

引用格式:田小平,吴学民,王莹莹.全尾砂高效分级脱水充填工艺优化设计与砂仓性能研究[J].有色设备,2025,39(1):92-97.

TIAN Xiaoping, WU Xuemin, WANG Yingying. Optimization design of high-efficiency graded dehydration filling process for total tailings and study on sand bin performance[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(1): 92-97.

全尾砂高效分级脱水充填工艺优化设计与砂仓性能研究

田小平¹, 吴学民², 王莹莹^{2,3}

(1. 金诚信矿山工程设计院有限公司, 北京 100070; 2. 北京金诚信矿山技术研究院, 北京 100070;
3. 金诚信膏体充填实验室, 北京 100070)

[摘要] 本研究提出了一种全尾砂分级脱水充填新工艺,该工艺通过全尾砂分级处理,其中粗粒级尾砂采用自然重力沉降法进行脱水,而细粒级尾砂则采用絮凝重力沉降法进行脱水。为此,本研究还专门研制了相应的分级脱水设备。与传统的全尾砂脱水工艺相比,该分级脱水工艺显著提升了浓缩效率,降低了能耗和脱水成本,同时减少了环境污染。该工艺的适用性广泛,尤其适用于非煤金属矿山的全尾砂充填工程,为矿山充填技术的可持续发展提供了新的技术路径。

[关键词] 全尾砂分级脱水; 充填工艺; 粗粒级重力沉降砂仓; 细粒级絮凝沉降砂仓; 絮凝重力沉降; 粒度分布

[中图分类号] TD853 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0092-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.013

0 引言

充填采矿法经历了从废石干式充填、碎石混凝土胶结充填,到不含胶凝剂的分级水砂充填,再到高浓度胶结充填,直至当前的全尾砂高浓度充填和膏体充填的发展过程^[1]。在现行全尾砂脱水工艺中,普遍采用絮凝技术的深锥浓密机或风水造浆立式砂仓,无需专设全尾矿过滤脱水设备,即可实现全尾砂的连续脱水,直接制备出浓度超过 75% 的高浓度砂浆。该砂浆与添加料混合搅拌后,被输送至井下充填采场。因全尾砂高浓度料浆具有良好的稳定性和可塑性,不沉淀、不析、不脱水等特点,且全尾砂脱水工艺、高浓度料浆制备及搅拌和输送设备国产化等工艺要点的解决,使全尾砂高浓度充填成为目前国内外矿山普遍采用的充填工艺。

全尾砂作为选厂尾砂的最原始状态,其粒度多在 1 mm 以下,且具有较宽的粒级范围。高分子聚合物作为絮凝剂,一般针对粒径较细的尾矿颗粒絮凝效果较好。然而,当尾砂颗粒粒径增大到一定值,絮凝就较难发生。试验研究证明,当尾矿颗粒粒径大于 0.03 mm 时,几乎不会出现絮凝现象;处于 0.01 ~ 0.03 mm 时有少量絮凝;只有颗粒粒径在

0.01 mm 以下时,才呈现出明显的絮凝现象。基于此,目前普遍将絮凝的颗粒粒径界限为 0.01 mm,即颗粒级大于 0.01 mm 后几乎没有絮凝,絮凝剂对提高尾砂沉降速率无影响。为简化分析,将能产生絮凝现象的尾矿颗粒称为“细”粒级,反之称为“粗”粒级,“粗”粒级的沉速取决于自身重力克服黏性阻力和形状阻力的程度,“细”粒级与高分子聚合物絮凝剂作用形成网状或絮团的较大絮凝体,加速其沉降速度,形成絮凝层。2 种颗粒在全尾砂浆中的沉速不同^[2]。

基于上述原理,对全尾砂进行粒级分级,实现粗细分离,并针对粗粒级和细粒级分别采用适宜的浓缩方法。此工艺优化不仅显著提升了浓缩效率,而且有效降低了设备制造及运维成本,实现了经济效益与技术效能的双重提升。

1 全尾砂脱水工艺

全尾砂连续脱水工艺作为全尾砂高浓度充填系统的核心环节,其技术与应用对整体充填效率及成本控制具有显著影响。当前,工程中广泛采用絮凝技术的深锥浓密机或风水造浆立式砂仓进行全尾砂脱水充填。

[收稿日期] 2024-10-16

[第一作者] 田小平(1972—),男,山西吕梁人,工程师,主要从事金属矿山采矿设计工作。

1套全尾砂脱水工艺构成的充填系统至少由1座砂仓(深锥浓密机或立式砂仓)、1座水泥仓、料浆搅拌计量输送等设备及设施组成,该工艺如图1所示。由于采用全尾砂脱水工艺,即在立式砂仓内对全粒级范围内全部尾矿进行脱水,存在脱水效率低、脱水成本高及选充时间不平衡等问题^[3],具体如下。

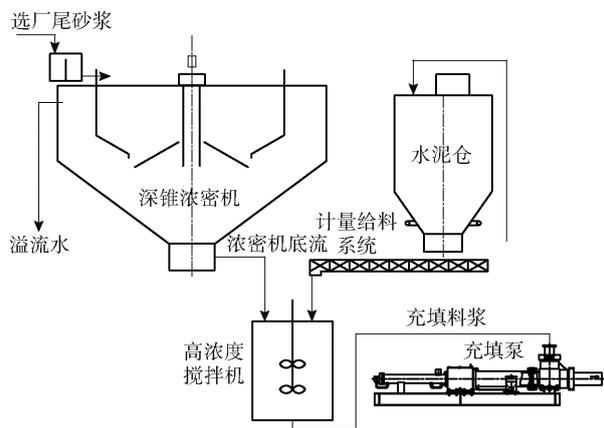


图1 全尾砂脱水充填工艺图

Fig. 1 The process of dewatering and filling with all tailings

1)尾砂浓缩效率低。全尾砂脱水工艺涉及粗粒级尾矿的自然重力沉降与细粒级尾矿的絮凝结团沉降。由于2种沉降方式同时进行,粗粒级的自然沉降易干扰细粒级的絮凝结团过程,导致底流浓度形成时间延长,进而影响尾砂的整体浓缩效率。

2)尾砂脱水成本高。絮凝脱水的主要成本来源于絮凝剂的消耗。在全尾砂絮凝沉降过程中,絮凝剂主要作用于细粒级尾矿,对粗粒级沉降效果不明显。因此,按照尾矿浆中尾砂总质量含量添加絮凝剂的方式,易造成絮凝剂的浪费,增加脱水成本。

3)脱水消耗功率高。由于全尾砂混合絮凝浓缩工艺形成的底流含有大量粗粒级颗粒,导致底流压实密度高、屈服应力大,进而增加电耗。

4)设备结构复杂,制造和维护成本高。深锥浓密机的驱动和刮泥耙机构占其制造成本的60%以上。设备结构的复杂性不仅增加了制造和维护成本,还可能因运行管理不当或尾矿物理级配变化引发压耙等事故风险。

5)生产组织难度大。选厂通常实行24h连续生产,而充填作业的有效工作时间每日仅约8h,占整个循环时间的30%。为满足生产需求,需配置更大容量的深锥浓密机或立式砂仓以增强储砂功能,

但这又进一步降低了底流获取效率,增加了投资成本和生产组织难度。

2 全尾砂分级脱水充填工艺

针对传统全尾砂脱水工艺存在的缺点,本研究提出全尾砂分级脱水工艺。该工艺将全尾砂浆预先分级,随后分别按粗、细粒级进行沉降脱水,提升了脱水效率,降低成本,并简化了生产管理。

本研究设计的工艺路线是将选矿厂输出的全尾砂首先经旋流器进行精确分级,依据预设的分级界限,将粗、细粒级砂浆分别引导至2座专用砂仓。粗粒级尾砂在重力沉降砂仓内自然沉降,而细粒级尾砂则在絮凝沉降砂仓内通过添加絮凝剂进行结团沉降。沉降后的高浓度底流合并进入搅拌机,与各类充填物料均匀混合,制备出符合标准的高浓度充填料浆,合格的高浓度充填料浆被输送至井下充填区,完成充填作业。

高浓度充填料浆制备中的关键工艺是全尾砂分级脱水工艺,即全尾砂作为充填料,只将全尾砂浆先分级,再按粗细粒级分别沉降脱水。本工艺采取全尾砂粗细粒级沉降,与传统的全尾砂脱水工艺相比,有效解决了脱水效率低及分级沉降难等问题,降低了脱水成本,简化了生产管理。具体优点如下。

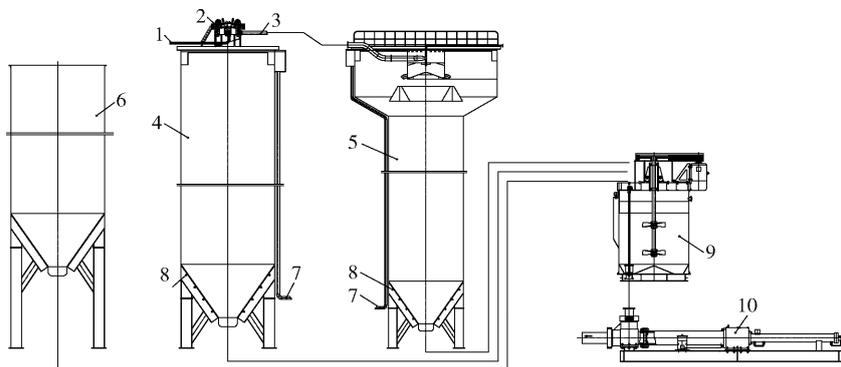
1)絮凝剂用量减少。与传统全部尾矿浆中添加絮凝剂相比,本工艺仅对细粒尾砂通过添加絮凝剂进行浓缩,尾砂总量的减少,降低了絮凝剂的添加量。另外,经过分级后的细粒尾砂浓度为5%~7%,更适合于细粒尾砂絮凝,提高了尾砂脱水效率,有效降低了絮凝剂的添加量和成本。

2)浓缩效率提升。粗、细粒尾砂分别在2个砂仓沉降脱水互不干扰,沉降速率大幅提升。对于粗粒尾砂,由于消除了细粒级尾矿絮凝结团的干扰,会加快其自然重力沉降速度,而细粒尾矿的絮凝结团由于不再受到粗粒尾砂沉降的影响,其浓缩速度也相应加快,有效提高了沉降速率。

3)设备配置成本降低。对于粗粒尾砂自然重力沉降的立式砂仓,由于其底流为较粗的颗粒,孔隙率较高,孔隙含间隙水,压实密度较小,底流泥层不会板结,屈服应力较小,借助简单的风力或水力造浆方式,很容易实现流态化放砂,而无需结构复杂和成本高企的刮泥耙。而对于细粒尾砂絮凝沉降的立式砂仓,其底流表现为稠度较高的尾砂膏体,却具有较小的屈服应力,也不会板结,同样借助简单的风力或

水力造浆即可流态化放砂,也无需配置刮泥耙。上述 2 种脱水设备均为结构简单筒仓,其制造和维护成本较低。

4) 适应矿山生产安排。通过合理配置砂仓容积,本工艺能够适应选厂 24 h 连续工作制,确保尾砂全部通过砂仓进行高效浓缩处理。同时,减小砂仓容积不仅成本低廉,还有助于稳定底流浓度,提升充填质量。



1—全尾砂输送管; 2—旋流器组; 3—一段溢流; 4—砂仓; 5—T 型砂仓; 6—胶凝剂仓;
7—溢流水; 8—风水造浆阀; 9—高浓度搅拌筒; 10—充填工业泵

图 2 全尾砂分级脱水充填工艺示意

Fig. 2 The process of classified dewatering and filling with all tailings

3 砂仓结构

3.1 粗粒级重力沉降砂仓

粗粒级砂仓的功能是接收和储存旋流器底流砂浆,使粗粒级尾砂自然重力沉降,形成高浓度泥层,其溢流可通过砂仓上部溢流堰排出循环利用。粗粒级砂仓无需特殊结构,采用上置旋流器的筒仓结构,为优化放砂过程,砂仓下部设计为锥形体,并在下部锥体外部设置多道环形管,环形管上外接多个通达仓体内部的“控压助流”喷嘴,保证在初始放砂时使仓底局部尾砂流态化。当放砂过程进入稳定阶段,由于仓底已形成尾砂流化层并具备下溜惯性,此时可关闭“控压助流”喷嘴。这一操作不仅继续保证放砂,还有效维持了底流放砂浓度的稳定性。为进一步提升放砂速度,在结构方面设置浓密仓下部锥形体仓的角度小于目标底流的安息角,利用料流的重力自溜效可实现快速、顺畅的放砂过程。粗粒级砂仓结构示意图如图 3 所示。

3.2 细粒级絮凝沉降砂仓

细粒级尾矿的絮凝结团沉降作为全尾砂高浓度充填料浆制备的核心技术,其复杂性和实施难度决

本工艺系统由旋流器、重力沉降砂仓、絮凝沉降砂仓、胶凝材料仓、搅拌设备及相关辅助设备及阀门仪表等组成。工艺流程如图 2 所示,选厂排放的 20% 左右浓度的全尾砂经旋流器分级后,粗粒尾砂在重力沉降砂仓内自然沉降,细粒尾砂溢流至絮凝沉降砂仓进行结团沉降。2 座砂仓的沉降底流合并进入搅拌机,与充填物料混合均匀后,制备出合格的高浓度充填料浆,最终输送至井下充填区。

定了絮凝结团沉降砂仓在工艺流程中的关键地位。砂仓型絮凝脱水设备在处理尾矿时,其处理量主要受沉降面积,即砂仓池体面积的影响,而在絮凝脱水过程中,压缩沉降路径的长度和时间则直接决定了底流的浓度,这与砂仓的高度密切相关。这些原理构成了仓型絮凝脱水设备设计的基本依据^[4]。

研究表明,泥层高度对底流浓度具有显著影响。随着泥浆高度的增加,深锥增稠机底流的固体质量分数呈现出先缓慢增长(泥浆高度 1~4 m)、后快速增加(泥浆高度 4~7 m)、最终趋于稳定(泥浆高度超过 7~8 m)的 3 个阶段^[5]。底流浓度与不同泥浆高度下尾矿絮凝体的沉降性能有关,可以通过调整泥浆层高度改变底流浓度,以满足井下充填所需要的强度要求。

基于上述原理,絮凝沉降砂仓的结构设计可采用增大絮凝沉降面积和压缩沉降段泥层高度的技术措施,以提升尾矿处理量和底流浓度。借鉴高效浓密机和立式砂仓的结构特点,设计了一种新型絮凝沉降砂仓,该砂仓上部为带有絮凝剂给料和混合桶的大直径浅仓(絮凝结团仓),下部为较小直径的筒状絮凝结团沉降和压缩仓(浓密仓)。

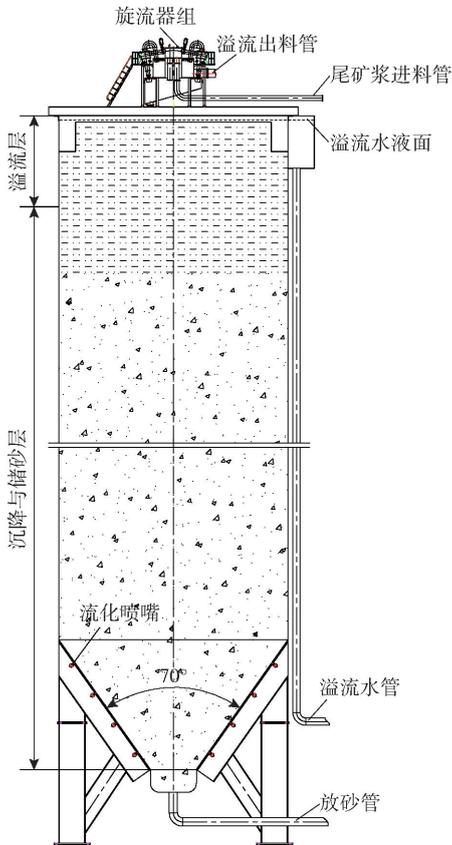


图3 重力沉降砂仓

Fig. 3 Gravity settling sand bin

絮凝结团仓的上部沿周边设环形溢流堰,溢流槽底板坡向溢流管接口处,结团仓中心上部设下部封底的进砂混合筒,为使混合筒内细粒尾砂水平方向流至絮凝结团仓内,进砂混合筒下部沿侧壁周边均匀开多个出砂圆孔,并在出砂圆孔下端设有环形分流锥,使混合有絮凝剂的细粒尾砂通过环形分流锥向浓密仓腔体的内外部分布,优化絮凝结团环境。

为便于放砂,浓密仓下部采用锥形体设计,并在锥体外部设置多道环形管,环形管上外接多个通达仓体内部的“控压助流”喷嘴^[6],确保初始放砂时仓底局部尾砂流态化,锥形底下接带阀门的底流管,实现稳定放砂。

为了稀释较高浓度的细粒级尾矿浆,使之能够与絮凝剂更好结合,在给料井上部设置了多个上清液进料方孔,利用给料井内外料浆和上清液的密度差所产生的液面高差,使上清液溢流到给料井内部。稀释水量会随着进料浓度的波动而自行调整,使给料井内部浆液浓度始终保持在最佳的浓缩沉降范围内。稀释水量不取决于进料矿浆量的大小,只取决

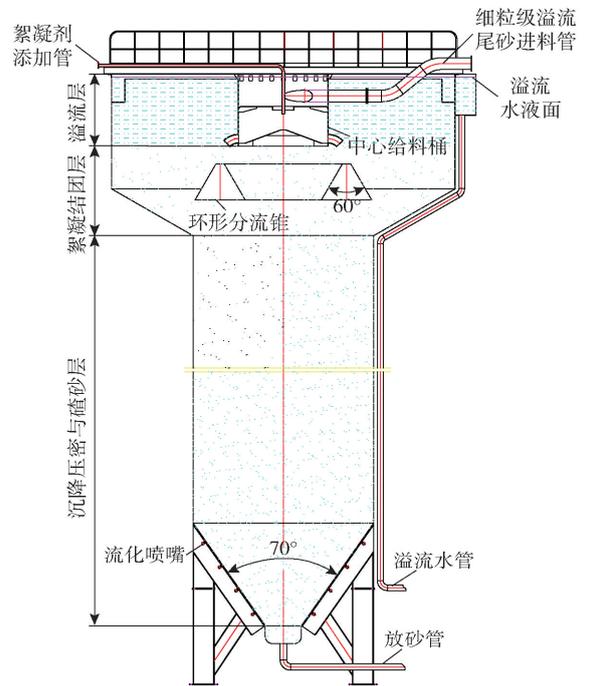


图4 絮凝沉降砂仓

Fig. 4 Flocculating settling sand bin

于进料浓度;当进料浓度高时,稀释水量更大;反之,则稀释水量更小。通过这种结构,使给料井内浆液浓度达到相对稳定,絮凝剂的给料量也相对稳定,且消耗最小。

絮凝结团仓絮凝沉降所形成的底流由于屈服应力较低,在初始放砂时也可采用“控压助流”喷嘴使仓底局部尾砂流态化。当能够放砂时,因仓底已经形成尾砂流化层下溜惯性,此时关掉“控压助流”喷嘴,不但可实现顺利放砂,同时保证了底流放砂浓度的稳定。为了进一步实现快速放砂,同样在结构方面设置浓密仓下部锥形体仓的角度小于目标底流的安息角,依靠料流的重力自溜效应实现放砂。

通过上述结构设计,构造成一种适用于细粒级尾矿絮凝沉降浓缩的新型絮凝沉降砂仓(图4),为全尾砂高浓度充填料浆的制备提供了高效、稳定的设备保障。

3.3 絮凝沉降砂仓研制

依据室内尾砂自然沉降及絮凝沉降试验,设计制造了1台半工业试验型絮凝沉降砂仓(图4)。结合实验室天花板高度,设计絮凝沉降砂仓上部沉降仓 $\Phi 3.5$ m,高2.5 m,下部浓密仓体 $\Phi 1.6$ m,高5.0 m,底部锥角 70° ,总高度为8.7 m,容积 32.8 m³。

絮凝沉降砂仓上部中心设有下部封底的进砂混

合筒,进砂混合筒 $\Phi 1.2$ m,高 1.5 m;进砂混合筒下部侧壁设有 12 个均布且向下弯曲的放浆管,使进砂筒内的尾砂浆自流至沉降仓内。

在浓密仓锥形体底部安装有带阀门的底流放砂管,在放砂管道上安装压力传感器,用于自流倍线试验或取砂试验。在浓密仓锥形体底部安装流量计、浓度计、黏度计、密度计和压力传感器等,其数据通过计算机进行实时监测和精准控制,为试验提供了数据支持。

4 半工业试验

4.1 尾砂分级界限依据

本研究以某铅锌矿选矿尾砂为原料开展半工业试验。在半工业试验前,对全尾砂的粒级组成特性进行测试,其 -0.01 mm 的尾砂颗粒所占比例约为 14%, $+0.01 \sim -0.03$ mm 的尾矿颗粒所占比例约为 15%, $+0.03$ mm 以上的尾砂颗粒占 71%。由测试可知,大部分尾矿为“粗”颗粒,主要依靠自身的重力在全尾砂浆中沉降,仅有 14% 的 -0.01 mm “细”颗粒尾砂与絮凝剂结合形成絮凝团体,而介于 $+0.01 \sim -0.03$ mm 的尾矿颗粒,其沉降速度明显较 $+0.03$ mm 以上的尾砂颗粒慢,但这类“粗”尾砂颗粒易与絮凝团粘连而一起加速下沉。因此,这类介于 $+0.01 \sim -0.03$ mm 的“粗”颗粒尾砂还具有带动絮凝团加速沉降的作用。

基于以上试验和分析,尝试将粒径分级界面确定为 0.037 mm,分离出尾砂中粒径大于 0.037 mm 以上的“粗”砂以实现自然重力沉降;小于 0.01 mm 的“细”颗粒尾砂实现絮凝沉降, $0.01 \sim 0.03$ mm 的尾矿颗粒作为沉降内核带动细粒级絮凝团加速沉降。

4.2 细粒级尾矿絮凝沉降试验

通过将分离出的 -0.037 mm 粒级尾砂配制成浓度为 5%~7% 的浆液,在实验室里用量筒进行絮凝剂选型和絮凝沉降试验,经过试验对比和分析,最终确定选用相对分子量为 1×10^7 的阴离子聚丙烯酰胺作为絮凝剂。该絮凝剂在浓度为 0.5‰、耗量为 40 g/t 的条件下,展现出优异的絮凝效果和沉降性能。

4.3 全尾砂分级脱水试验

本研究采用 FX200-GX 型旋流器(标称分离粒度为 $37 \sim 150$ μm)对浓度为 15%~20% 的全尾砂浆进行分级处理。其中, $+0.037$ mm 以上的粗粒级底

流进入重力沉降砂立式砂仓,进行自然重力沉降;而 -0.037 mm 的细粒溢流则进入絮凝沉降砂仓,进行絮凝团沉降浓缩。

在立式砂仓中, $+0.037$ mm 以上的粗粒级尾矿通过自然重力沉降实现浓缩,粗粒尾砂在砂仓中自然下沉,形成压密层,浓度自上而下逐渐增加。与此同时,浓度为 5%~7% 的细粒尾砂溢流经加压泵加压后,通过管道输送至絮凝沉降砂仓。在絮凝沉降砂仓中,通过添加絮凝剂,对细粒尾砂进行絮凝浓缩。特别需要指出的是,加压的目的是赋予进入絮凝沉降砂仓中间絮凝混合桶的细粒级料浆一定的流体动能,使其能够依桶壁做切向运动,从而与絮凝剂充分混合。

试验结果显示,立式砂仓底流浓度可达 79%,塌落度为 15~20 cm;絮凝沉降砂仓底流浓度可达 54%,塌落度为 20~25 cm。根据分级试验得出的粗砂和细砂所占比例,确定 2 个砂仓沉降后的高浓度底流量,并将其一并输入搅拌机进行搅拌。搅拌后料浆浓度达到 76%。为了重复验证试验结果,本次搅拌试验未添加水泥、胶凝剂或其他充填物料。

5 结论

本研究提出了全尾砂分级脱水工艺,对传统全尾砂脱水工艺进行了显著改进。在该工艺中,选厂全尾砂首先通过旋流器进行精确分级,其中粗粒级底流在立式砂仓内进行重力自然沉降,而溢流细粒尾砂则进入专设的絮凝沉降砂仓进行絮凝团沉降。随后,将 2 种底流高效混合,形成优质的充填骨料。

1)全尾砂分级脱水工艺展现出沉降速率快、浓缩效率高的显著优势。经实际应用发现,该工艺装备系统的脱水效率提升超过 2 倍,相较于深锥浓密机,成本降低约 30%,能耗减少约 70%,絮凝剂添加量减少约 70%,运营费用降低 30% 以上,经济效益和环境效益显著。

2)在重力沉降砂仓中,底流尾砂堆积的孔隙率较高,导致其屈服应力相对全尾砂减小;而在絮凝沉降砂仓中,由于尾砂浓度较低,屈服应力亦较小,因此无需配备大功率驱动的刮泥耙。在放砂初期,仅需采用风或水助流的方式破坏其惯性屈服应力,即可实现放砂。

3)由于重力沉降砂仓和絮凝沉降砂仓设计中摒弃了传统的耙架及其动力系统,设备运行过程中

几乎无需维护和维修,彻底消除了压耙风险和耙架动力消耗,使得运维管理更加简单、可靠。

综上所述,全尾砂分级脱水工艺不仅在技术上实现了突破,而且在经济性和实用性方面均具备良好的性能,为矿山充填作业提供了高效、节能、环保的全新解决方案。

[参考文献]

- [1] 于润沧. 我国胶结充填工艺发展的技术创新[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 1-3, 9.
- [2] 郑攻关, 王永彬, 谢经鹏, 等. 搅拌剪切对全尾砂膏体微观结构影响研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 22-27, 40.
- [3] 张亚东, 蔡嗣经, 徐泰松, 等. 罗河铁矿开采由崩落法改为充填法的效益分析[J]. 金属矿山, 2013(1): 11-14.
- [4] 王洪江, 王小林, 张玺, 等. 超细全尾砂深锥动态絮凝浓密试验[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 163-169.
- [5] 裴明松, 许梦国, 王平, 等. 程潮铁矿两种采矿方法并存下地表变形规律研究[J]. 金属矿山, 2015(12): 148-152.
- [6] 王怀勇. 凡口铅锌矿立式砂仓造浆与放砂关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [7] 赵晶莹. 充填系统与设备选型分析[J]. 有色矿冶, 2024,

- 40(5): 16-18.
- [8] 李广波, 盛宇航, 刘杰, 等. 不同流变剂对某矿全尾砂膏体充填性能的影响[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6): 135-141.
- [9] 田小平, 吴学民, 刘伟涛. 矿山充填料浆搅拌技术与设备选型的应用研究[J]. 有色设备, 2024, 38(6): 98-104.
- [10] 黎梦圆, 李航空, 郭利杰, 等. 基于超细磷尾砂的絮凝沉降特性及其胶结膏体充填材料性能研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(5): 28-39.
- [11] 孙欢欢, 石勇, 赖伟, 等. 全尾砂高效活化搅拌技术及均质化膏体充填特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 45-50.
- [12] 贾旭峰, 周乐, 赵龙. 江西金山全尾砂膏体充填试验研究[J]. 冶金与材料, 2023, 43(5): 124-126.
- [13] 梁新民, 王怀勇, 陈小伟, 等. 铲运机自动化出矿系统在上向分层充填采场的应用研究[J]. 有色设备, 2021, 35(3): 68-75.
- [14] 贾翱翔. 内蒙古某铜锌多金属矿采空区全尾砂胶结充填技术的应用[J]. 有色矿冶, 2023, 39(6): 14-16.
- [15] 谢经鹏, 杨柳华, 郑攻关, 等. 充填料浆泌水特性及其微观结构演变[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(4): 1-7.

Optimization design of high-efficiency graded dehydration filling process for total tailings and study on sand bin performance

TIAN Xiaoping¹, WU Xuemin², WANG Yingying^{2,3}

(1. Jinxin Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Beijing Jinxin Mining Technology Research Institute, Beijing 100070, China;

3. Jinchengxin Paste Filling Laboratory, Beijing 100070, China)

Abstract: This study proposes a novel graded dehydration filling process for total tailings. The process involves the classification of total tailings into coarse and fine fractions, with the coarse fraction undergoing natural gravity sedimentation for dehydration and the fine fraction undergoing flocculated gravity sedimentation. To implement this process, specialized graded dehydration equipment has been developed. Compared to traditional total tailings dehydration methods, this graded dehydration process significantly enhances concentration efficiency, reduces energy consumption and dehydration costs, and minimizes environmental pollution. The process exhibits broad applicability, particularly for total tailings filling projects in non-coal metal mines, offering a new technical pathway for the sustainable development of mine filling technology.

Keywords: total tailings graded dehydration; filling process; coarse-grained gravity sedimentation sand bin; fine-grained flocculation sedimentation sand bin; flocculated gravity sedimentation; particle size distribution

