

基于RSM-DEM的TBM出渣效率优化研究

邱梓航*, 邓立营#

沈阳工业大学化工装备学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月24日; 录用日期: 2025年12月17日; 发布日期: 2025年12月25日

摘要

本研究旨在通过结合离散元方法(DEM)和响应曲面法(RSM)对全断面隧道掘进机(TBM)的出渣效率进行多参数优化。研究以一台直径7.83 m的TBM刀盘为对象,选取了刀盘掘进速度、刀盘转速、出渣槽长度、出渣槽宽度和溜渣板长度这五个关键的结构与工况参数作为影响因子。研究首先通过单因素仿真分析确定了各因子的有效水平范围,然后基于中心复合设计(CCD)建立了二次回归模型,用以分析各因素及其交互作用对30秒内排渣效率的影响。研究结果表明,各参数间存在显著的交互耦合效应,特别是刀盘转速与其它四项参数的交互作用尤为突出。最终,研究得到了最优参数组合(掘进速度61.5 mm/min, 转速7.85 rpm, 出渣槽长度810 mm, 宽度688 mm, 溜渣板长度1852 mm),在此条件下模型预测的排渣率为65.96%,与DEM仿真验证结果(66.34%)的偏差仅为0.57%,证明了优化方法与模型的可靠性。

关键词

TBM, 出渣槽, 离散元方法, 多参数, 响应曲面法

Research on Optimizing TBM Slurry Discharge Efficiency Based on RSM-DEM

Zihang Qiu*, Liying Deng#

School of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

Received: November 24, 2025; accepted: December 17, 2025; published: December 25, 2025

Abstract

This study aims to perform multi-parameter optimization of the mucking efficiency of a tunnel boring machine (TBM) cutterhead by combining the Discrete Element Method (DEM) and Response Surface Methodology (RSM). A cutterhead with a diameter of 7.83 m was selected as the research object,

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 邱梓航, 邓立营. 基于 RSM-DEM 的 TBM 出渣效率优化研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(6): 759-777.
DOI: 10.12677/met.2025.146079

and five key structural and operational parameters—cutterhead penetration rate, rotation speed, muck chute length, muck chute width, and muck guide plate length—were considered as influencing factors. Single-factor simulation analyses were first conducted to determine the effective level ranges of each factor. Based on the Central Composite Design (CCD), a quadratic regression model was then established to analyze the effects and interactions of these parameters on the mucking efficiency within 30 seconds. The results reveal significant interactive coupling effects among the parameters, with cutterhead rotation speed exhibiting the most prominent interactions with the other four variables. The optimal parameter combination was obtained as follows: penetration rate of 61.5 mm/min, rotation speed of 7.85 rpm, muck chute length of 810 mm, muck chute width of 688 mm, and muck guide plate length of 1852 mm. Under these conditions, the model predicted a mucking rate of 65.96%, which deviated by only 0.57% from the DEM simulation result (66.34%), confirming the reliability of the proposed optimization method and the accuracy of the regression model.

Keywords

Tunnel Boring Machine (TBM), Discrete Element Method (DEM), Discrete Element Method, Multiparameter, Response Surface Methodology (RSM)

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全断面岩石隧道掘进机是一种专门用于开挖地下通道工程的大型工程机械, 具有开挖快、优质、安全、经济、有利于环境保护和降低劳动强度的优点[1], 其出渣效率直接关系到掘进连续作业、能耗水平和刀具磨损, 是影响施工效率与经济性的核心指标之一[2]。

翟国强[3]等结合工程实践与数学理论, 探讨了刮渣板长度、刮渣组数量及溜槽长度等关键结构参数的确定原则与计算方法。Zheng [4]构建 EDEM 模型评估不同结构组合下的排渣性能, 提出通过优化支持肋几何与相对位置可降低堵塞风险并提高综合排渣率。夏毅敏[5]研究了出碴槽长宽比与开口角度对出渣性能的影响规律, 提出控制开口宽度并优化角度范围可提升出渣效率。Yang [6]基于离散元方法得出合理的铲斗布置与槽位组合可显著提升刀盘排渣效率, 并给出了铲斗排布的优化设计思路。Li [7]以硬岩 TBM 为对象分析刀盘转速与单转贯入对排渣效率的耦合影响, 发现排渣效率随转速与贯入先升后降, 并据此提出工况参数的优化区间建议。李大平[8]则针对溜碴过程开展理论与仿真分析, 探索溜碴板角度、刀盘转速等参数对溜碴性能的影响。Xia [9]采用离散元模型探讨了出碴槽长宽比与开口角度对出碴效率的敏感性, 提出在恒定开口面积条件下, 槽的纵横比与开口角度存在最优组合可使排渣效率达到极大化。霍军周[10]从出碴槽布置方式入手, 提出对称布置与长短槽交替等设计原则以增强出渣稳定性和效率。陈巍[11]针对刀盘开口面积进行研究, 指出合理开口范围对维持出渣与破岩平衡的重要性。唐建国[12]分析了掘进参数对出渣效率的影响, 强调刀盘转速等参数设置的合理性。耿麒[13]则针对两级刀盘出渣结构, 探讨出渣口排布、螺旋形式与刀盘转速等因素对综合出渣性能的影响, 并提出相应的优化建议。

上述研究主要针对出渣口、溜渣板以及铲斗的排布和结构单一因素进行分析, 对于刀盘的工况参数和刀盘的结构参数没有与排渣效率进行耦合联系。

相较于以往仅针对单一结构参数或只针对工况参数对排渣效率的研究, 本文通过 RSM-DEM 方法实现了结构与工况参数的多因素耦合建模与优化, 系统揭示了出渣系统中两种参数的交互效应及其对排渣

效率的综合影响规律, 从而突破了现有研究在多参数协同优化方面的不足。

2. TBM 出渣过程与关键参数分析

2.1. 刀盘出渣过程

在 TBM 掘进过程中, 刀盘位于掘进机最前端, 直接作用于掌子面。滚刀在破碎岩石的同时产生大量岩渣, 这些岩渣在重力作用下落至刀盘底部。当刮刀转动至底部时, 会将堆积的岩渣铲入铲斗中, 随后在刀盘旋转带动下, 岩渣沿溜渣板被提升至皮带输送机上方, 并在重力作用下落入输送机, 实现连续排出。如图 1 所示, 1 是石渣堆积在刀盘底部的过程, 2-1 为堆积的石渣进入刀盘内部的过程, 2-2 为石渣随刀盘旋转被溜渣板提升的过程, 3 为石渣被运输机送出的过程。本文针对渣石生成到落入皮带运输机这一过程进行数值模拟分析, 不考虑石渣在皮带运输机上的运动过程。

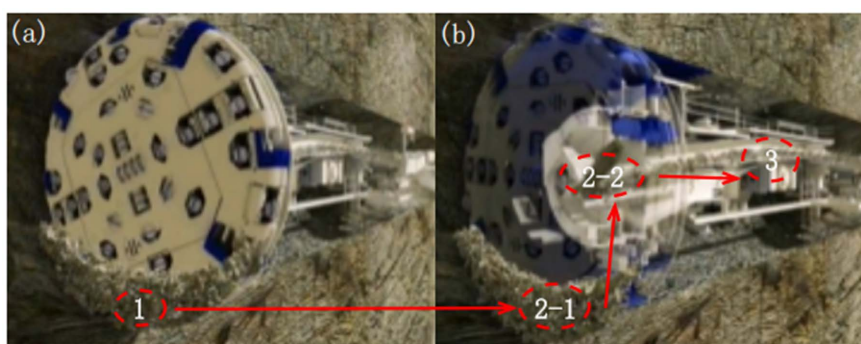


Figure 1. Schematic diagram of the TBM slag discharge process
图 1. TBM 出渣过程示意图

2.2. 出渣效率关键参数识别

排渣效率主要受刀盘结构参数、运动参数这两类因素的耦合控制。下文将主要分析结构参数在排渣过程中理论所起的作用, 并据此建立本研究的部分关键参数理论取值范围。

出渣槽的长度决定了其覆盖刀盘边缘的作业范围, 较长的槽体能更广泛地捕捉飞散的岩渣, 减少因区域遗漏导致的残留堆积, 但过长可能削弱结构刚性, 增加运动阻力; 而槽体宽度则直接影响单次铲取的岩渣容量, 适当加宽可提升单次运载量, 降低频繁回填的能耗, 但过宽可能因颗粒分布不均引发局部堵塞。同时刀盘掘进速度的调控需与出渣系统的处理能力进行联合, 速度过快时, 岩渣生成速率可能远超出渣槽的运转上限, 导致底部岩渣堆积并加剧刀具磨损; 速度过慢则虽能缓解出渣压力, 但会拖慢整体施工进度。

石渣进入刀盘内部要运送到皮带运输机上, 溜渣板的长度起决定性的作用, 溜渣板过长, 意味着渣土在溜渣板表面滑行的路径更长, 这会增加渣土堆积在溜渣板上的风险, 溜渣板过短, 这会导致渣土无法在脱离溜渣板后无法进入皮带运输机, 对刀盘内部进行二次磨损。

3. 出渣过程数值模型构建

3.1. 离散元仿真模型建立

3.1.1. 模型简化与假设说明

以 7.83 m 刀盘直径为研究对象, 为提高仿真计算效率并突出出渣系统的主要影响因素, 本研究在建立 EDEM 离散元模型时进行了若干合理简化。首先, 忽略滚刀、刀座及耐磨板等细节结构, 仅保留对出

渣性能影响显著的铲斗、出渣槽及溜渣板部分, 从而聚焦于颗粒流动特性。其次, 将岩渣颗粒理想化为球形单元, 并假设颗粒形状与尺寸分布均一, 以降低形状复杂性对接触检测效率的影响。此外, 模型未考虑刀盘自重引起的局部变形与刀具磨损效应, 认为刀盘为刚体结构。上述假设可能导致仿真结果在绝对排渣率上略高于实际情况, 但不影响不同参数组合间的相对变化趋势与规律识别。

简化后的模型如图 2 所示。

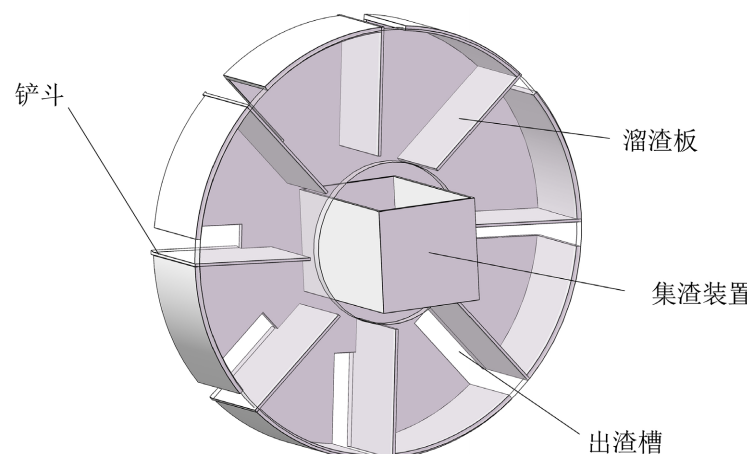


Figure 2. Modeling of the TBM cutterhead
图 2. TBM 刀盘建模

将建立的简化的几何体导入到 EDEM 中, 并在刀盘的前方建立一个与刀盘等直径 1 mm 高的圆柱体, 考虑到颗粒有可能直接掉出刀盘边缘, 在刀盘边缘处添加隧洞边界防止颗粒直接掉出边界, 如图 3 所示。

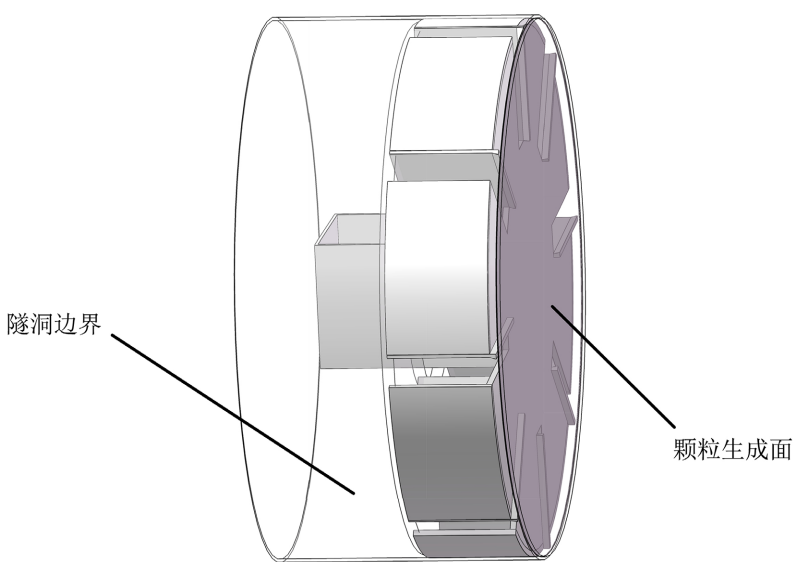


Figure 3. Cutterhead enclosed by tunnel boundary
图 3. 被隧洞边界包含的刀盘

将圆柱体设置为颗粒工厂, 将其设置为虚拟接触, 在颗粒工厂上随机产生一定数量的球形颗粒单元, 来模拟 TBM 掘进过程中产生的岩渣, 并使刀盘以一定转速旋转, 集渣装置、隧洞边界保持固定, 对整个几何体赋予 Q345 钢的材料属性并设置为真实物理接触。对环境的重力加速度设置为 9.81 m/s^2 。

刀盘在旋转的过程中会源源不断地产生石渣, 这里以刀盘固定时间旋转一周产生的颗粒数为基础, 对整个出渣过程的石渣数进行模拟。通过刀盘转速、贯入度和刀盘掘进直径, 计算出渣模拟过程中每秒掌子面上的岩渣颗粒的生成数量。

单位时间内因刀盘旋转而产生的石渣颗粒数量 N_1 为

$$N_1 = \frac{V_1}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3} = \frac{3D^2v}{2d^3} \quad (1)$$

此式中 v 是 TBM 掘进速度, d 为颗粒直径, 石渣颗粒直径设置为 100 mm 的球形颗粒。

3.1.2. DEM 材料与接触参数设定

将组成岩渣和刀盘的材料设置为花岗岩和 Q345 钢, 通过查阅资料得到岩渣颗粒以及 Q345 钢的力学参数如表 1 所示, 赋予岩渣颗粒与掘进速度大小相等、方向相反的初速度, 从而模拟 TBM 刀盘向前推进开挖的过程。

Table 1. Parameter settings of the cutterhead and rock chips

表 1. 刀盘与岩渣的参数设置

参数设置	泊松比	弹性模量/(GPa)	密度/($10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Q345 钢	0.3	210	7.85
岩渣	0.2	27.9	2.43

为确保离散元仿真结果的准确性与可重复性, 模型的材料参数与接触模型的合理选取至关重要研究在 EDEM 软件环境下采用 Hertz-Mindlin (无滑移) 接触模型, 该模型能够同时考虑颗粒间的弹性接触、切向摩擦、滚动阻力及能量耗散效应, 适用于模拟岩渣与金属结构间的非线性接触行为。模型中涉及的参数包括材料物性参数(弹性模量、密度、泊松比)以及接触参数(摩擦系数、恢复系数、滚动摩擦系数等), 均依据前人实验研究与数值模拟经验确定。具体的 DEM 仿真接触参数设置如表 2 所示。

Table 2. DEM simulation contact parameters

表 2. DEM 仿真接触参数设置

接触参数	岩渣 - 岩渣	岩渣 - 刀盘	取值依据与说明
接触模型	Hertz-Mindlin (无滑移)	Hertz-Mindlin (无滑移)	EDEM 内置非线性接触模型
静摩擦系数	0.50	0.45	依据耿麒麟等[13]和 Xia 等[9]的实验研究结果
滚动摩擦系数	0.05	0.03	参考 Zheng 等[4]模拟参数设置
恢复系数	0.35	0.40	依据 Li 等[7]及 Yang 等[6]的数值验证结果
时间步长/s	2.0×10^{-6}	-	满足稳定迭代条件
颗粒直径/mm	100	-	参考陈巍[11]标定颗粒物理力学参数结果

为了方便后续计算还需要引入计算排渣率的物理量, 建立公式有

$$n = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

n 为刀盘排渣率, N_2 为刀盘累计排出到集渣装置上的颗粒数量。

3.2. 响应曲面实验设计

3.2.1. 响应曲面法介绍

响应曲面法(RSM)是一种用于优化多变量问题的统计方法, 通过建立数学模型来分析影响因素与响应变量之间的关系。CCD 曲面响应法(Central Composite Design)是其中一种可以用于优化实验条件的响应曲面方法。它通过多元二次回归方程拟合各因素与响应值之间的关系, 能够有效评估因素的非线性影响, 广泛应用于工程优化等领域。CCD 设计的优点包括应用方便以及良好的预测性, 适合于多因素非线性实验优化。

考虑到对排渣效率的影响因素有五个不同的因子, CCD 方法能够最合理的实验次数构建多参数耦合作用下的响应曲面模型, 分析出交互影响并寻求最优解, 具体的分析流程如图 4 所示。

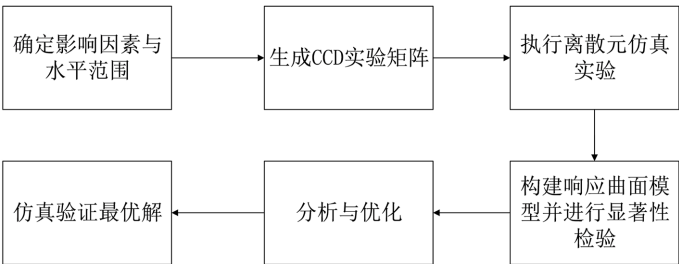


Figure 4. Flow chart of the CCD method
图 4. CCD 方法流程图

3.2.2. 单因素分析

为获取关键参数在实际系统中的有效工作区间, 避免响应曲面实验落入失效区, 需先进行单因素实验分析, 从而为后续响应曲面实验确定一个高效的参数变化区间。

除被考察因子外, 其余参数固定为: 出渣槽宽度 500 mm、出渣槽长度 900 mm、溜渣板长度 1700 mm、刀盘转速 7.5 rpm、掘进速度 90 mm/min。

针对出渣槽长度, 在 700~1500 mm 中每 100 mm 设置 1 个水平, 在其他条件固定时, 最终在 15 s 内排出的颗粒数如图 5 所示。

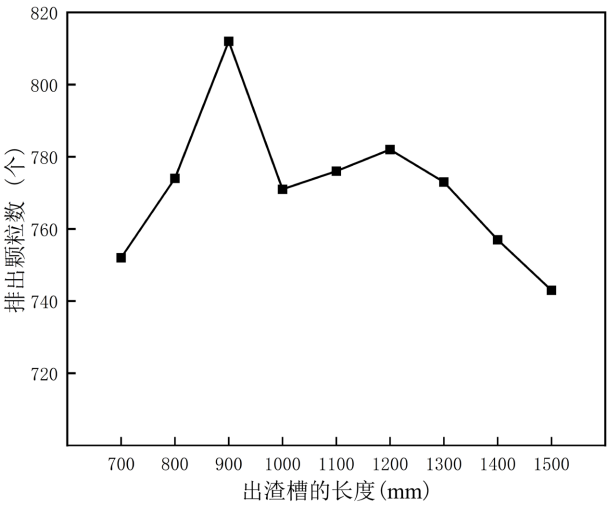


Figure 5. Number of discharged particles for mucking chutes of different lengths
图 5. 不同长度的出渣槽排渣颗粒数

根据图 5 可知：排出颗粒数随出渣槽长度的增加呈现出先增后减的非线性变化规律。当出渣槽长度为 900 mm 时，排渣效率达到峰值。当长度小于 900 mm 时，排渣空间不足可能导致颗粒流动不畅；而当长度超过 900 mm 后，由于宽度没有增加，出渣槽末端堆积石渣增加，反而降低了排渣效率。

为在响应曲面法中准确刻画该参数在最优值附近的影响规律，避免效率明显低下的区域，同时考虑到出渣槽的长度过长会与其他刀盘结构例如滚刀、刀座发生干涉，本研究确定出渣槽长度的因子水平范围为：800 mm 至 1000 mm。

针对出渣槽宽度，设置 500 mm、600 mm、700 mm、800 mm、900 mm 五个水平。在其他条件固定时，15 s 内不同出渣槽宽度排出的颗粒数如图 6 所示。

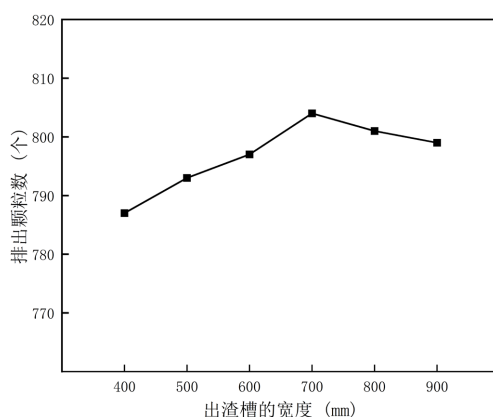


Figure 6. Number of discharged particles for mucking chutes of different widths

图 6. 不同宽度的出渣槽排渣颗粒数

由图 6 可知，随着出渣槽宽度的不断增加，集渣装置所收集到的颗粒数先增加后趋于平缓，这是因为宽度增加导致同时通过出渣槽进入至刀盘内部石渣的数量增加，从而排出的颗粒数增加，但是出渣槽的宽度到达了 700 mm 时，进入刀盘内部的颗粒数达到了饱和，此时增加出渣槽的宽度对排渣效率的影响变化不大，同时考虑到出渣槽过宽对刀盘的强度、刚度的影响过大，由此将试验所需出渣槽宽度设置在 500~700 mm 之间。

针对溜渣板有效长度，在 1500~2100 mm 设置每 100 mm 作为一个水平，不同溜渣板长度排出的颗粒数如图 7 所示。

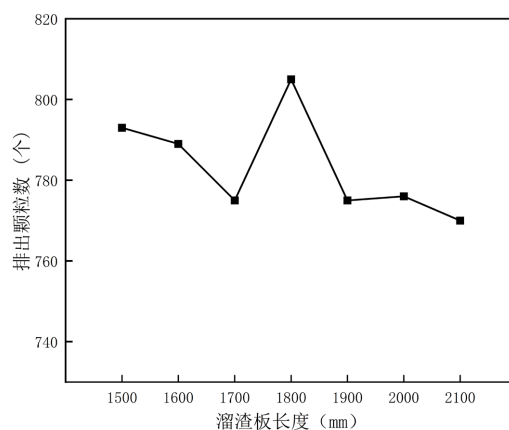


Figure 7. Number of discharged particles for mucking plates of different lengths

图 7. 不同长度的溜渣板排渣颗粒数

由图 7 可知, 在其它参数固定的条件下, 随着溜渣板长度的增加, 总体趋势上呈现先增加后减小最后趋于平稳的情况, 一开始排渣颗粒的减小是因为石渣并不是均匀的覆盖在溜渣板上, 而是呈现上下堆叠的方式, 溜渣板板长的增加导致上方石渣的运动路径长度增加, 最上端下方的石渣由于不能及时脱离溜渣板将直接被板甩出落回至刀盘内部, 直到溜渣板长度为 1700 mm 时排出颗粒数才开始增加, 增加至 1900 mm 时颗粒数变化才趋于稳定, 由此将仿真试验中溜渣板的长度设置为 1700 mm~1900 mm。

针对刀盘转速, 设置 5~10 rpm 以 0.5 rpm 作为间距一共设置 11 个水平, 在其他条件固定时, 15 s 内不同刀盘转速排出的颗粒数如图 8 所示。

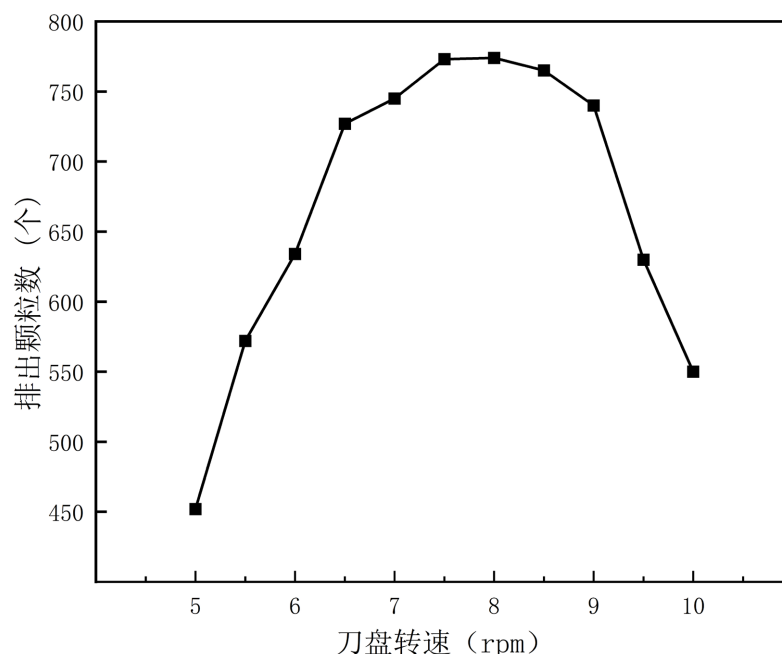


Figure 8. Variation of discharged particle number with time at different cutterhead rotation speeds
图 8. 不同刀盘转速排渣颗粒数随时间的变化曲线

由图 8 可知, 刀盘转速为 5 rpm 时, 由于刀盘转速过低, 一部分石渣还未提升至某一高度就已经与溜渣板发生脱离, 导致这部分石渣重新落回刀盘内部, 最终导致排出颗粒数不断减小, 刀盘转速为 10 rpm 时, 由于刀盘转速过快, 大部分石渣被溜渣板甩出时的速度过大, 水平方向上的距离超过了集渣装置的水平距离, 导致大部分石渣重新落入到刀盘内部, 最终排出颗粒数同样减小, 而刀盘转速处于 6.5~8.5 rpm 时, 集渣装置收集到的石渣颗粒数趋于稳定, 几乎没有石渣重新落回刀盘内部, 排出颗粒数较为稳定, 这说明刀盘处于 6.5~8.5 rpm 时, 能够确保后续的仿真结果不失真。

针对刀盘掘进速度, 设置 60 mm/min、80 mm/min、100 mm/min、120 mm/min 一共设置 4 个水平, 由于掘进速度会增加生成的颗粒数, 用排出颗粒数无法衡量排渣的尺度, 采用排渣率作为分析的结果, 在其他条件固定时, 不同刀盘掘进速度排渣率随时间的变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知, 随着刀盘掘进速度的增加, 排渣率逐渐减小, 其根本原因在于渣土“生成”与“排出”之间的动态平衡被打破。掘进速度的增大导致单位时间内产生的渣土量急剧增加, 当该数量超过排渣系统的排渣能力时, 便会造成颗粒在出渣槽入口等关键部位发生堆积和堵塞。导致排渣率的下降。

这一原因表明, 盲目提高掘进速度并非总能提升施工效率, 必须将其与排渣系统的能力进行匹配优化, 考虑到掘进速度为 100 mm/min 之后的排渣率降低过多, 将试验的刀盘掘进速度设置为 60~100 mm/min。

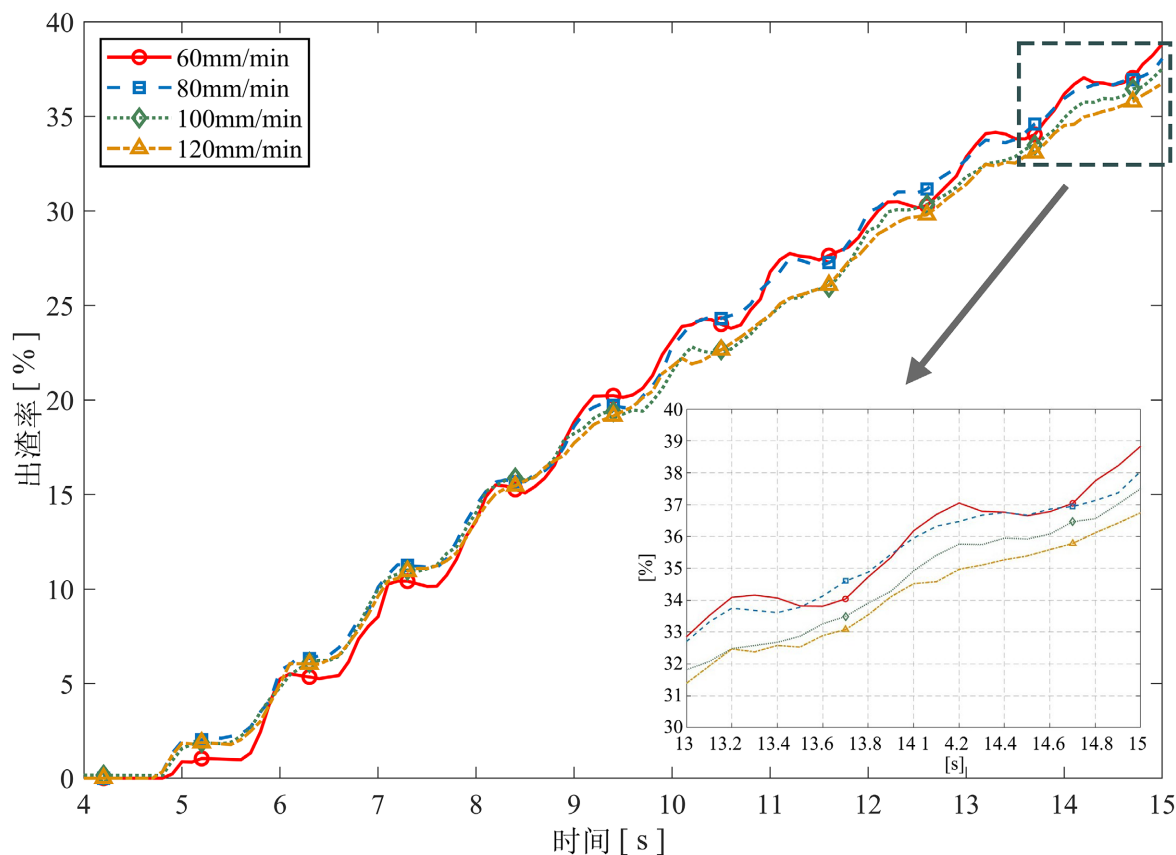


Figure 9. Variation of mucking rate with time at different cutterhead advance speeds

图 9. 不同刀盘掘进速度排渣率随时间的变化曲线

3.2.3. 参数水平选择范围

由前述单因素仿真可得出各关键参数的水平选择的范围, 这一结果能够保证各影响因素在有效范围内进行响应面优化分析。

最终的因子水平选择如表 3 所示。

Table 3. Factor level selection range

表 3. 因子水平选择范围

影响因子	刀盘掘进速度 (mm/min)	刀盘速度 (rpm)	出渣槽的长度 (mm)	出渣槽的宽度 (mm)	溜渣板的长度 (mm)
因子水平范围	60~100	6.5~8.5	800~1000	500~700	1700~1900

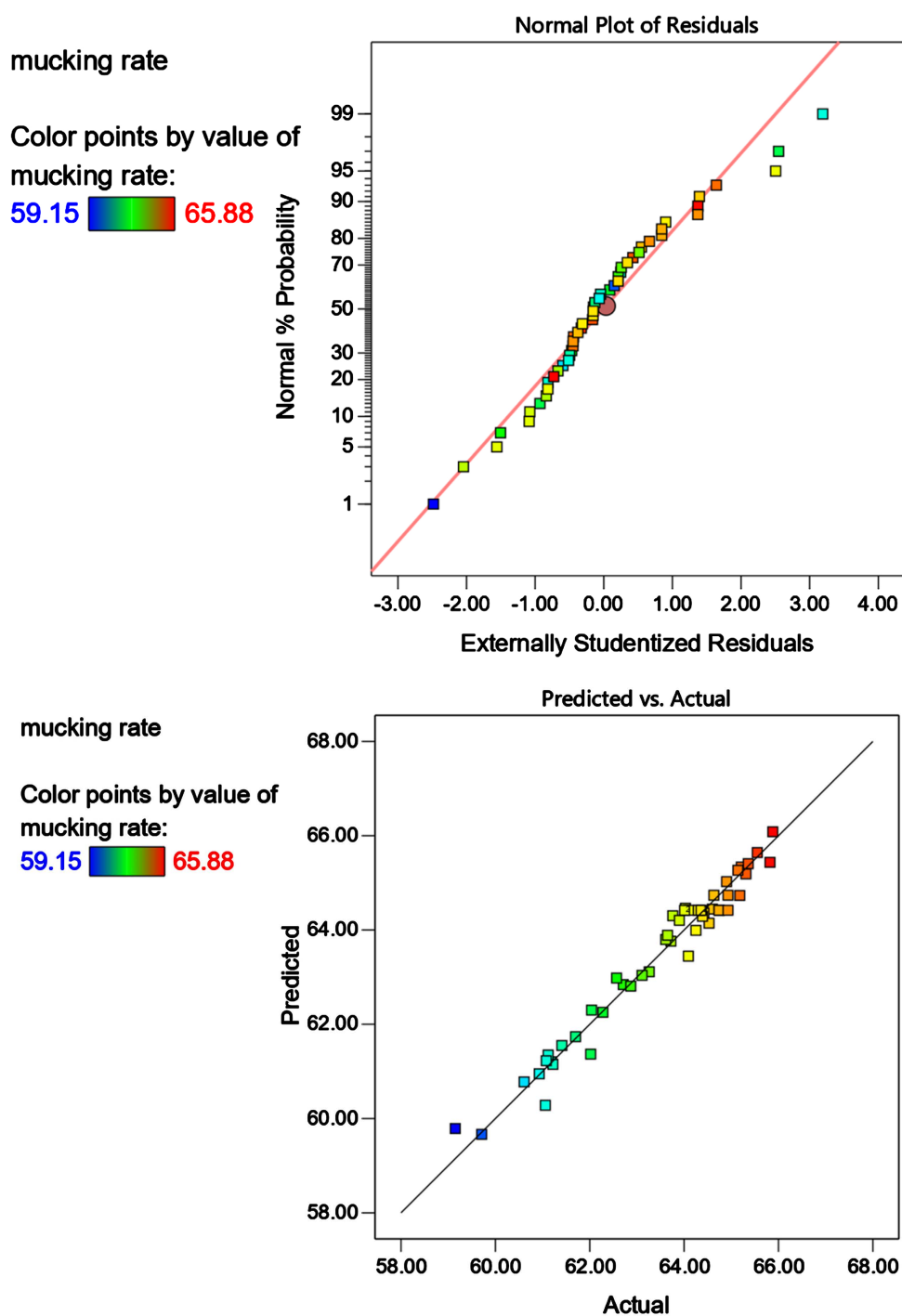
考虑到实际工程中的约束, 由于实际操作条件的物理限制, 实验区域被约束在由因子点定义的立方体内。因此, 选择面心 CCD 作为实验方案, 其轴向点与因子点位于同一平面上, 从而保证了所有实验运行的可行性与安全性。通过 CCD 方法生成的仿真试验矩阵如附录表 S1 所示。

4. 多参数耦合对出渣效率的影响分析

4.1. 响应曲面模型建立与显著性分析

依据 CCD 实验设计方案, 共生成 50 组参数组合并完成对应的 EDEM 数值模拟, 获取每一组条件下

的 30 s 内的排渣率作为响应值。随后利用二次多项式回归模型对五个因子及其交互项进行拟合, 建立预测模型。回归模型 $Y_{\text{排渣率}} = -106.56447 - 0.235764 * A + 27.40358 * B - 0.085970 * C - 0.050784 * D + 0.140189 * E + 0.011188 * AB - 6.6e-05 * AC + 5.8e-05 * AD + 6.4e-05 * AE + 0.002575 * BC + 0.003875 * BD - 0.003612BE - 1.75e-06 * CD - 1.5e-05 * CE + 2e-05 * DE + 0.000324 * A^2 - 1.66047 * B^2 + 5.3e-05 * C^2 - 1.1e-05 * D^2 - 3.2e-05 * E^2$, 最后根据仿真所得的排渣率方差分析表如表 3 所示, 残差分析如图 10 所示。



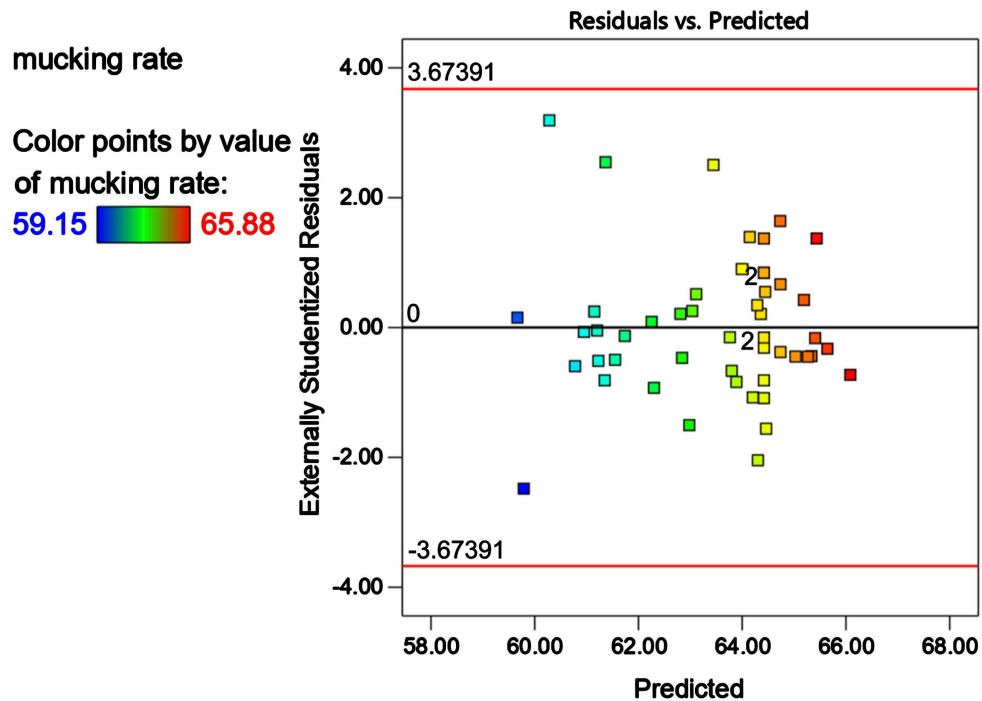


Figure 10. Residual analysis of mucking rate
图 10. 排渣率残差分析图

通过可信度分析给出的模型的概率 P 值小于 0.01, 说明整个回归模型方程是显著的; 回归模型的相关系数 $R^2=0.9683$, 说明响应值排渣率的 96.83% 的变化来源于所选的自变量之间的影响。通过残差图可以看出残差点大致呈一条直线, 服从正态分布, 这说明模型的统计推断(如 P 值、置信区间)是可靠的, 预测值均匀分布在轴线 0 的上下侧, 这说明二阶模型没有遗漏重要的交互项或高阶项, 实际值被拟合成了一条直线, 说明模型预测值与实际值高度吻合。

由图中其他项 P 值可知, 各因素主效应对排渣率的影响都较为显著, 符合实际情况, 其中刀盘转速与刀盘掘进速度、出渣槽长度、出渣槽宽度、溜渣板长度有明显交互作用(AB、BC、BD、BE), 以及溜渣板长度与出渣槽长度、出渣槽宽度有明显交互作用(CE、DE) (表 4)。

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) table for mucking rate
表 4. 排渣率方差分析表

模型	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
	136.17	20	6.81	44.31	0.0044	**
A	1.22	1	1.22	7.96	0.0085	**
B	79.74	1	79.74	518.98	<0.0001	***
C	8.06	1	8.06	52.43	<0.0001	***
D	6.13	1	6.13	39.91	<0.0001	***
E	0.3833	1	0.3833	2.49	0.0251	*
AB	1.6	1	1.6	10.43	0.0031	**
AC	0.5512	1	0.5512	3.59	0.0682	

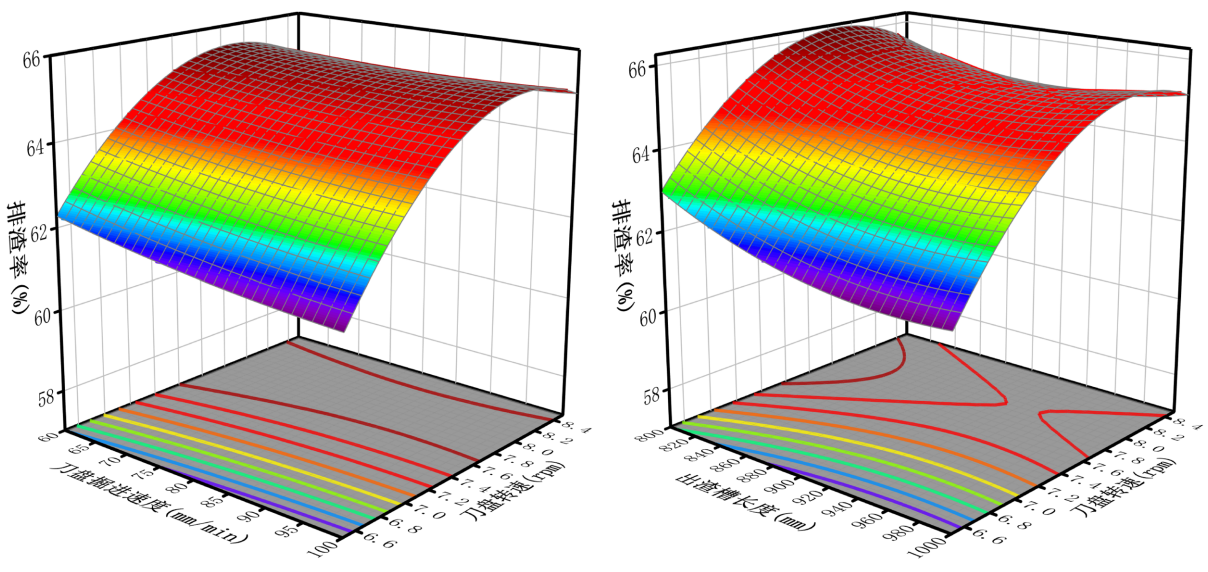
续表

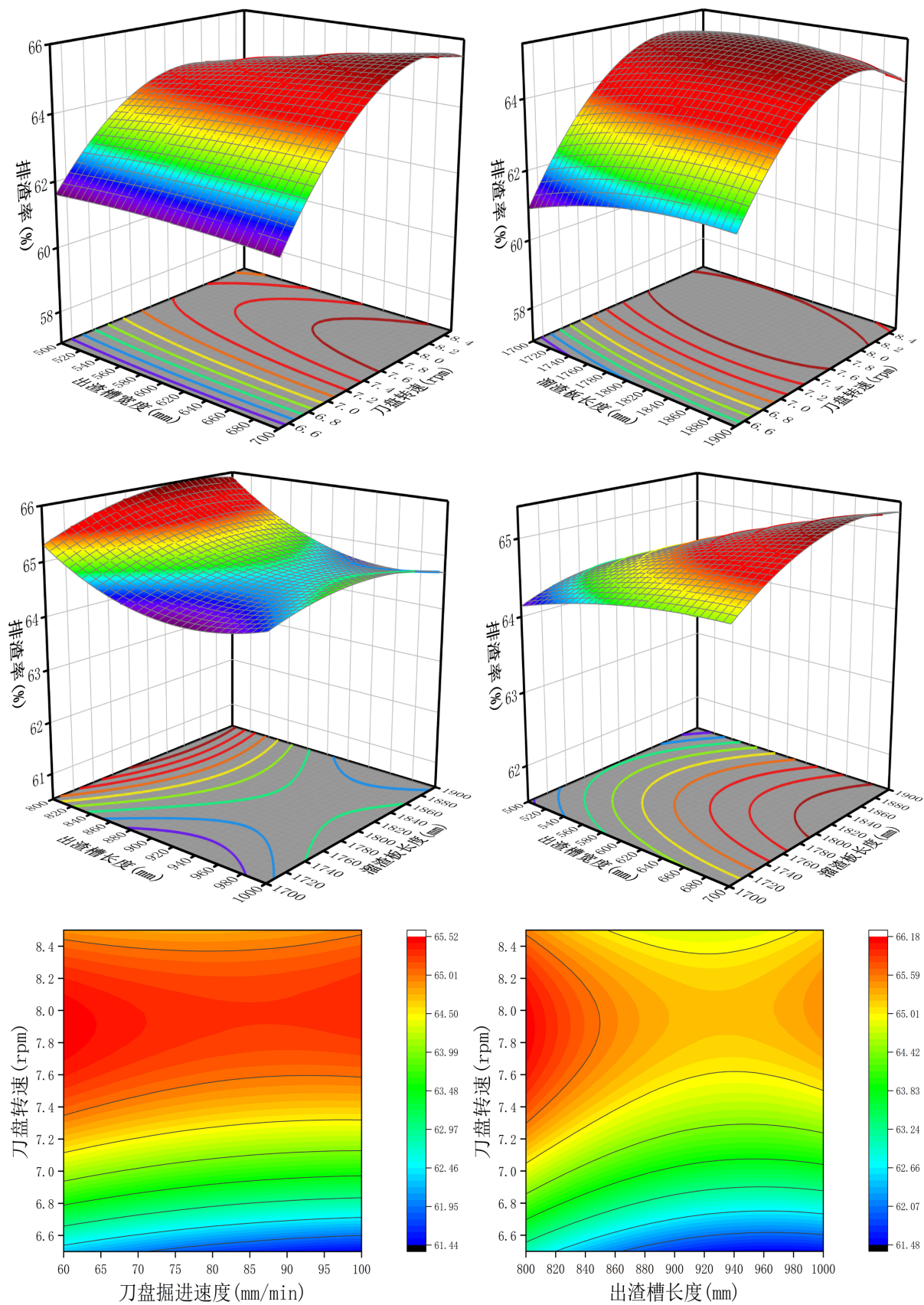
AD	0.4324	1	0.4324	2.81	0.1042	
AE	0.5202	1	0.5202	3.39	0.076	
BC	2.12	1	2.12	13.81	0.0009	**
BD	4.8	1	4.8	31.27	<0.0001	***
BE	4.18	1	4.18	27.18	<0.0001	***
CD	0.0098	1	0.0098	0.0638	0.8024	
CE	0.732	1	0.732	4.76	0.0373	*
DE	1.25	1	1.25	8.12	0.008	**
A ²	0.0415	1	0.0415	0.2701	0.6072	
B ²	6.82	1	6.82	44.38	<0.0001	***
C ²	0.6935	1	0.6935	4.51	0.0423	*
D ²	0.0275	1	0.0275	0.1791	0.6753	
E ²	0.254	1	0.254	1.65	0.2087	
残差	4.46	29	0.1537	-	-	-
失拟项	3.71	22	0.1686	1.58	0.2756	
纯误差	0.7462	7	0.1066	-	-	-
所有项	140.62	49	-	-	-	-
R ²				0.9683		

备注：*：显著，P<0.05；**：高度显著，P<0.01；***：极完全显著，P<0.001，其中 A 为刀盘掘进速度，B 为刀盘转速，C 为出渣槽长度、D 为出渣槽宽度、E 为溜渣板长度。

4.2. 多参数交互效应分析

在建立有效的响应曲面模型后，最终形成的响应面图与等高线图如图 11 所示，从左到右依次是 AB、BC、BD、BE、CE、DE 的响应面图和等高线图。





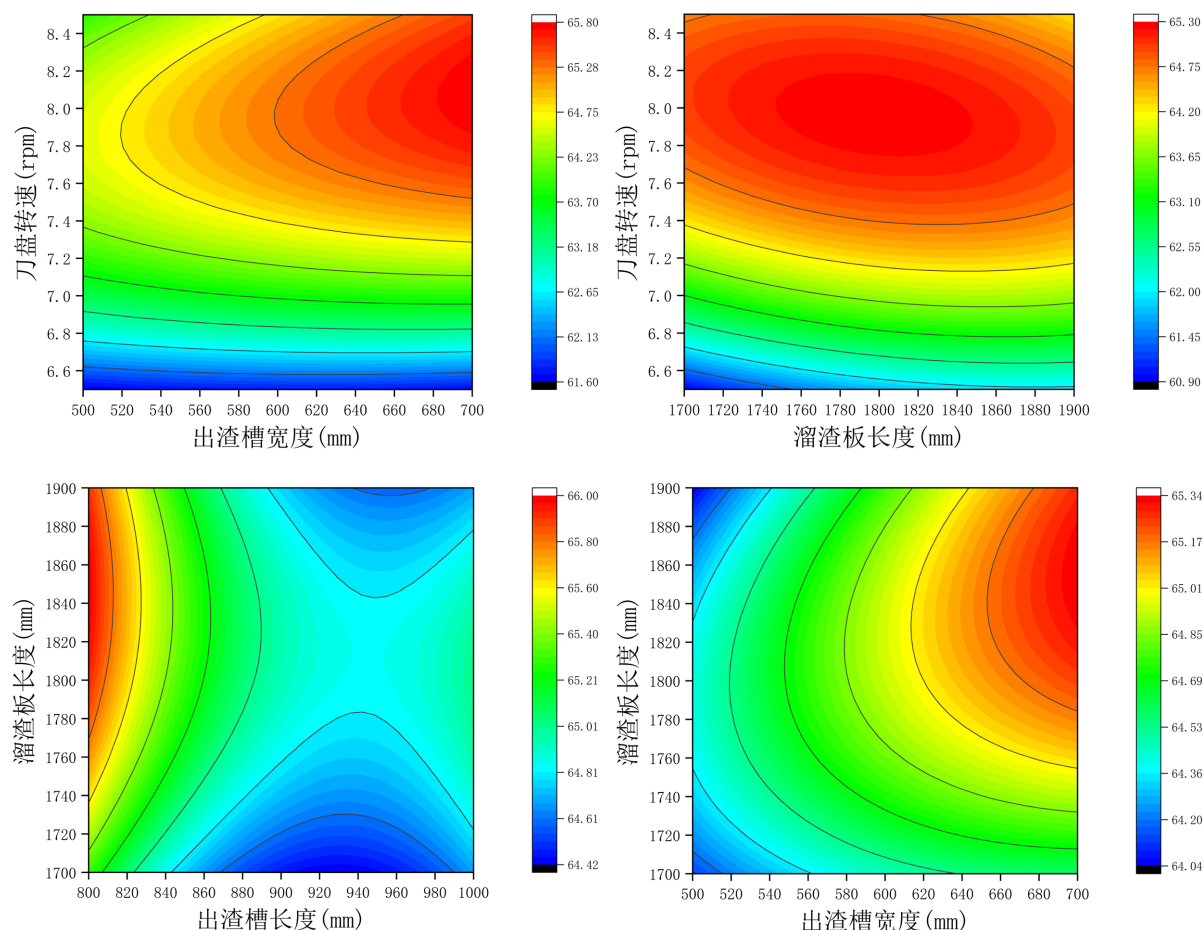


Figure 11. Response surface and contour plots of mucking rate

图 11. 排渣率响应面图和等高线图

由图 11 可知,不同因素间的交互作用对排渣效率的影响差异明显。整体上,响应曲面呈现出典型的非线性特征,表明排渣效率受多因素耦合作用的显著影响。具体分析如下:

1) 刀盘掘进速度与刀盘转速(AB)

该交互项的响应面呈明显的鞍形结构。当刀盘掘进速度较低(60~70 mm/min)时,排渣率随转速的增加先升后降;而在掘进速度较高时,最佳转速区间范围缩小。这表明在掘进速度增加后,系统的出渣能力受到限制,提高同样的转速,更容易导致渣土抛掷量过大使石渣堆积与回落。

2) 刀盘转速与出渣槽长度(BC)

该交互项的响应面呈“倾斜椭圆形”分布,说明二者存在协同增强效应。当出渣槽长度从 800 mm 增加至 900 mm 时,排渣率随转速增加而显著提高;但当长度超过 900 mm 后,曲面趋于平缓,表明过长的槽体对效率提升作用有限。此结果与单因素分析一致,过长的槽体可能导致渣流在末端堆积。

3) 刀盘转速与出渣槽宽度(BD)

该响应面在宽度增加时排渣率也随之增加,这表明宽度过小会降低排渣效率。同时由于出渣槽的宽度受到刀盘的强度以及刚度的限制不宜过长,随着转速的提升,宽度过大的槽会造成颗粒分布不均,部分岩渣被甩出槽外。

4) 刀盘转速与溜渣板长度(BE)

该交互项的等高线呈“椭圆型封闭区域”,表明二者存在较强的协同关系,当溜渣板长度低于 1750

mm 时, 排渣率对转速变化敏感; 当长度超过 1800 mm 后, 效率趋于稳定。这说明适度延长溜渣板可提高渣流导向性, 但过长将增加渣流在板上的停留时间, 削弱整体排出能力。

5) 出渣槽长度与溜渣板长度(CE)

响应面表现为局部“波谷”特征, 表明二者存在较强的协同关系。在出渣槽长度为 800~820 mm 且溜渣板长度为 1800~1900 mm 时, 排渣率达到峰值。过短的溜渣板会造成颗粒未能充分导向集渣装置, 而过长则使部分颗粒滑行距离过大而回落。

6) 出渣槽宽度与溜渣板长度(DE)

响应面呈明显的非对称分布, 当宽度为 650~700 mm、溜渣板长度为 1850 mm 附近时, 系统排渣效率最高。

综上, 刀盘转速在多参数交互中起主导作用, 尤其在与结构参数(出渣槽长度、宽度及溜渣板长度)耦合时, 对排渣效率的影响最为显著。合理匹配各参数能显著改善颗粒流动路径与分布状态, 从而提升整体排渣性能。

4.3. 参数优化与验证

在明确了多因素交互效应的基础上, 进一步利用响应曲面法中的优化功能, 得出预测排渣效率最大的最优解。优化过程以排渣率最大化为目标函数, 并结合前述因子水平范围作为约束条件, 最终响应面的预测结果为图 12 所示。

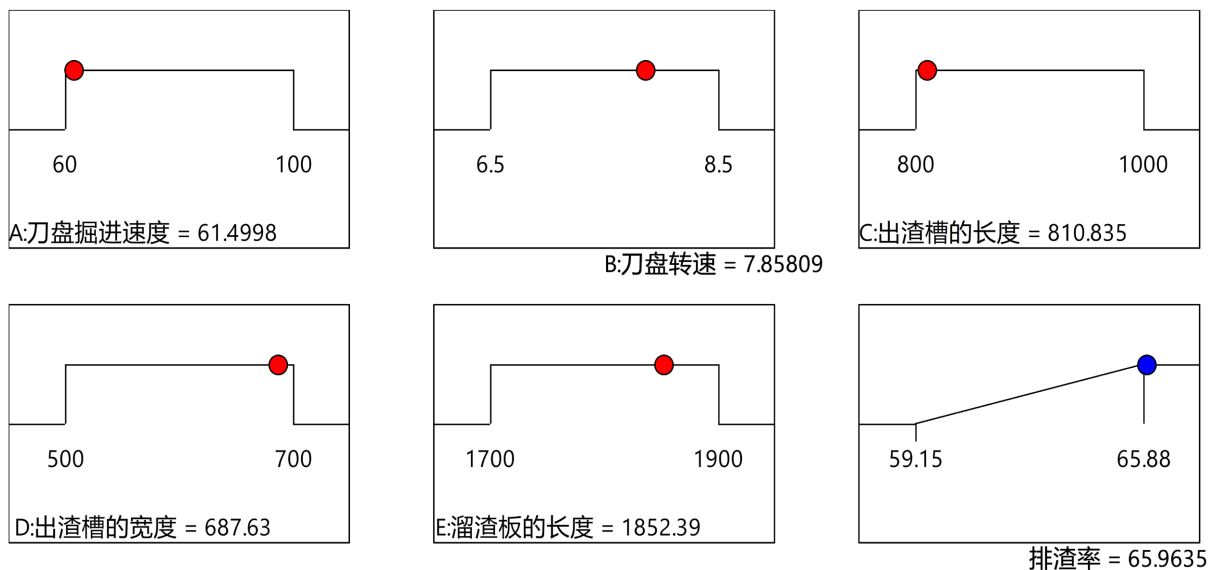


Figure 12. Predicted optimal result of the response surface

图 12. 响应面预测最优结果

由图 12 所得, 刀盘掘进速度为 61.5 mm/min, 刀盘转速为 7.85 rpm、出渣槽长度为 810 mm、出渣槽宽度为 688 mm, 溜渣板长度为 1852 mm 时, 回归模型预测 30 s 内总排渣率为 65.96%, 对此参数下的模型进行仿真试验得出实际排渣率为 66.34%, 与预测值偏差 0.006%。

为验证优化结果的可靠性并评估模型的预测精度, 设计了系统的验证实验方案。在最优参数组合基础上, 对五个因子分别施加 $\pm 5\%$ 的扰动, 生成 10 个验证点进行仿真验证与最优参数的实际值进行对比, 从而得到最优参数处于最优的区域。由表 5 可知, 预测最优点在实际仿真中仍处于最优的区域。

Table 5. Optimal region verification table
表 5. 最优区域检测表

描述	刀盘掘进速度 (mm/min)	刀盘转速 (rpm)	出渣槽的长度 (mm)	出渣槽的宽度 (mm)	溜渣板的长度 (mm)	实际排渣率 (%)
最优点	61.5	7.85	810	688	1852	66.34
周边点 1	64.5	7.85	810	688	1852	65.75
周边点 2	60	7.85	810	688	1852	65.65
周边点 3	61.5	8.24	810	688	1852	65.14
周边点 4	61.5	7.45	810	688	1852	64.85
周边点 5	61.5	7.85	850	688	1852	65.78
周边点 6	61.5	7.85	770	688	1852	66.09
周边点 7	61.5	7.85	810	722	1852	65.56
周边点 8	61.5	7.85	810	654	1852	65.54
周边点 9	61.5	7.85	810	688	1944	65.74
周边点 10	61.5	7.85	810	688	1760	65.92

这说明将得到的最优组合参数输入 EDEM 仿真模型进行验证，以确保响应曲面预测值与实际模拟结果的一致性。最终验证结果表明偏差较小，则说明优化方案具有可靠性和可行性，从而为后续刀盘结构设计及施工参数选择提供了依据。

5. 结论

1) 与现有文献相比，本研究的主要创新在于基于 DEM-RSM 联合方法，系统量化了出渣结构与工况参数的交互影响，构建了高精度预测模型($R^2=0.9683$)，显著优于以往单因素或线性回归模型，优化结果通过仿真验证偏差小于 1%，验证了模型的可靠性与适用性。该方法可为不同直径 TBM 刀盘的参数化设计提供通用参考。

2) 刀盘转速在多参数交互中起主导作用，尤其在与结构参数(出渣槽长度、宽度及溜渣板长度)耦合时，对排渣效率的影响最为显著。

3) 以 7.83 m 直径刀盘为研究对象，刀盘掘进速度为 61.5 mm/min，刀盘转速为 7.85 rpm、出渣槽长度为 810 mm、出渣槽宽度为 688 mm，溜渣板长度为 1852 mm 时回归方程预测 30 s 内排渣率为 65.96%，实际仿真 30 s 内排渣率为 66.34%，相差 0.57%，且处于周边最优区域。

参考文献

[1] 韩美东, 曲传咏, 蔡宗熙, 等. 刀盘掘进过程动态仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(8): 1098-1102.

[2] 李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 877-896.

[3] 翟国强, 张玉锋. 浅谈 TBM 刀盘的进出渣设计[J]. 建筑机械化, 2013, 34(2): 76-78.

[4] Zheng, J., Zhang, H., Wang, D., *et al.* (2023) Optimization of Supporting Rib Geometry on TBM Cutterhead to Improve Muck Discharge Efficiency. *Civil Engineering Journal*, **9**, 10106-10120.

[5] 夏毅敏, 杨妹, 吴遁, 等. TBM 刀盘出渣槽结构对出渣效率的影响规律[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1561-1567.

[6] Yang, M., Wang, S., Zhang, Y., *et al.* (2020) Numerical Simulation and Optimization of Muck Bucket Arrangement on

- TBM Cutterhead Based on DEM. *Journal of Central South University*, **27**, 2981-2992.
- [7] Li, M., Zhang, Q., Zhao, X., *et al.* (2025) Investigation on Muck Removal Efficiency and Performance Optimization of Large-Diameter Hard-Rock TBM Cutterhead. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **162**, Article 106637.
- [8] 李大平. 基于 ABAQUS 的 TBM 刀盘溜碴过程仿真[J]. 建设机械技术与管理, 2013, 26(6): 101-106.
- [9] Xia, Y.M., Liu, H., Hu, J., *et al.* (2024) Numerical Study on TBM Mucking Performance and Optimization of Supporting Ribs. *Automation in Construction*, **160**, Article 105464.
- [10] 霍军周, 陈巍, 欧阳湘宇, 等. 基于岩碴流动性的 TBM 出碴槽口选优设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 715-718.
- [11] 陈巍, 孙伟, 霍军周. TBM 刀盘开口面积的确定[J]. 机械设计与制造, 2015(5): 29-31+35.
- [12] 唐建国, 彭正阳, 张祥富, 等. 掘进参数对抽水蓄能电站斜井 TBM 刀盘出渣效率的影响规律[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 29-35.
- [13] 耿麒, 谢立扬, 张泽宇, 等. 全断面隧道掘进机刀盘刮碴铲斗结构对出碴性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11): 149-157.

附 录

Table S1. CCD experimental matrix
表 S1. CCD 实验矩阵

仿真方案	刀盘掘进速度 (mm/min)	刀盘转速 (rpm)	出渣槽的长度 (mm)	出渣槽的宽度 (mm)	溜渣板的长度 (mm)	排渣率 (%)
1	60	8.5	1000	700	1900	65.18
2	60	6.5	800	700	1700	61.7
3	100	6.5	800	700	1900	63.11
4	60	8.5	800	700	1900	65.14
5	60	8.5	800	500	1900	64.09
6	60	6.5	1000	700	1700	60.61
7	100	8.5	800	500	1900	63.61
8	60	6.5	800	500	1900	62.71
9	80	7.5	900	600	1700	64.25
10	60	6.5	1000	500	1900	61.12
11	60	8.5	1000	700	1700	65.36
12	80	7.5	900	600	1800	64.36
13	60	6.5	800	700	1900	63.26
14	80	7.5	900	600	1800	64.01
15	80	7.5	900	500	1800	63.65
16	100	6.5	800	500	1900	62.04
17	100	6.5	1000	700	1900	60.93
18	100	8.5	1000	500	1700	63.72
19	60	8.5	1000	500	1900	62.57
20	60	8.5	1000	500	1700	64.6
21	80	7.5	900	600	1800	64.3
22	80	7.5	800	600	1800	65.82
23	100	8.5	1000	500	1900	62.87
24	100	8.5	800	700	1900	65.88
25	60	7.5	900	600	1800	64.63
26	100	8.5	1000	700	1700	65.31
27	60	6.5	1000	700	1900	61.41
28	100	6.5	1000	700	1700	59.71
29	100	7.5	900	600	1800	64.42
30	80	7.5	900	600	1800	64.74

续表

31	80	8.5	900	600	1800	64.39
32	100	8.5	800	700	1700	65.55
33	80	7.5	900	600	1800	64.74
34	100	6.5	800	700	1700	61.22
35	80	7.5	900	600	1800	64.93
36	100	6.5	800	500	1700	61.19
37	100	8.5	1000	700	1900	64.9
38	100	8.5	800	500	1700	64.53
39	100	6.5	1000	500	1700	59.15
40	80	7.5	900	600	1900	63.9
41	60	6.5	800	500	1700	62.28
42	80	6.5	900	600	1800	61.08
43	60	8.5	800	700	1700	65.21
44	80	7.5	1000	600	1800	64.03
45	80	7.5	900	700	1800	64.93
46	100	6.5	1000	500	1900	61.06
47	80	7.5	900	600	1800	64.11
48	60	6.5	1000	500	1700	62.02
49	80	7.5	900	600	1800	64.36
50	60	8.5	800	500	1700	63.76