

# 高灰难选煤泥微气泡浮选机理与过程强化研究

魏安奇

山东鲁泰控股集团有限公司鹿洼煤矿

DOI:10.32629/ems.v8i5.20219

**[摘要]** 随着采煤机械化程度的提高和重介选煤工艺的变革,高灰难选煤泥的比例显著增加,其分选已成为选煤领域的技术瓶颈。本文系统分析了高灰难选煤泥的矿物学特征及浮选难点,揭示了微气泡强化浮选的物理化学机理。研究表明,微气泡不仅能够提高微细粒与气泡的碰撞概率,还能通过体相纳米气泡强化捕收、表界面纳米气泡诱导液膜破裂等多重机制,显著改善高灰细泥的选择性分离。在此基础上,提出了基于能量输配的浮选过程调控策略及以“粗选-扫选”为代表的多段工艺优化方案。本文旨在为完善微细粒矿物浮选理论、开发高效柱式浮选技术提供理论依据和技术支撑。

**[关键词]** 高灰难选煤泥;微气泡浮选;纳米气泡;过程强化;机械夹带

## 一、引言

我国煤炭资源丰富,但禀赋条件复杂,随着采煤机械化程度的不断提高和重介选煤工艺的广泛应用,“粗颗粒重介分选+粗煤泥分选+细煤泥浮选”的三段式流程已成为主流工艺-1。这一变革导致入浮煤泥中高灰、微细粒和连生体比例显著增大,煤泥呈现“细、杂、贫、难”的典型特征。

高灰难选煤泥浮选面临的核心科学问题是:微细粒高灰矿物(尤其是-0.045mm粒级)的选择性分离困难。传统浮选方法在处理此类物料时,一方面由于微细粒质量小、动量低,与气泡碰撞概率极低;另一方面,高灰细泥比表面积大、表面能高,易通过机械夹带和细泥罩盖方式污染精煤产品-1。旋流微泡浮选柱虽在细粒分选中具有一定优势,但精煤灰分高、选择性差的问题仍未根本解决。

近年来,微气泡浮选技术被认为是突破微细粒分选瓶颈的重要方向-2。微纳米气泡因其独特的物理化学特性,能够显著强化气泡与颗粒的相互作用,提高目的矿物的回收效率。本文将从高灰难选煤泥的难选机理出发,系统阐述微气泡强化浮选的理论机制,并提出过程强化的技术路径,以期为我国难选煤泥的高效利用提供理论指导。

## 二、高灰难选煤泥的特征与浮选难点

### 2.1 矿物学与表面化学特征

高灰难选煤泥的物质组成复杂,其难选性源于多重因素的耦合作用。从矿物组成看,此类煤泥中脉石矿物含量高,尤其是高岭石、蒙脱石等粘土矿物在破碎过程中易泥化,形成大量-0.045mm的微细粒。从表面化学性质看,低阶煤和高氧化程度煤泥表面含有大量含氧官能团(如羧基-COOH、羟基

-OH等),这些极性基团易与水分子形成氢键,导致煤粒表面形成厚的水化膜-6。

研究表明,易浮煤与难浮煤的表面性质存在显著差异。浮选精煤的接触角可达 $109.25^\circ$ ,而中灰煤泥的接触角仅约 $80.63^\circ$ ,两者相差近 $30^\circ$ -3。红外光谱分析表明,浮选精煤表面含有较多的烷基和氨基等疏水性基团,而难选煤泥则以羧基、羟基等亲水性含氧官能团为主-3。这种表面性质的差异直接决定了煤粒与气泡的粘附能力。

### 2.2 高灰细泥的夹带机制

高灰细泥对浮选精煤的污染主要通过两种途径:一是机械夹带,即微细粒矿物随泡沫层水流被裹挟进入精矿产品;二是细泥罩盖,即高灰细泥附着在煤粒表面,阻碍捕收剂作用及煤粒与气泡的直接接触。

从动力学角度分析,机械夹带程度与泡沫层的结构特性密切相关。泡沫层中水的存在是细泥进入精煤的载体,泡沫的稳定性、水回收率及泡沫层高度均影响夹带程度-1。对于-0.045mm的微细粒,由于其重力沉降阻力小,更容易随泡沫水相上升,造成精煤污染。研究指出,当入浮煤泥中高灰细泥含量超过一定阈值时,单纯依靠调节浮选参数难以有效控制夹带,必须从泡沫结构调控和颗粒表面性质改性两方面入手-1。

### 2.3 传统浮选的局限性

针对高灰难选煤泥,传统机械搅拌式浮选机存在明显不足:一是气泡直径较大(通常 $0.5\sim 2\text{mm}$ ),与微细粒煤的碰撞概率低;二是矿浆湍流强度高,易造成已粘附颗粒的脱附;三是泡沫层结构难以精细调控,细泥夹带严重。

浮选柱技术虽在一定程度上改善了分选环境,但在处理高灰、高含量-0.045mm 粒级煤泥时,仍面临分选选择性差的挑战-7。正交试验结果表明,对于高灰细泥浮选,起泡剂用量对精煤产率和浮选完善指标的影响最为显著,其次是捕收剂用量和入料浓度-7。这表明,气泡特性(尺寸、数量、稳定性)在高灰细泥分选中扮演着关键角色。

### 三、微气泡强化浮选的机理

#### 3.1 微气泡的物理化学特性

微气泡通常指直径小于 50  $\mu\text{m}$  的气泡,而纳米气泡则指尺寸在 1  $\mu\text{m}$  以下的气泡。与常规浮选气泡相比,微纳米气泡具有以下独特性质:极高的比表面积、较长的水中停留时间、表面电荷效应显著以及能够产生羟基自由基等活性氧物种。

从浮选动力学角度,气泡尺寸减小对颗粒-气泡碰撞概率的提升作用可通过经典碰撞模型解释。在粘性流场中,碰撞概率与气泡直径成反比关系。当气泡直径从 1mm 减小至 100  $\mu\text{m}$  时,碰撞概率可提高一个数量级以上-2。这是微气泡强化微细粒回收的首要机理。

值得注意的是,2000 年研究者证实纳米气泡可稳定存在于疏水表面,这一发现彻底改变了人们对气泡稳定性的传统认知-8。此后,纳米气泡在浮选领域的应用研究迅速发展,形成了系统的理论体系。

#### 3.2 体相纳米气泡的强化作用

体相纳米气泡是指分散在矿浆中的纳米级气泡群体,其对浮选的强化机理体现在多个层面。

强化捕收作用:纳米气泡可作为“二次捕收剂”,在颗粒表面形成气膜,增强颗粒的疏水性。研究表明,经纳米气泡预处理后的矿物表面接触角显著增大,与常规浮选捕收剂产生协同效应-2。对于氧化煤泥,CO<sub>2</sub> 微纳米气泡能够在煤表面形成特定的吸附层,有效屏蔽亲水位点,提高浮选回收率-10。

增强碰撞与粘附:纳米气泡在颗粒表面的桥接作用可大幅降低诱导时间。原子力显微镜(AFM)直接力测量表明,当纳米气泡存在于颗粒与气泡之间时,两者间的疏水引力作用程从常规的 20nm 扩展至 100nm 以上,显著促进了液膜薄化和破裂过程-5-8。

降低药剂消耗:由于纳米气泡本身具有疏水表面,可部分替代常规捕收剂的功能。工业试验表明,采用纳米气泡预处理后,捕收剂用量可降低 20%-30%,同时保持相当的回收率。

#### 3.3 表界面纳米气泡的成桥机制

表界面纳米气泡是吸附在固体表面或宏观气泡表面的纳米级气泡,其对浮选的强化机制尤为引人关注。

液膜破裂诱导机制:在颗粒与气泡接近过程中,两者间的水化膜需要薄化至临界厚度(通常为数十纳米)后才能发生破裂,实现三相接触周边扩展。当颗粒或气泡表面存在纳米气泡时,这些纳米气泡会充当“触发点”,在较大的分离距离处诱导液膜破裂-8。理论计算表明,强疏水性表面与气泡间的临界液膜厚度约为 39nm,而弱疏水性表面仅为 16nm-3。纳米气泡的存在相当于增强了颗粒表面的疏水性,使液膜破裂更容易发生。

颗粒间作用力调控:纳米气泡在颗粒表面可产生长程疏水引力,促进微细粒的自聚集和选择性团聚。对于高灰细泥,利用纳米气泡的选择性吸附,可实现煤颗粒与粘土矿物的差异化团聚,增大表观粒径差异,从而提高分选选择性。

#### 3.4 三相泡沫界面调控

浮选柱内的三相泡沫是分选发生的核心区域。高灰细泥的机械夹带主要发生在泡沫层中,因此调控泡沫特性是抑制细泥污染的关键。

研究表明,泡沫中水的存在形式可分为气泡间隙水和 Plateau 边界水-1。微细粒矿物随水进入泡沫层,当泡沫排水速度较快、泡沫层高度适宜时,夹带进入的细泥可在泡沫层中得到二次清洗,回落至矿浆中。微气泡由于尺寸小、比表面积大,能够形成结构更致密、稳定性适中的泡沫层,有利于细泥的排出。

此外,泡沫流变特性的调控也十分重要。适当增加起泡剂用量可以提高泡沫的稳定性,但过度稳定会导致泡沫“发粘”,反而加剧细泥夹带。因此,针对特定煤泥性质,存在最优的气泡尺寸分布和泡沫结构参数。

### 四、浮选过程强化策略

#### 4.1 基于能量输配的过程调控

浮选过程本质上是一个能量驱动的分选过程。能量输入包括水力搅拌能量、气泡分散能量和药剂作用化学能等。基于能量输配的过程强化理念强调,应将能量输入与物料的可浮性变化相适应-4。

具体而言,在浮选的不同阶段,能量输入策略应有所差异:在矿浆预处理阶段,需要高剪切能量促进药剂分散和与颗粒作用;在浮选槽内,则需要适宜的能量使气泡充分分散

并与颗粒碰撞,但过高的湍流能量会导致已粘附颗粒脱附-4。

对于高灰难选煤泥,建议采用“强搅拌调浆—弱湍流浮选”的能量分配模式。强搅拌调浆可使高灰细泥从煤粒表面分散剥离,而弱湍流浮选则有利于已矿化气泡的选择性回收。

#### 4.2 工艺参数优化

针对高灰难选煤泥的浮选,工艺参数的优化应以提高选择性为核心目标。

充气量与搅拌转速:研究发现,增加充气量可提高精煤回收率,但会降低中灰煤泥的回收效果-3。这表明,对于不同类型煤泥,充气量的影响方向不同。在实际操作中,应通过浮选速率试验确定最优充气量。

矿浆浓度与药剂制度:高灰细泥浮选适宜采用较高矿浆浓度(80-100g/L),以提高单位处理能力和泡沫层的“自清洗”效果-7。药剂制度方面,起泡剂的影响往往大于捕收剂,应优先优化起泡剂的种类和用量-7。

浮选时间与段数:单段浮选难以同时保证精煤灰分和回收率。青龙寺选煤厂的工业实践表明,采用“粗选—扫选”两段浮选工艺,精煤产率可达66.30%,灰分降至9.97%-6。对于极难选煤泥,甚至需要采用三段或四段浮选。

#### 4.3 微气泡发生技术与装备

微气泡的高效发生是微气泡浮选技术的核心。目前,微气泡的发生方法主要包括:溶气释放法、射流空化法、电解法和微孔发泡法。

在煤炭浮选领域,旋流微泡浮选柱是应用最广泛的设备之一。其工作原理是:矿浆经循环泵加压后进入射流空化管,在高速射流和压力突变的条件下析出微细气泡,然后进入旋流段实现气泡与颗粒的相互作用-1-7。

近年来,基于纳米气泡的新型浮选装备不断涌现。研究者开发了体相纳米气泡发生装置,可在常规浮选前对矿浆进行纳米气泡预处理,显著改善浮选指标-5。这类装备结构简单、能耗低,具有广阔的工业应用前景。

### 五、结论与展望

#### 5.1 主要结论

(1)高灰难选煤泥的浮选难点源于其表面亲水性强、微细粒含量高、粘土矿物易泥化等特征的耦合效应。高灰细泥的机械夹带和细泥罩盖是精煤污染的主要途径。

(2)微气泡强化浮选的机理包括:体相纳米气泡通过增大碰撞概率和强化捕收作用提高回收率;表界面纳米气泡通

过诱导液膜破裂和产生长程疏水引力促进颗粒-气泡粘附。

(3)过程强化应遵循“能量-物料适配”原则,采用“强搅拌调浆—弱湍流浮选”的能量分配模式,并结合“粗选—扫选”多段工艺,可显著改善高灰难选煤泥的分选效果。

#### 5.2 未来研究方向

尽管微气泡浮选技术在实验室和工业试验中已取得显著进展,但仍存在若干关键科学问题亟待解决。

纳米气泡稳定性机制:纳米气泡在体相中能够稳定存在的热力学解释尚不完善,需要进一步发展理论模型和原位表征技术。

选择性强化技术:目前微气泡对目的矿物和脉石矿物的强化作用缺乏选择性,如何实现“差异强化”是未来的重点方向。

大型化装备开发:与大型重介选煤厂配套的高效柱式浮选装备开发仍面临挑战,需要开展系统的放大规律研究。

智能化控制:结合在线检测和机器学习技术,实现浮选过程的实时优化控制,是微气泡浮选技术走向工业应用的重要途径。

#### [参考文献]

- [1]谢广元. 浮选柱三相泡沫特性对高灰细泥机械夹带作用机制的研究[R]. 国家自然科学基金项目(No. 51474213), 2015. -1
- [2]任浏祎, 肖丹丹, 张新宇, 等. 微泡强化微细粒矿物浮选研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2025. -2
- [3]许光前, 王焕忠, 耿大将, 等. 基于强化粗粒中灰煤泥浮选回收与分离效果的调控机制研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(11): 202-210. -3
- [4]桂夏辉. 基于能量输配的煤泥分选过程强化机理研究[R]. 国家自然科学基金项目(No. 51304192), 2014. -4
- [5]邢耀文. 微细粒纳米气泡浮选过程强化[R]. 安徽理工大学学术报告, 2025. -5
- [6]青龙寺选煤厂煤泥浮选提质增效工艺优化[J]. 洁净煤技术, 2025. -6
- [7]刘均章, 等. 基于旋流微泡浮选柱的高灰细泥浮选优化试验[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(3): 22-25. -7
- [8]微细颗粒矿物纳米气泡浮选机理研究进展[J]. 矿业科学学报, 2025. -8