

引用格式: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.

TIAN Xiaoping, WU Xuemin, LIU Weitao. Application of mine filling slurry mixing technology and equipment selection [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(6): 98-104.

矿山充填料浆搅拌技术与设备选型的应用研究

田小平¹, 吴学民², 刘伟涛^{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] 在矿山充填采矿作业中, 采空区充填体的强度直接关乎矿山的安全稳定与经济效益。针对当前充填工程中充填体强度难以满足设计要求的问题, 本文深入分析了常用充填料浆搅拌设备的工作特性, 并系统研究了不同充填骨料的类别及其构成比例。在此基础上, 创新性地提出了“高效活化+低速混合”的充填料浆组合搅拌工艺。该工艺针对不同骨料构成的充填料浆, 制订了相应的搅拌方法, 显著增强了充填料浆制备工艺系统的适应性和灵活性。本研究成果为提升充填体强度、保障矿山安全与经济效益提供了有效技术途径, 具有较高的行业借鉴价值。

[关键词] 充填采矿; 充填强度; 配比及养护; 充填料浆搅拌; 高效活化+低速混合; 搅拌质量

[中图分类号] TD853.34 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)06-0098-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.06.015

0 引言

自20世纪30年代以来, 充填采矿法经历了干式充填、分级尾砂胶结充填、高浓度胶结充填、全尾砂胶结充填, 直至膏体充填等多个发展阶段^[1], 伴随着其技术的广泛应用, 相关工艺环节的技术与设备也在不断地进行改进和完善。

在矿山充填工程中, 充填料浆的搅拌混合是重要的工艺环节, 这一环节旨在通过搅拌的对流运动、扩散作用和剪切作用将构成充填料浆的集料和胶凝材料搅拌混匀、活化, 使胶凝材料充分发挥胶结作用并最终形成具有一定抗压强度的均质充填体。

在搅拌过程中, 各物料颗粒在搅拌机叶片的转动、推动作用下, 相互冲击碰撞, 这使得物料的团聚结构受到破坏而分散, 形成流动性良好的均质料浆。充填料浆搅拌混合质量的优劣, 直接影响到充填体强度的形成。搅拌质量的优劣取决于搅拌强度, 而搅拌强度与搅拌方式、搅拌速度和有效搅拌时间等因素有关^[2]。

工程实践表明, 尽管在试验室试验按照充填试验结果推荐的充填材料配比及养护要求, 最终充填体的强度值能够满足设计要求, 但在工业生产中, 采用同样的配比及养护时间往往难以达到所需强度。与充填体的强度相关的影响因素很多, 其中搅拌工艺环节设备的结构、类型以及配置的影响是不可忽视的重要因素。

1 影响搅拌质量的设备因素

1.1 选用的设备结构或设备配置组合的合理性

某镍矿的充填系统选用立式高浓度搅拌槽来搅拌以棒磨砂为主要集料的充填料浆, 然而, 由于棒磨砂颗粒较粗、加工性极强, 搅拌叶轮的使用寿命大幅缩短, 仅在约1500h工作时长后就因磨损而失效。这一状况反映出, 对于充填料浆的成分构成及其特性了解不够深入, 进而导致了设备结构设计或设备配置组合失当。

1.2 搅拌设备本身存在设计和制造问题

在某银多铅锌矿中, 尽管其与试验室所采用的充填配比保持一致, 但仍存在充填体强度不足以满足采矿工程实际需求的问题。经过深入研究分析, 发现搅拌设备的叶轮配置不合理, 导致了搅拌强度

[收稿日期] 2024-09-15

[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。

不达标,进而使得水泥无法充分弥散并完成水化反应。通过实施针对性的技术改造后,满足了工程要求^[3];某公司运营的另一座铅锌矿也存在相似的问题^[4];此外,在湖北某化工集团的充填系统中,双卧式搅拌槽因结构设计上的缺陷,导致运行料位偏低,有效搅拌时间短,胶凝材料无法得到充分弥散和水化,造成充填体强度低难以满足采矿工程需要;某镍矿充填系统采用卧式双轴搅拌机在搅拌以棒磨砂为主要充填集料的充填料浆时,由于搅拌轴长 6 m,搅拌扭矩过大,仅依靠安装在搅拌槽外两端的轴承支撑难以满足其挠曲变形的需求。同时,搅拌轴头的同轴度不够,使得两端的密封腔形成副支承,充填料浆沿轴头进入密封腔室,加速了轴头的磨损,同时产生料浆泄漏,运行仅 15 min,充填量不足 1 500 m³就会出现磨损泄漏和轴承损坏^[5]。

1.3 配置的设备能力不足

受充填试验、搅拌机选择和工艺匹配等影响,搅拌设备能力不足,不能满足井下空区的充填工作量和对充填体的各项技术经济指标。如某矿山充填系统由于配置的搅拌设备有效体积小和动力配置低,搅拌时间短,也使得胶凝材料不能得到充分弥散和水化,充填体强度低难以满足采矿工程需要。

1.4 未合理配置设备以适应充填集料的特殊性

由于不同的矿山所赋存的充填集料不同,其构成充填料浆的各种集料的理化性质上亦存在显著差异。因此,根据充填集料的理化特性,并结合不同搅拌设备的性能特点,进行充填搅拌设备的合理配置,对提升充填料浆的拌合质量具有重要意义。如国内某磷矿充填系统采用以破碎废石为粗集料的全尾砂充填,以一级立式高浓度搅拌槽为拌和设备。然而,由于碎石的加工性太大,造成运行中搅拌叶轮寿命过短^[6]。

2 充填集料的类别及构成

充填料浆由充填集料、胶凝材料、水以及改善充填料浆性能的外加剂混合制备而成,其中充填集料是充填体中起填充和骨架作用的惰性材料。集料的种类繁多,通常选用的是矿山实际赋存或能够以低成本就近获取的固体废弃物,如选矿厂各类选尾矿(如金属尾矿、磷尾矿等)、矿物加工过程中产生的废弃物(如磷石膏、赤泥及锰渣等)、破碎废石、冶炼渣、粉煤灰、棒磨砂、河沙或江沙等,集料级配及质

量不仅对充填料浆的拌合质量有显著影响,而且对充填体强度影响也很大。

级配良好、集料均匀系数合理、质地坚硬的集料能增大胶结体的密实性和强度。一般来说粗集料在集料中的比例应达到 60% ~ 70%,且粗集料富有棱角、表面粗糙时,能显著增强与水泥浆的粘结力,从而提升整体的强度;反之亦然。

细集料掺和比例应达到 30% ~ 40%,细集料能改善砂浆的输送性能,可防止离析现象的发生,最重要的是,细集料能够填充到粗集料之间的空隙中,从而增强胶结体的强度。

3 常用充填搅拌设备

3.1 立式单轴高浓度搅拌机

立式高浓度搅拌机(又称高浓度活化搅拌机)是一种高速搅拌设备,如图 1 所示,其转速可达 160 ~ 220 转/min。该型设备在单搅拌轴上设置了 2 组旋转方向相反的螺旋叶片,一方面,通过叶轮的高速旋转,形成径向不同流速的梯级流场,对料浆进行旋转剪切;另一方面,这 2 组反向旋转的螺旋叶片使得料浆在上下方向上翻腾混合。通过这 2 种作用,对加入其内的比表面积大的细粒级材料如尾砂和粉煤灰等、粉状胶凝材料及调浓水进行搅拌,使团聚状的集料及胶凝材料剪切、分散和充分水化,从而促进胶凝材料对细粒级材料的包裹作用,确保胶凝材料的有效利用和胶结作用的充分发挥。

大量实践应用已充分验证,经立式高浓度搅拌机制备出的充填料浆中集料混合均匀、胶凝材料分散度高、流动性好,充填体抗压强度明显提高。相同灰砂比 1:4 时的强度值可提高 1.3 ~ 1.8 倍。同时,在达到相同抗压强度的前提下,水泥的使用量可以减少 30% 以上。立式高浓度搅拌机的应用,不仅推动了高浓度全尾砂胶结充填技术的进一步发展,还为矿山带来了显著的经济效益。

立式高浓度搅拌机适用于以细粒级原材料如全尾砂浆、全尾滤饼、粉煤灰、水泥为充填材料的高浓度充填料浆连续搅拌制备。

3.2 连续型卧式双轴搅拌机

二级卧式双轴搅拌机是借鉴混凝土搅拌设备经改进后,适应早期分尾砂胶结充填的一种搅拌设备组合。该设备由 2 组相对独立的卧式双轴搅拌机组合而成,其中一段搅拌机的出料口与二段搅拌机的

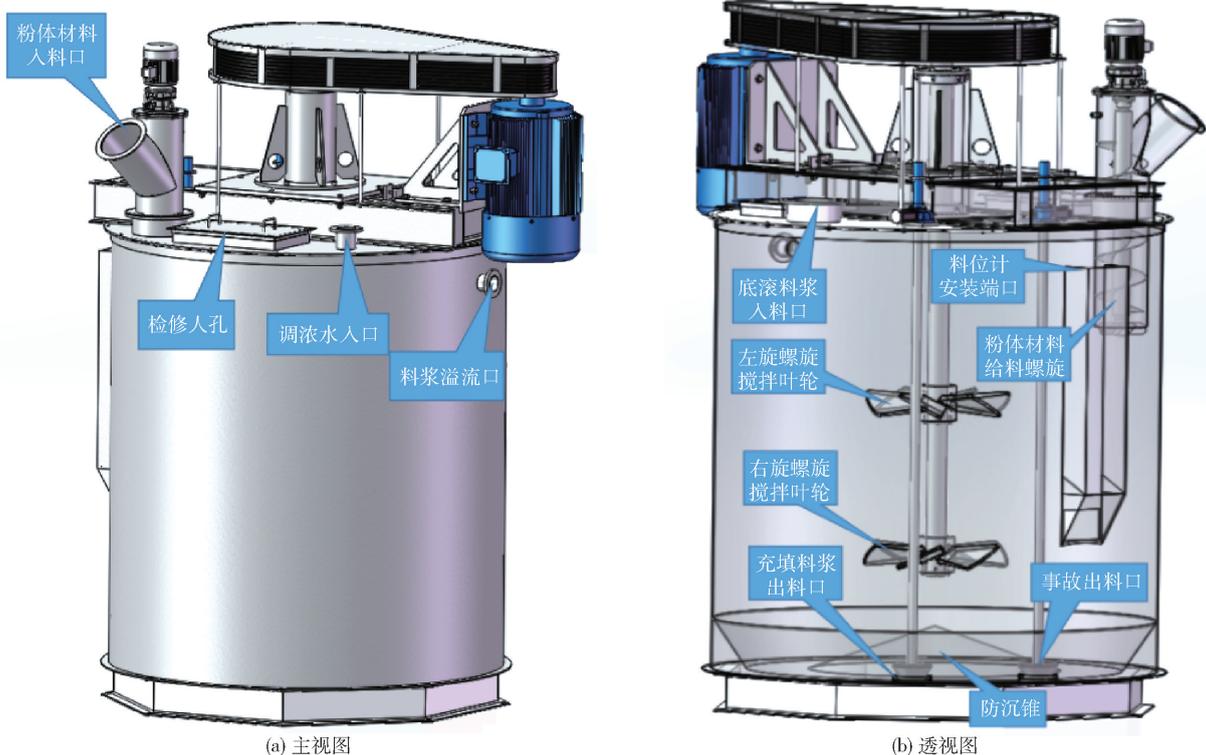


图 1 立式高浓度搅拌机示意

Fig. 1 Schematic diagram of vertical High-Concentration mixer

入料口相连通(图 2),实现了连续的进出料流程。卧式双轴搅拌机的设计旨在确保搅拌过程的连续性和高效性。

一段搅拌机搅拌轴设有 2 组旋转方向相反的桨叶形叶片,其主要作用是强力打散、混合与推送。在工作过程中,其桨叶不仅能够将沉积于槽底的物料翻扬并打散,而且由于 2 组桨叶轴反向旋转形成水激混合效应并向出料端推送;二段搅拌机的搅拌轴设有 2 组并列的螺旋轴,每根轴上装有 1 大(外螺旋)1 小(内螺旋)双层螺旋带型叶片,其旋转方向相反。在工作时,外螺旋将物料向出料端推进,而内螺旋则反向使其内部物料向后运动,依靠 2 层旋转方

向相反的螺带形成迂回的流场,从而强化搅拌槽内物料的搅拌混合,进一步对料浆的微小团聚实施剪切破碎和混合。

卧式双轴搅拌机的搅拌轴采用了两端轴承座支承和密封结构,其两轴端的旋转副和密封副因料浆容易进入,以及旋转时轴的挠曲变形而很容易快速损坏而发生轴端磨损、漏浆和轴承受交变载荷作用而破坏,为减缓卧式长轴的重力挠曲变形,设计时降低了其转速,通常控制在约 60 转/min,以确保设备的稳定运行与长久耐用。

这种设备组合能够适应各种集料构成的充填料浆的搅拌制备需求。然而,由于其转速相对较低,可

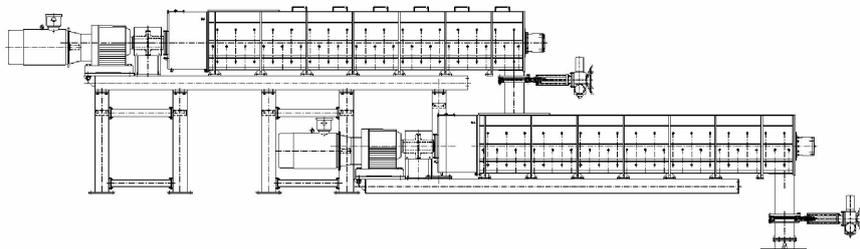


图 2 两级卧式搅拌机配置

Fig. 2 Configuration of Two-stage horizontal mixer

能在胶凝材料的活化和分散效果上存在不足,因此更适用于处理分级尾砂和含有碎石等比表面积较小的粗集料充填料浆制备。

对于仅有细粒级集料的充填料浆搅拌,该组合设备存在一些不足之处:由于其结构较为复杂,导致制造成本较高;占地面积较大,可能对空间布局造成限制;此外,旋转密封部件容易因磨损而失效,这不仅增加了维护难度,也提高了维护成本。因此,在处理此类单一细粒级集料时,需综合考虑其经济效益与实用性。

3.3 间歇式卧式双轴搅拌机

间歇式卧式双轴搅拌机是混凝土制备行业应用较普遍的搅拌设备。该设备采用上端口进料、底部开关门出料的间歇式搅拌方式。采用该型设备对充填集料实施搅拌制备,尽管其动力强劲,但由于搅拌速度低且搅拌时间短,难以使胶凝材料充分打散和弥散;此外,由于搅拌过程是间歇性的,导致无效工作时间较长,难以满足矿山充填工程中高达 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的大充填量料浆制备需求。

由于搅拌的间歇性,该设备在出料口下端必须配备缓存料槽或连接二级连续搅拌装置。鉴于这些局限性,这种设备在矿山充填工程领域已逐渐被新型设备所取代。然而,由于其结构紧凑,在一些中试实验室仍在使用的。

4 活化搅拌工艺及设备

均化搅拌实现了物料的充分均质,使得颗粒表面被水膜所覆盖,从而提高料浆流动性;活化搅拌是在均化的基础上,利用更高的搅拌速率,打破颗粒之间的水膜及水化产物包裹作用下形成的力链,揭露出颗粒新鲜面,从而改善料浆输送及力学性能。

4.1 活化搅拌技术原理

随着采矿和选矿技术的不断进步,以全尾砂为主要集料的高浓度充填已经成为主流充填工艺方式。全尾砂的浓缩脱水通常采用较为简便、成本较低的絮凝沉降方式。在全尾砂絮凝沉降工艺中,常在进料时添加聚丙烯酰胺等絮凝剂,以在尾砂浆中形成絮状结构。全尾砂浆进入搅拌机并与水泥混合时,絮凝剂的作用导致大量水泥絮凝状结构的形成,又大量形成水泥的絮凝状结构,生产的水化产物以膜的形式覆盖在絮团表面,减弱了水泥的水化速率,从而制约了充填体强度的提升。同时,料浆中水泥等细物料成分絮凝团聚体的形成,包裹了大量拌合

水,从而严重制约了充填料浆浓度的提高,也影响了料浆的输送性能^[8]。

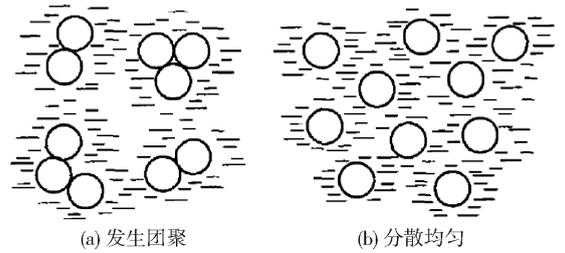


图3 水泥颗粒分布情况

Fig.3 Distribution of cement particles

强力活化搅拌对料浆施加了显著的剪切力和冲击力,当这些力超过絮凝团聚体内部分子间的凝聚力时,能够剪断或破坏部分絮凝结构,释放出被包裹的游离水。这一过程有效提升了料浆的输送性能。

以上细颗粒材料组成的充填料浆,是一种具有触变性能的体系,在振动、强力搅拌等机械作用下,当作用于颗粒的机械冲击力超过颗粒之间的内聚力时,混合料的颗粒便失去赖以组成统一介质的水膜。此时,其固体分散体系液化成溶胶体,具有近似牛顿流体的性态。此时,混合料的微粒处于活跃的似布朗运动状态,胶结料微粒则由于物理化学作用而分布在胶结料中,确保了混合的均匀性。此外,当水泥微粒相互碰撞时,会从表面脱落一些水合物和再结晶产物,从而暴露出新表面并又产生水合作用,这也加速了水泥颗粒的分散。分散体系的这种触变稀释性能,即剪切稀化性,揭示了尾砂胶结充填料浆可以制备成含水量少、流动性高、混合均匀的充填料浆。

以上原理表明,活化搅拌是实现胶凝材料与充填集料充分水化、包裹,使其充分发挥其胶结作用,制备成高质量充填料浆的必要工艺过程和手段。

4.2 活化搅拌设备

根据活化搅拌的原理,实现活化搅拌需通过高速旋转的转子施加强力剪切作用,以冲击絮凝团聚体并实现剪切稀化,减小颗粒之间的黏着力,增强水泥颗粒的破裂和水化作用,从而增强充填体的强度。活化搅拌过程要求设备具有大功率、高转速、高剪切等功能特点,以进一步增强胶凝材料弥散效果。为了保证料浆在设备中的搅拌时间足够,以实现最佳效果,搅拌停留时间应不小于 5 min 。

常见活化搅拌设备有2种类型:①强力活化搅拌机;②立式高浓度搅拌机(图1)。

1) 强力活化搅拌机^[9]。强力活化搅拌机适用于经初步混合的充填料浆,也就是充填料浆的制备需要配置两级搅拌(搅拌机初步混合+强力活化搅拌机)方式,这使得搅拌工艺变得复杂。此外,强力活化搅拌机转速高达1 000转/min,其工作过程中,尾矿颗粒会对转子和机壳产生极强的磨蚀性磨损,使得其转子使用寿命不长,易损件更换程序复杂,其稳定性、耐用性受到严重的制约。强力活化搅拌机的工作只适用于以细粒级集料为主要充填料的充填工艺,不能掺杂粗集料,需严格避免粗颗粒物的进入,以免造成转子和机壳损坏。由于这些原理和结构上的特性,使得其应用受到一定的限制。

2) 立式单轴高浓度搅拌机^[7]。立式单轴高浓度搅拌机由于其所具有的容积大、转速适中、对偶入的较大颗粒物料不敏感以及驱动及密封部分与料浆不接触等结构特点,作为活化搅拌设备具有明显优势:①对物料的适应性较广,高浓度尾砂浆、滤饼、粉体掺加料及胶凝材料都可直接进入;②集混合与活化搅拌于一体,有效缩短了搅拌工艺流程,简化了工艺配置;③对粗颗粒的不敏感性减少了对设备的损害风险;④由于驱动和密封部件位于设备上部,从而提高了设备的可靠性和稳定性。基于这些结构和性能特点,立式高浓度搅拌机在充填工程中得到了广泛的应用。

在立式高浓度搅拌机中,高速旋转的叶轮产生强大的作用力,使得絮凝团聚体破裂,水与固体颗粒的黏着性降低,这不仅减小颗粒之间的黏着力,还促使水泥颗粒集团破裂,从而强化了水泥的水化作用。这些变化改善了料浆的流动性和强度特性,使得其胶结作用得到充分发挥,实现了活化搅拌的目的。

经过立式高浓度搅拌机的高速活化搅拌工艺处理后,充填料浆的搅拌效果显著优于一般低速搅拌方法:试验结果表明,充填料浆经过高速活化搅拌后,充填料试块的抗压强度均有不同程度的提高;以塌落度为流动性衡量标准,流动性提高了5%以上;对于细粒级集料料浆(如尾砂),在质量浓度为70%~72%时,采用活化搅拌技术制备出的充填料展现出宾汉流体特性,其形状类似牙膏,含水量少,采场脱水量少。充填到采场的充填料无需平场,且表面光滑平整,充填体强度高,水泥耗量降低,单位体积水泥耗量降低20%~30%^[10]。

5 保证充填体强度的设备配置措施

在充填料浆的搅拌过程中,料浆的运动状况较

为复杂,在宏观上表现为对流运动、在微观上表现为扩散运动和剪切运动^[2],而不同的搅拌设备结构则会使料浆产生不同的运动方式。根据构成充填料浆的各种材料的不同性质,选择适用的搅拌设备以及组合不同类型的搅拌装置,能够显著提升搅拌效率与效果。

尾砂是矿山选矿后必然产生的剩余物,因其粒径小,具有较大的比表面积,因而存在脱水难度大及工程应用性能不佳的问题。根据尾砂的脱水浓缩制备工艺方法不同,脱水浓缩工艺总体分为机械脱水(压滤和过滤等)和絮凝浓缩两大类。当尾砂作为充填材料时,采用不同的脱水技术会得到物理形态迥异的产物,机械脱水法产出的是含水率较低的滤饼状物质,而絮凝浓缩法则生成高浓度的料浆形态。

充填工程搅拌设备的选型时,需综合考虑以下几方面:①要考虑搅拌处理能力,②考虑适应充填集料的结构型式及配置方式;③要考虑搅拌时间、搅拌轴转速、搅拌叶轮直径和搅拌桨叶结构等诸多因素对料浆搅拌质量的影响,使配置的搅拌工艺及设备达到简约高效和胶凝材料分散度高的效果。

搅拌设备的处理能力取决于搅拌设备对充填料浆的搅拌时间和配置功率,而对充填料浆的搅拌时间则取决于搅拌设备的有效容积。具体而言:①单级高效活化搅拌。在充填料浆搅拌制备过程中,对于只有细粒级材料(如全尾砂、赤泥等)充作集料的充填料,一般只需采用一段高速活化搅拌设备就可以制备成合格的充填料浆。②“高效活化+低速混合”组合搅拌^[11]。对于掺有大粒径碎石做集料的充填料浆搅拌,为了最大化利用两种设备的结构优势,同时规避各自的局限性,采用“高效活化+低速混合”组合搅拌技术,即立式高浓度搅拌机与低速双轴搅拌机配套使用,能起到更好的搅拌效果。

组合搅拌工艺,首先,将细粒级集料及胶凝材料在立式高浓度搅拌机中,进行高速活化搅拌,使得胶凝材料充分弥散,制备成初级料浆;然后,将初级料浆和粗粒级集料同时加入到次级卧式双轴搅拌机中进一步混合搅拌,制备成混合均质的充填料浆。该组合搅拌的技术特点是:初级搅拌根据细粒级物料比表面积较大和磨蚀性较小的物性特点,采用高速活化搅拌设备制备初级料浆。这种高速搅拌适应细粒级物料磨蚀性较小的特点,可以有效保证设备的稳定性和可靠性以及叶轮寿命;二级搅拌所采用的低速卧式搅拌设备适用于碎石等大粒径、磨蚀性较

强和比表面积较小的物性特点,能够使得初级料浆与粗集料的充分融合,最终形成均质的充填料浆。

需要特别指出的是,采用该组合的次级卧式双轴搅拌机宜采用双螺带型,双螺带型搅拌机所形成的迴转流场更有利于拌合质量的保证。根据矿山的实际需要,还可通过设置三通换向阀在该系统设置旁支管路。当仅采用细粒级集料和胶凝材料制备充填料浆时,可单独启用高效活化搅拌段;当掺有粗集料时,可采用“高效活化+低速混合”组合搅拌。这样的配置,极大地增强了充填料浆制备工艺系统的适应性和灵活性。

6 搅拌效果的评价研究

文献^[13]列出了影响混凝土搅拌效果的四类主要因素,即物料的流动状态(可采用塌落度衡量)、材料的物性(料浆的黏性、扩散度、集料的颗粒级配等)、操作条件(搅拌机型式、转速、处理量)和几何因素(连续型或间歇型)。

如果确定了充填料浆的构成组分等相关要素后,料浆的搅拌效果受搅拌时间、搅拌轴转速、搅拌叶轮直径、搅拌桨叶结构以及搅拌设备的配置等多种因素的影响。因此,对这些影响因素的试验研究,以确定最佳结构和配置,这对于降低充填成本和确保充填体强度具有重要意义。

胶凝材料的分散度是衡量料浆搅拌效果、影响充填体强度的重要技术指标,但目前尚未见有文献详细阐述如何评价胶凝材料的分散度。除了建立相关模型进行数值模拟和分析计算外,可行的试验方法是在保持其他相关参数不变的情况下,改变某一影响因素的结构参数,对料浆实施搅拌试验,通过测定充填体的强度数值来进行评价。

1) 搅拌时间对搅拌效果的影响^[21]。在搅拌过程中,由于叶片的转动而使物料颗粒之间产生相对运动,这种相对运动的强度越大,持续时间越长,混合的效果越佳。多个实际工程案例表明,以全尾砂为集料的充填料浆,搅拌时间在5 min左右,掺加的水泥就可得到充分分散,从而得到较为理想的固化强度。

如果料浆流量为 $Q(\text{m}^3/\text{h})$,搅拌设备有效容积为 $V(\text{m}^3)$,则料浆在搅拌槽中搅拌滞留时间 $T=60V/Q(\text{min})$ 。已知工程设计的工艺技术指标,根据该公式可选定搅拌设备的有效容积,进而确定其他相关参数。

2) 搅拌轴转速对搅拌效果的影响^[2]。搅拌轴转速的高低对料浆流场的影响是显而易见的,较高的转速会使梯级流场的剪切速率加大,从而有效促进粉体材料的分散效果。然而,搅拌轴转速对粉体材料分散存在一个最佳峰值,过高的转速不但会消耗更大的驱动功率,而且对粉体材料的进一步分散并无益处。因此,开展搅拌轴转速对料浆流场的影响以及搅拌效果的研究,对于优化设计和配置搅拌设备具有重要意义。开展关于搅拌轴转速对料浆流场影诸多的工程实践表明,对于以全尾砂为集料的充填料浆,将立式单轴高浓度搅拌机的轴转速区间设定在160~220 r/min是较为合理的选择。然而,确定最合理的转速区间尚有待于进一步试验研究。

3) 搅拌叶轮结构对搅拌效果的影响^[2]。搅拌叶轮的结构型式很多,即便相同结构型式叶轮的结构参数也存在较大差异。目前工程多采用螺旋推进式浆叶或螺带型结构作为充填料浆搅拌机叶轮。然而,由于螺带型结构制造工艺复杂,且不适用对以磨砾性较强的选尾矿作为主要介质工况下的高浓度高速搅拌。相比之下,螺旋推进式浆叶则因其具有制造工艺简单、易更换和价格低廉的特点,成为首选结构。因此,研究螺旋推进式浆叶螺旋角、叶片数量、直径等诸多关联参数,优化叶轮结构和参数,对于确保搅拌质量并降低运行功耗具有较大的实际工程意义。搅拌机的叶轮直径对搅拌效果具有显著影响。根据工程实践,一般立式搅拌机叶轮的直径为筒体内径的1/3左右为宜。然而,确定最佳的叶轮直径还需通过进一步的试验和研究来明确。

4) 外加剂对搅拌效果的影响。文献对在充填料浆中添加外加剂(通常为减水剂)做了试验研究^[15-16]。研究结果表明,在充填料浆搅拌过程中掺加适量的外加剂,可以在浓度不变的前提下,显著降低料浆的稠度(或增加塌落度),从而增强料浆的流动性。这对于降低搅拌功耗、降低管输沿程阻力和泵压功耗以及增强充填采场的料浆流平摊开度具有重要的工程意义。

7 结语

采取上述措施后,充填料浆制备工艺系统的适应性与灵活性得以显著增强,进而为矿山采空区充填体提供了充分的强度保障。同时,生产环节的简化不仅提升了矿山的安性能,还优化了经济效益,并有效改善了井下作业环境。然而,为确保充填后

采空区的稳定性和持续性,仍需结合矿山具体情况,因地制宜地持续优化充填工艺与设备配置,以确保充填效果的长期稳定与安全。

[参考文献]

- [1] 周爱民. 矿山废料胶结充填[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [2] 吴爱祥. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [3] 宋泽普,郑伯坤,黄腾龙,等. 充填料浆活化搅拌因素研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(12):48-51.
- [4] 吴凡,韩斌,胡亚飞,等. 膏体充填料浆管输摩阻损失计算及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报,2021,38(6):1158-1166.
- [5] 姚维信. 高浓度大流量管输充填技术与工艺[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [6] 李守强,郭利杰,郑旭,等. 膏体充填料浆管道自流输送分析及管线布置[J]. 中国矿业,2021,30(8):149-153.
- [7] 吴学民. 一种立式搅拌设备:212215369[P]. 2020-12.
- [8] 杨建桥,黄德镛. 矿用充填料搅拌机研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊,2011(5):61-63.
- [9] 熊有为,刘福春,刘恩彦,等. 基于DEM-SPH耦合的高浓度充填料浆搅拌仿真[J]. 矿业研究与开发,2022,42(1):162-167.
- [10] 杨培培,姚心,谢盛青,等. 基于ANSYS二次开发的尾矿充填输送仿真研究[J]. 有色设备,2020,34(4):16-19.
- [11] 吴学民. 一种适用于多种充填集料的矿山充填料浆制备系统:216941268[P]. 2022-07.
- [12] 寇云鹏,郑伯坤,栾黎明,等. 充填料浆搅拌机的桨叶研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(1):179-184.
- [13] 陈志平. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [14] 邵思维,徐巍,谷龙飞,等. 基于某铜矿的智能充填生产信息管理系统解决方案[J]. 有色设备,2021,35(2):82-86.
- [15] 郑娟荣,吕杉杉. 减水剂对全尾砂胶结膏体充填料浆中粉状组成分散程度的影响试验[J]. 有色金属(矿山部分),2014,66(5):69-73.
- [16] 杨柳华,王洪江,吴爱祥,等. 全尾砂膏体搅拌技术现状及发展趋势[J]. 金属矿山,2016(7):34-41.

Application of mine filling slurry mixing technology and equipment selection

TIAN Xiaoping¹, WU Xuemin¹, LIU Weitao^{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: In the process of mine filling and mining operations, the strength of the filling body in the goaf is directly related to the safety, stability, and economic efficiency of the mine. In response to the current issue where the strength of the filling body in filling engineering fails to meet design requirements, this paper conducts an in-depth analysis of the working characteristics of commonly used filling slurry mixing equipment and systematically investigates the types and composition ratios of different filling aggregates. Based on this, an innovative “high-efficiency activation + low-speed mixing” combined slurry mixing process is proposed. This process formulates corresponding mixing methods for filling slurries composed of different aggregates, significantly enhancing the adaptability and flexibility of the slurry preparation system. The research findings provide an effective technical approach for improving the strength of the filling body, ensuring the safety and economic efficiency of the mine, and hold high reference value for the industry.

Keywords: filling mining; filling strength; ratio and curing; filling slurry mixing; high-efficiency activation + low-speed mixing; mixing quality ▲