石灰窑内矿料破碎装置结构设计及分析

崔　钺[a,b]，杨相彬[b]，王会刚[a,b]，刘晓雯[a,b]，高允政[a]

（唐山学院 a. 机电工程学院；b. 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室，
河北 唐山 063000）

摘要：为实现石灰窑内狭小空间的石灰石二次破碎作业，设计了一种四推杆破碎装置。在完成破碎装置总体结构设计的基础上，通过静力学分析得到了沿镐钎路径的应力分布情况，最大应力值为 139 MPa，满足使用要求；通过动力学分析得到了镐钎前六阶的固有频率（第六阶最大值为 8 118.7 Hz）及模态振型，并对照仿真数据对破碎装置进行了样机试制，对破碎过程中装置的稳定性进行了校验。结果表明，破碎装置可有效节省窑内二次破碎作业的人力成本且能提高破碎效率和安全性，同时能提升石灰石破碎作业的经济效益。

关键词：石灰石；矿料；破碎装置

中图分类号：TH69　**文献标志码**：A　**文章编号**：1672 - 349X(2025)06 - 0008 - 04

DOI：10. 16160/j. cnki. tsxyxb. 2025. 06. 002

Structural Design and Analysis of a Mineral Crushing Device in the Lime Kiln

CUI Yue[a,b], YANG Xiangbin[b], WANG Huigang[a,b], LIU Xiaowen[a,b], GAO Yunzheng[a]

（a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. Key Lab of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation, Tangshan University, Tangshan 063000, China）

Abstract: To realize secondary limestone crushing in the confined space inside a lime kiln, a four-push-rod crushing device is designed. Based on the overall structural design, static analysis was conducted to obtain the stress distribution along the pickaxe path, with a maximum stress of 139 MPa meeting operational requirements; Dynamic analysis yields the first six natural frequencies (maximum value of 8 118. 7 Hz for the sixth order) and modal shapes, and prototype testing of the crushing device was conducted compared with simulation data, verifying the stability of the device during the crushing process. The results show that the device can effectively reduce labor costs for secondary crushing operations in the kiln, enhance efficiency and safety, and improve economic benefits in limestone crushing.

Key Words: limestone; mineral materials; crushing device

收稿日期：2025 - 05 - 04

作者简介：崔钺（1987—），男，河北保定人，副教授，博士，研究方向为机电一体化设计；
杨相彬（1987—），男，河北唐山人，工程师，研究方向为机械制造。

0　引言

石灰窑主要由窑体、传动、密封、上料及燃烧 5 个系统构成。由于上料过程中的初筛不能保证全部的石灰石破碎粒度可控，因此需要窑内二次破碎，并且破碎系统的造型应力求做到系统简单、设备型号正确、工作可靠、操作维修方便等[1]。由于窑炉内部空间狭小且作业温度极高，对破碎装置的整体耐用性和抗高温性能有着严格的要求，传统的破碎技术难以适应这一特殊环境下的工艺要求，因此，研发一种新型的石灰窑专用石灰石破碎装置，不仅是对现有技术的必要补充，更是行业发展的必然趋势[2]。

随着智能制造的兴起，石灰石破碎装置的设计逐渐向高效节能、粒度精准控制和模块化方向发展。在矿料的破碎特性研究方面，任非[3]采用单轴加载破碎试验分析了矿料的尺寸强度效应；Jimenez 等[4]采用离散元中的颗粒黏结模型进行了模拟物料破碎过程中的微观形态与力学特性变化研究；周宇杭[5]则在颗粒黏结模型的基础上，通过数值模拟分析了石灰石物料破碎的全过程。在矿料破碎试验方面，Rosenkranz 等[6]设计了落重冲击试验装置并对石子物料进行了冲击破碎试验；杨明坤[7]对落锤冲击试验机进行了改进；刘金铭等[8]设计了高速冲击试验机并测试了相关结构件的冲击特性；胡育齐[9]在 PL8500 型立轴冲击式破碎机的基础上，通过 CFD-DEM 气固耦合分析了物料破碎冲击碰撞规律，提升了冲击式破碎机的粒度破碎能力。本文设计的石灰窑专用破碎装置正是基于这些研究成果的产品化应用。

1　总体设计及模型设置

1.1　动力源的选取

目前常用的动力源有液动、电动和气动。出于安全考虑，放置于石灰窑内部的矿石破碎装置需要有防爆功能，因此，本设计在比较了电动、液动和气动的优缺点后选用了气动。根据 Nadplski 单矿粒静压破碎模型进行破碎冲击时的能量计算[10−11]，即根据初选冲击矿粒度小于给矿粒度 10% 进行冲击破碎能 E_{cs} 的估算，并根据冲击破碎能的大小进行破碎装置气动压力输入大小的选择：

$$t_{10}=M(1-e^{-f_{mat}\cdot x^{n}\cdot E_{cs}})。\tag{1}$$

式中，t_{10} 为冲击矿粒度小于给矿粒度1/10的百分比(%)；M 为矿石破碎特性参数；f_{mat} 为破碎特性模型参数(kWh/t)；x 为矿石平均粒度(m)；n 为粒度效应因子；E_{cs} 为冲击破碎能量(kW/h)。

破碎设备按照工作原理可分为颚式、圆锥式、辊式及冲击式等类型。考虑石灰窑内复杂的作业环境，本设计采用冲击式破碎方式，选用机械臂和末端冲击头结合作业。机械臂利用四推杆结构助力，定位精确，加之气动动力源与电动推杆驱动能够产生较大的瞬间冲击力，从而实现了对较大矿石的冲击破碎；将风镐作为末端冲击头，耐磨性好且可更换，使得整体破碎系统更加简洁、高效。这种组合不仅提升了破碎作业的精准度，而且优化了特殊工况下系统的适应性和操作便捷性。

1.2　机械结构的设计

该破碎装置冲击瞬间有[12]：

$$M_1V_1+M_2V_1=M_1V_2+M_2V_2+mV_2。\tag{2}$$

式中，M_1 为镐钎的质量(kg)；M_2 为活塞的质量(kg)；m 为石灰石的质量(kg)；V_1 为冲击前镐钎速度(m/s)；V_2 为冲击后石灰石和活塞的速度(m/s)。

活塞的冲击能为：

$$E=F_1\lambda s=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)c_1p_0\lambda s。\tag{3}$$

式中，s 为活塞行程(m)；F_1 为镐钎作用力(N)；λ 为行程系数；p_0 为供气压(Pa)；c_1 为气镐冲程构造系数；D 与 d 分别为气缸内径及气缸活塞杆直径(m)。

为满足破碎装置无死角破碎，选用步进电动推杆调整执行器的位置姿态，如图 1 所示。

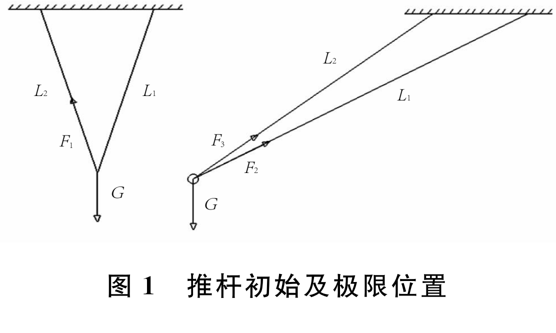


图 1　推杆初始及极限位置

图 1 中，推杆初始位置几何关系为：

$$L_2{}^2=h^2+(\frac{b}{2})^2。\tag{4}$$

推杆极限位置几何关系为：

$$L_1{}^2=h^2+B^2。\tag{5}$$

式中，电动推杆运动至极限位置时最长，记作 L_1；电动推杆在初始收缩状态时，记作 L_2，$L_1=2L_2$；两推杆的距离为 b；执行末端初始位置到定平台的距离为 h；石灰窑进料口工作空间范围为 B。

在 b 为 300 mm，h 为 550 mm，B 为 2 000 mm 的情况下，可由式(4)(5)求得电动推杆行程 L_2 为 570 mm。

结构设计采用并联机械臂，装置上端固定在窑体上，下端执行器由 4 根电动推杆驱动实现镐钎位置姿态变换，中间辅助杆限制镐钎末端的自由度以提高机械臂的整体刚度。镐钎冲击破碎动力源采用气动，气缸活塞杆直径为 14 mm，供气压力 0.4～0.5 MPa，镐钎尺寸为 ϕ20 mm×220 mm。根据超标石灰石的最大粒度(200 mm)控制破碎装置整体长度为 1 300 mm，使作业范围可覆盖单体超标石灰石，满足窑炉内部空间使用要求。采用 4 根推杆驱动镐钎满足作业范围内各个方向的移动要求，确保破碎过程中定位精准。破碎装置如图 2 所示。

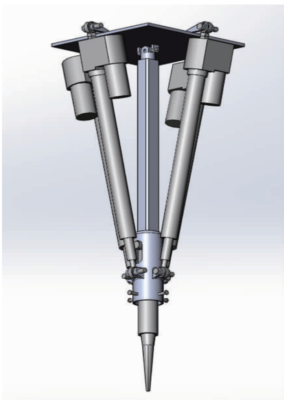


图 2　破碎装置

镐钎因与矿料直接作用而为易磨损件。采用四面体网格划分对其进行力学分析(如图 3 所示)，单元尺寸调整至小于 5 mm，总体单元数量为 63 100 个。镐钎上连接面为固定端，根据试验数据受力采集情况，对镐钎底部施加 7 666 N作用力。

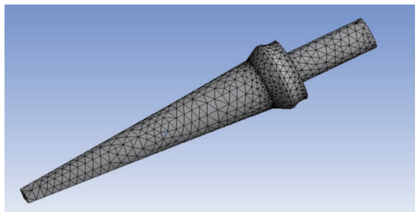


图 3　镐钎网格划分

2　模拟结果与试验验证

图 4 为镐钎总体及剖视的应力分析云图。镐钎的最大应力发生在其底部，最大应力值为 139 MPa，低于选用的镐钎材料的屈服强度，最大应力值未超过材料的许用应力，故能够满足使用要求。

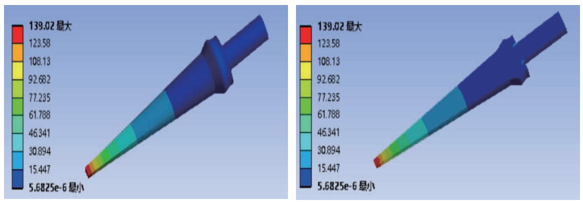


图 4　镐钎应力云图(总体及剖视)

图 5 为镐钎应力路径图。在镐钎末端与矿料接触位置时应力最大为 139 MPa，镐钎沿长度方向结构不断变宽，承载能力不断增强，镐钎所受的应力值不断下降。在 162 mm 位置处镐钎结构变窄，承载能力降低，应力值有小幅度的增加，随后应力值继续变小且在固定侧逐渐趋近于 0。

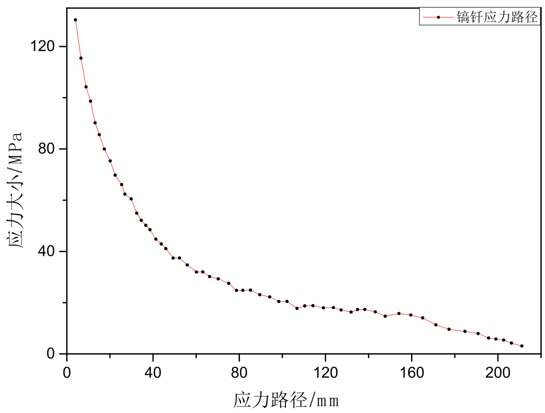
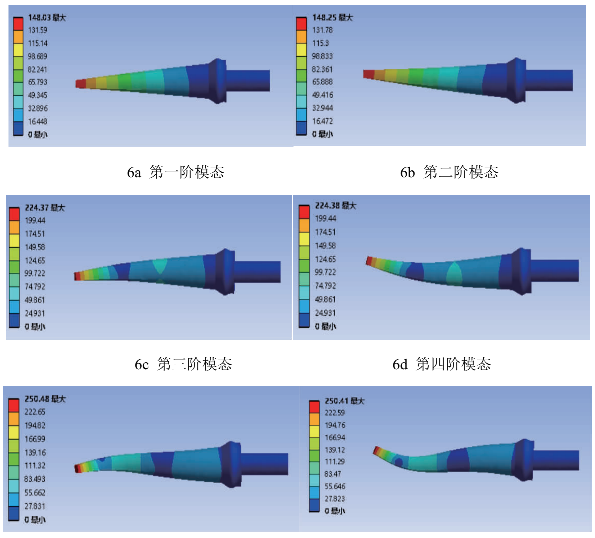


图 5　镐钎应力路径

对镐钎进行模态分析，重点关注镐钎的固有频率及振型。模态方程将系统中物理坐标系所描述的响应向量通过坐标系转换放入模态坐标系中进行分析[13]，提取前 6 阶模态，如图 6 所示。



6a 第一阶模态　6b 第二阶模态

6c 第三阶模态　6d 第四阶模态

6e 第五阶模态　6f 第六阶模态

图 6　镐钎前六阶模态

镐钎在第一阶模态时的固有频率为 1 236.2 Hz，镐钎前端在 *XOZ* 平面沿 *X* 轴方向摆动；第二阶的固有频率为 1 239.1 Hz，镐钎前端在 *XOZ* 平面沿 *X* 轴方向摆动；第三阶的固有频率为 3 759.6 Hz，镐钎整体在 *YOZ* 平面沿 *Y* 轴呈 C 形扭动；第四阶的固有频率为 3 764.2 Hz，镐钎整体在 *YOZ* 平面沿 *Y* 轴呈 C 形扭动；第五阶的固有频率为 8 111.4 Hz，镐钎整体在 *YOZ* 平面沿 *Y* 轴呈 S 形扭动；第六阶的固有频率为 8 118.7 Hz，镐钎整体在 *YOZ* 平面沿 *Y* 轴呈 S 形扭动。通过前 6 阶镐钎振型的分析可得出振型危害情况，设计时可据此调控作业过程中破碎装置的固有频率以延长装置的使用寿命。

至此，破碎装置样机试制完成，并在实验室环境下进行了石灰石矿料的破碎试验（如图 7 所示）。破碎装置可在设计作业范围内实现动作位置准确和石灰石破碎作业，破碎后的石灰石大小满足二次破碎粒度要求，设备运行稳定，镐钎未出现异常磨损。

图 7　样机试制及破碎试验

3　结论

基于对石灰窑内矿料破碎工况的分析，完成了一种结构简单且实用性强的破碎装置的总体结构设计，并通过静力学分析得到了沿镐钎路径的应力分布情况，通过动力学分析得到了镐钎前六阶的固有频率及模态振型，根据固有频率分析结果规避了装置的共振情况，对照仿真数据进行了样机试制并校验了破碎过程中装置的稳定性。

下一步将基于现有的力学分析与试验结果对该装置结构进行优化设计，以进一步提高装置的应力承载和抗振性能，提升整体破碎效率，确保装置在窑炉内严苛条件下作业的可靠性。

参考文献：

[1]　ZHANG Y，LI X，WANG H，et al. Soil compressibility and resilience based on uniaxial compression loading test in response to soil water suction and soil organic matter content in northeast China[J]. Sustainability，2022，14(5)：2620.

[2]　高强，张建华. 破碎理论及破碎机的研究现状与展望[J]. 机械设计，2009，26(10)：72 - 75.

[3]　任非. 混凝土单轴压缩蠕变试验的模拟研究[J]. 混凝土，2022(1)：65 - 69.

[4]　JIMENEZ-HERRERA N，BARRIOS G K P，TAVARES L M. Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds[J]. Advanced powder technology，2018，29(3)：692 - 706.

（下转第 99 页）

培养目标，明确课程目标、重构课程内容、优化教学方法，并推动学生与企业教师深度交流，使之接触实际工程并开展工程锻炼，从而有效激发了学生的学习积极性，提升了其岗位技能和职业竞争力，促进其成为合格的高级工程技术人才。总之，这一课程建设模式不仅有效破解了传统课程与行业需求脱节的问题，实现了教学效果与学生岗位技能、职业素养的同步提升，更印证了产教融合与一流课程建设同向同行的可行性，为同类院校深化课程改革、培养高素质应用型人才提供了实操性强的参考范式。

诚然在“建水”教学实践中仍存在一些挑战，一是翻转班与平行班的学生在知识应用上还存在一定差异，二是学生处理复杂工程问题的能力还有待加强。因此，在未来教学中会对不同层次的学生持续加强针对性教学，并继续优化教学方法和内容，以便进一步提升学生的知识应用能力以及解决复杂工程问题的能力。

参考文献：

[1] 国务院办公厅. 关于深化产教融合的若干意见[EB/OL]. (2017-12-19)[2024-11-02]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-12/19/content_5248564.htm.

[2] 吴岩. 融合发展协同攻坚：以产教融合推进“质量革命”[R/OL]. (2019-11-30)[2024-11-02]. http://k.sina.com.cn/article_2613324761_9bc42bd902000pwsk.html.

[3] 高品，薛罡，刘振鸿，等. 工程化教育背景下“建筑给水排水工程”课程教学改革与实践[J]. 东华大学学报(社会科学版)，2019，19(2)：191－195.

[4] 贾海燕，周典. 产教融合视域下“岗课赛证思”五元融合的课程教学改革与实践：以道路工程施工课程为例[J]. 黄冈职业技术学院学报，2024，26(4)：31－36.

[5] 刘志峰，马颖忆，张启菊，等. “产教融合”应用型本科高校一流本科课程建设的应然之路：基于《建筑设计Ⅳ》的建设探讨[J]. 汉江师范学院学报，2023，43(4)：115－120.

[6] 马力，魏守凤，段然，等. 项目引导式教学在“园林设计”课程中的探索与实践[J]. 宁波工程学院学报，2021，33(1)：95－100.

[7] 王倩倩，于竹青，胡秀兰. 无机非金属材料工学课程科产教融合教学改革探索[J]. 高教学刊，2024(29)：152－155.

[8] 黄心怡，陈艳，吴轶群. 产教融合背景下的“电气安全技术”课程改革与实践[J]. 科技风，2024(31)：17－19.

（责任编校：李秀荣）

（上接第 11 页）

[5] 周宇杭. 应力加载作用下的石灰石物料破碎特性研究[D]. 南京：东南大学，2022.

[6] ROSENKRANZ S, BREITUNG-FAES S, KWADE A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills[J]. Powder technology, 2011, 212(1): 224－230.

[7] 杨明坤. 数字化落锤冲击试验机改进设计[D]. 重庆：重庆大学，2017.

[8] 刘金铭，张建卓，潘一山，等. 高速冲击试验机设计与结构件冲击拉压试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2019，38(3)：216－223.

[9] 胡育齐. 冲击式破碎机单颗粒物料累积损伤破碎行为研究[D]. 贵阳：贵州大学，2023.

[10] NADPLSKI S, KLEIN B, GONG D, et al. Development and application of an energy benchmarking model for mineral comminution[C]//The 6th International Conference on Semi-Autogenous and High Pressure Grinding Technology, Perth, Australia, 2015: 453－456.

[11] 邓琪昌. 几种岩石类材料破碎特性及能耗研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.

[12] 秦大同，谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 2 版. 北京：化学工业出版社，2019：1153－1154.

[13] 周炬，苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解(动力学)[M]. 北京：人民邮电出版社，2024：42－48.

（责任编校：白丽娟）