

分级破碎设备破碎齿成型工艺的研究应用

黄身水¹, 马秋乐², 吴彪¹, 赵国亮¹, 龙福强¹, 贾海洋²

1. 镇宁县红蝶实业有限责任公司, 贵州 安顺 561000

2. 泰伯克(天津)机械设备有限公司, 天津 301712

DOI:10.61369/ME.2025070006

摘 要 : 分级破碎设备作为矿山、建材、冶金等行业物料破碎环节的核心装备, 其性能直接影响破碎效率与物料处理质量。破碎齿作为分级破碎设备的关键工作部件, 长期承受物料的冲击、挤压与磨损, 其结构强度、耐磨性及使用寿命对设备整体运行稳定性和经济性至关重要。成型工艺作为破碎齿制造的核心环节, 决定了其微观组织、力学性能与服役行为。本文系统梳理了分级破碎设备破碎齿成型工艺的发展现状, 深入研究了铸造、锻造、焊接及复合材料成型等主流工艺的技术原理、关键控制因素与优化路径, 结合实际应用案例分析了不同成型工艺的适用性与应用效果, 指出了当前工艺存在的问题, 并对未来智能化、高性能化成型工艺发展趋势进行展望, 为破碎齿制造技术的创新与升级提供参考。

关 键 词 : 分级破碎设备; 破碎齿; 成型工艺; 铸造; 锻造; 复合材料

Research and Application of Forming Process for Crushing Teeth in Classification Crushing Equipment

Huang Shenshui¹, Ma Qiule², Wu Biao¹, Zhao Guoliang¹, Long Fuqiang¹, Jia Haiyang²

1. Zhenning County Hongdie Industrial Co., Ltd., Anshun, Guizhou 561000

2. Taibo (Tianjin) Mechanical Equipment Co., Ltd., Tianjin 301712

Abstract : Classification crushing equipment serves as the core apparatus for material crushing in industries such as mining, building materials, and metallurgy, with its performance directly influencing crushing efficiency and material processing quality. As the key working component of classification crushing equipment, crushing teeth endure long-term impacts, extrusions, and abrasions from materials, making their structural strength, wear resistance, and service life crucial for the overall operational stability and economic efficiency of the equipment. The forming process, as the core aspect of crushing teeth manufacturing, determines their microstructure, mechanical properties, and service behavior. This paper systematically reviews the development status of forming processes for crushing teeth in classification crushing equipment, delves into the technical principles, key control factors, and optimization paths of mainstream processes such as casting, forging, welding, and composite material forming. It combines practical application cases to analyze the applicability and application effects of different forming processes, points out the existing issues in current processes, and anticipates future trends towards intelligent and high-performance forming processes, providing references for the innovation and upgrading of crushing teeth manufacturing technology.

Keywords : classification crushing equipment; crushing teeth; forming process; casting; forging; composite materials

引言

在矿产资源开发、建筑固废资源化利用等领域^[1], 分级破碎设备承担着将大块物料破碎至特定粒度等级的重要任务, 而破碎齿作为与物料直接接触的核心部件, 其性能优劣直接关系到设备的破碎效率、能耗及维护成本。据统计, 在分级破碎设备的故障中, 因破碎齿磨损、断裂导致的停机占比超过30%, 因此, 提升破碎齿的综合性能成为设备优化升级的关键突破口^[2]。

成型工艺是破碎齿制造的核心环节, 其不仅决定了破碎齿的几何形状精度, 更深刻影响其内部组织结构、力学性能(如硬度、韧性、耐磨性)及服役寿命。随着材料科学与制造技术的发展, 破碎齿成型工艺已从传统的铸造工艺逐步向锻造、焊接复合、复合材料成型等多元化方向发展^[2]。本文通过对现有破碎齿成型工艺的研究与应用分析, 旨在为行业内破碎齿制造工艺的选择与优化提供理论与实践支撑。

一、分级破碎设备破碎齿成型工艺现状

破碎齿的工作环境恶劣，需同时具备高硬度以抵抗磨损、高韧性以承受冲击，因此对成型工艺的要求极为严苛。目前，行业内应用的破碎齿成型工艺主要包括铸造工艺、锻造工艺、焊接成型工艺及复合材料成型工艺，不同工艺在技术特点、性能表现及适用场景上存在显著差异^[3-5]。

（一）铸造工艺

铸造工艺因具有可制造复杂形状、生产成本较低、适应性强等优势，是早期及目前中小规模制造中应用最广泛的破碎齿成型工艺。其基本原理是将熔融的金属液（如高锰钢、合金钢等）浇注到预设的模具中，待金属液凝固冷却后，经清理、热处理等后续工序得到破碎齿毛坯。

传统铸造工艺在破碎齿制造中存在诸多不足：一是铸造过程中易产生气孔、砂眼、缩松等内部缺陷，导致破碎齿在服役过程中因应力集中而早期断裂；二是铸件的晶粒较为粗大，力学性能不均匀，尤其是韧性与耐磨性的平衡难以控制；三是模具精度对铸件尺寸精度影响较大，后续机加工量较大，材料利用率较低。

（二）锻造工艺

锻造工艺通过对金属坯料施加外力，使其在塑性变形状态下获得所需形状与尺寸，同时利用锻造过程中的塑性变形细化晶粒，改善金属内部组织结构，从而提升破碎齿的力学性能。锻造工艺主要包括自由锻、模锻等，其中模锻因能实现较高的尺寸精度与表面质量，在破碎齿制造中应用更为广泛。

锻造工艺制备的破碎齿具有晶粒细小、组织致密、力学性能优异等特点，其硬度与韧性的匹配性显著优于铸造工艺产品。但锻造工艺也存在局限性：一是对坯料的加热温度、变形速率等工艺参数控制要求严格，工艺窗口较窄；二是对于形状复杂的破碎齿，模具设计难度大、制造成本高，且锻造设备投资较大，不适用于小批量生产；三是锻造过程中易产生折叠、裂纹等缺陷，对操作人员的技术水平要求较高。

（三）焊接成型工艺

焊接成型工艺通常采用复合结构设计，即选用耐磨性优异的材料（如高铬铸铁、硬质合金等）作为破碎齿的工作层，选用韧性较好的材料（如碳素钢、合金钢等）作为基体层，通过焊接技术将两层材料复合为一体，形成兼具高耐磨性与高韧性的破碎齿。

焊接成型工艺实现了材料性能的优势互补，有效解决了单一材料难以同时满足耐磨性与韧性要求的问题。常用的焊接方法包括电弧焊、埋弧焊、激光焊等。然而，焊接成型工艺面临的主要挑战是焊接接头的质量控制，焊接过程中产生的残余应力、焊缝缺陷（如未焊透、夹渣等）易导致工作层与基体层结合不良，在冲击载荷作用下发生剥离失效，影响破碎齿的使用寿命。

（四）复合材料成型工艺

随着复合材料技术的发展，复合材料成型工艺在破碎齿制造中的应用日益受到关注。该工艺以金属或陶瓷为增强相，以金属基体（如高锰钢、合金钢）为连续相，通过粉末冶金、离心铸

造、原位合成等方法制备金属基复合材料破碎齿。

复合材料成型工艺可通过调控增强相的种类、含量与分布，实现破碎齿性能的精准设计，其耐磨性、耐冲击性等综合性能远超传统单一材料破碎齿。但目前复合材料成型工艺仍存在一些问題：一是增强相的均匀分散难度较大，易出现团聚现象，影响材料性能的稳定性；二是成型工艺复杂，生产效率较低，制造成本较高，限制了其大规模工业化应用。

二、破碎齿成型工艺关键技术研究

针对不同成型工艺的不足，行业内通过工艺优化、设备升级与材料创新等手段，不断提升破碎齿的成型质量与性能。以下从主流成型工艺的关键技术优化方向展开研究。

（一）铸造工艺的优化

1. 模具与浇注系统优化：采用消失模铸造技术替代传统砂型铸造，通过泡沫塑料模的精准设计与制造，减少铸件的尺寸误差与表面缺陷；优化浇注系统结构，合理设置浇口、冒口位置与尺寸，改善金属液的充型流动状态，减少气孔、缩松等缺陷的产生。

熔炼与浇注工艺控制：采用中频感应炉进行熔炼，精确控制熔炼温度与保温时间，减少金属液中的夹杂物含量；在浇注过程中采用真空浇注或保护气氛浇注技术，避免金属液与空气接触发生氧化，提升铸件的纯净度。

热处理工艺优化：通过调整淬火温度、保温时间与冷却速度，实现铸件组织的精细化控制。例如，对高锰钢破碎齿采用水韧处理工艺，消除铸态组织中的碳化物，获得单相奥氏体组织，提升其韧性与加工硬化能力；对合金钢破碎齿采用调质处理，实现硬度与韧性的最佳匹配。

（二）锻造工艺的关键技术

1. 坯料预处理技术：采用等温正火工艺对锻造坯料进行预处理，细化原始晶粒，改善坯料的塑性与均匀性，为后续锻造过程中的晶粒细化奠定基础。

2. 精密模锻工艺：开发多向模锻、等温模锻等精密锻造技术，精确控制锻造温度、变形速度与变形量，减少锻造缺陷的产生；采用数值模拟技术（如有限元分析）对锻造过程进行仿真优化，预测坯料的变形行为与缺陷形成位置，指导模具设计与工艺参数调整。

3. 锻造后热处理工艺：针对锻造后的破碎齿毛坯，采用低温回火工艺消除残余应力，稳定组织结构；对于高强度合金钢破碎齿，采用渗碳、渗氮等表面强化处理，进一步提升其表面硬度与耐磨性。

（三）焊接成型工艺的质量控制

1. 焊接材料与工艺匹配：根据工作层与基体层材料的特性，选择合适的焊接材料与焊接方法。例如，对于高铬铸铁与碳素钢的复合焊接，采用奥氏体不锈钢焊条进行过渡焊接，减少焊接接头的裂纹敏感性。

2. 焊接过程参数优化：通过试验优化焊接电流、电压、焊接

速度等工艺参数，控制焊接热输入量，减少焊接残余应力的产生；采用多层多道焊接工艺，并在焊接过程中进行层间保温与锤击，消除层间应力。

3.焊接后处理技术：焊接完成后对破碎齿进行去应力退火处理，降低残余应力；对焊接接头进行无损检测（如超声波检测、射线检测），及时发现并修复焊缝缺陷，确保焊接质量。

（四）复合材料成型工艺的创新

1.增强相分散技术：采用机械合金化、超声分散等技术，实现增强相在金属基体中的均匀分散；开发原位合成技术，通过化学反应在基体内部生成细小、均匀的增强相，避免增强相团聚问题。

2.成型工艺集成创新：结合离心铸造与粉末冶金技术，制备梯度复合材料破碎齿，使增强相在工作层呈梯度分布，进一步优化材料性能；采用3D打印技术制备复合材料破碎齿，通过逐层堆积实现增强相的精准分布与复杂结构的一体化成型。

3.界面结合强化：通过表面改性处理（如对增强相进行涂层处理），改善增强相与基体之间的界面结合强度，避免在服役过程中出现界面剥离失效。

三、破碎齿成型工艺的应用案例分析

（一）铸造工艺在某铁矿分级破碎设备中的应用

某铁矿的分级破碎设备原采用传统砂型铸造的高锰钢破碎齿，其平均使用寿命仅为15天，频繁更换破碎齿导致设备停机时间长，生产效率低下。为解决这一问题，制造企业对铸造工艺进行优化：采用消失模铸造技术，优化浇注系统与热处理工艺，将淬火温度控制在1050℃，保温时间2小时，水韧处理后快速冷却。

优化后的铸造破碎齿内部缺陷明显减少，晶粒尺寸细化30%，表面硬度提升至220HBW，冲击韧性达到100J/cm²。在实际应用中，破碎齿的使用寿命延长至35天，设备停机时间减少60%，年维护成本降低约40万元，显著提升了铁矿的生产效益。

（二）锻造工艺在建筑固废分级破碎中的应用

某建筑固废处理厂的分级破碎设备需处理硬度较高的混凝土块与钢筋混合物，对破碎齿的耐磨性与韧性要求极高。该厂采用模锻工艺制备的合金钢破碎齿，通过数值模拟优化锻造工艺参数，将锻造温度控制在850–900℃，变形量控制在60%，锻造后进行调质处理与表面渗氮处理。

该锻造破碎齿的表面硬度达到55HRC，冲击韧性为80J/cm²，在处理建筑固废过程中表现出优异的抗磨损与抗冲击性能，平均使用寿命达到60天，相较于传统铸造破碎齿，使用寿命提升了2倍，设备破碎效率提升15%，有效降低了建筑固废处理成本。

（三）焊接复合工艺在金属矿分级破碎中的应用

某金属矿的分级破碎设备破碎齿长期承受高硬度矿石的冲击磨损，单一材料破碎齿难以满足使用要求。采用焊接复合工艺制备破碎齿：以高铬铸铁为工作层（厚度15mm），以Q345钢为基体层，采用埋弧焊技术进行复合焊接，焊接后进行去应力退火

处理。

焊接复合破碎齿的工作层硬度达到60HRC，基体层冲击韧性大于100J/cm²，在实际应用中，其使用寿命达到50天，相较于纯高铬铸铁破碎齿（使用寿命20天）提升了1.5倍，且避免了纯高铬铸铁破碎齿易断裂的问题，设备运行稳定性显著提高。

四、存在的问题与发展展望

（一）当前存在的主要问题

尽管破碎齿成型工艺取得了显著进展，但在实际应用中仍存在一些亟待解决的问题：一是工艺参数的精准控制难度较大，不同批次生产的破碎齿性能一致性较差，尤其是复合材料成型工艺中增强相的分布均匀性难以保证；二是成型工艺与材料性能的匹配性不足，部分新型高性能材料因缺乏适配的成型工艺，其性能优势难以充分发挥；三是生产效率与制造成本的平衡问题突出，如精密锻造、复合材料成型等工艺虽能提升破碎齿性能，但生产周期长、成本高，限制了其大规模推广应用；四是成型过程的智能化水平较低，对操作人员的经验依赖度较高，难以实现工艺过程的实时监测与智能调控。

（二）未来发展展望

1.智能化成型工艺：结合物联网、大数据与人工智能技术，开发破碎齿成型过程的智能监测与调控系统。通过在成型设备上安装传感器，实时采集温度、压力、变形量等工艺参数，利用大数据分析建立工艺参数与产品性能之间的关联模型，实现工艺参数的自适应优化与智能调控，提升产品性能的一致性与稳定性。

2.高性能材料与成型工艺的协同创新：加强材料科学与制造技术的交叉融合，针对新型陶瓷增强金属基复合材料、梯度功能材料等高性能材料，开发适配的成型工艺，如激光增材制造、电磁脉冲成型等，充分发挥材料的性能优势，进一步提升破碎齿的耐磨性、耐冲击性与使用寿命。

3.绿色高效成型工艺：响应节能环保的发展需求，开发绿色成型工艺。例如，采用近净成型技术减少后续机加工量，提高材料利用率；开发低温成型工艺降低能耗；采用环保型模具材料与焊接材料，减少生产过程中的污染物排放，实现破碎齿制造的绿色化与高效化。

4.轻量化与集成化设计：结合拓扑优化与仿生设计理念，优化破碎齿的结构形状^[6-7]，在保证性能的前提下实现轻量化设计，降低设备运行能耗；开发一体化成型工艺，实现破碎齿与其他部件的集成制造，减少装配环节，提升设备的整体可靠性。

五、结论

分级破碎设备破碎齿的成型工艺直接决定其性能与服役寿命，对设备的运行效率与经济性具有重要影响。本文通过对铸造、锻造、焊接及复合材料成型等主流工艺的研究表明，各成型工艺均有其优势与局限性，通过工艺优化可显著提升破碎齿的综合性能。铸造工艺通过模具优化与热处理调控，可减少内部缺

陷、细化晶粒；锻造工艺借助精密成型与表面强化技术，能实现力学性能的大幅提升；焊接复合工艺通过材料优势互补，解决了耐磨性与韧性的平衡问题；复合材料成型工艺则为破碎齿性能的精准设计提供了可能。

应用案例表明，优化后的成型工艺在实际生产中能有效延长破碎齿使用寿命、降低设备维护成本、提升生产效率。针对当前

工艺存在的参数控制难、成本高、智能化水平低等问题，未来应重点发展智能化成型、高性能材料协同创新、绿色高效成型及轻量化集成化设计等方向，推动破碎齿制造技术的持续升级，为分级破碎设备的高效稳定运行提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李朋. 分级破碎机可靠性分析与提高改进措施 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(08): 223-225.
- [2] 郝铭. 分级破碎机可更换破碎齿性能影响因素分析 [D]. 煤炭科学研究总院, 2025. DOI: 10.27222/d.cnki.gmkzy.2025.000060.
- [3] 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, 50(02): 32-36. DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2022.02.006.
- [4] 王保强. 煤用分级破碎机耐磨材质的研究 [J]. 矿山机械, 2016, 44(02): 52-54. DOI: 10.16816/j.cnki.ksjx.2016.02.014.
- [5] 元愈, 李占贤. 分级破碎齿在线堆焊修复探讨 [J]. 煤矿机械, 2013, 34(01): 217-218. DOI: 10.13436/j.mkjx.2013.01.134.
- [6] 刘文统, 刘建军, 刘振, 等. 基于 ANSYS-Workbench 的破碎齿热偶分析及应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (12): 32-35. DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2024.12.007.
- [7] 刘振, 张学斌, 张伏平, 等. TCC 分级破碎机结构优化及应用实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (08): 28-30. DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2024.08.007.