

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.006

机械能辅助热扩散渗装置设计与分析

黄雅兰, 陈方琴, 姚亮, 俞丁楠, 彭阁友, 李嘉贺, 陈海锋

(湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要:提出一种新的机械能辅助纳米化热扩散渗方法和装置,为对热扩散渗装置结构进行优化,借助离散单元法完成筒内介质球运动行为的数值仿真,结合位置密度统计方法量化分析介质球的动态运动特征,系统探究衬板倾角与衬板高度两类关键结构参数对介质球运动形态及介质球空间密度分布的影响机制。研究表明:当衬板角度为 20° 时,抛落状态介质球的均匀性与集中性最好;当衬板高度为 24 mm 时,介质球在抛落区的分散性最好,抛落状态最佳。研究结果为选择合适的衬板角度和衬板高度提供理论依据。

关键词:机械能辅助;热扩散渗;离散单元法;运动特性

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0029-05

Design and Analysis of a Mechanical Energy-assisted Thermal Diffusion Percolation Device

Huang Yalan, Chen Fangqin, Yao Liang, Yu Dingnan, Pen Geyou, Li Jiahe, Chen Haifeng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper proposes a novel mechanical energy-assisted nanocrystallization thermal diffusion infiltration method and device, in order to optimize the structure of the thermal diffusion infiltration device. Based on the discrete element method, the motion behavior of the medium balls inside the barrel is simulated. The motion characteristics of the medium balls within the barrel are analyzed using the position density method. The influence laws of liner angle and liner height on the motion state of the medium balls and the position density distribution of the medium balls are studied. The research results indicate that when the liner angle is 20° , the uniformity and concentration of the medium balls in the throwing state are optimal; when the liner height is 24 mm, the dispersion of the medium balls in the throwing area is best, achieving the most favorable throwing state. The research findings provide a theoretical basis for selecting appropriate liner angles and liner heights.

Keywords: mechanical energy assistance; thermal diffusion infiltration; discrete element method; motion characteristics

0 引言

传统的热扩散渗工艺需要在 $900^\circ\text{C} \sim 1\,100^\circ\text{C}$ 的高温下保温几个到几十个小时,扩散速度慢,导致工件组织晶粒变得粗大,材料性能下降,因此需降低热扩散渗工艺的保温温度并缩短保温时间^[1]。国内外部分学者提出先将工件表面进行纳米化预处理,再进行热扩散渗加工的助渗方法^[2]。文献[3]探究了不同加热温度对钢材表面渗铬层厚度的影响规律。试验结果表明:在 $500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 温度范围内,升温处理可有效地促进渗铬层生长,使渗层厚度随温度升高持续增大;当温度升至 $600^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 范围,渗铬层深度却随温度升高逐渐减小。究其原因,低于 600°C 时,非平衡态纳米晶界为铬

原子扩散的主要通道,可显著加快元素迁移速率;温度高于 600°C 后,晶粒发生明显粗化,铬元素的扩散机制逐步从晶界扩散主导转为晶格扩散主导,由于晶界这一快速通道的消失,整体扩散能力随之减弱。当温度进一步升至 700°C 以上,晶粒粗化加剧,物质传输几乎完全依赖晶格扩散。综上所述可知,热扩散过程中纳米材料出现晶粒长大现象后,其特有的微观形貌与扩散优势会逐步丧失。因此,纳米结构表层的高温稳定性是决定表面纳米化预处理工艺热扩散强化^[4]效果的核心制约因素。

针对上述问题,本文设计了一种新型机械能辅助纳米化热扩散渗装置及对应的工艺方法。该装置借助筒体内置挡板驱动磨介球与渗剂一同运

基金项目:湖南省自然科学基金(2023JJ30241);湖南省大学生创新训练项目(S202310534047)

第一作者简介:黄雅兰(2002—),女,湖南湘西人,本科,研究方向为智能制造工程、机械工程与自动化,3425403512@qq.com。

通信作者简介:陈海锋(1986—),男,湖南邵阳人,副教授,博士,研究方向为机械结构设计与优化、机械工程与自动化,chenhf1986@126.com。

动,当筒体旋转至特定角度后,磨介球与渗剂在重力作用下自由坠落,从多个方向冲击工件表面。金属表层受撞击后会产生位错运动与孪晶转变,进而在工件表面构筑纳米晶层,同时生成大量可供元素扩散的空位结构,可有效促进渗层快速形成。

1 机械能辅助热扩散渗装置设计

机械能辅助热扩渗设备的整体结构如图1所示,主要由筒体、转动轴与行星传动结构组成。该筒体整体由左端盖19、罐体5和右端盖9组合装配而成。左端盖19利用螺栓完成与输入轴2的锁紧固定,右端盖9同样采用螺栓结构安装在支撑轴11上。输入轴2与支撑轴11严格同轴布设,两根轴体分别通过轴承安装在保温箱4两侧的端座结构上,其中输入轴2向外连接驱动电机。罐体5内壁两端加工有内齿圈结构,可与行星传动组件相互啮合;其内壁中段还均匀排布多组挡板7,该构件与筒壁表面呈锐角夹角。保温箱4内壁和罐体5外壁的间隙处,排布有加热板6。整套行星传动系统主要由行星轮13、行星销18、行星架10及太阳轮12构成。行星架10借助轴承分别装配在左端盖19、右端盖9内侧位置;行星轮13依靠行星销18铰接在行星架10上;太阳轮12固接于旋转轴15,并与行星轮13形成啮合传动配合,罐体5内部装填渗剂与介质球,配合整体结构完成作业。

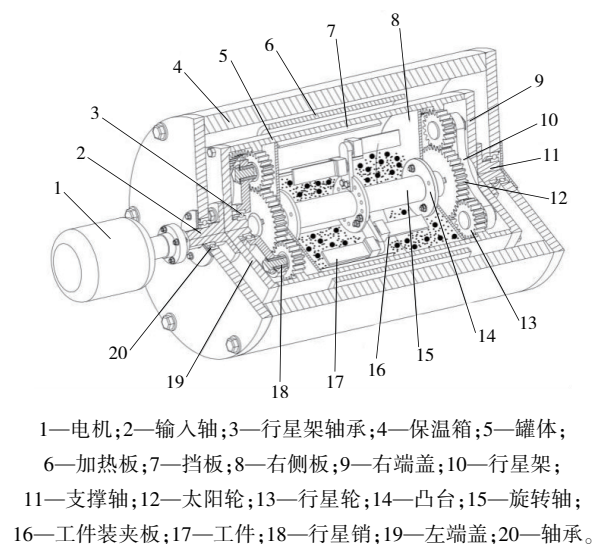


图1 机械能辅助热扩散渗装置结构图

工作原理为:电机1通过输入轴2与左端盖19带动渗罐转动,内置于渗罐内部的行星传动系使旋转轴与渗罐绕相反的方向旋转,渗罐内部均匀设置的挡板带动弹丸运动,在渗罐转动到一定

的角度时,弹丸由于重力自由下落,对工件表面进行冲击,使其产生热塑性变形,渗罐内装有渗剂,实现材料表面缺陷形成与元素扩散同时进行。介质球撞击工件的过程中,其运动状态会直接改变筒内介质球整体的分布特征,进而作用于工件表面的冲击作用。为明晰筒体内介质球的运动特性,本文依托离散单元法开展数值仿真,并结合位置密度法分析介质球的运动行为。试验探究了衬板倾角与高度两项参数对介质球运动形态、介质空间密度分布的作用规律,可为衬板结构参数的优选提供理论支撑。

2 介质球运动区域的分布演化规律

2.1 位置密度法分析原理

图2示意了位置密度法的原理,首先以筒体横截面为特征面,使用仿真软件EDEM^[5]后处理模块的selection功能创建Bin网格,其中Bin网格长度与筒体的长度相等,然后将筒体横截面划分为 $M \times N$ 个网格,逐一时间步统计各网格内介质球的数量和运动参数,最后对计算得到的参数做均值处理。仿真初始阶段,筒体内颗粒工厂生成的介质球会呈现无序排布状态,无法均匀填充于各衬板间隙,仅在筒体持续旋转若干周期后,颗粒体系的运动状态方可逐步趋于稳定。为保障仿真分析数据的准确性与有效性,本文待设备整体运转工况完全平稳后,选取筒体单次完整回转过程作为数据统计周期,采集各个网格单元的颗粒运动参数,据此归纳介质球在筒体径向空间的分布特征与运动变化规律。

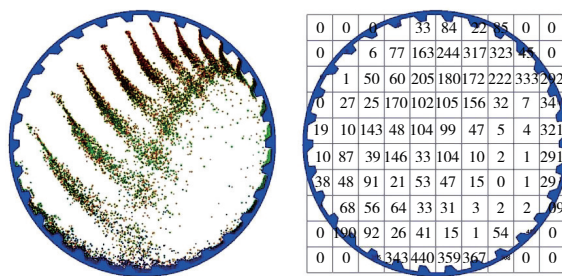


图2 位置密度法原理示意图

采用网格密度法统计分析各网格内介质球运动参数,以此表征整体介质群的运动行为,具备合理性与有效性。首先,所有参数均在颗粒运动进入稳态后采集;其次,介质球出现在各个网格的概率基本均等,通过统计单组网格单元内颗粒数量,以此得到对应区域的概率分布。筒体旋转作业

时,内部介质球的运动行为具备典型的周期性变化特点。本研究通过提取固定运转周期内的均值数据与累积参数开展位置密度分析,能够有效消除仿真过程中随机扰动对颗粒运动轨迹的不利影响,显著提升仿真结果的可靠性与精准度。

2.2 衬板倾角对分布特征的作用规律

为深入探究衬板倾角对筒体内介质球空间密度分布特征的调控机制,本研究开展单一变量仿真试验,保持筒体内径、衬板高度、衬板数量、介质球半径以及介质球数量等关键结构参数恒定,具体参数设置如表1所示。经仿真迭代计算后可求解出各衬板倾角工况对应的筒体最优工作转速,并在各工况最优转速条件下进行数值模拟分析,系统揭示衬板倾角波动对介质球运动行为及整体动力学特性的影响规律。

表1 衬板角度仿真参数设置方案

衬板 角度/(°)	衬板 高度/mm	衬板 数量	介质球 半径/mm	介质球 数量
0、10、20、 30、40	30	30	3	22 000

梳理各项仿真数据后得到如图3所示的内部介质球运动形貌。

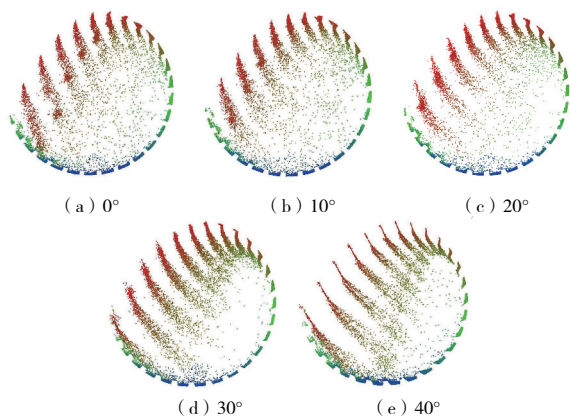
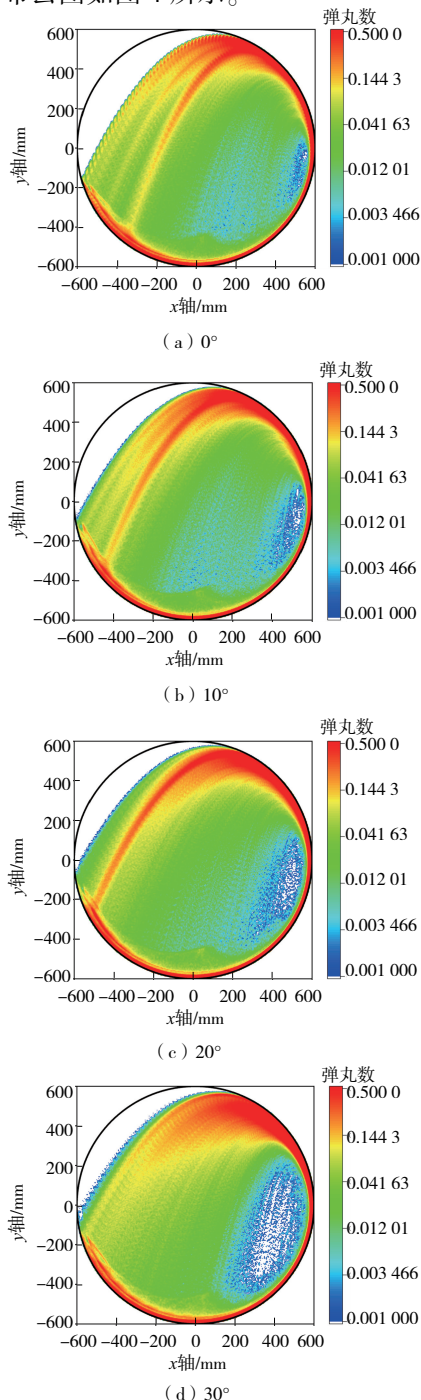


图3 衬板角度对介质球运动状态的影响规律

筒体完成10圈转动后,在筒体最优转速的工作条件下,衬板倾角的调整对介质球的最大运动能量几乎无影响,但会显著改变介质球的整体运动形貌,使其呈现先聚集、后分散的演变规律。各类倾角工况下,筒体横截面均会形成清晰的无介质空白区域。对比各组仿真结果可知,衬板倾角设置为10°与20°时,介质球的抛落运动效果最为优异,沿抛落轨迹运动的介质球能够实现更为均匀的空间分布状态;当衬板倾角调整至0°时,抛落过程中的介质球聚集程度较高,分布相对集中;

而衬板倾角增大至40°时,尽管抛落介质球具备较好的分散程度,但整体分布均匀性相较于10°、20°倾角工况有所下降。

介质球在筒体内部的运动路径呈现出显著的随机特征与离散分布特性^[6],为了便于直观分析介质球沿筒体空间位置的抛落轨迹变化规律^[7-9],筒体旋转10圈至颗粒运动稳定后,按时间步采集介质球空间坐标,统计单周期内各网格的颗粒出现频次^[10],将各网格内的介质球统计数量除以单周期旋转时长,量化得到筒内介质球的空间位置密度分布特征,最终绘制的介质群位置密度分布云图如图4所示。



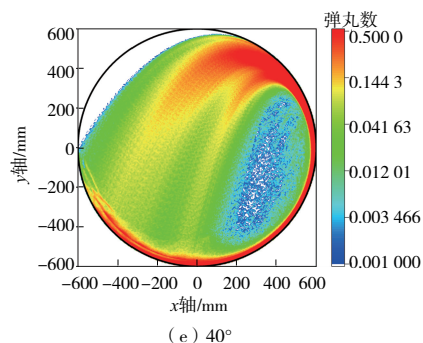


图4 衬板角度对介质球位置密度分布的影响规律

由图中分布特征可得,随着衬板倾角逐步增大,筒内无介质空白区域面积呈现先扩大后缩小的变化趋势。衬板倾斜角度为 0° 、 10° 及 40° 时,筒体抛落区的介质球密度分布呈现显著的分叉特征^[11];而衬板倾角为 20° 时,介质球在抛落区形成规整且连续的单一带状分布结构,该现象表明, 20° 倾角工况下介质球抛落运动的聚集一致性最优^[12]。

2.3 衬板高度对分布特性的影响

设置其他参数恒定,仅改变衬板高度并开展多组仿真,对应方案如表2所示。

表2 衬板高度仿真参数设置方案

衬板高度/mm	衬板角度/ $^\circ$	衬板数量	介质球半径/mm	介质球数量
18、24、30 36、42	20	30	3	22 000

结合仿真数据,得到在不同衬板高度下介质球的运动状态如图5所示。

由图5仿真结果可以看出,衬板高度的增大会使介质球的整体运动形态呈现“分散—聚集”的演变特征^[13-14],该变化规律与衬板倾角对介质运动的影响规律恰好相反。在其余工况参数保持一致的条件下,低衬板高度工况下相邻衬板的间隙尺寸较小,大量介质球无法被衬板有效抬升,在未到达临界抛落位置时便提前发生滚落、泻落行为^[15-17],最终使介质球整体呈现较为分散的分布特征。随着衬板高度不断提升,相邻衬板的容纳空间显著增大,衬板对介质颗粒的牵引提升效果大幅增强,能够有效抑制介质球发生相对滑动。当衬板高度达到 42 mm,筒内介质球几乎不存在泻落现象,但抛落轨迹上的颗粒分布均匀性欠佳、扩散程度不足,整体分散性能显著降低。

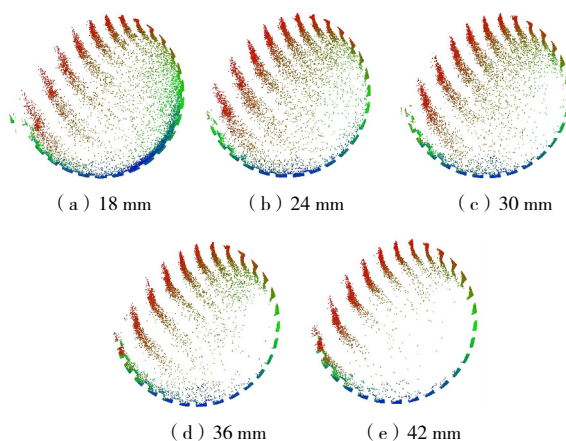
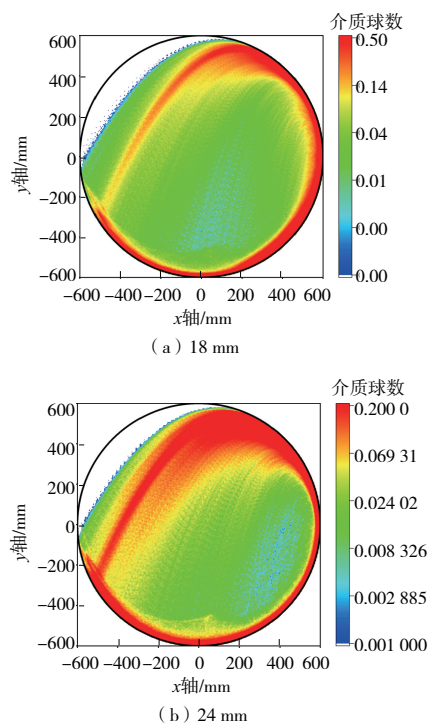


图5 衬板高度对介质球运动状态的影响规律

图6为不同衬板高度对应的介质球位置密度分布特征。可以发现随衬板高度递增,抛落区域内介质球的分布形态呈现“聚集—分散—聚集”的阶段性变化规律。当衬板高度为 18 mm 时,相邻衬板间隙狭小,衬板可牵引的介质总量有限,仅有部分颗粒能够进入抛落运动状态,介质运动轨迹几乎覆盖筒体全部内部区域。随着衬板高度持续增大,衬板间有效空间进一步拓宽,被衬板抬升并参与抛落运动的介质球数量逐步增多,筒体内部空白无料区域愈发清晰且面积持续扩大。其中衬板高度为 24 mm 时,抛落区域内介质球的分散效果最优,整体抛落运动状态达到最佳。



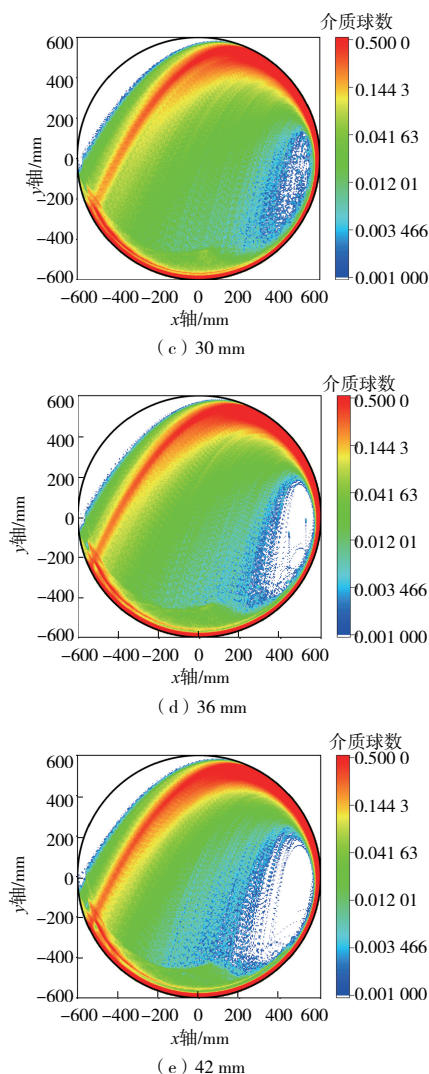


图6 衬板高度对介质球位置密度分布的影响规律

3 结语

本文基于离散单元法对机械能辅助纳米化热扩散渗装置筒体内介质球的运动规律进行仿真,采用位置密度法对筒体内介质球的运动特性进行分析,得到如下结论。

1) 保持其他参数不变,随着衬板倾角的增加,介质球的运动状态呈现出明显的“集中-分散”趋势。在衬板角度为 20° 或者 10° 时,介质球的抛落状态最好,当衬板角度为 20° 时,介质球在抛落区域呈单一的“带状”分布,此时抛落状态介质球的集中性最好。

2) 保持其他参数不变,随着衬板高度的增加,介质球的运动状态呈现出“分散-集中”的趋势,与在不同角度下的介质球运动状态相反。随着衬板高度的增加,进入抛落阶段的介质球数量逐渐增加,筒体内部的空抛区面积逐渐增加,衬板高度

为 24 mm 时,介质球在抛落区的分散性最好,抛落状态最佳。

参考文献:

- [1] 尹自信,王楠.不同转速率下球磨机介质运动状态分布行为研究[J].有色金属(选矿部分),2022(3):118-123.
- [2] 尹自信.球磨机铁矿石颗粒破碎及粒度分布行为研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [3] Makokha A B, Moys M H, Bwalya M M, et al. A new approach to optimising the life and performance of worn liners in ball mills: experimental study and DEM simulation [J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 84(1/2/3/4): 221-227.
- [4] 杨栋,陶重阳,卿俊,等.镁合金表面制备金属和金属/陶瓷复合涂层的研究进展[J].金属世界,2024(4):29-38.
- [5] 崔润,叶文旭,杨小兰,等.基于 EDEM 的新型砂磨机主参数仿真及优化[J].南京工程学院学报(自然科学版),2021,19(1):74-78.
- [6] 梁曼,孙卫红,孙毅,等.球磨过程中介质群运动区域划分方法研究[J].机械工程学报,2020,56(23):212-225.
- [7] 杨吉鑫.基于离散单元法的机械能辅助热扩散渗装置设计[D].湘潭:湖南科技大学,2023.
- [8] 谢磊.基于离散模型异形颗粒混合与分离特性数值模拟研究[D].大庆:东北石油大学,2025.
- [9] 郭昌军,郭帅,谢贵重,等.基于离散单元法的高压辊磨机辊面结构优化研究[J].金属矿山,2026(4):220-228.
- [10] 文翰程,付军,李百川.基于离散元的 LUHPC 细观动态损伤特性研究[J/OL].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),1-13[2026-01-14].<https://link.cnki.net/urlid/42.1824.u.20251209.1141.002>.
- [11] 樊新波,王桂红,万民顺.新拌混凝土离散元模型建立及坍塌度数值模拟[J].建设机械技术与管理,2025,38(4):11-13,21.
- [12] 王吉,董新芳.介质充填率和料球比对球磨机磨矿效果的影响[J].世界有色金属,2026(4):131-133.
- [13] 李培,张萌,王晓,等.基于流固耦合的湿式球磨机磨矿效果离散元分析[J].金属矿山,2025(6):182-187.
- [14] 赵元,马华庆,赵永志.研磨介质形状对球磨机特性影响的 DEM 模拟研究[J].矿山机械,2020,48(5):38-45.
- [15] 李书兆,孙国栋,张安,等.基于离散元分析的各向异性砂土循环荷载下的宏微观液化特性[J].大连海事大学学报,2025,51(2):115-124.
- [16] 贺杰龙.基于离散元法的旋转滚筒内颗粒偏析放大规律研究[D].赣州:江西理工大学,2025.
- [17] 张旭阳.球磨机衬板更换机械手结构设计与运动特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.

收稿日期:2024-06-03