

从动力学与流变学视角分析砂磨机中研磨介质的运动机制

滕毅

(广东科睿实业有限公司, 广东 顺德 528300)

摘要: 本文深入探讨了砂磨机中介质在不同流体环境下的运动机制。从经典动力学与流变学的双重视角, 分析了不同类型流体的流变行为如何通过流体阻力影响介质的动能、动量和冲量。同时, 阐明了主轴转速、介质(粒径、密度及装填率)等关键操作参数对研磨效率和效果的影响。此外, 引入流固耦合理论框架, 深入解释了涂料与介质之间的复杂相互作用。旨在从动力学本质上解释砂磨机的研磨机制, 为优化砂磨工艺、推动智能化砂磨机发展提供理论指导。

关键词: 介质; 动力学; 流变学; 动能; 动量; 冲量

中图分类号: TQ630.5+6 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)09-0043-04

Analysis of Grinding Media Motion Mechanisms in Bead Mills from the Perspective of Dynamics and Rheology

TENG Yi

(Guangdong Kerui Industrial Co., Ltd., Shunde 528300, Guangdong, China)

Abstract: This paper provides an in-depth discussion on the motion mechanisms of grinding media in bead mills under different fluid environments. From the dual perspectives of classical dynamics and rheology, it analyzes how the rheological behavior of different types of fluids affects the kinetic energy, momentum and impulse of grinding media through fluid resistance. Meanwhile, the effects of key operating parameters such as spindle speed and grinding media (particle size, density and loading ratio) on grinding efficiency and effectiveness are elucidated. In addition, the theoretical framework of fluid-solid coupling is introduced to explain in depth the complex interactions between coatings and grinding media. The aim of this paper is to explain the grinding mechanism of bead mill from the essence of dynamics, and to provide theoretical guidance for optimizing the grinding process and promoting the development of intelligent bead mill.

Key words: grinding media; dynamics; rheology; kinetic energy; momentum; impulse

0 引言

砂磨机自 20 世纪 50 年代问世以来, 已广泛应用于涂料领域, 是颜填料分散的关键设备。长期以来, 砂磨工艺优化多依赖经验, 现有研究多聚焦于设备结构改进、驱动与自动化控制系统, 对研磨过程中介质在复杂流体中的受力与运动行为的研究尚显不足。

为此, 本文构建了以动能、动量与冲量为核心的动力学框架, 结合典型涂料的流变特征, 分析介质在不同流体中的动力学特征及其对研磨效率的影响。有助于从动力学视角理解砂磨机的工作原理, 还为砂磨机设计和砂磨工艺优化提供了思路。

1 研磨介质的动力学基础

介质在砂磨机内部的运动是一个复杂的流固两相流动过程。在高速旋转的搅拌装置驱动下, 介质(如氧化铁珠)彼此之间, 以及介质与被研磨涂料中的液体和固体物料之间均存在频繁且复杂的相互作用。理解这

收稿日期: 2025-07-16

作者简介: 滕毅(1978—), 男, 本科, 主要从事涂料生产工艺研究工作。E-mail: millbase@hotmail.com。

一过程的本质,需要从经典动力学的基本概念入手。

1.1 动能(E_k)

动能是衡量运动物体所携带能量的物理量,它与物体的质量和速度平方成正比。动能的计算公式为: $E_k=1/2\cdot mv^2$,其中, m 为质量, v 为瞬时速度。在研磨过程中,介质的动能决定了其在碰撞时对颜填料颗粒的冲击破碎能力,动能的大小与冲击力的强度成正比。

1.2 动量(p)

动量是衡量物体运动状态的量度,定义为物体质量与其速度的矢量积。动量的计算公式为: $p=mv$,其中, m 为质量, v 为瞬时速度,动量是矢量,其方向与速度方向一致。在砂磨机内部,介质动量的变化是研究其受力情况(冲量)的基础。若无外力作用,动量守恒,对于分析能量传递效率至关重要。

1.3 冲量(J)

冲量是指力在一段时间内对物体动量变化的累积效应,冲量的计算公式为: $J=F\cdot\Delta t$,其中, F 为作用在介质上的平均力, Δt 为力的作用时间。冲量等于动量的变化,即 $J=\Delta p=m\cdot\Delta v$,因此,冲量也是一个矢量,其方向与速度的方向一致。冲量代表了介质在碰撞或剪切作用下的累积效应,它直接影响介质对颜填料颗粒的破碎效果。较高的冲量意味着介质对颜填料颗粒施加了更大的力或更长的作用时间。

2 研磨介质的工作机制

砂磨工艺本质上是一个解聚过程不是破碎过程,所以产品的理论细度只能无限接近涂料中使用的颜填料颗粒中粒径最大的某种粉料的初级粒子粒径,介质对颜填料聚集体的解聚,是其复杂运动过程中多种微观作用累积的结果,这些作用主要归结为碰撞和剪切解聚两种机制,二者在不同流体环境和工艺参数下,其贡献比重有所不同,理解这两种机制及其与介质动力学量的关联,是优化砂磨工艺的关键。

2.1 碰撞解聚

碰撞解聚是指介质以高速撞击颜填料聚集体,通过瞬时动能传递在聚集体内部诱发应力集中,使颗粒间内聚力迅速削弱,促使聚集体解体。介质所携带的动能是驱动有效解聚的能量来源。介质速度越高,动能越大,单次碰撞可释放更强冲击力,显著增强解聚与细化效果。在碰撞过程中,介质与聚集体间的动量交换遵循动量守恒定律,而部分动能转化为热能等非机械能,导致能量耗散。

高密度介质因质量大、惯性强,即便在较低速度下也能产生较高动量,表现出更强冲击能力,适用于破碎大尺寸团聚体或处理高固含、高黏度体系,有效解聚依赖于瞬时冲量的积累,即介质在极短接触时间内释放

的动量。根据经典力学,冲量由 $J=\Delta p$ 决定,在碰撞过程中表现为有限时间内的冲击力 $F=J/\Delta t$ 。当冲量一定时,接触时间越短,冲击力峰值越高,更易在局部形成应力集中,使聚集体内聚力被突破,从而实现解聚。可见,介质在碰撞瞬间产生的冲击力,是实现有效解聚的关键动力学因素之一。

2.2 剪切解聚

剪切解聚发生在介质在研磨腔内被搅拌装置高速驱动时。介质与搅拌器、研磨腔壁以及介质之间,产生剧烈且复杂的相对运动。正是这种相对运动,驱动了其间流体形成极高的剪切速率,从而在流体内部产生了强大的黏性剪切应力。这些剪切应力直接作用于颜填料聚集体,是促使其逐步解体并最终实现均匀分散的核心机制。

在剪切解聚过程中,流体黏性扮演着至关重要的角色,它就像一座能量传递的桥梁。搅拌装置输入的机械能,首先通过流体的黏性剪切作用传递给高速运动的介质。随后,介质的复杂运动在流体中持续制造出高强度剪切应力场。这些高剪切应力精准地作用在悬浮的颜填料颗粒聚集体上,反复“撕扯”或“剥离”,不断削弱聚集体内部颗粒间的内聚力,从而将其逐步解聚成更小的聚集体。

剪切速率是影响剪切解聚效率的核心参数。剪切速率越高,聚集体所承受的局部剪切应力就越大,解聚效果也越显著。值得注意的是,不同于碰撞解聚那种通过高速冲击瞬间释放高能量的作用,剪切解聚更依赖于剪切应力的持续累积和反复作用。它是一种“温和而持久”的机制,通过不断施加剪切应力来削弱颗粒间的内聚力,促使聚集体渐进性地解体成更小的聚集体。

3 涂料的流变特性

流变学作为研究物质在应力作用下变形与流动行为的科学,为揭示介质在不同体系中所受阻力特征及其动态响应提供了理论基础。准确识别涂料类型及其响应规律,有助于构建适配的动力学模型,为理解研磨过程中的能量转化与介质行为预测提供理论支撑。

3.1 流变学基本概念

剪切应力 $\tau=F/A$,其中, F 为切向力, A 为受力面积。剪切应力是作用在流体单位面积上的切向力,通常由搅拌装置对流体施加的剪切力产生。在砂磨机中,搅拌装置的旋转运动以及介质与流体之间的相对运动都会产生剪切应力。

剪切速率 $\dot{\gamma}=dv_x/dy$,其中, dv_x 为相邻流体层之间的速度差, dy 为层间距离。剪切速率是流体层间相对运动速度的梯度,衡量了流体受剪切形变的快慢。在砂磨机中,搅拌装置的高速旋转会在研磨腔内产生极高的

剪切速率,尤其是在搅拌装置边缘和介质间隙中。

动力学黏度 $\eta = \tau / \dot{\gamma}$, 定义为剪切应力与剪切速率的比值, 动力学黏度是流体抵抗流动的内部摩擦力的量度。

雷诺数 $R_e = \rho v L / \eta$, 其中, ρ 为流体密度, v 为流体流速, L 为特征长度, η 为流体动力学黏度, 雷诺数是一个描述流体流动状态的无量纲数, 用于衡量流体惯性力与黏性力之间的相对大小。

3.2 涂料的流变特性分析

从流变学视角, 流体分为牛顿流体和非牛顿流体, 其黏度和剪切速率之间存在 3 种关系, 见图 1; 按照剪切应力-剪切速率的关系, 流体可划分为五类: 牛顿、假塑性、膨胀性、触变性和宾汉塑性流体, 见图 2。

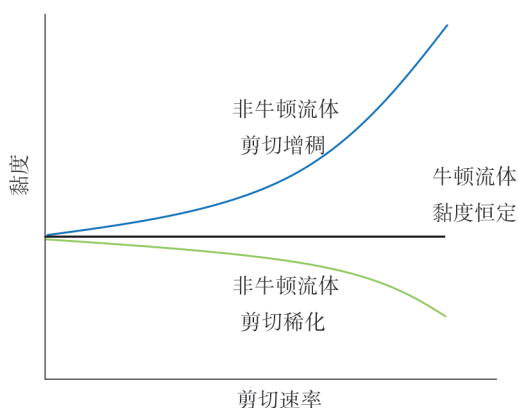


图1 黏度和剪切速率的关系

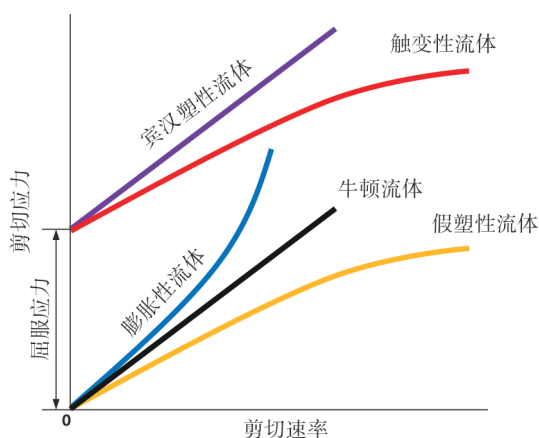


图2 剪切应力-剪切速率的关系

不同类型涂料的流变行为对介质具有不同影响, 主要表现在动能传递路径、碰撞机制及整体研磨效率的变化。

牛顿流体的黏度在不同剪切速率下保持恒定, 其阻力响应稳定且可预测。当主轴转速升高时, 剪切速率与流体黏性阻力同步提升, 介质所受的阻力反馈线性

可控, 动力学响应更趋于理想模型。

假塑性流体在高剪切速率下黏度显著下降, 有利于介质以较小阻力进入高剪切区, 保持更高的速度, 由于其黏度变化呈剪切稀化趋势, 可促使剪切力集中于颜填料颗粒团聚区域, 从而增强解聚效果, 是大多数涂料的主要流变特征。

膨胀性流体在剪切过程中黏度随速率升高而上升, 阻力反馈增强, 介质运动易被限制, 导致动能损耗加剧, 降低了其在实际研磨中的适用性。

触变性流体则呈现明显的时间相关性, 剪切作用下结构被逐步破坏, 黏度下降; 当剪切终止后, 结构随时间部分或完全恢复, 这一滞后性使介质运动具有“路径记忆”与“恢复障碍”, 尤其在中低剪切区形成颜填料颗粒堆积或短时非流动区域, 从而影响局部剪切均匀性。

宾汉塑性流体具有屈服应力阈值, 外加剪切应力超过此阈值后体系方能流动, 这类流体会对介质的初始启动行为造成显著阻滞, 尤其在充填率较高或转速偏低的条件下, 容易造成介质局部的结构化滞留, 从而显著降低有效剪切频率。

3.3 研磨介质所受流体阻力

3.3.1 黏性阻力

当介质在流体中以较低速度运动时, 流体流动通常呈层流状态, 此时介质主要受到黏性阻力。对于球形颜填料颗粒, 经典的斯托克斯定律(Stokes' Law)描述了其所受的黏性阻力: $F_{vis} = 6\pi\mu rv$, 其中, μ 为流体的动力学黏度, r 为介质的半径, v 为介质相对于流体的速度。斯托克斯定律适用于雷诺数较低的层流区域。尽管砂磨机内局部剪切速率很高, 且存在介质紧密堆积和高速运动的复杂多相流环境, 斯托克斯流动可能受限, 但它仍是理解黏性阻力的基础。

3.3.2 惯性阻力

值得注意的是, 在实际砂磨中, 介质运动的雷诺数通常较高, 当介质在流体中以较高速度运动, 或所处流体密度较大时, 流体流动可能由层流过渡至湍流, 此时, 流体的惯性效应增强, 介质将主要受到流体因绕流和压差所产生的惯性阻力。

这类阻力并非源自介质本身的惯性, 而是流体在高速绕流过程中因流线分离形成低压尾流区所致。惯性阻力通常用以下公式表示: $F_{inert} = Y_2 \cdot C_d \rho A v^2$, 其中, C_d 为阻力系数(取决于介质形状和雷诺数), ρ 为流体密度, v 为介质相对于流体的速度, A 为介质的迎流面积(对于球形介质, $A = \pi r^2$)。惯性阻力通常在雷诺数较高时占主导地位, 但在砂磨机这种高速、高剪切的环境中, 黏性阻力与惯性阻力往往是并存且相互影响的。

4 砂磨机变量对研磨介质动力学状态的影响

在研磨过程中,介质的动力学状态一方面受到搅拌装置结构与涂料流变特性等不可调节因素的影响,另一方面会受到砂磨机变量的影响,这些变量在很大程度上决定了介质的动能和动量水平,进而影响研磨的最终效果和效率。

4.1 主轴转速

主轴转速是砂磨机的核心参数,直接决定介质的动力学表现。随着主轴转速的提高,介质获得更高速度,其动能与动量同步增强。更高的动量有助于介质克服流体阻力,进而产生更大的冲量,在单位时间内形成更强的冲击力,有效提升研磨效率并缩短研磨时间。

然而,主轴转速的提升也伴随着负面影响,特别是膨胀性流体,流体阻力随转速升高非线性增长,导致系统能耗显著上升,介质对设备的剧烈冲击加速其磨损。此外,在低黏度体系中,过高转速还会导致介质在离心力作用下被甩向腔壁,紧贴外沿失去有效运动,无法参与碰撞和剪切,形成“死区”;同时,浆料沿腔体内壁形成高速环流,绕过介质分布区域,出现“短路”现象,导致介质动能无法有效传递给颜填料颗粒,能量利用率降低,研磨效率下降。

4.2 介质粒径

粒径是决定介质与颜填料颗粒接触及能量传递效率的关键参数之一,直接影响研磨效率和涂料最终可达到的最小细度。大粒径介质因单颗质量大,即使在相同速度下亦具备更高动能和动量,单次碰撞释放更多破碎能量,有利于高效破碎大颗粒,但其单位体积内数量少、间隙大,有效碰撞频率低和剪切区域稀疏;相比之下,小粒径介质虽然单颗动能有限,但数量多、间隙小,能提供高频碰撞和剪切区域密集,有助于颜填料颗粒的深度解聚。

介质粒径还显著影响其受流体作用力的表现。根据斯托克斯公式,粒径越小,所受黏性阻力越低,更易被流体牵引加速,在高剪切区响应迅速;然而在实际研磨过程中,研磨腔内涂料的雷诺数通常较高,流动状态已超出斯托克斯流范围,惯性阻力同样不可忽视,这可能导致小粒径介质在局部区域活跃度降低,使其向颜填料颗粒的动能传递效率下降。相反,粒径过大时,介质难以充分进入研磨区域,造成能量分布不均和局部研磨死角,降低整体研磨效果。

4.3 介质密度

介质密度直接影响其动能和动量水平。在相同转速与粒径条件下,高密度介质可携带更大动能与冲击动量,有助于提高初期解聚效率;然而,高密度介质也会显著改变腔内运动行为:在高转速下,高密度介质惯

性大,易在离心力作用下甩向腔壁,同样紧贴外沿失去有效运动,无法参与碰撞和剪切,形成“死区”;在低转速或流场扰动不足时,流体拖曳力难以克服介质自身重力,介质易沉降堆积于腔底或流动盲区,同样无法进入有效剪切区域,导致局部研磨效率下降,并可能引发物料分布不均。

相比之下,低密度介质运动灵活、响应迅速,更易进入复杂流动区域,有助于形成均匀剪切分布,但其动能有限,不适合高强度解聚工况。此外,高密度介质通常硬度较高,在高速撞击下易加剧设备磨损,增加维护成本。

4.4 介质装填率

介质装填率是指介质堆积体积与研磨腔体有效容积的比值,通常以百分数表示。该参数直接影响介质的自由运动空间、单位时间内的剪切与碰撞频率,以及介质动能传递效率。

装填率偏低,介质运动空间充足,理论上可获得较高速度,但碰撞和剪切频率显著下降,导致研磨效率不足;装填率升高,腔内介质数量增加,碰撞和剪切频率显著上升,研磨效率和效果提升;但是,当装填率过高时,介质运动空间被严重压缩,介质间的摩擦和无效碰撞明显增多,介质的整体运动速度显著降低,介质易产生堆积,形成致密的“介质床”,阻碍能量传递同时会引发局部发热量过高、设备磨损加剧、砂磨机搅拌轴卡死和筛网堵塞等重大工艺风险。

5 试验验证与理论支撑

A STROBEL 团队^[1]的研究成果为本文中关于介质运动机制和流变学影响的论点提供了佐证。其通过创新的单粒子探针技术,深入探究了介质的微观受力条件,利用分析特殊探针粒子的塑性变形来量化应力能量和应力数的分布。该研究清晰地揭示了介质在砂磨过程中所承受的力(包括应力强度和碰撞频率)呈现出明显的分布特征,这直接验证了本文关于介质在复杂流体中存在多样化相互作用模式的观点。

尤为重要的是,论文的试验结果明确指出了流体黏度对介质动力学行为的显著影响。研究发现,随着流体黏度的增加,介质之间的碰撞频率会降低,同时传递的应力能量也随之减少。这一现象可归因于高黏度流体对介质的黏性阻尼效应及其对粒子捕获效率的影响。这些发现有力地支持了本文关于流体黏性在调控介质动能、动量和冲量传递过程中扮演关键角色的论点,并印证了高黏度流体可能限制介质有效运动效率的观点。

综上,通过量化分析介质的应力分布及其受流体黏度的影响,为本文所构建的基于动(下转第 52 页)