

选矿与矿物加工

文章编号: 1004-4051(2025)09-0322-13

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20250917

## 分级破碎机的研究进展

姚树建<sup>1</sup>, 潘永泰<sup>2,3</sup>, 蒋平<sup>1</sup>, 毕研琨<sup>4</sup>, 刘君<sup>4</sup>

(1. 招金矿业股份有限公司夏甸金矿, 山东招远 265400;

2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083;

3. 中国矿业大学(北京)矿山与城市固废资源化工程研究中心, 北京 100083;

4. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 矿产资源的开发利用关乎国家的能源安全、经济发展和环境保护。破碎作为矿产资源开采、加工及应用的关键环节,其工艺水平直接影响矿物产品的综合利用效率与经济效益。在破碎设备中,分级破碎机因其成块率高、处理能力强、结构简单等优势被广泛应用,相关研究也在近年取得显著进展。本文首先阐述分级破碎机的结构组成和工作原理,分析其工作特性与技术优势;然后从机理探索、结构优化和智能调控三个方面对设备研究进展进行综述;最后探讨未来研究方向与发展趋势。结果表明:破碎机理研究主要依托断裂力学、冲击动力学及岩石力学等理论,通过构建矿物断裂模型,并结合离散元仿真与试验手段进行校正优化,进而指导设备参数与工作参数的选取;结构优化研究则基于实际工况或设备现存缺陷,运用有限元分析等手段改进设备结构,以满足特定生产需求;智能调控研究正从传统的继电控制向自动化、智能化方向转型,通过识别设备状态数据,自主调控工作参数,从而提升设备的破碎能力和工作效率。综上所述,分级破碎机技术发展的机遇与挑战并存,未来可通过构建更精细的理论体系、制定通用的改良策略,以及融合深度学习与大数据技术,推动设备与工艺的科学化、标准化与智能化发展。

**关键词:** 分级破碎机; 破碎工艺; 机理探索; 结构优化; 智能调控

**中图分类号:** TD451 **文献标识码:** A

## Research progress on sizing crusher

YAO Shujian<sup>1</sup>, PAN Yongtai<sup>2,3</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, BI Yankun<sup>4</sup>, LIU Jun<sup>4</sup>

(1. Xiadian Gold Mine, Zhaojin Mining Industry Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, China;

2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing

100083, China; 3. Engineering Research Center for Mining and Urban Solid Waste Recycling, China University of

Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

4. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The exploration and utilization of mineral resources is related to the energy security,

收稿日期: 2025-05-09 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 52074308); 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室开放研究基金项目资助(编号: BGRIMM-KZSKL-2024-14)

第一作者简介: 姚树建(1979—), 男, 汉族, 山东成武人, 高级工程师, 主要从事矿山选矿技术及装备的研究及应用工作, E-mail: 632379098@qq.com。

通讯作者简介: 潘永泰(1972—), 男, 满族, 河北雄县人, 博士, 研究员, 主要从事矿物与固废破碎解离的科学研究与装备研制等工作, E-mail: panyongtai@cumtb.edu.cn。

引用格式: 姚树建, 潘永泰, 蒋平, 等. 分级破碎机的研究进展[J]. 中国矿业, 2025, 34(9): 322-334.

YAO Shujian, PAN Yongtai, JIANG Ping, et al. Research progress on sizing crusher[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(9): 322-334.

economic development and environmental protection of the country. As a crucial link in the mining, processing and application of mineral resources, the technological level of crushing directly affects the comprehensive utilization efficiency and economic benefits of mineral products. Among the crushing equipment, sizing crusher is widely used because of its advantages of high fragmentation percentage of ore lumps, high capacity and simple structure, etc. In recent years, the related researches have also made significant progress. Firstly, the composition and operating principle of the sizing crusher are expounded, with its working characteristics and technical advantages analyzed; then, the research progress of the equipment is reviewed from the three aspects of mechanism exploration, structure optimization and intelligent regulation; finally, the future research direction and development trend are discussed. The study shows that the research on crushing mechanism mainly relies on the theories of fracture mechanics, impact dynamics and rock mechanics, through the construction of mineral fracture model, integrated with discrete element simulation and experimental means for correction and optimization, which in turn guides the selection of equipment parameters and operating parameters; structural optimization research is based on the actual working conditions or existing defects of the equipment, which uses finite element analysis and other methods to optimize the structure of the equipment for meeting specific production needs; intelligent regulation research has been transforming from traditional relay control to automation and intelligent control, by identifying equipment state data to autonomously regulate operating parameters, so as to enhance the capacity and working efficiency of the equipment. In conclusion, the technological development of sizing crusher has both opportunities and challenges, and in the future, it can promote the scientific, standardized and intelligent development of equipment and process by building a more refined theoretical system, establishing a common improvement strategy, as well as integrating deep learning and big data technology.

**Keywords:** sizing crusher; crushing process; mechanism exploration; structural optimization; intelligent regulation

## 0 引言

矿产资源是国民经济建设与国防安全的重要保障,其开发利用与国家的能源安全、经济发展、环境保护密切相关<sup>[1-2]</sup>。原矿由于体积大、有用矿物占比小,常需破碎环节来进一步解离与纯化<sup>[3-4]</sup>,进而缓解当前矿产资源的供需矛盾<sup>[5]</sup>。作为选矿工艺的前置核心环节,破碎是一种物料在内力作用、外力作用下,克服质点间的内聚力,实现尺寸减小、形态改变的物理过程<sup>[6]</sup>。通过多级破碎工艺,可令原矿满足后续入料粒度。原矿中有用矿物与脉石矿物初步解离,能够提高后续工艺中目的矿物的回收率与品位。

根据能量来源,物料的破碎通常可分为机械能破碎与非机械能破碎<sup>[7]</sup>。其中,机械能破碎技术成熟、适用性强,在工业领域应用最为广泛。机械能破碎的形式主要包括挤压、劈开、冲击、折断和研磨等<sup>[8]</sup>。常用的破碎机械可按照结构分为齿辊破碎机、颚式破碎机、冲击式破碎机、选择性破碎机和分级破碎机等<sup>[7]</sup>。齿辊破碎机以劈碎为主,兼具挤压和折断破碎的功能,适用于硬金属矿;颚式破碎机以挤压破碎为主,兼有劈开和折断功能,适用于含矸石、黄铁矿较多的原煤和作沸腾炉燃料的矸石;冲击式破碎机具有高频冲击特点,适用于脆性物料的中碎或细碎;选择性破碎机利用可破碎性的差异分离原料;

分级破碎机与齿辊破碎机结构相似,主要采用剪切和拉伸破碎,常用于矿山、冶金等行业的中脆性块状物料粗级破碎、中级破碎。现阶段,分级破碎机因其成块率高(过粉碎低)、处理能力大、可靠性强、结构简单等优势,逐渐成为选矿领域的关键破碎设备<sup>[9-10]</sup>。

本文基于分级破碎机的结构原理和工作特点,总结设备在机理、设计、控制等方面的研究进展,讨论了该领域面临的挑战和未来的发展趋势,旨在为分级破碎领域研究者与工程人员提供理论与实践参考。

### 1 分级破碎机的结构特点与工作原理

分级破碎机本质上是一种具有分级破碎机理的新型双齿辊破碎机<sup>[3]</sup>。分级破碎根据不同的物料特性与粒度要求,通过改变设备结构与工作方式,实现对物料的强制破碎或直接排出,兼具破碎与筛分功能<sup>[11]</sup>。在实际生产中,分级破碎机对不同粒度组成的人料进行选择破碎,如同旋转的格筛,对符合粒度要求的物料直接通过,而对大于要求粒度的物料进行破碎,最终使破碎产物全部满足产品粒度需求<sup>[12-13]</sup>。针对分级破碎机,从结构组成、工作原理和技术优势三方面进行讨论。

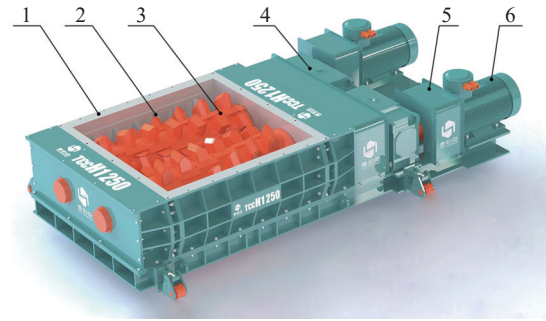
#### 1.1 结构组成

分级破碎机结构简单,主要由机架、侧齿板、破碎齿辊、减速器、液力耦合器与电机组成,如图1所

示。其中,机架用于承载与保护整机部件,可分为悬臂安装与落地安装两种;侧齿板用来控制从齿辊外侧排出的物料粒度,并防止破碎齿间物料卡堵;破碎齿辊作为工作部件,其材料与结构设计保证分级破碎机的正常工作;减速器使从电机输入的高转速降为低转速,保证设备以低转速、大扭矩对物料进行破碎;液力耦合器主要用于受力缓冲和过载保护;电机可提供输入动力,驱动设备运转。

### 1.2 工作原理

在分级破碎时,破碎齿与物料的接触作用可分为三个阶段,如图2所示。第一阶段为筛分作用,如图2(a)所示。物料由给料槽进入破碎腔内,以自由落体的方式与破碎齿、破碎辊撞击。在此阶段,小粒度物料将不会受到破碎,而是直接通过齿的侧隙、侧面梳齿板的空隙排出破碎腔;而粒度较大的颗粒将被相对运动的齿辊咬入破碎区域,参与后续的破碎过程。第二阶段是大块物料的初级破碎,如图2(b)所示。运动中的破碎齿与大块物料接触,交错的齿尖快速旋转,与物料多次碰撞,并不断刺破或剪切物料。若此时物料未被粉碎,则会在呈螺旋排布的破碎辊上不断翻转,等待下一对齿的继续作用,直至物



1-机架; 2-侧齿板; 3-破碎齿辊; 4-减速器;  
5-液力耦合器; 6-电机。

图1 分级破碎机结构

Fig. 1 Structure of sizing crusher

(资料来源:文献[14])

料能被齿辊咬入为止。第三阶段为物料被咬入的深度破碎,如图2(c)所示。此时物料受到两个相对齿辊前、后刃面的剪切与挤压作用;当物料被咬入后,将受旋转齿辊的挤压破碎,小粒度产物从齿辊间落下。在咬合作用完成后,对齿开始分离,破碎空间区域增大,并排出中间粒度产物。基于上述工作原理,分级破碎机常对物料进行剪切与劈裂破碎,更适用于抗压强度显著高于抗剪强度、抗拉强度的矿物。

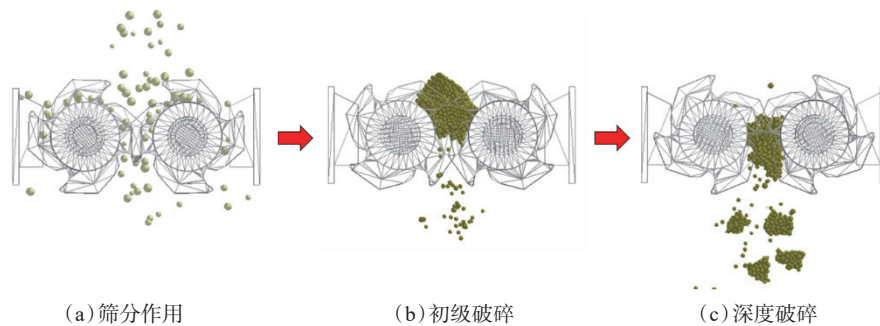


图2 分级破碎机工作原理

Fig. 2 Working principle of sizing crusher

(资料来源:文献[15])

### 1.3 技术优势

在以齿型、齿布为代表的结构参数与以旋向为代表的工作参数的耦合作用下,分级破碎机具有明显的技术优势<sup>[3,9,12]</sup>:①设备同时具备分级与破碎双重功能,小于产品粒度的物料受分级作用直接从齿辊间或侧齿板间排出,超过产品粒度的物料则被破碎;②采用固定中心距对矿物进行强行破碎,破碎空间尺寸受严格控制,保证了产品粒度;③设备齿尖对物料进行刺破,成块率高,分级作用可减少过粉碎,降低产物的细粒增量;④单机处理能力大,破碎效率高,可根据不同的矿物组成及破碎比,选择破碎齿辊的旋转方向,从而增加破碎通道,提高设备的处理能力

和破碎效率。

现有分级破碎机还具备破碎强度大、可靠性高、整机高度低、运行振动小等技术特性,适用于煤炭、焦炭、石灰石、氧化铝矿石、油母页岩、石膏、钾盐矿等中硬脆性物料,以及白云石、铁矿石、花岗岩、钢筋混凝土等坚硬物料的初级破碎与二级破碎<sup>[9]</sup>。

从结构与原理层面来看,分级破碎机在性能提升方面仍存在较大优化空间。首先,在物料适应性上,分级破碎机破碎脆性物料时,破碎强度可达300 MPa(单轴抗压强度),入料粒度上限为1 500 mm,出料粒度为25~400 mm<sup>[9]</sup>,但对硬质、强韧性物料的破碎能力有限。其次,设备采用固定中心距的强行

破碎模式来保障产品粒度, 导致当有害硬质异物(如铁器)或大块异物进入破碎腔时, 两齿辊无法及时退让缓冲, 易产生齿辊弯曲变形、齿间断裂等结构损伤。此外, 由于分级破碎机需要根据实际生产情况进行齿型、齿布和齿辊旋向的选择, 前期设计需进行大量模拟与试验。最后, 相关领域尚未构建系统、科学的破碎理论体系, 难以有效指导设计与生产, 且整体智能化程度较低。鉴于上述问题, 有必要对分级破碎机的研究进展进行系统综述, 探索针对性解决方案, 推动设备技术的进步与革新。

## 2 分级破碎机的研究进展

### 2.1 机理探索

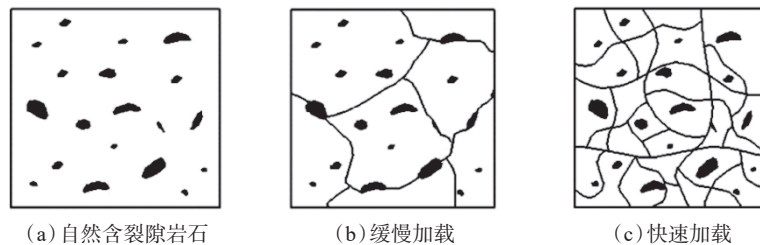
分级破碎的机理探索主要应用断裂力学、冲击动力学及岩石力学等学科理论, 通过构建破碎过程的力学模型, 推致力传导路径、能量耗散规律和颗粒断裂行为之间的内在联系。其中, 分级破碎理论模型为包含物料力学参数(如抗压强度、断裂韧性、弹性模量)、设备结构参数(如齿辊间距、齿形角度、转速差)和运行工艺参数(如給料速率、破碎频率)的多

变量耦合模型。

通过数值模拟与物理试验的方法, 可以验证分级破碎的理论模型。前者常借助离散元法(DEM)、有限元法(FEM)等先进仿真技术, 对单颗粒及颗粒群的破碎过程进行动态模拟, 建立微观尺度下裂纹演化过程与宏观破碎效果的映射关系; 后者多采用点载荷试验、单轴压缩试验、落锤试验和半工业试验等方法, 通过设定初始加载条件, 采集试验过程状态信息和破碎效果信息, 对理论模型进行补充与校正。

#### 2.1.1 破碎物料的断裂动力学分析

对破碎物料进行断裂动力学分析, 通过探究物料在动态加载过程中的断裂行为特征, 建立加载速率与破碎功耗、产品粒度间的量化关系, 可为分级破碎机的工作转速选择提供理论指导<sup>[16]</sup>。早期的破碎物料断裂动力学分析主要基于裂纹扩展理论<sup>[16-17]</sup>。ATKINSON<sup>[18]</sup>认为矿物实际强度低于理论强度的原因是内部存在的细裂纹直接影响矿物破碎后的粒度分布, 以及破碎过程中的能量消耗(图3)。



(a) 自然含裂隙岩石

(b) 缓慢加载

(c) 快速加载

图3 不同加载方式下破碎粒度

Fig. 3 Crushing sizes at different loading rates

(资料来源: 文献[18])

潘永泰等<sup>[16-17]</sup>研究表明, 分级破碎的产物尺度随应变率的增大而呈幂函数减小, 分级破碎机加载速率与破碎功耗成反比, 可选择低线速度、大扭矩的工作参数。周强等<sup>[19]</sup>基于Grady-Kipp动态断裂模型, 研究加载速率与产品粒度的定量关系, 推导平均破碎粒度 $L_m$ 随恒应变率 $\dot{\epsilon}$ 变化的关系见式(1)。其中,  $\alpha$ 为包含 $C_g$ 、 $m$ 和 $k$ 的关系式, 见式(2)。

$$L_m = \frac{6C_g}{m+2} \alpha^{-1/(m+3)} \dot{\epsilon}^{-m/(m+3)} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{8\pi C_g^3 k}{(m+1)(m+2)(m+3)} \quad (2)$$

式中:  $C_g$ 为裂纹活化后趋近的恒定断裂生长速率;  $k$ 和 $m$ 为常数, 表征断裂活化的材料特性。

Grady-Kipp模型<sup>[20-21]</sup>认为岩石破碎源于内部裂纹、缺陷在拉应力作用下的活化和生长, 其过程与加载速率密切相关。上述研究表明, 破碎产物的平均粒

度与加载速率和矿物性质有关, 进一步验证了破碎粒度随加载速率的增大而按幂函数规律减小。经落锤试验测试可知, 该断裂模型<sup>[19]</sup>适用于1.5~5.0 m/s的加载范围。

分级破碎机入料的断裂强度同样影响产品的粒度分布。潘永泰等<sup>[22]</sup>选用HDH-1型岩石点载荷仪对0~40 mm的矸石与煤颗粒进行试验, 并以最大破碎力和断裂应力作为评价指标。经数据分析可知, 点载荷随着颗粒尺寸的增加而离散性增大, 而断裂应力随着颗粒尺寸的增加而离散性减小。研究建立了基于Logistic模型的断裂强度分布模型, 见式(3)和式(4)。

$$F_C = F_{30} \left( \frac{S_F}{1 - S_F} \right)^{\frac{1}{D_F}} \quad (3)$$

$$\sigma_C = \sigma_{30} \left( \frac{S_\sigma}{1 - S_\sigma} \right)^{\frac{1}{D_\sigma}} \quad (4)$$

式中:  $F_c$ 为最大破碎力对应的点载荷, N;  $F_{50}$ 为中值强度(断裂概率为 0.5 时)对应的点载荷, N;  $S_F$ 为以点载荷定义强度分布的断裂概率;  $D_F$ 为以点载荷定义强度分布的离散程度;  $\sigma_c$ 为颗粒的断裂应力, MPa;  $\sigma_{50}$ 为中值强度对应的断裂应力, MPa;  $S_\sigma$ 为以断裂应力定义强度分布的断裂概率;  $D_\sigma$ 为以断裂应力定义强度分布的离散程度。在该模型中, 煤岩颗粒离散程度与尺寸无明显依赖关系, 煤岩颗粒中值强度对应的点载荷随颗粒尺寸的增加呈幂函数规律增加, 而对应的断裂应力则相反。

此外, ZHOU 等<sup>[23-24]</sup>通过 TAW-3000 液压伺服实验及模型分析, 揭示了煤颗粒床粉碎中比能与压力的线性关系、细颗粒“保护效应”, 以及扩展 G-S 分布模型的适用性, 同时发现脆性球体(玻璃、陶瓷)的破碎力与破碎能量服从对数正态分布, 且中位数与粒径平方线性相关, 为分级破碎的工艺建模与单颗粒破碎强度分析提供了理论依据。

研究者们从微观角度进一步揭示物料的破碎机理。ZHANG 等<sup>[25]</sup>通过分子动力学模拟研究二氧化硅拉伸断裂行为, 发现预裂纹、非晶形态及垂直载荷方向可提升能量效率达 6.69 倍, 为分级破碎中引入预裂纹和优化载荷方向提供依据。CAO 等<sup>[26-27]</sup>通过分子模拟来分析非晶二氧化硅的裂纹角度影响, 发现 45°裂纹呈“Z”形扩展的新增表面能效率最高, 建议破碎中调整施力方向以增加表面积, 提升破碎效果; 另外, 该团队研究 C-S-H 凝胶微孔方向效应, 表明微孔对  $x$  轴拉伸影响最大, 定向加载平行微孔平面可促进能量释放。微观研究与宏观研究的结合, 进一步完善了物料分级破碎的断裂理论。

### 2.1.2 破碎设备的工作机理和动力学分析

通过对分级破碎设备开展动力学分析, 可以更直观地观察设备结构与工作参数对破碎效果的影响, 进而确定合理的设计与工作参数, 提高设备的破碎效率。王保强<sup>[8]</sup>通过建立力学模型和离散元模型, 研究颗粒承载特性等多参数对破碎性能影响, 提出了协同优化方法。首先, 开展破碎机理研究, 建立中颗粒、大颗粒齿顶咬入和小颗粒齿背研磨的力学模型, 并推导颗粒承载公式, 发现破碎力受颗粒粒度和咬合位置影响。通过离散元法建立 DEM 唯像模型, 研究工作参数(齿辊转速、转动形式、转速差)对破碎效果(单位时间处理量、完全破碎时间)的影响, 得到最优齿辊转速。然后, 分析并优化齿辊结构参数, 发现非等高齿辊处理能力更强, 齿密度为 8 时处理量和功率最大, 齿盘螺旋角增大可提高处理量和齿辊力矩。采用响应面法对上述参数进行协同优化, 获

取处理量、完全破碎时间与各因素的定量关系及影响显著性顺序。基于冲击动力学分析破碎齿辊在冲击作用下的强度, 建立扭转振动和横向振动模型, 提出动态响应方法。采用离散元-有限元耦合的手段, 研究入料高度和布料长度对齿辊动态特性的影响, 发现随着两者增加, 齿辊最大变形增大。最后, 设计实验模型机和测试系统, 进行破碎效果试验。结果表明, 响应面法得到的处理量和实验值接近, 齿辊内转破碎效果更好, 转速为 74 r/min 时过粉碎率最小。

综上所述, 结合模拟与试验对分级破碎设备运行过程进行研究, 不仅实现分级破碎机理的深度解析, 还建立了破碎关键参数与产品质量间的影响关系模型, 为分级破碎设备的优化设计与参数调控提供理论支撑。

### 2.1.3 破碎过程的能量演化分析

在分级破碎能量演化与精确计算方面, GUO 等<sup>[28-30]</sup>开展系列研究, 针对物料破碎的动能计算忽略运动特性和空间分布的问题, 采用高速摄影测量颗粒速度、激光粒度分析获取粒度分布, 结合动能公式计算不同粒径颗粒动能贡献, 发现超大颗粒产物多位于表面, 通过控制颗粒空间分布和运动轨迹可提升分级破碎的能量利用率; 针对单颗粒破碎新表面积计算忽视形状和粗糙度的问题, 利用图像处理提取颗粒形状参数和表面分形维数, 基于分形理论对比四种模型(光滑球体、光滑椭球体、粗糙球体和粗糙椭球体)的表面积, 发现粗糙模型表面积随粒径增大显著大于光滑模型, 该方法可用于评估分级破碎能效; 针对无烟煤冲击破碎的耗散热能计算, 通过红外热像技术记录破碎过程的温度场, 结合牛顿冷却定律修正温度, 建立考虑冷却过程与空间温度分布的散热模型, 为分级破碎耗散热能计算与节能增效提供了理论依据。

## 2.2 设计优化

近年来, 分级破碎机的设计优化主要分为两类: 一类是通过分析破碎效率、能耗等关键指标来确定合理的设计参数与工作参数; 另一类是针对实际生产条件与工况开展设备改造优化, 满足具体的生产需求。

### 2.2.1 设备零部件性能研究

开展分级破碎设备的关键零部件性能研究, 可在评估设计合理性与可靠性的同时, 优化零部件结构。

1) 分体式机架的模态分析。机架的稳定性关系分级破碎机的使用寿命和可靠性。马浩<sup>[31]</sup>针对井下分级破碎机分体式机架结构的稳定性问题,

采用 ANSYS Workbench 进行模态分析, 通过建立主体为 H 型钢结构的有限元模型, 研究材料为 Q235-A 钢的机架状态, 并求解前 6 阶固有频率 (44.444~76.852 Hz) 及振型。结果表明, 机架主要振动形式为侧板下方的摆动和扭转, 且对分体位置无明显振动影响。在此基础上, 李朋等<sup>[32]</sup> 针对分体机架加工复杂、拆装困难和效率低的问题, 通过去除锥销定位结构和立肋夹板、在分体机架断面立肋焊接横板并加工卯榫结构来代替原有夹板定位销联接方式, 如图 4 所示, 具有保证设备运行平稳、缩短拆装时间和改善连接质量的优势。

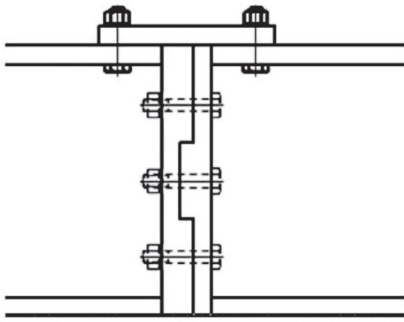


图 4 机架榫卯结构

Fig. 4 Mortise-tenon structure of the frame

(资料来源: 文献 [32])

2) 破碎辊总成的载荷特性分析。矿物结构组成、力学特性与几何尺寸具有非均质性, 导致设备破碎时关键零部件承受非线性载荷。通过研究关键零部件的载荷特性, 可为零件设计与工作参数选取提供指导。针对破碎辊总成, 李志强等<sup>[33]</sup> 利用离散元与有限元耦合的方法, 分析 SCC1150 分级破碎机在不同公称传动比下齿辊的最大应力; 通过 DEM-Workbench 耦合建模, 采用单向耦合方式, 在有限元分析计算中, 求解最大应力方程。研究结果表明, 齿盘连接处的最大应力值最高, 可选择公称传动比为 20 的方案来降低齿辊所受最大应力、延长齿辊的使用寿命。刘振等<sup>[34]</sup> 分析 TCC7025 型分级破碎设备在工作时齿辊受到的主轴转矩、轴承座约束力和负载力, 建立 ANSYS 结构应力计算有限元模型, 分析不同工况下齿辊结构应力和变形, 如图 5 所示。由图 5 可知, 齿辊载荷分布影响受载齿应力, 设计时应让更多破碎齿接触物料; 离电机越近的齿应力越大; 齿尖线应力计算值偏大, 距齿尖线下 5 mm 处更接近实际。LIEBERWIRTH 等<sup>[35-36]</sup> 研究了与分级破碎机结构相似的双齿辊破碎机, 分析其动态特性和处理量的影响因素, 通过开展小型工业级光辊破碎机和中试齿辊破碎机的试验可

知, 破碎力与齿辊间隙呈对数线性关系, 产品粒度分布受细颗粒“保护效应”的影响, 即在颗粒床粉碎或破碎过程中, 细颗粒通过填充粗颗粒间隙、缓冲机械载荷, 从而减少粗颗粒直接破碎的现象; 齿辊破碎机的处理量对物料抗压强度并不敏感, 但易受进料粒度分布和超大块物料的影响, 这也从侧面反映了分级破碎机在处理大块物料时将面临挑战。

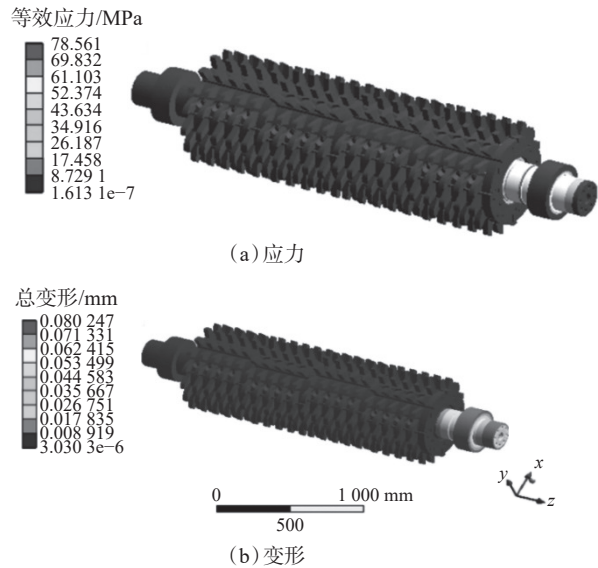


图 5 齿辊均载应力、变形情况

Fig. 5 Stress and deformation of the tooth roller under uniform loading

(资料来源: 文献 [34])

综上所述, 齿辊总成的载荷特性分析为其设计优化提供理论指导, 可以降低部件在工作过程中受到的载荷影响, 提高设备的破碎效率与使用寿命。

3) 破碎齿的性能分析。近年来, 研究者从材质、齿型、结构优化、制造工艺等多个维度对分级破碎机的破碎齿展开研究。在材质方面, 陈通<sup>[37]</sup> 对国产分级破碎机中碳钢破碎齿的铸造工艺与材料进行研究, 调整 Cr 元素、Si 元素含量后, 发现碳化物分布更加均匀, 能够提升铸件平均硬度和耐磨性, 但同时会增加铸造成本、降低韧性。冯海涛<sup>[38]</sup> 对比 MMD 分级破碎机进口刀齿帽和国产刀齿帽, 发现两者材料接近、均为低合金调质钢; 相较之下, 进口刀齿帽的 Mn 元素、Cr 元素、Mo 元素的含量较高, Ni 元素、Si 元素、S 元素含量较低, 硬度更均匀, 拉伸强度更高, 而国产刀齿帽延伸率高, 冲击性能较差。在破碎齿型方面, 潘永泰等<sup>[39]</sup> 指出, 合理的齿型设计需保证破碎齿各部应力分布均匀。在此基础上, 通过对鹰嘴齿进行有限元应力分析和破碎力计算, 构建了齿型设计的理论框架, 有利于优化分级破碎的产品粒度

组成,降低破碎功耗。针对破碎齿结构优化问题,张明远<sup>[40]</sup>运用正交试验法,以降低等效应力、减小零件质量为目标,对SSC型分级破碎机破碎齿结构参数进行研究,通过综合平衡法得到齿厚、齿根宽、齿倾角的最优参数方案,优化后破碎齿等效应力减小12.06%,质量减轻8.43%,安全系数提高13.71%,实现了零件的轻量化与强度提升。卓荣明<sup>[41]</sup>针对齿环式破碎齿在使用中齿环体和齿尖易断裂、难更换的问题,确定齿环和齿尖材质分别为低合金钢和T8A棒料;通过将破碎齿拆分成齿环体和齿尖,保证了齿尖的耐磨性和齿环体的冲击韧性;把单排齿环体改进为双排齿环体,提高破碎齿的承载能力;通过在键槽底部与侧面采用圆角连接减少应力集中、降低键槽深度来增加承载能力。在制造工艺上,陈通等<sup>[42]</sup>针对大尺寸破碎齿热处理问题展开研究:通过调整材质中C、Si和稀土含量,提升浇铸温度,采用淬火保温阶梯化和变更回火工艺等措施,使破碎齿硬度和

耐磨性明显改善。

综上所述,分级破碎机破碎齿在材质、齿型、结构和制造工艺方面的研究均取得一定进展,但仍面临挑战。未来的研究可着眼于材料配方优化、制造工艺提升和失效机制研究等方面。

4)传动结构的改进。研究者们还对分级破碎机的传动结构进行分析与改进,并取得了不错的效果。针对分级破碎机联轴器的失速保护装置(图6),任瑞生<sup>[43]</sup>开展相关改进研究。失速保护装置在实际生产中稳定性下降,原因包括系统误差、工作液污染和容错率低等。通过安装U形光电传感器,降低了外界磁场和电流的干扰;在联轴器上加设圆盘,通过圆盘、传感器罩与盖板密封感应空间,并加设排污路径,避免了工作液的泄露;在圆盘上增加凸起部位作为监测点,相比原有的两个感应磁铁,感应部位更多。应用表明,该装置在使用的六个月内,未出现误报和错报现象。

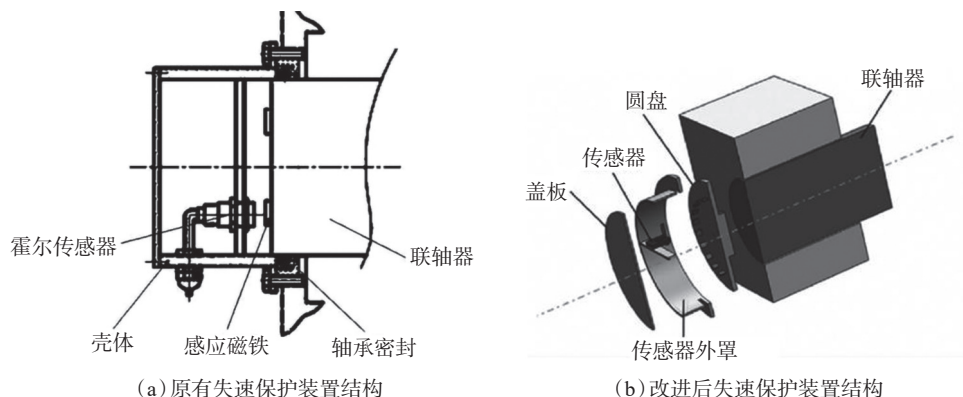


图6 失速保护装置改进前后对比

Fig. 6 Comparison of stall protection device before and after improvement

(资料来源:文献[43])

在传动方式上,潘永泰等<sup>[44]</sup>提出采用同步齿轮机构进行传动,解决分级破碎机在实际工作中齿辊转速会因机械部件特性和载荷变化而波动的问题,如图7所示。通过对工业现场分级破碎机同步齿轮机构改造前后齿辊转速对比测试,研究者提出用于评价齿辊转速的稳定性系数 $k_1$ 和同步性系数 $k_2$ 。其中,稳定性系数 $k_1$ 描述实际转速与平均转速间的关系,表征齿辊转速波动性,见式(5)。

$$k_1 = \frac{|n_1 - \delta| + |n_2 - \delta| + \dots + |n_N - \delta|}{N\omega} \quad (5)$$

式中: $n_1, n_2, \dots, n_N$ 为在一段时间内单个齿辊测量的 $N$ 个实际转速; $\delta$ 为齿辊平均转速; $\omega$ 为齿辊额定转速。同步性系数 $k_2$ 通过表征两齿辊相对转速差关系来评价转速同步性优劣,见式(6)。

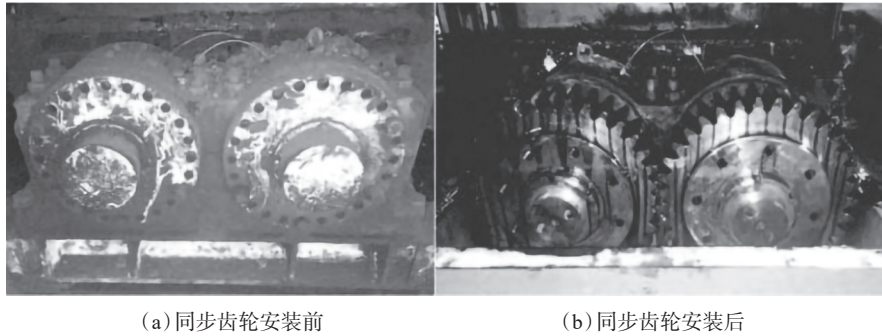
$$k_2 = \frac{|n_1 - \mu_1| + |n_2 - \mu_2| + \dots + |n_N - \mu_3|}{N\omega} \quad (6)$$

式中: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ 为在一段时间内另一个齿辊测量的 $N$ 个实际转速。因此,进行同步齿轮改造后,两系数越小,齿辊的转速更稳定、同步。

在此基础上,采用高速摄影机拍摄同步齿轮的实际工作状态,可知其通过稳定咬合、互相约束来保证转速平稳性和同步性。在未来研究中,需进一步分析同步齿轮结构下设备的载荷与振动情况,验证同步齿轮结构的合理性。

### 2.2.2 工作参数对分级破碎的影响

除设备结构参数外,工作参数也同样会对破碎效果和部件产生影响。近年来,研究者们对影响分级破碎效果的多种工作参数进行模拟与试验分



(a) 同步齿轮安装前

(b) 同步齿轮安装后

图7 同步齿轮安装前后对比

Fig. 7 Comparison of synchronous gears before and after the installation

(资料来源: 文献 [44])

析, 为分级破碎机的现场应用提供理论指导与方法指导。李志强<sup>[45]</sup>运用离散元法与响应曲面法, 研究 SSC1150 型分级破碎机不同给料高度、给料速度、落料位置和齿辊转速对双齿辊破碎性能的影响, 并通过建立仿真模型和模拟实验, 分析破碎齿的应力、位移和磨损情况。结果表明, 给料高度对磨损影响显著, 给料速度对等效应力影响显著, 该项研究为分级破碎机给料参数与工作参数的选择提供了参考。王甲等<sup>[46]</sup>基于离散元仿真软件 EDEM, 建立分级破碎机三维模型, 模拟设备不同齿辊转速 (1.8~3.5 rad/s) 和物料硬度 ( $f=2, 4, 6$ ) 下的破碎过程。结果表明: 转速相同时, 物料硬度越大破碎时间越长、效率越低; 实际生产中转速选择 2.2 rad/s 时破碎效率最高。

围绕分级破碎机关键部件的磨损问题, 李志强等<sup>[47]</sup>通过黄金分割实验与 DEM 模拟, 发现最佳给料高度为 1.809 m 时 SSC1150 分级破碎机的磨损峰值最低; 董涵宇等<sup>[48]</sup>分析不同物料硬度 ( $f=2, 4, 6$ ) 与齿辊转速 (1.8~2.6 rad/s) 的耦合影响, 发现齿辊、耐磨衬板的受力及磨损随硬度和转速升高而加剧; 王观民等<sup>[49]</sup>研究辊齿仰角对磨损的影响, 发现随仰角增大, 平均法向与切向累积接触能量呈非线性增长, 建议在满足生产能力前提下采用低仰角 ( $55^\circ\sim 65^\circ$ ) 以规避剧烈磨损区间。上述研究证明了离散元法在磨损机理分析中的有效性, 为分级破碎机抗磨损设计及工况参数优化提供了量化参考, 有助于提升设备可靠性与使用寿命。

### 2.2.3 不同工况下的设备的优化与改造

在工业生产中, 分级破碎设备在不同工况下的优化改造常遵循“具体问题、具体分析”的原则。由于各类工况存在差异性, 此类改造虽能够提供宝贵的理论与实践经验, 但难以在大范围内进行推广应用。其中, 大峰露天煤矿<sup>[50]</sup>针对原装车系统存在的处理能力不足、过粉碎率高的问题, 新建以 SSC 破碎

站为核心的系统, 包含两级 SSC 分级破碎机。产品应用后, 破碎产品的细粒增量仅 7.79%, 破碎效率为 87.54%, 成块率提升。新矿集团龙固洗煤厂作为矿井型重介选煤厂, 在采用 FP5020GB 型强力分级破碎机进行精煤破碎时, 存在超粒问题。潘世奇<sup>[51]</sup>提出在井下增加大型破碎机控制原煤粒度, 并调整储煤场钢篦子空隙尺寸; 调整破碎机齿辊转速, 通过变频器加大冲击破碎作用; 改进破碎机齿形, 在齿环根部和齿窝处堆焊, 减小包容空间。结果表明, 改进后超粒率降至 1.77%, 破碎效率达 79.25%, 排料最大颗粒尺寸符合要求。塔山煤矿针对 2114 工作面原 SCB8015 型破碎机出现的破碎效果差、效率低、易堵塞等问题, 采用 2PLF 型分级破碎机进行代替<sup>[52]</sup>。该设备通过双齿辊结构实现分级破碎, 过粉碎率仅为 6%。投产后, 破碎符合粒径要求的原煤达 95%, 粉化率控制在 5% 左右, 且具备自动调速、故障报警停机等自动化功能, 显著提升了破碎效率与原煤利用率。为解决太原洗煤厂原 FP75150 分级破碎机破碎效果差、处理能力不足、易堵料等问题, 李泽毅<sup>[53]</sup>采用 SSC800 三轴分级破碎机替代原有设备, 并在此基础上优化轴系结构、增加齿厚、配备新型锥套皮带轮和蛇形弹簧联轴器。集成远程控制、故障保护和视频监控系系统, 并实现筛分/破碎模式的自动切换。投产后, 块煤年产量提升 2 335 t, 年创造经济效益约 105.1 万元。针对红树梁选煤厂产品粒度超限导致动筛排矸系统频繁卡堵、单机处理能力不足的问题, 文柯然<sup>[54]</sup>采用外旋式齿辊旋向、连体式破碎腔体结构和高可靠轴承密封结构等关键技术, 设计开发了 SSC900 外旋式齿辊分级破碎机。设备投产后, 实际处理量可达 1 200~1 400 t/h, 最大处理能力提高 45%, 100~300 mm 的大块物料破碎率 100%, 50 m 以上物料的超限率为 1.8%, 有效解决了后续排矸系统卡堵的问题。

综上所述,通过分级破碎机的替代与改造,可有效提高原有矿物的破碎效率与利用率,侧面说明分级破碎所具有显著的技术优势和广阔的应用前景。

### 2.3 智能调控

分级破碎机作为矿山领域的核心设备,其调控技术的智能化直接影响设备的破碎效率、可靠性和破碎工艺的安全生产水平。随着工业自动化与人工智能技术的发展,分级破碎机的调控模式从传统的继电控制逐步向自动化、智能化转型。早期分级破碎机主要依赖继电器接触式控制,仅能实现“启/停”操作,抗干扰能力弱且缺乏故障保护机制<sup>[55]</sup>。随着可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)技术的普及,控制系统逐步集成实时监控、智能保护与数据通信功能。在此基础上,双齿辊分级破碎机的智能调控系统进一步融合了软启动、失速保护及远程监控,显著提升了设备的运行稳定性<sup>[56]</sup>。近年来,分级破碎机的智能调控主要集中在自动控制、自动润滑、自动移位、主轴转速测控和入料识别等方面<sup>[57]</sup>。

1) 自动控制。作为分级破碎机智能化的核心,自动控制技术<sup>[58]</sup>由 PLC、传感器、变频器、人机交互界面等构成。该系统集成智能控制与设备保护,可通过输入的设备监测信号判断设备运行状态,利用模糊控制理论与信息技术对分级破碎设备进行工作参数调控,防止出现重载、过载和堵料现象。

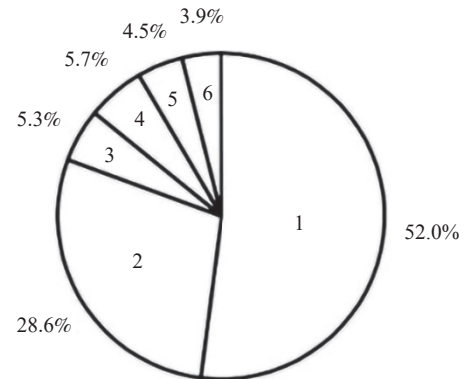
2) 自动润滑。自动润滑技术<sup>[58]</sup>是一种基于微型计算机技术的智能化可编程数字控制装置,主要由供油系统和控制系统组成。供油系统采用电动柱塞润滑泵向主轴承供油,控制系统通过 PLC 和人机交互界面,分自动和手动两种模式控制润滑泵动作。自动模式根据工况和环境设置累积工作时间、供油时间确定供油量,遵循少量多次原则定时定量在线多点润滑,防止润滑不足或过润滑。

3) 自动移位。自动移位装置与底座连接形成自动行走机构,并与自动控制系统结合<sup>[58]</sup>。装置由电动机、驱动轮和从动轮组成,在破碎机停车检修或故障维修时,可将其从入料溜槽下方水平移出,缩短检修时间,提高生产适应性,工作时则固定在水平轨道确保设备平稳运行。

4) 主轴测速。主轴转速测控<sup>[58]</sup>通过在齿辊轴承杯外侧防护罩内安装失速传感器,齿辊轴端圆盘上固定磁性感应装置,齿辊转动时传感器产生脉冲信号,反馈至自动控制系统并转换为数字信息与预设值比对,实现对齿辊转速的实时监测。当设备因卡转、堵转等异常而导致转速降低时,在允许范围内系统将发生故障预警,而超出范围时系统则输出保护

信号,避免传动系统受到冲击损害。

5) 入料识别。在现有故障诊断的基础上,考虑到有害异物进入破碎腔的危害,研究者们进一步提出了分级破碎机的入料识别问题,旨在降低设备故障风险。潘永泰等<sup>[59]</sup>针对太西洗煤厂分级破碎机因铁器进入而导致的故障问题,以 MMD625 型工业破碎机为研究对象,设计基于音频信号的故障诊断系统。研究选用声压传感器采集破碎设备运行过程中的状态信号,利用 MATLAB 对声压信号进行降噪处理并计算各参数指标,最终选择短时能量均值和峰值、短时幅度均值和峰值,以及短时幅度差为特征量建立判定模型,并运用均方差法计算上述特征量对故障判定的加权值,相关权重判断图如图 8 所示。结果表明,将上述故障判定方法运用于工业现场,入料铁器识别正确率可达 82%。



1-短时能量均值; 2-短时能量峰值; 3-短时幅度均值;  
4-短时幅度峰值; 5-幅度差均值; 6-幅度差峰值。

图 8 特征量判定权重

Fig. 8 Weight of characteristic quantity judgment

(资料来源:文献<sup>[59]</sup>)

在此基础上,研究者们结合深度学习和信号处理方法,进一步提高识别准确率与效率。首先, PAN 等<sup>[15]</sup>针对大通量、高带速和厚料层的大型选煤厂,提出基于深度学习的分级破碎机入料识别方法:利用声压与振动传感器采集破碎煤、木和铁等不同入料时设备的状态信号,基于谱减法 and 连续小波变换将原有时序信号进行降噪与转换,通过残差网络(Residual Neural Network, ResNet)中的 ResNet-50 判断不同的入料图像种类;该方法对煤-铁-木、煤-铁和煤-木分类的准确率分别为 84.0%、93.5% 和 80.1%,可以满足有害入料的识别需求,为设备的运行状态监测与故障诊断提供技术支持。随后,针对相同的入料信号数据集,为降低主观干扰,BI 等<sup>[14,60]</sup>分别提出一种基于时间序列分类的单组分入料端到端模型(图 9)和一种基于多源数据融合注意力机制的混合入料异

物识别模型(图 10)。前者未对原始数据进行过多变换, 仅将信号样本进行数据增强与切割; 模型经数据集训练, 在实验室破碎试验中对单组分入料的识别准确率可达 87.42%, 在工业测试中对铁的识别精度可达 99.10%; 相比传统人工特征提取的方法, 该方法分类性能更好、处理时间更短、运行成本更低。针对混合入料异物识别, 研究者基于连续小波变换和挤压激励残差网络(Squeeze-and-Excitation Residual Network, SE-ResNet)构建深度学习模型, 自动提取入料信号转换的融合图像特征; 经数据集训练, 该模型对分级破碎机混合入料的识别准确率可达 85.99%, 在工业测试中平均准确率为 95.64%, 最终满足了分级破碎机对含铁混合入料的识别需求。

综上所述, 当前设备的智能调控涉及多个方面, 但整体仍处于自动化水平, 设备智能化研究尚在初期阶段, 并未实现大范围的推广与应用。推动矿山智能化建设是国家推进数字化、绿色化协同转型的重要内容<sup>[61]</sup>。在未来研究中, 智能感知、智能决策、智能执行与健康诊断将成为分级破碎机智能化的关键研究方向<sup>[62]</sup>, 破碎设备的智能化升级将有助于实现破碎工艺的安全、可靠、高效和稳定运行。

### 3 结论与展望

2024 年全球矿业政策的激烈变革, 推动了矿业

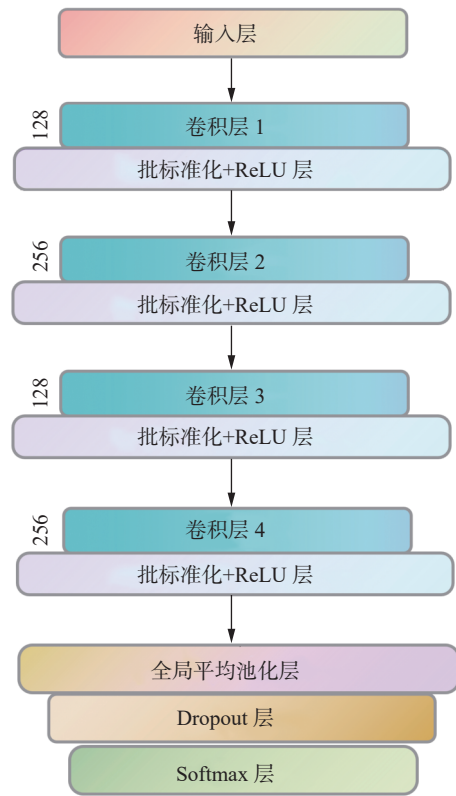


图 9 分级破碎机入料识别的端到端网络模型

Fig. 9 End-to-end network model for feeding identification of sizing crusher

(资料来源: 文献 [14])

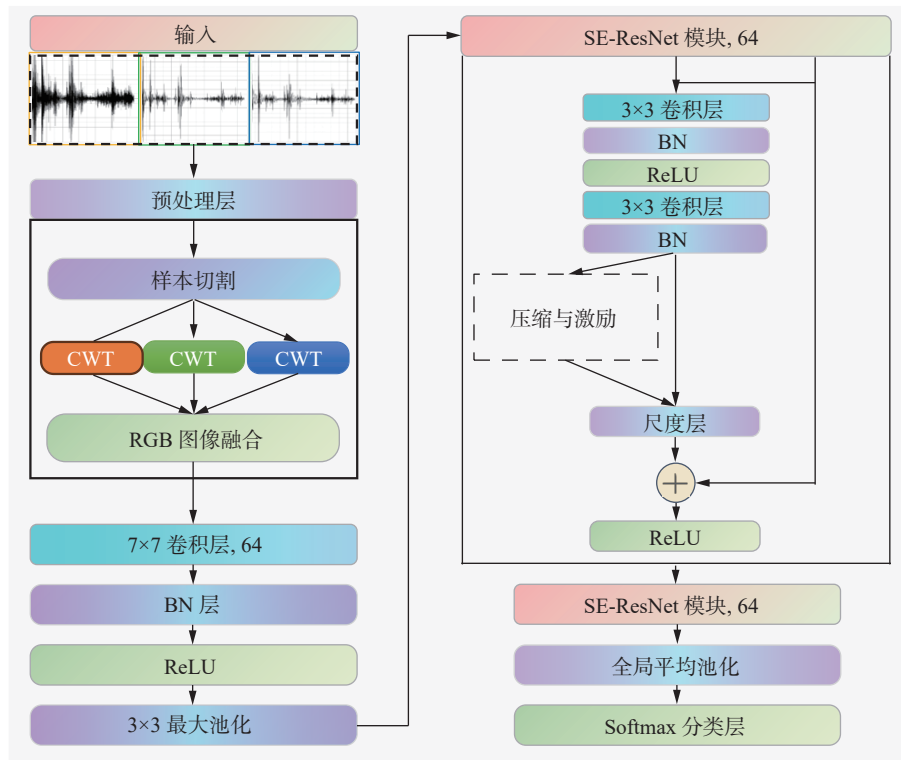


图 10 混合入料异物识别方法

Fig. 10 Identification method for unbreakable objects in the mixed feed

(资料来源: 文献 [60])

领域以新技术为核心的创新发展,但未来仍面临许多机遇与挑战<sup>[63-65]</sup>。分级破碎机作为矿业领域破碎工艺环节的核心设备,其技术发展水平直接影响矿物破碎效率与经济效益。对分级破碎机研究现状进行全面梳理和分析,不仅能够清晰把握当下设备的发展脉络,明确未来发展方向,还有助于聚焦行业热点问题,探索可行的解决方案。

1)在机理探索方面,破碎过程受物料特性、设备参数及工况条件等多因素耦合影响,尽管研究者构建了相关的理论模型,但此类模型多基于经验或假设,未形成科学完备的理论体系,无法满足实际生产中精准预测和破碎调控的需求。

2)在设计优化方面,现有的设备改造多针对特定工况与问题,缺乏科学规范的设计思路与标准,不同工况下的设计方案差异较大,难以进行大范围推广,不能适应多样化的生产环境与工作条件。

3)在智能调控方面,当前分级破碎机整体处在自动化水平,虽具备一定自动控制、润滑、移位、测速等功能,但与深度学习、大数据分析等前沿技术融合不足,未将智能感知、智能决策、智能执行和健康诊断等前沿技术广泛应用于工业生产。

展望未来,分级破碎机的研究可聚焦以下几点。

1)理论研究深化:综合运用多学科知识,构建更完善的分级破碎理论体系,借助先进的测试技术和数值模拟方法,深入研究物料破碎机理,建立结合多因素耦合作用的精确量化模型。

2)构建通用的设计标准:开展广泛的工况调研与实验研究,提取关键共性因素,制定科学统一的结构设计标准与规范;利用模块化、标准化的设计理念,提高设计方案的通用性与互换性,降低设计成本,缩短研发周期,增强设备对不同生产环境的适应性。

3)智能化升级拓展:深度融合人工智能、大数据与物联网技术,推动分级破碎机向智能化全面迈进,加强智能感知技术研发,实现对设备运行状态、物料特性的实时精准监测;结合大数据与深度学习技术,构建设备运行调控的智能决策模型,实现工艺参数的自适应优化与故障诊断的智能预警;研发智能执行系统,提升设备自主响应与协同作业能力,构建无人化、智能化的破碎工艺流程。

## 参考文献(References):

[1] 陈从喜. 战略性矿产资源开发利用研究进展与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 4-19.  
CHEN Congxi. Progress and prospects in the development and utilization of strategic mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 2025,

34(2): 4-19.  
[2] 成金华, 阮晟哲, 宋益. 技术创新视角下中国关键矿产最优生产路径研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(10): 1-11.  
CHENG Jinhua, RUAN Shengzhe, SONG Yi. Study on the impact of technological innovation on the optimal production path of critical minerals in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(10): 1-11.  
[3] 潘永泰. 分级破碎[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.  
[4] WANG B, WANG G, WANG H, et al. Comparison of breakage behavior between the sieving crusher and ordinary teeth roll crushers[J]. *Energy Sources, Part A, Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2019, 41(2): 252-259.  
[5] 鞠建华, 韩见, 冯聪. 我国矿产资源综合利用现状评估与发展路径[J]. 中国矿业, 2024, 33(6): 14-25.  
JU Jianhua, HAN Jian, FENG Cong. Evaluation and development path of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(6): 14-25.  
[6] 李为, 詹肇麟, 李松. 破碎理论发展浅析[J]. 矿山机械, 2008, 36(19): 96-98.  
LI Wei, ZHAN Zhaolin, LI Song. Analysis on the development of crushing theory[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2008, 36(19): 96-98.  
[7] 王新文, 潘永泰, 刘文礼. 选煤机械[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.  
[8] 王保强. 大型分级破碎机破碎机理及冲击动力学特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.  
[9] 潘永泰. 我国煤炭破碎设备70年发展与展望[J]. 选煤技术, 2019(1): 32-36.  
PAN Yongtai. Development of China's coal crushing equipment over the past 70 years and perspective[J]. *Coal Preparation Technology*, 2019(1): 32-36.  
[10] 王保强, 王国法, 李朋. 国产煤用分级破碎设备的技术现状与发展趋势[J]. 煤炭工程, 2018, 50(9): 121-123.  
WANG Baoqiang, WANG Guofa, LI Peng. Technical development status of domestic coal sizing crusher[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(9): 121-123.  
[11] 潘永泰, 张新民. 分级破碎技术的发展趋势[J]. 选煤技术, 2010(5): 65-68.  
PAN Yongtai, ZHANG Xinmin. Growing tendency of sizing crush technology[J]. *Coal Preparation Technology*, 2010(5): 65-68.  
[12] 潘永泰, 路迈西, 张日祯. 国内外分级破碎技术的研究[J]. 选煤技术, 2003(3): 7-9.  
PAN Yongtai, LU Maixi, ZHANG Rizhen. Research on material-classified crushing technology carried out both at home and abroad[J]. *Coal Preparation Technology*, 2003(3): 7-9.  
[13] 赵川江, 潘永泰, 姜喜瑞, 等. 煤炭破碎设备的现状及适用范围[J]. 选煤技术, 1999(4): 44-45.  
ZHAO Chuanjiang, PAN Yongtai, JIANG Xirui, et al. The current situation and applicable scope of coal crushing equipment[J]. *Coal Preparation Technology*, 1999(4): 44-45.  
[14] BI Y, PAN Y, YU C, et al. An end-to-end harmful object identification method for sizer crusher based on time series classification and deep learning[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 120: 105883.  
[15] PAN Y, BI Y, ZHANG C, et al. Feeding material identification for a crusher based on deep learning for status monitoring and fault diagno-

- sis[J]. *Minerals*, 2022, 12(3): 380.
- [16] 潘永泰,王保强. 分级破碎机转速的断裂动力学分析[J]. *选煤技术*, 2003(6): 79-81.  
PAN Yongtai, WANG Baoqiang. Analysis on breaking dynamics based on rotation speed of classification crusher[J]. *Coal Preparation Technology*, 2003(6): 79-81.
- [17] 潘永泰,路迈西. 大处理能力分级破碎机的断裂动力学分析与工业应用[J]. *选煤技术*, 2006(S1): 27-30.  
PAN Yongtai, LU Maixi. Kinetic analysis on breaking mechanism of large-capacity sizing breaker[J]. *Coal Preparation Technology*, 2006(S1): 27-30.
- [18] ATKINSON B K. 岩石断裂力学[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- [19] 周强,潘永泰,郭庆,等. 分级破碎过程的断裂动力学分析和试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(5): 461-467.  
ZHOU Qiang, PAN Yongtai, GUO Qing, et al. Fracture dynamics analysis and experimental study on graded crushing process[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(5): 461-467.
- [20] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(3): 147-157.
- [21] GRADY D E, KIPP M E. The micromechanics of impact fracture of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5): 293-302.
- [22] 潘永泰,李泽康,周强,等. 点载荷作用下煤岩颗粒断裂强度的试验研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(8): 97-101.  
PAN Yongtai, LI Zekang, ZHOU Qiang, et al. Experiment on fracture strength of coal and rock particles under point load[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(8): 97-101.
- [23] ZHOU Q, GUO Q, PAN Y, et al. Experimental research on the strength distribution of brittle spheres under compression[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2021, 57(2): 59-70.
- [24] ZHOU Q, GUO Q, PAN Y, et al. Experimental research on energy-size distribution model of coal particle bed comminution[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2020, 56(5): 772-783.
- [25] ZHANG C, PAN Y, BI Y, et al. Fracture behavior and energy efficiency of silica under a tensile load using molecular dynamics[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 292: 109627.
- [26] CAO X, PAN Y, ZHANG C, et al. Molecular dynamics study on crack angle effect on amorphous silica fracture performance[J]. *Minerals*, 2023, 13(8): 1068.
- [27] CAO X, PAN Y, ZHANG C, et al. Molecular dynamics study on microporous direction effect on C-S-H fracture performance[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 109168.
- [28] GUO Q, PAN Y, ZHOU Q, et al. Calculation model of dissipated thermal energy of anthracite impact crushing, incorporating cooling process and spatial temperature distribution[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2023, 43(9): 1493-1508.
- [29] GUO Q, ZHOU Q, PAN Y, et al. The accurate algorithm of new surface area of single particle comminution, incorporating particle shape and roughness[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2021, 57(1): 259-272.
- [30] GUO Q, PAN Y, ZHOU Q, et al. Kinetic energy calculation in granite particles comminution considering movement characteristics and spatial distribution[J]. *Minerals*, 2021, 11(2): 217.
- [31] 马浩. 基于 ANSYS 的分级破碎机分体式机架的模式分析[J]. *选煤技术*, 2018(1): 40-42.  
MA Hao. ANSYS-based modal analysis of sizing crusher's split-type frame assembly[J]. *Coal Preparation Technology*, 2018(1): 40-42.
- [32] 李朋,王保强. 分级破碎机分体式机架联接方式的技术改进[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(7): 124-125.  
LI Peng, WANG Baoqiang. Technical improvement of connection method of split-type frame of sizing crusher[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(7): 124-125.
- [33] 李志强,王宏,王保强. 基于 Workbench 的不同公称传动比下 SSC1150 分级破碎机齿辊强度研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(6): 136-139.  
LI Zhiqiang, WANG Hong, WANG Baoqiang. Study on the strength of tooth roller of SSC1150 sizing crusher with different nominal transmission ratios based on Workbench[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(6): 136-139.
- [34] 刘振,杨忠福,刘静静,等. TCC7025 型分级破碎设备的载荷特性分析[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(11): 65-67.  
LIU Zhen, YANG Zhongfu, LIU Jingjing, et al. Analysis of load characteristics of TCC7025 sizing crusher[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(11): 65-67.
- [35] LIEBERWIRTH H, SILBERMANN F, SZCZELINA P. New insights into double roll crushing[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 202: 108298.
- [36] LIEBERWIRTH H, HILLMANN, HESSE M. Dynamics in double roll crushers[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 103-104: 60-66.
- [37] 陈通. 分级破碎机破碎齿材质及其性能的研究[J]. *选煤技术*, 2022(2): 32-36.  
CHEN Tong. Study on the materials for making the crushing tooth of sizing crusher and their properties[J]. *Coal Preparation Technology*, 2022(2): 32-36.
- [38] 冯海涛. MMD 进口刀齿帽材料性能研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2024(13): 46-48.  
FENG Haitao. Research on the material properties of MMD imported cutter tooth caps[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2024(13): 46-48.
- [39] 潘永泰,姜喜瑞,尹忠君,等. 分级破碎机破碎齿型的研究[J]. *选煤技术*, 1998(4): 7-8.  
PAN Yongtai, JIANG Xirui, YIN Zhongjun, et al. Research on the crushing tooth profile of Sizing crusher[J]. *Coal Preparation Technology*, 1998(4): 7-8.
- [40] 张明远. 基于正交试验法的破碎齿结构优化设计[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2019(7): 10-13.  
ZHANG Mingyuan. Structure optimization design of sizer teeth based on orthogonal test method[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2019(7): 10-13.
- [41] 卓荣明. 分级破碎机齿环式破碎齿的改进[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(10): 124-126.  
ZHUO Rongming. Improvement of tooth ring type broken teeth of classification crusher[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(10): 124-126.
- [42] 陈通,李朋,王昱. 分级破碎机大尺寸破碎齿热处理工艺研究[J]. *煤矿机械*, 2023, 44(5): 93-96.  
CHEN Tong, LI Peng, WANG Yu. Study on heat treatment process of large size crushing teeth of sizing crusher[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(5): 93-96.
- [43] 任瑞生. 分级破碎机联轴器失速保护装置的改进[J]. *煤炭工程*,

- 2018, 50(S1): 154-156.
- REN Ruisheng. Improvement of stall protection device for coupling of grading crusher[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(S1): 154-156.
- [44] 潘永泰, 白鹏, 李泽魁, 等. 同步齿轮对分级破碎机转速影响的动态研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(2): 126-130.
- PAN Yongtai, BAI Peng, LI Zekui, et al. Dynamic research on the effect of synchronized gear on rotational speed of sizing crusher[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(2): 126-130.
- [45] 李志强. 基于离散元的分级破碎机给料方式对双齿辊破碎性能影响的研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
- [46] 王甲, 董涵宇, 刘满平, 等. 基于 EDEM 不同转速的煤炭破碎效率分析[J]. *煤矿机械*, 2023, 44(2): 76-78.
- WANG Jia, DONG Hanyu, LIU Manping, et al. Analysis of coal crushing efficiency at different rotational speeds based on EDEM[J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(2): 76-78.
- [47] 李志强, 王宏, 王保强. 基于离散元的给料高度对分级破碎机齿辊的磨损研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(10): 135-138.
- LI Zhiqiang, WANG Hong, WANG Baoqiang. Study on the effect of feed height based on discrete element on the wear of tooth roller of sizing crusher[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(10): 135-138.
- [48] 董涵宇, 彭家辉, 王甲, 等. 基于离散元方法的分级破碎机受力磨损分析[J]. *科技与创新*, 2024(2): 132-135.
- DONG Hanyu, PENG Jiahui, WANG Jia, et al. Analysis of the force and wear of the classifying crusher based on the discrete element method[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2024(2): 132-135.
- [49] 王观民, 邱良, 刘朋, 等. 基于离散元的辊齿仰角对分级破碎机辊齿的磨损研究[J]. *矿山机械*, 2024, 52(4): 30-33.
- WANG Guanmin, QIU Liang, LIU Peng, et al. Research on wear of roller teeth in grading crusher by elevation angle of roller teeth based on discrete element[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2024, 52(4): 30-33.
- [50] 马浩, 徐海, 潘永泰. Ssc 破碎站在大峰露天煤矿装车系统中的应用[J]. *选煤技术*, 2012(1): 30-32.
- MA Hao, XU Hai, PAN Yongtai. Application of SSC sizing station in loading system in Dafeng opencut coal mine[J]. *Coal Preparation Technology*, 2012(1): 30-32.
- [51] 潘世奇. 龙固选煤厂精煤破碎机的选择和应用[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(4): 131-133.
- PAN Shiqi. Selection and application of crusher for clean coal in Longgu Coal Preparation Plant[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(4): 131-133.
- [52] 潘明涛, 王亚鹏. 分级破碎机在综放工作面的应用研究[J]. *矿业装备*, 2021(5): 234-235.
- PAN Mingtao, WANG Yapeng. Application research of sizing crusher in fully mechanized caving face[J]. *Mining Equipment*, 2021(5): 234-235.
- [53] 李泽毅. SSC800 分级破碎机在太原选煤厂的应用[J]. *机械管理开发*, 2022, 37(12): 184-186.
- LI Zeyi. SSC800 classifying crusher in Taiyuan coal processing plant[J]. *Mechanical Management and Development*, 2022, 37(12): 184-186.
- [54] 文柯然. 外旋式齿辊分级破碎机在红树梁选煤厂的应用实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2023(7): 1-3.
- WEN Keran. Application and practices of reverse rotation sizing crusher at Hongshuliang Coal Preparation Plant[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2023(7): 1-3.
- [55] 史月鹏. 分级破碎机电气控制应用分析[J]. *能源与节能*, 2019(3): 165-166.
- SHI Yuepeng. Application analysis of electrical control of classifying crusher[J]. *Energy and Conservation*, 2019(3): 165-166.
- [56] 亓愈. 双齿辊分级破碎机保护系统的研究探讨[J]. *煤炭技术*, 2014, 33(7): 177-179.
- QI Yu. Discussion of double roll sizing crusher protection system[J]. *Coal Preparation Technology*, 2014, 33(7): 177-179.
- [57] 李朋, 张明远, 王保强. 分级破碎机智能化技术现状与发展方向[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(1): 133-136.
- LI Peng, ZHANG Mingyuan, WANG Baoqiang. Status and development trends of intelligent technology of sizing crusher[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(1): 133-136.
- [58] 田小涛. 工作面双齿辊破碎机自动控制系统设计及应用[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(5): 152-155.
- TIAN Xiaotao. Design and application of automatic control system for double toothed roll crusher in working face[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(5): 152-155.
- [59] 潘永泰, 朱长勇, 惠学齐, 等. 基于音频信号的破碎机故障识别技术研究[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(8): 161-164.
- PAN Yongtai, ZHU Zhangyong, HUI Xueqi, et al. Research on fault identification technology of crusher based on audio signal[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(8): 161-164.
- [60] BI Y, PAN Y, LI G. A Mixed-Feed identification method for sizer crusher based on Squeeze-and-Excitation residual network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(13): 21706-21718.
- [61] 鞠建华, 韩见, 鞠方略. 中国智能矿山发展趋势与路径分析[J]. *中国矿业*, 2023, 32(5): 1-7.
- JU Jianhua, HAN Jian, JU Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(5): 1-7.
- [62] 刘冀尧, 李彬. 智能化和低碳化矿山机械在国内的应用及发展趋势[J]. *矿山机械*, 2024, 52(5): 49-54.
- LIU Jiyao, LI Bin. Application of intelligent and low-carbon mining machinery in China and its development trend[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2024, 52(5): 49-54.
- [63] 王炯辉. 矿业新技术时代的特征及展望[J]. *中国矿业*, 2025, 34(1): 9-16.
- WANG Jionghui. Characteristics and prospects of the new technology era in mining industry[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(1): 9-16.
- [64] 闫卫东, 周起忠, 胡容波, 等. 2025 年全球矿业展望[J]. *中国矿业*, 2025, 34(1): 17-26.
- YAN Weidong, ZHOU Qizhong, HU Rongbo, et al. Global mining outlook in 2025[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(1): 17-26.
- [65] 于瑞, 黄霞, 张伟波, 等. 2024 年全球矿业政策发展趋势分析[J]. *中国矿业*, 2025, 34(1): 27-36.
- YU Rui, HUANG Xia, ZHANG Weibo, et al. Analysis of global mining policy development trends in 2024[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(1): 27-36.