

钼尾矿梯度离析-管道输送与干滩调控协同优化工艺研究

李新宽 于晓斌 苒 勇 汪光平
金堆城钼业股份有限公司 陕西 渭南 714102

摘要: 尾矿库干滩坡度是影响尾矿沉积稳定性和安全运行的关键参数。本文针对钼尾矿的特性,提出一种基于重力离析密度分层调控的优化放矿工艺,通过调控干滩坡度实现尾矿颗粒的合理分选与堆积。研究分析了干滩坡度对浸润线位置、渗流稳定性及尾矿沉积层理的影响,合理控制干滩坡度可有效降低渗流风险,提高尾矿库稳定性。此外,结合金属矿山尾矿库智能监测技术^[1]可实现动态优化放矿工艺,为尾矿库安全管理提供科学依据。

关键词: 干滩坡度; 重力离析; 密度分层; 坡度调控; 渗流稳定性; 溃坝风险

1 引言

尾矿库的安全运行直接影响矿山企业的可持续发展和生态环境安全。干滩坡度作为尾矿排放过程中的关键参数,不仅决定了尾矿颗粒的沉积分布,还显著影响浸润线位置和坝体稳定性^[2]。然而,传统放矿工艺往往忽视重力离析效应对尾矿密度分层的影响,导致粗颗粒堆积不均、渗流路径异常等问题,进而引发溃坝、污染等事故。同时也没有对重力离析效应可能带来好的方面加以利用。

针对这一问题,本文提出基于重力离析密度分层调控的优化放矿工艺,通过调整重力离析后取料位置、不同的取料量、放矿点位置、放矿管数量和排放速率,实现尾矿颗粒按密度梯度自然分选,优化干滩坡度。研究结合工程案例和基于颗粒流模拟的数值分析方法^[3],验证该工艺在提高尾矿库稳定性、降低渗流风险方面的有效性。同时,探讨了智能化监测技术在动态优化放矿策略中的应用前景,为尾矿库的安全管理提供理论支撑和技术参考。

2 干滩对钼尾矿库的影响

合理控制干滩坡度和长度对钼尾矿库的安全运行至关重要。适宜的坡度有利于尾矿颗粒自然分层,粗颗粒向坝前富集形成高渗透层,细颗粒则在库尾沉积。坡度过陡或过缓都会影响排放效果和坝体稳定性。干滩长度需要满足基本规范要求,过短会导致浸润线上升,影响坝体安全,合理长度配合适当坡度能有效控制浸润线深度。在防洪方面,足够的干滩长度有助于提高调洪能力,而合适的坡度能维持良好的排洪流速。针对钼尾矿的特性,需要适当调整坡度参数,并通过智能系统实现动态调控。在环保方面,合理的坡度和长度配置有助于控制粉尘和重金属污染。

2.1 排放效率控制

干滩坡度保持在合理区间时,钼尾矿可形成理想的重力离析分层(粗颗粒向坝前富集,细颗粒向库尾沉积);坡度过陡会导致粗颗粒向更尾部滑移,影响滩面沉积效果;坡度过缓则降低排放速率,影响生产能力,同时大量细颗粒于坝前沉积,影响坝体水的渗透。

2.2 渗透稳定性

在尾矿库运行过程中,干滩长度的合理控制对维持坝体渗透稳定性具有关键作用。当干滩长度不足时,会导致浸润线快速抬升,使坝体饱和区域扩大,进而降低坝体材料的抗剪强度。通过科学调控干滩坡度和长度的协同关系,可以有效控制浸润线的埋深,使其保持在设计规范要求的合理范围内。这种协同调控机制能够避免因渗透压力过大而引发的坝体结构破坏,确保尾矿库在长期运行中的渗透稳定性。同时,合理的干滩设计还能促进尾矿沉积层的自然固结过程,进一步增强坝体的整体稳定性,为尾矿库的安全运行提供重要保障。

2.3 沉积结构优化

尾矿滩面在合理的坡度条件下,形成坝前粗颗粒层、中部过渡层、库尾细泥层三段式结构,可给坝体带来更好的透水性,有利于浸润线埋深的控制,确保坝体稳定性;也可以在坝前一定区域内形成必要的承载力,保证坝前生产性活动的要求。

2.4 防洪能力

合理增加干滩长度,通过增大调洪库容、延长洪水滞留时间、扩大水面面积(区域)和优化颗粒级配,每增加100m干滩长度,在干滩坡度1%-3%的情况下,显著提升调洪库容,调洪库容提升约15%-20%,同时增强消能效果、延长径流路径和改善沉积结构,安全超高明显增加,有效降低暴雨工况下的漫顶风险。

2.5 防尘控制

防尘控制措施方面,通过优化干滩坡度和长度可显

著降低滩面扬尘产生，干滩裸露面积每减少10%，扬尘量可下降约25%，合理的控制干滩坡度及长度可有效控制滩面扬尘；再通过分散放矿、散水喷淋、覆盖等方式控制滩面扬尘。

2.6 渗滤液风险

长度不足可能会导致坝前污染物富集区扩大，增加重金属渗漏风险（水体和大气污染）。合理规划干滩长度可避免坝前形成污染物富集区，通过分级沉淀设计促进重金属的自然沉降和吸附，同时保持适宜的沉积层渗透性能以实现污染物梯度降解。

3 调整干滩坡度的方法

3.1 重力离析分区域排放

重力离析分区域排放是一种基于矿浆颗粒自然分异特性的排放方法。该方法通过管道上下层或受矿槽前后端的重力离析效应，使矿浆在流动过程中自然形成浓度和粒径的梯度分布。较浓的粗颗粒矿浆与较稀的细颗粒矿浆在重力作用下实现自动分离，随后通过分区排放将不同特性的矿浆分别输送至预定区域。这种排放方式能够精确控制尾矿在干滩上的沉积结构，形成设定的颗粒级配分布，从而优化干滩的物理力学特性。在实际应用中，该方法可根据尾矿特性、排放要求和场地条件进行

灵活调整。相比传统均匀排放方式，重力离析分区域排放能够显著改变干滩的渗透性、稳定性和抗冲刷能力，为尾矿库的安全运行和长期稳定性提供有力保障。

3.2 放矿支管调整

通过优化放矿管道系统设计可实现滩面坡度的精准调控，主要技术路径包括：管道数量调节、多级扩径耦合和末端扩散槽消能。增加放矿管数量可分散矿浆流量，降低单管排放强度，避免局部冲刷；减少管道数量则能集中排放能量，促进粗颗粒向坝前富集，结合控制系统动态调整工作管道数量以匹配不同阶段的排放需求。采用变径管道设计（如三级阶梯扩径），通过逐级降低流速实现粗颗粒在扩径段减速沉积、细颗粒保持悬浮状态向远端输送，该设计可同步优化沉积结构和滩面渗透性。在管道末端加装扇形扩散槽，通过消能挡板分解矿浆冲击力、导流格栅均匀分布流速，实现矿浆平缓铺展，减少滩面冲沟形成。上述措施需与干滩长度、矿浆浓度等参数联动控制，形成坡度-流速-粒径的协同优化机制，最终实现坝前区形成高渗透粗颗粒层、库尾区维持稳定细颗粒沉积、整体坡度稳定在安全区间。

4 工程实例

4.1 尾矿的物理力学性质

表1 尾矿颗粒分析结果统计

地层	颗粒组成（mm）					
	> 20.0	20.0~2.00	2.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	< 0.075
②层尾中砂		0.0~3.6	6.4~46.1	34.2~59.7	8.0~18.7	2.5~27.5
②-1层尾粗砂		2.7	52.0	32.8	6.3	6.2
②-2层尾粉砂			2.5~8.3	25.2~39.2	14.4~25.6	34.6~45.8
③层尾中砂		1~3.8	5.2~43.4	30.1~59.3	9.5~24.3	2.5~31.4
③-1层尾粉砂			3.3~12.4	35.2~39.7	16.7~20.1	32.3~40.3
④层尾中砂		0.4~9.5	5.9~41.3	33.3~64.5	8.3~22.7	8.2~24.9
⑤层尾中砂		0.2~2.0	3.2~37.3	35~58.2	9.1~23.5	8.3~29.0
⑥层碎石土	25.6~86.8	1.8~23.8	0.8~8.3	1.0~7.5	1.0~5.4	8.6~30.9

4.2 尾矿的抗剪强度指标

表2 饱和快剪试验指标统计

地层	统计指标	统计值				
		n	范围值	平均值 $\bar{\phi}$	标准差 σ_f	变异系数 δ
②层尾中砂	黏聚力c（kPa）	6	2.9-4.4	3.3	0.514	0.155
	内摩擦角（°）	6	21.8-22.9	22.3	0.323	0.014
③层尾中砂	黏聚力c（kPa）	6	5.0-5.4	5.2	0.142	0.027
	内摩擦角（°）	6	22.2-23.2	22.8	0.301	0.013
④层尾中砂	黏聚力c（kPa）	6	8.2-8.9	8.6	0.230	0.027
	内摩擦角（°）	6	22.5-22.8	22.6	0.104	0.005
⑤层尾中砂	黏聚力c（kPa）	6	8.5-8.9	8.8	0.150	0.017
	内摩擦角（°）	6	24-24.5	24.3	0.215	0.009

4.3 渗透试验

表3 单环注水试验渗透系数k统计(cm/s)

地层	统计值		
	n	范围值	平均值
②尾中砂	5	$1.56\times10^{-2}\sim2.49\times10^{-2}$	2.11×10^{-2}
②-2尾粉砂	1	1.33×10^{-3}	

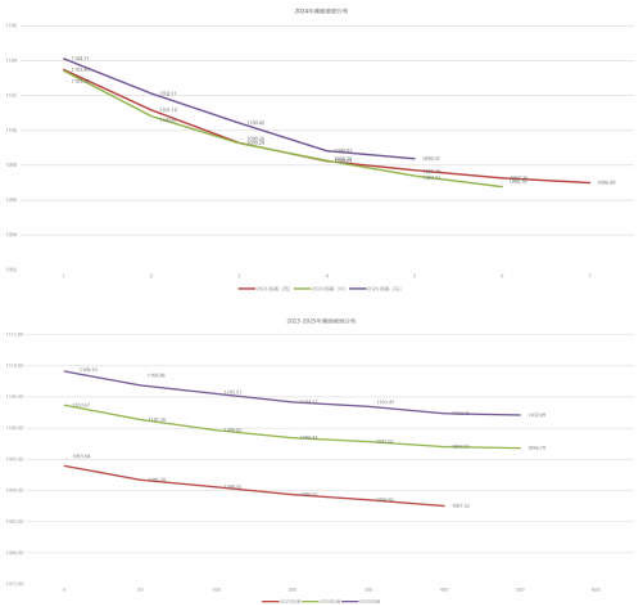
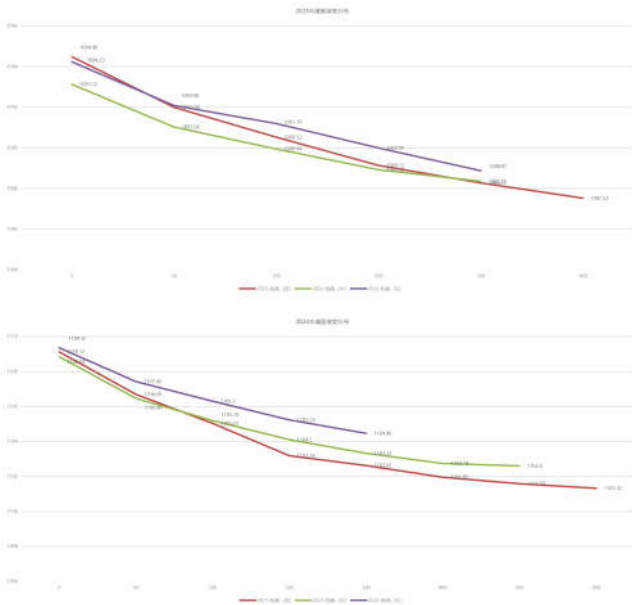
4.4 放矿策略

基于非等径三通分流系统的矿浆梯度分级排放技术，通过差异化管径配置与重力离析效应的协同作用，实现了尾矿浆的高效分级与精准排放。该系统采用变径三通结构设计，利用不同管径的流速差异和颗粒重力沉降特性，使矿浆在流动过程中自然形成浓度和粒径的梯度分布：较浓的粗颗粒矿浆与较稀的细颗粒矿浆在分流系统中实现自动分离。通过智能调控阀门，系统可自主选择分区域排放策略，将高浓度粗颗粒矿浆优先输送至坝前区域排放，而低浓度细颗粒矿浆则定向排放至库区远端。这种分级排放方式有效优化了坝面沉积结构，在坝前形成高渗透性的粗颗粒堆积层，同时在库尾维持稳定的细颗粒沉积区。该方法的应用显著提升了干滩的物理力学性能，包括增强渗透性、改善稳定性和提高抗冲刷能力，为尾矿库的安全运行和长期稳定性提供了可靠

保障。系统运行过程中，还可根据尾矿特性、排放要求和场地条件进行动态调整，实现排放参数的精准控制。

4.5 实施效果

基于重力离析效应的尾矿排放工艺优化表明，通过合理利用矿浆在受矿槽或输送管道中的自然分层特性，可实现尾矿排放的精准控制。研究数据显示，受矿槽前端或管道下部约占总矿浆量2/3的矿浆浓度较总尾矿浓度提升12%，而槽后端或管道上部1/3矿浆浓度则降低8.5%。工程实践表明，将浓度提升的矿浆优先排放至坝前区域，可使坝前400m干滩坡度稳定在1.6%-1.7%的理想范围内，既满足生产需求又符合安全规范要求。这一工艺创新不仅充分利用了重力离析的自然分选作用，还通过智能监测技术实现了排放参数的动态优化，为尾矿库的安全运行提供了新的技术思路。



工程实践表明，通过合理利用尾矿浆重力离析特性实施分区排放，可显著优化尾矿库运行效果。在保持总排放量不变的前提下，将受矿槽前端或管道下部高浓度矿浆（占总量的2/3）集中排放放在坝前200m堆坝区域，可使该区域干滩坡度由原来的1.4%-1.5%显著提升至2.3%-2.7%，有效加速滩面速率；同时将受矿槽后端或

输送管道上部低浓度矿浆（占总量的1/3）排放在防洪区域，既确保了400m防洪干滩坡度等关键安全指标维持稳定，又实现了干滩距离的合理延伸。这种基于矿浆自然离析特性的差异化排放策略，在不改变调洪起始库水位、调洪最终洪水位、调洪高度、参与调洪滩长、入汛控制滩顶与进水口高差等等核心安全指标的情况下，

不影响坝效率，还有效提升了干滩长度，保障了防洪安全，实现了尾矿库运行效益的整体优化。

滩长 范围m	2022年度		2023年度		2024年度		2025年度	
	滩面坡度%	平均坡度%	滩面坡度%	平均坡度%	滩面坡度%	平均坡度%	滩面坡度%	平均坡度%
0-50	2.52	1.47	4.49	2.30	4.62	2.62	4.49	2.47
50-100	2.52		2.29		3.41		2.70	
100-200	1.67		1.20		1.22		1.34	
200-300	1.04		0.85		0.61		0.70	
300-400	0.85	1.67	0.98	1.61	0.81	1.67	1.12	1.69

5 结论

本研究提出的基于重力离析密度分层调控的钼尾矿干滩坡度优化放矿工艺，通过系统性的理论分析和工程实践验证，取得了以下重要结论：

（1）工艺创新性方面，该技术首次将重力离析效应从被动影响因素转化为主动调控手段，通过非等径三通分流系统的创新设计，实现了矿浆的梯度分级排放。这种工艺突破不仅解决了传统均匀排放方式导致的颗粒分布不均问题，更通过智能调控系统实现了排放参数的动态优化。

（2）工程效果方面，实施结果表明该工艺显著改善了尾矿库的关键性能指标。坝前200m区域的干滩坡度由1.4%-1.5%提升至2.3%-2.7%，坡度提升幅度达60%以上，同时保持了防洪关键区域（400m）坡长及坡度的稳定性。这种差异化的坡度分布既满足了堆坝取料区的工程需求，又确保了防洪安全指标不受影响。

（3）安全性能提升方面，该工艺通过三段式沉积结构（坝前粗颗粒层、中部过渡层、库尾细泥层）显著改善了坝体的渗透稳定性。粗颗粒层的高渗透性有效控制了浸润线埋深，细颗粒层的致密结构则增强了污染物的截留能力，实现了安全与环保的双重保障。

（4）经济效益方面，该工艺在保持原有排放总量的

情况下，通过优化排放策略使滩面高程上升速率合理提高，这意味着在同等库容条件下一定时间范围内可增加尾矿库的存水量或防洪库容，产生可观的安全效益。

（5）推广应用价值方面，本研究建立的“坡度-流速-粒径”协同优化机制具有普适性意义，其技术原理可推广至其他类型尾矿库的放矿工艺优化。特别是将智能化监测技术与传统工艺相结合的思路，为尾矿库的数字化转型提供了实践范例。

综上所述，本研究所提出的优化放矿工艺在技术创新性、工程适用性、安全可靠等方面均表现出显著优势，为提升尾矿库本质安全水平、实现矿山绿色可持续发展提供了有效的技术解决方案。未来研究可进一步探索人工智能算法在排放参数实时优化中的应用，以及该工艺在不同类型尾矿库中的适应性改进。

参考文献

[1]张可能,刘志祥.金属矿山尾矿库智能监测技术应用进展.工程科学学报,2023,45(5):823-831

[2]王兆丰,刘音.尾矿库干滩坡度对浸润线的影响规律研究.岩土力学,2021,42(3):789-796

[3]李俊平,周科平.基于颗粒流模拟的尾矿库放矿参数优化.中国矿业大学学报,2022,51(2):256-263