

基于EDEM仿真技术的轮斗挖掘机铲斗结构优化设计

孙 龙

中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司 沈阳 110000

摘 要：轮斗挖掘机铲斗结构优化设计直接影响挖掘效率和能耗水平。研究采用EDEM离散元仿真技术，建立了煤岩离散元模型并进行参数标定，分析了铲斗在挖掘过程中的动力学响应特征。针对铲斗底板、侧板和耳板等关键部位的受力状态，从几何参数和连接方式等方面进行了结构优化设计。实验结果表明，优化后铲斗的挖掘效率提升18.6%，电能消耗率降低12.3%，最大等效应力下降23.1%，显著改善了铲斗的整体性能。

关键词：轮斗挖掘机；铲斗结构；EDEM仿真

引言

轮斗挖掘机广泛应用于露天煤矿，其铲斗结构直接影响挖掘效率和能耗。合理设计轮斗挖掘机铲斗结构，对于提高矿山开采效率、降低能源消耗具有重要意义^[1-2]。目前国内外学者针对轮斗挖掘机铲斗结构开展了大量研究，但仍存在铲斗结构参数难以优选、优化效果不佳等问题。本文基于EDEM离散元仿真技术，对轮斗挖掘机铲斗结构进行优化设计，为提高其挖掘性能提供理论参考。

1 轮斗挖掘机铲斗的现状分析

目前，铲斗结构设计主要采用三维建模和有限元分析相结合的方法，通过静力学分析优化铲斗的几何参数和板材厚度等，以提高铲斗的强度和刚度^[3]。然而，这种设计方法难以全面考虑铲斗在实际挖掘过程中受到的动态载荷作用。此外，一些研究采用正交试验设计，通过对比分析不同结构参数组合下的挖掘阻力，得出影响铲斗性能的主要参数。但是，由于铲斗结构参数众多且存在耦合效应，单纯依靠正交试验难以获得全局最优的参数组合。总的来说，现有轮斗挖掘机铲斗结构设计方法存在以下局限性：基于静力学分析，未充分考虑挖掘过程中的动态载荷效应；缺乏铲斗与煤岩相互作用的仿真分析，难以准确评估铲斗的受力状态；结构参数优化过程复杂，难以快速获得最优设计方案。

2 基于 EDEM 仿真技术的轮斗挖掘机铲斗结构优化

2.1 优化分析过程

2.1.1 煤岩建模及标定

为了准确模拟轮斗挖掘机铲斗与煤岩的相互作用，首先需要建立合理的煤岩离散元模型。本文采用线性接触模型，通过赋予颗粒间的法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 来描述颗粒接触力。为提高计算效率，选用球形颗粒代替实际煤岩块体，通过调整颗粒尺寸分布和粘附力 γ 等参数，使其宏观力学性质与实际煤岩一致^[4]。

接下来需要对建立的煤岩离散元模型进行参数标定，以确保模型能够真实反映煤岩的物理力学特性。标定过程中，采用拉氏试验和直接剪切试验相结合的方法，分别测定煤岩的抗拉强度 σ_t 、内聚力 c 和内摩擦角 ϕ 等参数。通过优化迭代算法，不断调整离散元参数，直至数值试验结果与室内试验结果吻合。其中，参数迭代优化采用最小二乘法，目标函数为数值试验值与实测值的均方根误差^[5]。当RMSE小于设定阈值时，认为离散元参数满足标定要求。

通过煤岩建模及参数标定，获得了与实际煤岩力学性质相近的离散元模型，为后续轮斗挖掘机铲斗结构优化奠定了基础。在此基础上，下一步将开展挖掘机作业过程仿真，分析铲斗受力状态并评估其挖掘性能。

2.1.2 挖掘机作业过程仿真

在获得标定后的煤岩离散元模型基础上，利用EDEM软件对轮斗挖掘机实际作业过程进行三维动力学仿真。首先，根据挖掘机的结构参数和运动特性，在EDEM中构建虚拟样机模型，包括铲斗、齿轮、轮辋等关键部件。然后，基于多体动力学理论，定义各部件之间的运动约束和接触关系，如铰接、滑移等^[6]。在此基础上，考虑铲斗与煤岩之间的相互作用，采用Hertz-Mindlin接触模型计算二者的接触力。该模型综合考虑了法向和切向方向的接触变形，接触力 F_c 可表示为：

$$F_c = F_n + F_t = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_n^{3/2} + \sqrt{8G^*\sqrt{R^*}\delta_n}\delta_t$$

其中， F_n 和 F_t 分别为法向和切向接触力， E^* 为等效弹性模量， R^* 为等效半径， δ_n 和 δ_t 分别为法向和切向重叠量， G^* 为等效剪切模量。

通过设置铲斗的转速、下降速度等运动参数，模拟挖掘机在不同工况下的实际作业情况。仿真过程中，利用EDEM内置的速度追踪算法，实时记录铲斗各部位的速度

度、加速度和受力数据，并将其导出用于后续分析^[7-8]。同时，提取铲斗与煤岩的接触面积、接触压力等信息，评估铲斗的载荷分布特征^[9]。

基于以上仿真结果，可全面掌握轮斗挖掘机铲斗在实际作业中的动力学行为和受力状态，为优化铲斗结构提供重要依据。

2.1.3 结果分析

通过对轮斗挖掘机作业过程的三维离散元仿真，获得了铲斗在实际挖掘中的动力学响应数据。为量化评估铲斗各部位的受力状态，引入载荷分布不均匀系数 η ，其定义为：

$$\eta = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{avg}}}$$

其中， $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 和 F_{avg} 分别为铲斗受力的最大值、最小值和平均值。 η 值越大，表明铲斗受力分布越不均匀，容易产生应力集中，降低铲斗使用寿命。

为直观比较不同部位的受载特点，表1给出了铲斗底板、侧板和耳板的载荷分布不均匀系数^[10]。可以看出，侧板和耳板的 η 值明显高于底板，说明铲斗两侧受力相对集中。分析其原因，主要是由于侧板和耳板直接与大块煤岩接触，冲击载荷较大。而铲斗底板虽然承受了较大的垂直向载荷，但分布相对均匀。

表1 铲斗不同部位的载荷分布不均匀系数

部位	底板	侧板	耳板
η	1.35	2.87	3.12

此外，通过对铲斗应力云图的分析，发现铲斗底部边缘、侧板与底板的连接处以及耳板根部存在明显的应力集中现象，最大Von Mises等效应力达到了215MPa，接近铲斗材料的屈服强度。这些高应力区域极易发生疲劳断裂，是铲斗结构优化的重点^[11-13]。

综合以上仿真结果，可得出以下结论：1）铲斗侧板和耳板受力相对集中，是发生变形和断裂的薄弱部位；2）铲斗底部边缘和侧板连接处应力水平较高，需重点加强；3）耳板与齿座的连接方式不合理，应进行结构改进。这为后续铲斗结构的优化设计提供了明确方向和重要依据。

2.2 具体结构优化设计

结合前文对轮斗挖掘机铲斗受力状态及应力分布特征的分析，本文针对铲斗底板、侧板和耳板等关键部位进行了针对性的结构优化设计。为提高铲斗整体受力均匀性并延长其使用寿命，重点调整了铲斗几何参数范围，包括底板弧度半径、侧板倾斜角度以及耳板连接方式。

底板弧度半径设定在1200mm至1800mm之间，以减

少底部边缘应力集中现象；侧板倾斜角度控制在75°至85°范围内，避免因过大冲击载荷导致变形；耳板则通过增加加强筋和优化根部过渡圆角设计，将圆角半径扩大至50mm以上，从而降低局部应力水平^[14]。为实现上述优化目标，实际中采用了数控折弯机和激光切割设备进行加工制造，其中数控折弯机的工作压力范围为300吨至600吨，能够精确成型复杂曲面结构，而激光切割设备的切割精度可达±0.1mm，确保板材尺寸的一致性和装配精度。这些设备的优势在于既能满足高强度材料的加工需求，又能保证结构细节的精细化处理，从而提升铲斗的整体性能。

优化后的铲斗在实际作业中，底板主要承担垂直方向的挖掘阻力，侧板负责引导煤岩进入铲斗内部，耳板则通过改进后的连接方式有效分散传递载荷，使各部位协同工作更加高效稳定^[15-16]。这种设计不仅提高了铲斗的抗疲劳能力，还显著增强了其在复杂工况下的适应性，为露天煤矿高效开采提供了可靠保障。

3 优化结构的对比分析

3.1 实验设计

为验证本文优化后的轮斗挖掘机铲斗结构在实际场景中的应用效果，设计了对比实验。实验目标是评估优化前后铲斗的挖掘性能差异，主要考察挖掘效率、电能消耗率和铲斗应力水平等指标。实验选取某露天煤矿作为现场试验场地，分别使用优化前（传统结构）和优化后的两种铲斗进行挖掘作业，每种铲斗测试3个循环，单个循环作业时长控制在2小时左右。保持轮斗挖掘机其他部件结构及操作参数一致，视作业区煤岩条件基本相同。

实验中，传统铲斗结构选用优化前的原始设计方案，铲斗容量为0.6m³，底板弧度半径为1000mm，侧板倾斜角为70°，耳板与齿座采用焊接连接。优化后的铲斗几何参数如2.2节所述，容量仍为0.6m³（但能力提升至4000m³/h），底板弧度半径1500mm，侧板倾斜角80°，耳板通过加强筋与底板、侧板可靠连接。

实验过程严格遵循标准操作规程，由专业团队操控挖掘机，确保试验数据的可靠性。使用轮斗速度传感器、电能监测设备等实时采集轮斗转速、电能消耗率等数据，通过应变片获取铲斗的应力信息。实验结束后，对所有数据进行统计分析，并与预设的评价指标对比，具体包括：

①平均挖掘效率：优化后铲斗的目标值 $\geq 2000\text{m}^3/\text{h}$ ，较优化前提升15%以上；

②电能消耗率：优化后铲斗的目标值 $\leq 0.5\text{kWh}/\text{m}^3$ ，较优化前降低10%以上；

③铲斗最大等效应力：优化后铲斗的目标值 $\leq 180\text{MPa}$ ，较优化前降低20%以上。

通过上述3个定量指标，结合铲斗在不同工况下的受力分布云图、疲劳寿命预测等，多角度评估优化设计的实际效果。实验共获取数据组数不少于18组，每种指标重复测量3次取平均值，保证结果的统计意义。

3.2 结果分析

通过对比实验，获得了传统铲斗和优化后铲斗在实际作业中的性能参数统计数据，如表2所示。可以看出，优化后的铲斗在挖掘效率、电能消耗率和最大应力水平三个方面均有明显改善。其中，平均挖掘效率达到 $4120\text{m}^3/\text{h}$ ，较优化前提高了18.6%，电能消耗率降至 $0.47\text{kWh}/\text{m}^3$ ，降幅达12.3%，最大等效应力控制在 172MPa 以内，较优化前下降了23.1%。

表2 传统铲斗与优化后铲斗性能对比

评价指标	传统铲斗	优化后铲斗	变化率
挖掘效率 (m^3/h)	3475	4120	+18.6%
电能消耗率 (kWh/m^3)	0.53	0.47	-12.3%
最大等效应力 (MPa)	224	172	-23.1%

进一步分析发现，铲斗优化后挖掘效率的提升主要得益于容量的合理设计和侧板倾角的优化，使得铲斗装载系数由原来的0.82提高到0.93，从而带来了18.6%的效率增益。同时，优化后的铲斗使得装载过程更加顺畅，降低了挖掘阻力，轮斗在相同功率输出下转速得以提高5%左右，也为效率提升做出了贡献。电能消耗率的降低一方面源于挖掘效率的提高，更重要的是优化后铲斗受力更加合理，避免了不必要的能量损失。等效应力水平的大幅下降，则主要归功于应力集中区域的重点加强，尤其是耳板连接方式的改进，极大地提高了铲斗的结构可靠性，疲劳寿命预计可延长30%以上。

综合以上实验结果可以得出，本文优化设计的铲斗结构，在实际工程应用中取得了显著成效。无论是从挖掘效率、能耗水平还是可靠性方面，都较传统设计有了长足进步。这不仅验证了基于EDEM仿真的结构优化方法

的有效性，也为轮斗挖掘机铲斗的设计提供了新思路。后续研究中，可进一步拓展试验工况，在更加复杂的现场环境下开展对比测试，并针对轻量化、模块化等方向继续深化优化设计，使轮斗挖掘机的整机性能得到全面提升。

4 结束语

通过EDEM离散元仿真技术对轮斗挖掘机铲斗结构进行优化设计，获得了以下主要成果：建立了煤岩离散元模型及参数标定方法；揭示了铲斗挖掘过程中的动力学响应规律；提出了基于受力特征的铲斗结构优化方案。优化后的铲斗在挖掘效率、能耗水平和结构可靠性等方面均取得显著提升。未来研究将重点关注铲斗轻量化设计、智能控制策略以及不同地质条件下的适应性问题，进一步提高轮斗挖掘机的作业性能和经济效益。同时，将探索建立更加精确的煤岩-铲斗相互作用模型，为铲斗结构优化提供更可靠的理论依据。

参考文献

[1]邓春雨.重挖矿用掘机装载工作装置力学分析[J].机械管理开发,2025,40(01):59-61.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2025.01.020.

[2]任雪娇.一种液压挖掘机工作装置铰点载荷计算方法[J].内燃机与配件,2024,(24):39-41.DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2024.24.008.

[3]张雷,陈雪辉,李昊,等.微织构对挖掘机铲斗关节摩擦副表面耐磨性能研究[J].湖南工业大学学报,2025,39(02):1-7.

[4]林述温,陆哲,危世佳,等.挖掘机工作过程动力特性仿真及主构件参数多目标优化设计方法[J/OL].中国机械工程,1-11[2025-02-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20241202.0911.002.html>.

[5]丁孺琦,姜佑鹏,李刚,等.分布式独立二次调压电液控制系统设计与仿真[J].农业机械学报,2024,55(10):481-490.