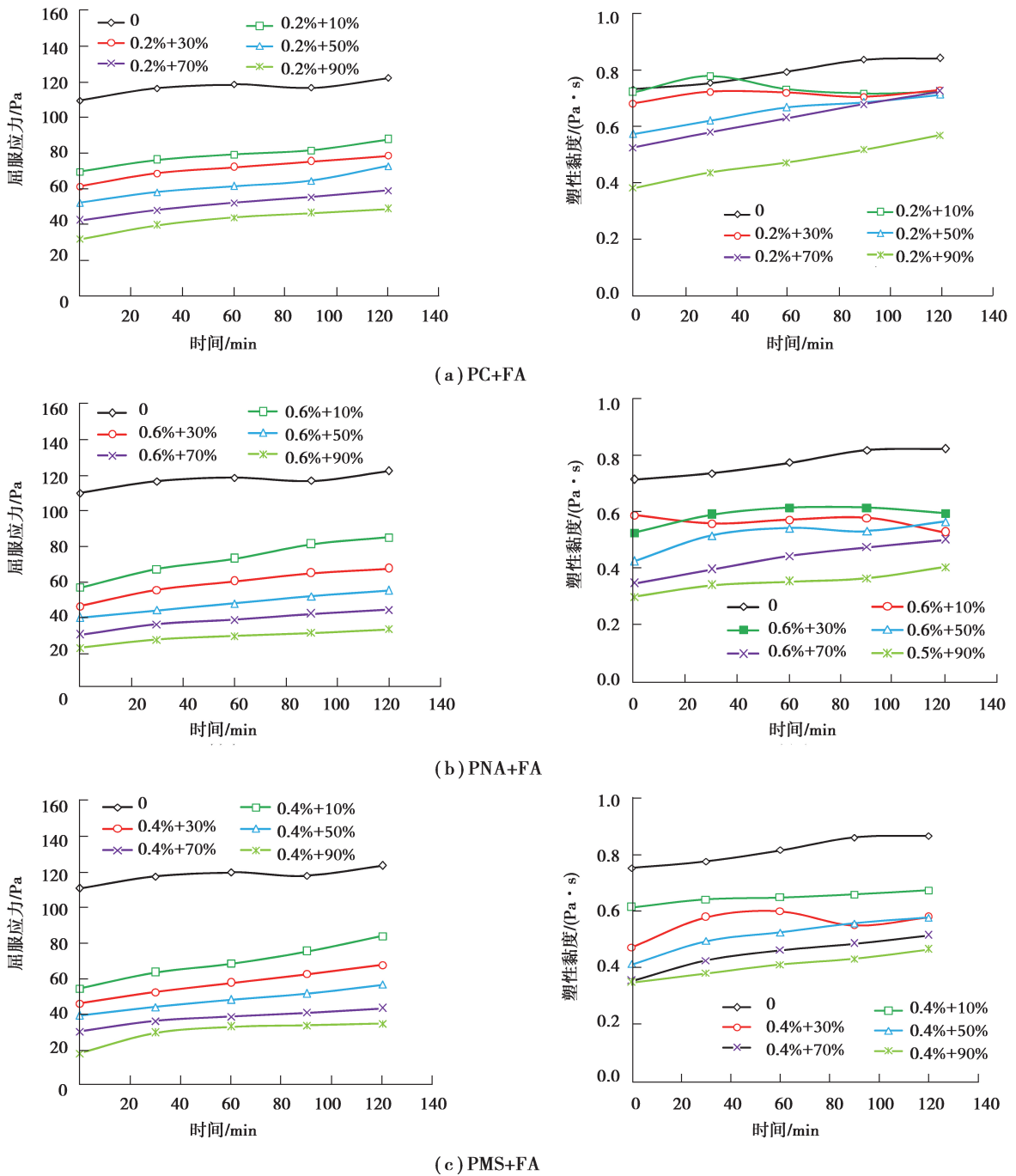


图 6 不同水化时间下,减水剂与粉煤灰复掺对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响
 Fig. 6 Effect of SPs and FA on rheological properties of CTB at different hydration time

表 4 减水剂与粉煤灰单掺和复掺时全尾砂胶结充填料浆的初始流变性能

Table 4 Rheological properties of CTB containing SPS and FA at the hydration time of 0 min

类型	w (减水剂掺量)/%	w (粉煤灰)/%	τ_0 /Pa	η /(Pa·s)
对照组	0.00	0	109.5	0.731
PC	0.20	0	81.9	0.708
PNS	0.60	0	57.9	0.649
PMS	0.40	0	58.3	0.651
FA	0.00	90	68.9	0.645
PC+FA	0.20	90	31.9	0.381
PNS+FA	0.60	90	21.5	0.308
PMS+FA	0.40	90	17.3	0.339

分析认为主要原因是:减水剂和粉煤灰复掺入料浆后,两者具有协同效应。一方面减水剂和粉煤灰可共同破坏料浆内部絮凝结构,破坏程度均高于单一掺入减水剂或粉煤灰的情况,使得料浆中自由水含量增多,固体颗粒表面水层的厚度亦随之增加,使得润滑作用增强的同时固体颗粒间摩擦作用降低,降低了流动阻力;另一方面,由于粉煤灰颗粒表面较光滑(如图 3 所示),减水剂不易吸附,与减水剂复掺后减水剂主要吸附在水泥和尾砂颗粒表面,粉煤灰“形态效应”受到较小的影响,仍具有单掺时的改性效果。所以,将减水剂与粉煤灰复掺入料浆中能更好地改善料浆的流变性能,从而促进料浆的远距离输送。同样,随着水化时间的增加,胶凝材料的水化反应导致料浆中自由水和减水剂减少,使复掺减水剂与粉煤灰的料浆得屈服应力和塑性黏度幅度都出现小幅退化。

3 结 论

1)料浆中掺入减少剂有助于改善其流变性能,且料浆屈服应力和塑性黏度随掺量的增加均减少;减水剂随胶结料的持续水化而被消耗,改善效果出现退化。

2)不同类型减水剂的减水效果存在较大差异,PC 通过空间位阻作用和静电斥力作用改善料浆的流变性能,其作用效果明显好于仅通过静电斥力作用来改善料浆流变性能的 PNS 和 PMS。减水剂存在着一个“安全掺量”,超过此范围料浆会出现离析现象。

3)粉煤灰的掺入能降低料浆的屈服应力和塑性黏度,改善料浆的流动性,且随掺入量的增加,作用效果越明显,其改性机理主要源于“形态效应”。

4)减水剂和粉煤灰两者具有协同效应,复掺后料浆的屈服应力和塑性黏度随着粉煤灰掺量的增加而降低,且降低幅度均大于料浆中单掺减水剂或粉煤灰。复掺减水剂和粉煤灰可显著改善料浆流变性能,利于料浆的远距离输送。

参考文献:

- [1] 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517-525.
WU Aixiang, YANG Ying, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517-525. (in Chinese)
- [2] Sheshpair M. A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(13): 5183-5208.
- [3] Ouattara D, Mbonimpa M, Yahia A, et al. Assessment of rheological parameters of high density cemented paste backfill mixtures incorporating superplasticizers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 294-307.
- [4] Yin S H, Wu A X, Hu K J, et al. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented

- paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2012, 35: 61-66.
- [5] 张钦礼, 王石, 王新民, 等. 不同质量浓度下阴离子型聚丙烯酰胺对似膏体流变参数的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1794-1801.
ZHANG Qinli, WANG Shi, WANG Xinmin, et al. Influence of anionic polyacrylamide on rheological parameters of paste-like slurry under different mass concentrations[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1794-1801. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Ouattara D, Yahia A, Mbonimpa M, et al. Effects of superplasticizer on rheological properties of cemented paste backfills[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 161: 28-40.
- [8] Huynh L, Beattie D A, Fornasiero D, et al. Effect of polyphosphate and naphthalene sulfonate formaldehyde condensate on the rheological properties of dewatered tailings and cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(1): 28-36.
- [9] 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.
- [10] 李宏泉, 方理刚. 空区膏体充填泵送特性及减阻试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2004, 19(1): 31-34.
LI Hongquan, FANG Ligang. Investigation on the characteristics of paste pumping into the empty area and the reducing pumping resistance[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2004, 19(1): 31-34. (in Chinese)
- [11] Li D L, Wang D M, Ren C F, et al. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 1007-1013.
- [12] Wang Q, Cui X Y, Wang J, et al. Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 35-44.
- [13] 刘宇, 黎梦圆, 阎培渝. 矿物掺合料对胶凝材料浆体流变性能和触变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 594-601.
LIU Yu, LI Mengyuan, YAN Peiyu. Effect of mineral admixtures on rheological properties and thixotropy of binder paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5): 594-601. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 絮凝沉降对全尾砂料浆流变特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3523-3529.
YANG Lihua, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Effect of flocculation settling on rheological characteristics of full tailing slurry[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(10): 3523-3529. (in Chinese)
- [16] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 246-252.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 246-252. (in Chinese)
- [17] 寇云鹏, 齐兆军, 盛宇航, 等. 运动状态下全尾砂胶结料浆流变参数时变性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(1): 15-19.
KOU Yunpeng, QI Zhaojun, SHENG Yuhang, et al. Study on time-dependent rheological parameters of unclassified tailings cemented slurry under motion state[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2019, 71(1): 15-19. (in Chinese)
- [18] 沈旦申, 张荫济. 粉煤灰效应的探讨[J]. 硅酸盐学报, 1981, 9(1): 57-63.
SHEN Danshen, ZHANG Yinji. A study of the effects of fly ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1981, 9(1): 57-63. (in Chinese)