

# 不同流变剂对某矿全尾砂膏体充填性能的影响\*

李广波<sup>1,2</sup>, 盛宇航<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>, 杨柳<sup>1,2</sup>

(1. 山东黄金矿业股份有限公司, 山东 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 莱州市 261441)

**摘要:** 为了保证某矿全尾砂膏体充填料浆的安全高效输送, 采用定性和定量分析方法分析了不同流变剂类型及掺量对于料浆流变特性和充填体强度的影响规律。结果表明: 添加3种流变剂后, 膏体充填料浆的流变特性得到明显改善, 且掺量越多, 流变参数整体降幅越大, 但掺量过多会使料浆产生离析沉降现象。添加流变剂后, 对于充填体1 d强度影响较大, 但对于3 d、7 d、14 d、28 d强度几乎无影响。最佳流变剂选型为YSKJ01, 掺量为0.4%时, 全尾砂膏体充填性能达到最优。从微观角度阐述了流变剂对于改善全尾砂胶结充填料浆流变特性的作用机理, 为该矿全尾砂膏体充填配比设计提供参考。

**关键词:** 充填料浆; 流变剂; 流变特性; 充填体强度

**中图分类号:** TD853.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2763(2024)06-0135-07

## 0 引言

随着充填技术的发展, 全尾砂膏体充填已广泛应用于金属矿山充填采矿, 充填体质量已得到充分验证<sup>[1-2]</sup>。利用全尾砂代替分级尾砂, 不仅取消了旋流器分级环节, 减少了能耗, 而且伴随着充填料浆质量浓度的提高, 尾砂利用率也随之提高。某矿“三高一扰动”问题突出, 且现阶段采用分级尾砂充填工艺, 充填料浆泌水量大, 充填体沉缩率大、接顶率低, 累计沉缩量已严重影响深部采矿活动。该矿设计由现有的分级尾砂充填工艺升级为全尾砂膏体充填工艺, 但质量浓度的提高也带来一个问题——如何保证膏体充填料浆的输送性能, 这对于胶东地区含泥尾矿尤为重要。以往该矿充填系统设计时, 当充填料浆质量浓度过高时, 一般考虑采用添加调浓水来调节, 但该方法降低充填料浆质量浓度的同时影响井下充填体的质量。因此, 如何改善全尾砂膏体充填料浆的流变特性以实现膏体充填料浆自流充填成为研究重点, 对此, 国内外学者进行了大量细致的研

究, 其中最为有效的方式为添加流变剂。流变剂的主要作用是改善充填料浆的和易性, 包括流变特性、黏聚性及保水性。OUATTARA等<sup>[3]</sup>分析了不同流变剂类型及掺量对胶结充填料浆流变特性的影响, 并探索不同外加剂混合对于改善胶结充填料浆的流变特性的作用。薛杉杉等<sup>[4]</sup>使用流变仪分析了萘系流变剂及BF高效流变剂对料浆流变特性的影响, 研究了流变剂在充填料浆流动过程中的作用。盛宇航等<sup>[5]</sup>分析了不同类型流变剂与粉煤灰单掺和复掺时对料浆流变特性的影响, 并从微观层面分析流变剂与粉煤灰的作用机理, 发现二者具有协同作用。吴再海等<sup>[6]</sup>通过多元线性回归分析, 得到料浆流动性与流变剂掺量的最佳配比, 并从微观上对料浆之间的颗粒电位进行了分析论证。张钦礼等<sup>[7]</sup>探讨某铅锌银矿全尾砂浆不同质量浓度下流变剂添加前后似膏体流变参数的变化, 并分析其影响机理。以往的研究<sup>[8-12]</sup>主要集中在流变剂对充填料浆流变特性单一因素的影响, 并没有考虑流变剂对充填体强度的影响。而对于矿山生产来说, 充填作业的首要作用是要为井下采空区提供足够的支撑强度, 保证井下采矿作业安全。

本文将针对以往研究的不足, 在现有研究的基础上, 通过研究不同流变剂类型及掺量对于膏体充填料浆流变特性和强度特性的影响规律, 探索适合某矿全尾砂膏体充填的最佳流变剂类型和掺量, 并从微观角度阐述流变剂对于改善全尾砂膏体充填料浆流变特性的作用机理, 以为该矿全尾砂膏体充填设计提供基础。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

(1) 骨料。试验采用某矿全尾砂作为骨料。分

\* 收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY05)。

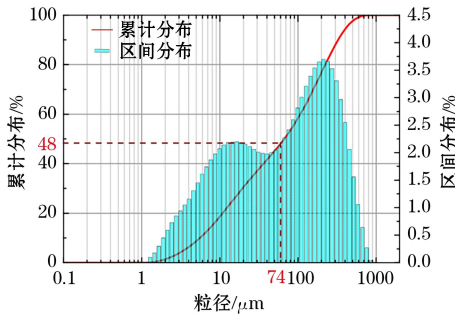
作者简介: 李广波(1989—), 男, 山东烟台人, 硕士, 工程师, 主要从事充填工艺技术研究, E-mail: 985315860@qq.com。

别利用 Mastersizer 3000 激光粒度仪、X 射线衍射分析(XRD)等手段对全尾砂性质进行测试,结果见表 1 和图 1。

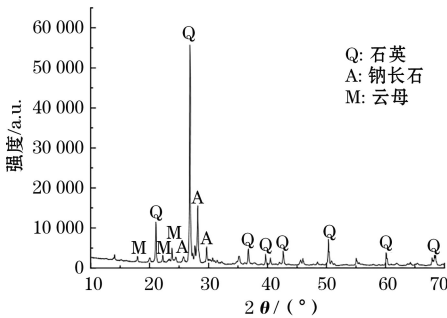
表 1 骨料化学成分含量

Table 1 Chemical composition of aggregates

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	62.608	SO <sub>3</sub>	0.397
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.201	TiO <sub>2</sub>	0.220
CO <sub>2</sub>	7.206	BaO	0.199
K <sub>2</sub> O	5.862	SrO	0.101
Na <sub>2</sub> O	3.116	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.085
CaO	2.313	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.041
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.163	MnO	0.027
MgO	0.902	ZrO <sub>2</sub>	0.009
Cl	0.548	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002



(a) 全尾砂粒径分布



(b) 全尾砂 XRD 衍射图谱

图 1 全尾砂骨料性质

Fig.1 Properties of full tailings aggregate

(2) 胶凝材料。胶凝材料采用该矿新研发的 C3 型胶凝材料,其性质见表 2。

表 2 C3 型胶凝材料特性测试结果

Table 2 Experimental results of properties of C3 type cementitious materials

真密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	堆密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	自然 安息角/ (°)	+80 μm 含量/ %	初凝 时间/ min	终凝 时间/ min
2.80	0.80	52	10.85	320	495

(3) 流变剂与拌合水。试验选用三种不同类型的高效流变剂,型号分别为 MF505、MF1100C、

YSKJ01。试验所用拌合水为矿山生产用水。

### 1.2 试验方案

采用水泥净浆搅拌机进行料浆制备,先将拌合水倒入搅拌锅中,然后加入混合均匀的固体物料(全尾砂、胶凝材料),最后加入流变剂。为确保料浆的均一性,先低速搅拌 120 s,再高速搅拌 120 s,最后将搅拌均匀的料浆快速转移至烧杯中进行流变参数测试。

首先开展不同流变剂类型及掺量对同一配比充填料浆流变特性影响的定性试验,料浆质量浓度和胶凝材料含量均保持相同,分别为 76% 和 300 kg/m<sup>3</sup>,流变剂掺量分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,流变剂掺量为流变剂质量占尾砂质量的百分数,定性试验方案见表 3。

表 3 定性试验方案

Table 3 Qualitative experimental schemes

序号	胶凝材料 含量/ (kg/m <sup>3</sup> )	料浆质量 浓度/ %	灰砂比	流变剂 掺量/ %	备注
1	300	76	1 : 3.86	0	对照组
2	300	76	1 : 3.86	0.2	试验组
3	300	76	1 : 3.86	0.4	
4	300	76	1 : 3.86	0.6	
5	300	76	1 : 3.86	0.8	

然后开展最佳流变剂类型及掺量对不同配比充填料浆流变特性的定量试验,试验方案见表 4。对照组充填料浆质量浓度分别为 74%、76%、78%,添加胶凝材料 300 kg/m<sup>3</sup>,不掺流变剂;试验组充填料浆质量浓度分别为 76%、78%,添加胶凝材料 300 kg/m<sup>3</sup>,流变剂掺量为定性试验确定的最佳流变剂掺量;成本对照组充填料浆质量浓度分别为 76%、78%,添加胶凝材料 250 kg/m<sup>3</sup>,流变剂掺量为最佳流变剂掺量。

表 4 定量试验方案

Table 4 Qualitative experimental schemes

序号	料浆质 量浓度/ %	胶凝材料 含量/ (kg/m <sup>3</sup> )	灰砂比	流变剂掺量	备注
1	74	300	1 : 3.62	0	对照组
2	76	300	1 : 3.86	0	
3	78	300	1 : 4.11	0	
4	76	300	1 : 3.86	最佳流变剂掺量	试验组
5	78	300	1 : 4.11	最佳流变剂掺量	
6	76	250	1 : 4.82	最佳流变剂掺量	成本对照组
7	78	250	1 : 5.12	最佳流变剂掺量	

最后在开展定量试验的同时,将剩余料浆浇注至提前准备好的标准三联试模(70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)内,放入恒温恒湿养护室进行养护,测试

不同龄期充填体试件强度。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 流变特性试验

采用 Brookfield RST-SST 型浆式旋转流变仪对不同状态下的充填料浆流变特性进行试验。如图 2 所示,具体测试步骤如下:整个试验时间为 5 min,分为上升段、稳定段和下降段,其中上升段为 0~2 min,剪切速率由 0 线性递增至  $120\text{ s}^{-1}$ ;稳定段为 2~3 min,剪切速率稳定在  $120\text{ s}^{-1}$ ;下降段为 3~5 min,剪切速率由  $120\text{ s}^{-1}$  线性递减至 0。

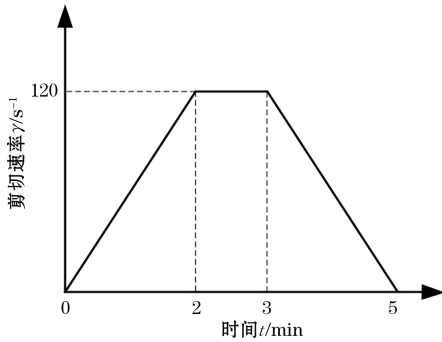


图 2 剪切速率变化

Fig.2 Variation of shear rate

根据以往研究,全尾砂充填料浆流变曲线一般采用 Bingham 模型进行拟合<sup>[13-15]</sup>,如式(1)所示,即料浆的流变参数为屈服剪切应力和塑性黏度。

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1)$$

式中, $\tau$  为剪切应力,Pa; $\tau_0$  为屈服剪切应力,Pa; $\mu$  为塑性黏度,Pa·s; $\gamma$  为剪切速率, $\text{s}^{-1}$ 。

#### 1.3.2 抗压强度测试

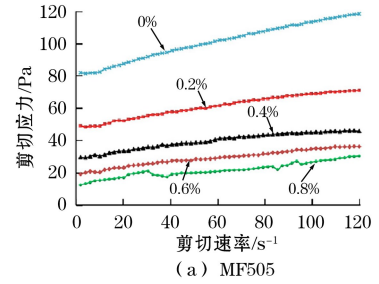
将剩余的充填料浆倒入  $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$  的标准三联试模中,再用保鲜膜包裹试块,将试块放置于恒温恒湿养护室(温度控制在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度控制在 90% 以上)内进行养护,当试块到达相应龄期后,采用 HM-5030 压力试验机测定不同龄期试块单轴抗压强度。

## 2 结果与分析

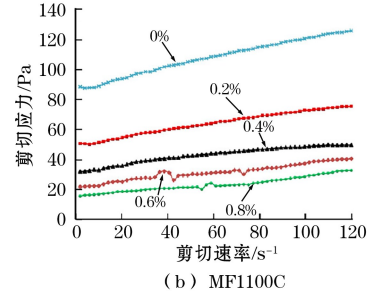
### 2.1 流变剂类型及掺量对充填料浆流变特性影响规律

不同流变剂类型及掺量下料浆流变特性曲线如图 3 所示,对料浆流变曲线进行拟合,拟合结果和流变参数见表 5。由图 3 和表 5 可知,稳定的流变曲线近似为直线,拟合度  $R^2$  均在 0.95 以上。添加 3 种流变剂后,充填料浆的流变特性得到明显改善,塑

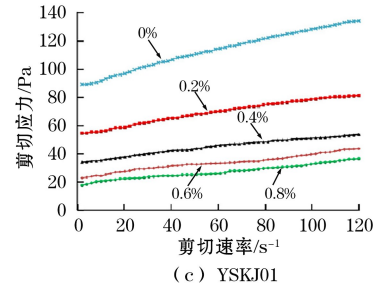
性黏度及屈服应力均产生下降,流变剂掺量越多,整体降幅越大。



(a) MF505



(b) MF1100C



(c) YSKJ01

图 3 不同流变剂类型及掺量对充填料浆流变特性曲线

Fig.3 Effect of different types and dosages of rheological on the rheological properties of filling slurry

表 5 流变特性定性试验结果

Table 5 Qualitative experimental results of rheological property

序号	流变剂类型	流变剂掺量/%	拟合结果	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	相关关系 $R^2$
1	MF505	0	$\tau = 89.756 + 0.388\gamma$	89.756	0.438	0.993
2		0.2	$\tau = 54.810 + 0.239\gamma$	54.810	0.239	0.988
3		0.4	$\tau = 34.715 + 0.167\gamma$	34.715	0.167	0.985
4		0.6	$\tau = 23.808 + 0.158\gamma$	23.808	0.158	0.979
5		0.8	$\tau = 18.572 + 0.140\gamma$	18.572	0.140	0.983
6	MF1100C	0	$\tau = 87.676 + 0.334\gamma$	87.676	0.434	0.994
7		0.2	$\tau = 50.277 + 0.223\gamma$	50.277	0.223	0.993
8		0.4	$\tau = 33.518 + 0.154\gamma$	33.518	0.154	0.958
9		0.6	$\tau = 21.948 + 0.153\gamma$	21.948	0.153	0.986
10		0.8	$\tau = 14.932 + 0.135\gamma$	14.932	0.135	0.964
11	YSKJ01	0	$\tau = 81.366 + 0.323\gamma$	89.367	0.433	0.994
12		0.2	$\tau = 48.782 + 0.202\gamma$	48.782	0.202	0.986
13		0.4	$\tau = 30.819 + 0.145\gamma$	30.819	0.145	0.961
14		0.6	$\tau = 20.584 + 0.139\gamma$	20.584	0.139	0.985
15		0.8	$\tau = 13.758 + 0.128\gamma$	13.758	0.128	0.976

由图 3 可知,流变剂掺量达到 0.2% 后,流变曲线较掺量为 0 时出现明显的平移下降,3 种流变剂屈服应力分别下降 38.93%、42.66% 和 45.41%,塑性黏度分别下降 45.43%、48.62% 和 53.35%;当掺量达到 0.4%,流变曲线较为密集,局部降幅逐渐减小,说明流变剂效果逐渐减弱;但流变剂掺量过多,会使流变曲线变得紊乱,可能是料浆产生了离析沉降。对不同流变剂掺量的充填料浆进行坍落度试验,以 YSKJ01 型流变剂作典型分析,结果如图 4 所示。当 YSKJ01 型流变剂掺量由 0 增至 0.6% 时,充

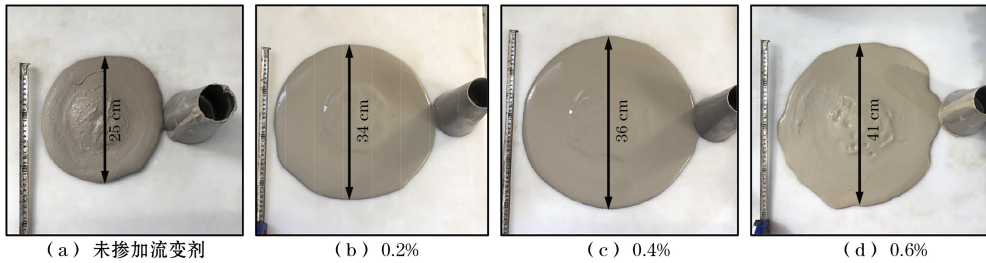


图 4 不同流变剂掺量充填料浆坍落度

Fig.4 Slump of filling slurry under different dosages of rheological agents

## 2.2 最佳流变剂掺量对不同配比充填料浆流变特性影响规律

根据前期全尾砂试验结果,该矿全尾砂充填料浆在充填料浆质量浓度为 74% 时达到膏体状态,而实际生产中料浆质量浓度存在波动,因此本节选用 YSKJ01 型流变剂,开展最佳流变剂掺量下不同配比充填料浆流变特性变化规律研究。

最佳流变剂掺量对不同配比充填料浆流动特性曲线如图 5 所示,拟合后结果见表 6。由图 5 可知,不同配比充填料浆在添加流变剂前后的流变曲线同样近似为直线,但胶凝材料添加量为 300 kg/m<sup>3</sup>、掺量为 0 时,流变曲线上翘,此时料浆的初始屈服值较大,其内部凝胶网状结构的强度较大,抗流动性和坍落性较强;而掺量为 0.4% 时,流变曲线下弯,此时料浆的初始屈服值较小,其内部已

填料浆坍落度分别为 25, 34, 36, 41 cm。

由图 4(d) 可以佐证,当 YSKJ01 型流变剂掺量达到 0.6% 时,料浆流变特性变化明显,部分粗颗粒尾砂沉降加快,料浆边缘出现明显的离析、泌水现象,料浆均质性被破坏,这势必影响其安全高效输送。

由定性试验可初步确定,当充填料浆质量浓度为 76%、胶凝材料添加 300 kg/m<sup>3</sup> 时,最佳流变剂选型为 YSKJ01,最佳掺量为 0.4%,此时膏体料浆具有较好的流动性且不会产生离析沉降现象。

出现稀化。

由表 6 可知,同配比充填料浆在流变剂掺量分别为 0 和 0.4% 时,屈服应力分别下降 84.74% 和 81.90%、塑性黏度分别下降 64.62% 和 63.54%。在相同灰砂比条件下,随着料浆质量浓度的增加,料浆屈服应力和塑性黏度降低幅度逐渐减小,说明流变剂对于高浓度料浆流动性的改变效果有所减弱,但幅度不大;在相同浓度条件下,随着灰砂比的增加,料浆屈服应力和塑性黏度变化不大,这侧面反映了流变剂主要作用于胶凝材料这样的细颗粒。

因此,针对该矿全尾砂膏体充填料浆,当充填料浆质量浓度超过 76% 时,建议添加流变剂提高料浆和易性,根据试验结果,推荐采用掺量为 0.4% 的 YSKJ01 型流变剂,实际应用时可再根据工业应用情况适当调整掺量。

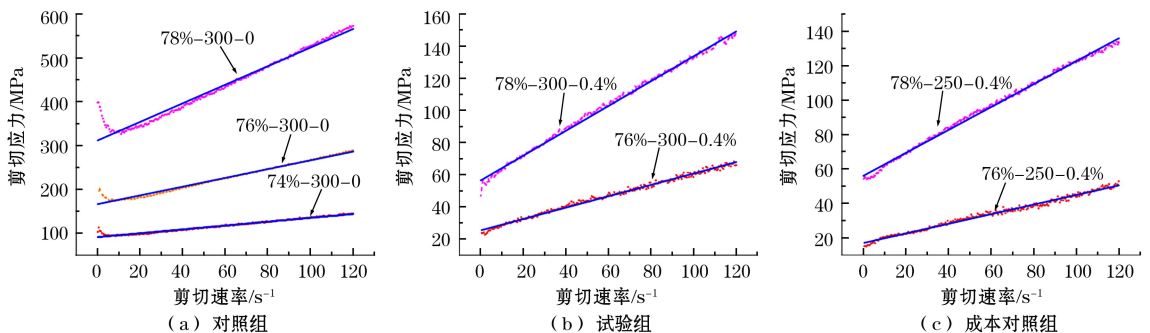


图 5 不同配比充填料浆流变特性曲线

Fig.5 Rheological properties curves of filling slurry with different ratios



表6 定量试验结果

Table 6 Quantitative experimental results

序号	流变参数			$R^2$	备注
	坍落度/ cm	屈服应力/ Pa	塑性黏度/ (Pa·s)		
1	26.7	90.87	0.4388	0.9742	对照组
2	25.2	166.07	0.9987	0.9752	
3	20.8	311.36	2.1181	0.9686	
4	28.9	25.34	0.3533	0.9920	试验组
5	27.7	56.35	0.7722	0.9962	
6	28.2	16.95	0.2790	0.9889	成本对照组
7	27.9	55.97	0.6651	0.9965	

### 2.3 流变剂掺量对充填体强度的影响

流变剂掺量对充填体强度的影响规律见表7。通过试验可得出以下结论。

(1) 由对照组可以看出,当胶凝材料含量一定的条件下,随着料浆质量浓度的增加,同龄期的充填体强度逐渐增加,并且增幅越来越大,这与前期全尾砂配比试验结论相互印证。

(2) 由对照组和试验组对比可以看出,在同配比条件下,添加流变剂对充填体1 d强度影响较大,但对于3 d、7 d、14 d、28 d强度几乎无影响,部分充填体强度还出现小幅度增长。

(3) 由试验组和成本对照组对比可以看出,在相同料浆质量浓度条件下,随着胶凝材料含量的降低,同龄期的充填体强度有不同程度的降低,特别是

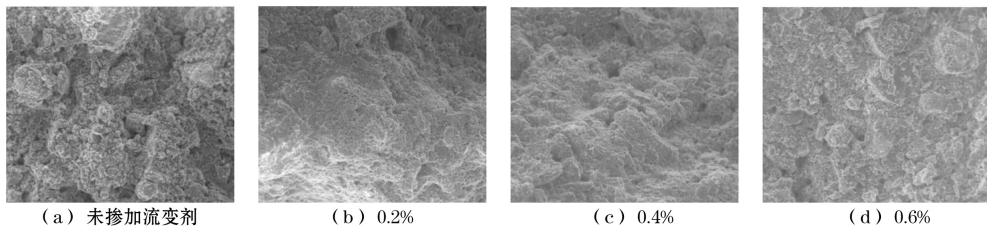


图6 不同流变剂掺量作用的充填材料微观结构

Fig.6 Microstructure of filling slurry with different dosages of rheological agent

由图6(a)可知,在加入流变剂之前,料浆中絮团粒径分布较为复杂,充填颗粒之间絮凝形成蜂窝结构,胶凝材料颗粒的粒径在 $50\ \mu\text{m}$ 左右。由图6(b)可知,流变剂掺量为0.2%时,絮团尺寸减小,大多缩小到 $50\ \mu\text{m}$ 以下,而尾砂颗粒和胶凝材料颗粒的粒径分布则趋于有序,使浆体结构更致密。由图6(c)可知,当流变剂掺量为0.4%时,料浆中的微粒絮团数量进一步减少,形成的结构孔隙率也随之降低,絮凝微粒如独立尾砂、胶凝材料增多,排列更有条理。由图6(d)可知,流变剂掺量为0.6%时,浆液中已基本没有大的絮团结构,且有较多单独的尾砂颗粒、胶凝材料

对于早期强度(1 d、3 d)影响较为明显。研究发现,减少胶凝材料含量的充填体强度也可以满足现场采矿强度要求。在工业试验时,在保证安全的前提下,可以尝试降低胶凝材料单耗。

表7 充填体强度试验结果

Table 7 Experimental results of the strength of filling body

序号	不同龄期强度/MPa					备注
	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	
1	0.498	3.612	4.806	5.791	6.034	对照组
2	0.620	4.178	5.329	6.371	6.547	
3	0.803	5.226	5.923	7.767	7.923	
4	0.360	4.064	5.269	6.255	6.482	试验组
5	0.458	4.882	6.032	7.829	7.961	
6	0.267	3.427	5.010	5.841	6.092	成本对照组
7	0.298	3.501	5.549	6.456	6.628	

## 3 流变剂作用机理研究

### 3.1 流变剂-料浆微观结构

采用环境扫描电子显微镜观察新拌浆料的微观形态,以表征流变剂-料浆的微观结构。观察料浆在 $3.5\ \text{nm}$ (ESEM环境真空模式,30 kV)状态下的微观结构,对比不同流变剂掺量条件下料浆的形貌差异,进而分析流变剂对充填料浆的作用效果,其结果如图6所示。

颗粒和胶凝材料水化物颗粒,各颗粒分布较为均匀,间隙也较小,说明流变剂使浆液中絮团结构发生了变化,从而使浆液的流变特性得到了改善。

### 3.2 微观结构模型及其作用机理

浆体中掺加流变剂之后,流变剂能够吸附到尾砂、胶凝材料颗粒表面,通过改变絮凝颗粒表面的电性以及空间位阻作用而使得原本絮凝的尾砂、胶凝材料颗粒分散开来,打破絮团结构,释放出絮凝结构中包裹的水,使得游离水的量增加,形成水化膜,起到润滑作用,同时分散颗粒的体积减小,从而达到改善浆体工作性能的效果,其结构模型如图7所示。

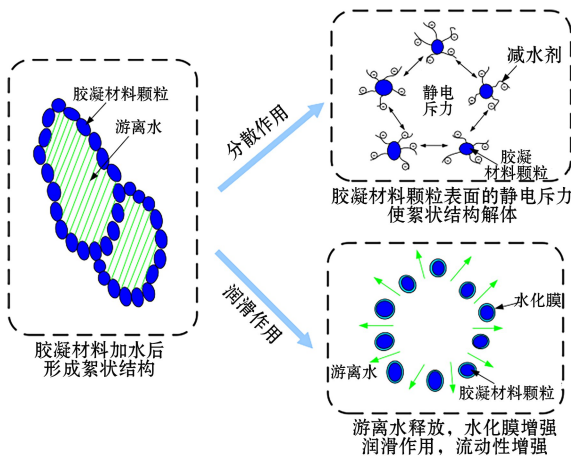


图 7 流变剂作用下浆体的结构模型

Fig.7 Structural model of slurry under the action of rheological agent

流变剂与胶凝材料颗粒之间相互影响,一方面表现在流变剂对胶凝材料浆体结构和性能的改变,对胶凝材料水化产物的形成和形貌的影响;另一方面,胶凝材料水化又影响着高效流变剂的分散作用。随着胶凝材料水化的进行,流变剂吸咐层也不断被胶凝材料水化产物覆盖,胶凝材料颗粒和水化产物颗粒开始凝聚,形成坚固的硬化体结构。高效流变剂与水同时加入时,高效流变剂参与胶凝材料水化过程,形成有机矿物并沉降在胶凝材料颗粒表面,造成少量流变剂被无效消耗而不能起到分散作用,这也是下一步研究的重点。

### 4 工业应用

该矿全尾砂膏体充填系统设计充填料浆质量浓度为 74%,为了提高井下充填体强度,根据前期试验结果,将充填料浆质量浓度提高到 78%,然后在搅拌工序中添加 0.4%的 YSKJ01 型流变剂,在搅拌桶中取制备好的料浆进行流变试验,同时在井下采场三通处取充填料浆,分别测试流变特性和充填体强度,测试结果见表 8。

表 8 添加流变剂前后性能对比

Table 8 Performance comparison before and after adding rheological agents

测试参数	料浆质量浓度/%	流变特性			强度特性/MPa		
		屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	坍塌度/cm	3 d	7 d	28 d
添加前	74	87.38	0.4724	26.5	3.427	4.728	5.755
添加后	78	57.62	0.7453	27.4	4.741	5.994	7.686

添加流变剂前后,料浆屈服应力降低幅度较大,

塑性黏度有小幅增加,但料浆状态更均质稳定,不易发生分分离析;从井下充填体凝固效果可以看出,全尾砂膏体充填料浆到达采场后不离析、不分层、略泌水,同时提高了充填体强度,对矿山安全高效开采具有重要意义。

### 5 结论

(1) 通过定性试验可以看出,分别添加 3 种流变剂后,膏体充填料浆的流变特性得到明显改善,掺量越多,流变参数整体降幅越大。最佳流变剂选型为 YSKJ01,当掺量为 0.4%时,充填料浆的流动性达到最优;当掺量超过 0.6%时,料浆边缘出现明显的离析、泌水现象,料浆均质性被破坏。

(2) 通过定量试验可以看出,同配比充填料浆(料浆质量浓度为 76%和 78%)在 YSKJ01 型流变剂掺量分别为 0 和 0.4%时,屈服应力分别下降 84.74%和 81.90%、塑性黏度分别下降 64.62%和 63.54%。在相同灰砂比条件下,随着料浆质量浓度的增加,料浆屈服应力和塑性黏度降低幅度逐渐减小,说明流变剂对于高浓度料浆流动性的改变效果有所减弱,但幅度不大。

(3) 添加流变剂后,对于充填体早期强度(1 d)影响较大,但对于 3 d、7 d、14 d、28 d 强度几乎无影响,部分充填体强度还略微增长。

(4) 从微观角度阐述流变剂对于改善全尾砂胶结充填料浆流变特性的作用机理,发现在加入流变剂之前,料浆中絮团粒径分布较为复杂,充填颗粒之间絮凝形成蜂窝结构;随着流变剂的添加,絮团尺寸减小,粒径分布则趋于有序,使浆体结构更致密,排列更有条理。当流变剂添加过量时,浆液中已基本没有大的絮团结构,颗粒呈现个体状态。

#### 参考文献(References):

[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.

[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] 薛杉杉,郭利杰,许文远.减水剂对充填料浆流动特性的影响分析[J].中国矿业,2018,27(增刊1):382-386.  
XUE Shanshan, GUO Lijie, XU Wenyuan. Effect analysis of water reducing agent on the rheological performance of filling slurry[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(S1): 382-386.
- [5] 盛宇航,李广波,姜海强.减水剂与粉煤灰对全尾砂胶结充填料浆流变性能的影响[J].重庆大学学报,2020,43(4):55-63.  
SHENG Yuhang, LI Guangbo, JIANG Haiqiang. Effects of superplasticizers and fly ash on rheological properties of cemented tailings backfill [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(4): 55-63.
- [6] 吴再海,李成江,齐兆军,等.减水剂在膏体充填管道输送的研究分析[J].矿业研究与开发,2020,40(3):145-149.  
WU Zhaihai, LI Chengjiang, QI Zhaojun, et al. Research and analysis of water reducing agent in pipeline transportation of paste filling[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 145-149.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 盛宇航,齐兆军,寇云鹏,等.减水剂对全尾砂胶结充填料浆流变性的影响[J].有色金属工程,2020(4):94-99.  
SHENG Yuhang, QI Zhaojun, KOU Yunpeng, et al. Influence of superplasticizers on Rheology of cemented tailings backfill [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020(4): 94-99.
- [13] 李广波,盛宇航,宋泽普,等.某矿不同级配尾砂高浓度料浆流变特性研究及优化[J].矿业研究与开发,2021,41(4):55-59.  
LI Guangbo, SHENG Yuhang, SONG Zepu, et al. Study and optimization of rheological properties of high concentration tailings slurry with different gradation in a mine [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4): 55-59.
- [14] 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.
- [15] LI Dunale, WANG Dongmin, REN Canfa, 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.

### Influence of Different Rheological Agents on the Filling Performance of Full Tailings Paste in a Mine

LI Guangbo<sup>1,2</sup>, SHENG Yuhang<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>, YANG Liu<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Gold Ming Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;

2. Filling Engineering Laboratory Branch, Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261441, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe and efficient transportation of the full tailings paste filling slurry in a mine, the effect of different types and dosages of rheological agents on rheological properties of the slurry and strength of the filling body were analyzed by qualitative and quantitative perspectives. The results show that after adding three types of rheological agents, the rheological properties of the paste filling slurry are significantly improved in general, and the more the dosage, the greater the decrease in rheological parameters. However, excessive dosage can cause segregation and sedimentation of the slurry. The addition of rheological agents has an impact on the strength of the filling material at 1 d, but has almost no effect on the strength at 3, 7, 14, and 28 d. The optimal rheological agent selection is YSKJ01, and when the dosage is 0.4%, the filling performance of the full tailings paste reaches the optimal value. From the microscopic perspective, the mechanism of the rheological agent to improve the rheological properties of the full tailings cemented filling slurry is expounded, which provides a reference for the design of the full tailings paste filling ratio of the mine.

**Key words:** Filling slurry, Rheological agents, Rheological property, Strength of filling body