

# “反L形容器”尺寸对圆柱滚子竖直振动超精滚抛效果的影响

梁振华<sup>1,3</sup> 李秀红<sup>1,3\*</sup> 王兴富<sup>1,3</sup> 李文辉<sup>2,3</sup> 杨胜强<sup>1,3</sup> 梁志强<sup>1,3</sup>

1.太原理工大学机械与运载工程学院,太原,030024

2.太原理工大学航空航天大学,晋中,030600

3.太原理工大学精密加工山西省重点实验室,太原,030024

**摘要:**通过仿真及实验探究了竖直振动超精滚抛工艺中容器尺寸对圆柱滚子加工效果的影响,以“反L形容器”的角度 $\alpha$ 、尺寸 $d$ 作为变量,分析了尺寸参数与滚子运动特征及表面颗粒介质力学行为间的联系。研究表明:随着 $\alpha$ 的增大,滚子活跃区域高度逐渐降低,轴线与水平面的偏离程度先减小后增大,外径面法向接触力先增大后减小,而切向相对速度逐渐减小;端面法向接触力先减小后增大,而切向相对速度先增大后减小;随着 $d$ 的增大,滚子活跃区域高度逐渐增大,轴线与水平面的偏离程度先减小后增大,外径面法向接触力先增大后减小,端面法向接触力先减小后增大,外径面及端面切向相对速度逐渐增大。实验结果与仿真结果基本吻合。较优的容器尺寸为: $\alpha=10^\circ$ , $d=50$  mm,加工后外径面粗糙度由 $0.105\ \mu\text{m}$ 降至 $0.036\ \mu\text{m}$ ,端面粗糙度由 $0.150\ \mu\text{m}$ 降至 $0.057\ \mu\text{m}$ ,表面轮廓相对平整,划痕基本去除。

**关键词:**圆柱滚子;竖直振动;光整加工;容器尺寸;离散元法

中图分类号:TH161

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Influences of Size of “Reverse L-Container” on Effect of Vertical Vibration Superfinishing Rolling of Cylindrical Rollers

LIANG Zhenhua<sup>1,3</sup> LI Xiuhong<sup>1,3\*</sup> WANG Xingfu<sup>1,3</sup> LI Wenhui<sup>2,3</sup>  
YANG Shengqiang<sup>1,3</sup> LIANG Zhiqiang<sup>1,3</sup>

1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

2.College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi, 030600

3.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

**Abstract:** Through simulation and experiments, the influences of container sizes on the machining effectiveness of cylindrical rollers in vertical vibration superfinishing rolling processes were investigated. The relation among the dimensional parameters and the movement characteristics of rollers and the mechanical behavior of surface particles was analyzed with the angle  $\alpha$  and size  $d$  of “reverse L-container” as variables. With the increase of  $\alpha$ , the height of the roller active region decreased gradually, and the deviation degree between the axis and the horizontal plane decreases first and then increased. The normal contact force of the outer diameter surface increased first and then decreased, while the tangential relative velocity decreased gradually. The normal contact force decreased first and then increased, while the tangential relative velocity increased first and then decreased. With the increase of  $d$ , the height of the roller’s active region gradually increased, the deviation degree between the axis and the horizontal plane first decreased and then increased, the normal contact force of the outer diameter surface first increased and then decreased, the normal contact force of the end face first decreased and then increased, and the tangential relative velocity of the outer diameter surface and the end face increased gradually. The experimental results agree with the simulation results. The better container size:  $\alpha=10^\circ$ ,  $d=50$  mm, after processing, the outer diameter surface roughness value is reduced from  $0.105\ \mu\text{m}$  to  $0.036\ \mu\text{m}$ , the end surface roughness value is reduced from  $0.150\ \mu\text{m}$  to  $0.057\ \mu\text{m}$ , the surface profile is flat relatively, and the scratches are removed basically.

**Key words:** cylindrical roller; vertical vibration; finishing process; container size; discrete element method

收稿日期:2024-02-26

基金项目:国家自然科学基金(51975399,51875389);中央引导地方科技发展基金(YDZJSX2022A020,YDZJSX2022B004)

## 0 引言

轴承是装备制造业中应用广泛的精密基础

件<sup>[1]</sup>,对装备的总体性能有着重大影响<sup>[2-3]</sup>。圆柱滚子作为圆柱滚子轴承最关键、最薄弱的零部件<sup>[1]</sup>,其表面质量严重影响到轴承的服役性能。目前,圆柱滚子外圆精密加工方法主要包括无心磨削<sup>[4]</sup>、无心超精研<sup>[5]</sup>、定心往复超精研<sup>[6]</sup>、电化学机械复合光整加工<sup>[7]</sup>、磁流体研磨<sup>[8]</sup>和双平面方式超精研抛<sup>[9]</sup>等,中小型圆柱滚子端面多采用双面磨床<sup>[10]</sup>。轴承滚子精加工方法主要是磨削后再超精加工,表面质量受磨轮及导轮的影响较大,不易控制<sup>[11]</sup>。随着高端装备的不断发展,对圆柱滚子外径面、端面及倒角进行大批量、全方位一致化加工已成为亟需解决的难题,除个别加工方法是环保因素及成本受限外,上述多数加工方法只能单一地对圆柱滚子外径面、端面进行精加工。

滚磨光整加工可以突破上述加工方法的局限性,实现滚子表面全方位加工。滚磨光整加工将待加工工件置于盛有加工介质的容器中,容器受到外力作用产生一定的运动形式,颗粒介质以一定的作用力和相对速度对工件表面进行碰撞、滚压、滑擦等以改善工件表面完整性<sup>[12-13]</sup>,具有成本低、效率高、可引入残余压应力、综合改善表面完整性等优点<sup>[14]</sup>。韩锐等<sup>[15]</sup>通过研究发现,水平强制振动光整加工 TC4 钛合金试件不仅可以大幅降低试件表面粗糙度值,还可以引入更大的残余压应力,提高表面完整性。目前滚磨光整工艺已广泛应用于圆柱滚子表面精密加工。WANG 等<sup>[16]</sup>对现有圆柱滚子表面抛光技术进行了全面评价,认为使用滚磨光整加工工艺,圆柱滚子自由放置在容器中,可以在不影响圆柱滚子工艺精度的情况下实现大批量、一致性加工。王晔等<sup>[17]</sup>采用振动式滚磨光整加工圆柱滚子,外径面粗糙度由  $0.038\ \mu\text{m}$  降到  $0.028\ \mu\text{m}$ ,端面粗糙度从  $0.069\sim 0.073\ \mu\text{m}$  降到  $0.027\sim 0.031\ \mu\text{m}$ ,对外径面圆度基本无影响,可以实现倒角圆滑过渡。吴广山等<sup>[18]</sup>采用振动光饰加工圆柱滚子,加工前后对滚子形状及几何精度并不产生破坏,可大幅降低滚子表面粗糙度值,改善外观。但由于将大批量滚子置于一个容器,故滚子之间难免发生磕碰,单件独仓、多仓分布方法是解决这一问题的有效途径,同时为保证多仓运动的一致性,本文提出了竖直振动多仓超精滚抛加工工艺,即将多个装有颗粒介质、磨剂和工件的容器固定在振动平台上,容器随平台振动,使得容器内颗粒介质对圆柱滚子表面产生独特的力学行为,从而改善圆柱滚子表面质量,并采用离散元法(discrete element method, DEM)及加工实验探究独仓容器尺寸对滚抛效果

的影响,优化工艺参数。

采用离散元法探究各工艺参数对滚抛效果的影响并指导加工已广泛应用于滚磨光整加工之中<sup>[19]</sup>,其基本原理是将散粒体分离成离散单元的集合,利用牛顿第二定律建立每个单元的运动方程,用动态松弛法迭代求解,该方法在分析离散特性的颗粒介质群体运动时具有明显的优势<sup>[20]</sup>。WANG 等<sup>[21]</sup>采用离散元法探究水平振动下颗粒介质的运动行为,分析了不同频率和振幅下颗粒介质流化的过程,结果表明增大振幅和频率可以提高颗粒系统的流化程度。WANG 等<sup>[22]</sup>使用 ADAMS 和 EDEM 软件耦合仿真方法对振动抛磨航空用盘类零件进行研究,将零件固定在容器内壁上,零件与内壁形成组合型腔影响颗粒流场特征,并在零件附近产生器壁效应,以提高加工效率。

混合颗粒物质在竖直振动过程中的分聚行为广泛存在于生产和生活领域<sup>[23]</sup>,采用竖直振动抛磨工艺对工件进行加工,若工件处于自由状态,也可以视为一种“颗粒介质”,与加工选用的颗粒介质在质量、形状及尺寸上存在较大差异,振动过程中,会出现大颗粒在上、小颗粒在下的“巴西果”现象,或者大颗粒在下、小颗粒在上的“反巴西果”现象<sup>[24-25]</sup>。当出现“巴西果”现象时,圆柱滚子处于颗粒介质上部,此时颗粒介质排列疏松,能量耗散严重,加工效果较差;若出现“反巴西果”现象,圆柱滚子与下器壁碰撞,磕碰严重,影响加工效果。如何避免上述现象成为改善自由类零件竖直振动滚抛效果的关键。李睿等<sup>[26]</sup>研究了混合颗粒材料中对流对颗粒分离行为的作用机制并发现:在受竖直振动的混合颗粒系统中,当发生对流时,重颗粒主要集中在对流圈的中心区域,轻颗粒主要集中在对流圈的外部。受到该现象启示,本文的基本构形为基于矩形容器演变出的“反 L 形容器”,该容器以一定参数竖直振动时,迫使其内颗粒介质频繁发生对流,进而调控圆柱滚子位置,避免出现“巴西果”及“反巴西果”现象,以改善加工效果。

振动滚抛工艺中,能量主要依靠容器器壁向内部颗粒介质群输入<sup>[27]</sup>,容器形状及尺寸显著影响颗粒介质流场特征。孔维姝等<sup>[28]</sup>发现竖直振动中矩形容器宽度显著影响对流强度。牛啸等<sup>[29]</sup>通过仿真及实验探究矩形容器的尺寸参数对叶片滚抛效果的影响,确定较优的容器尺寸参数。KNIGHT<sup>[30]</sup>通过实验发现,竖直振动中增大矩形容器侧壁倾斜角可以使对流反向。冯利东

等<sup>[31]</sup>探究了立式振动中容器结构对颗粒介质运动特性的影响,发现容器结构对颗粒介质流场特征的影响极大。

容器构形是实现宏观流场创成和精准调控的重要手段之一<sup>[32]</sup>。本文针对竖直振动超精滚抛工艺,采用工业上常用的激振参数(频率 25 Hz, 振幅 2 mm),基于离散元法探究“反 L 形容器”尺寸(下器壁角度  $\alpha$  与上器壁高度  $d$ )改变后对圆柱滚子表面颗粒介质力学行为的影响,并结合圆柱滚子运动特征及颗粒介质流场特征加以分析,建立圆柱滚子表面颗粒介质力学行为与加工效果之间的联系,选择加工效果较优的容器尺寸,为圆柱滚子表面精密加工提供一种新的工艺方法。

### 1 竖直振动超精滚抛加工原理

竖直振动超精滚抛加工原理如图 1 所示。加工装置包括振动系统、控制器、功率放大器、容器、颗粒介质和圆柱滚子。圆柱滚子自由放置在容器中,容器在振动系统驱动下产生竖直方向的振动,使得颗粒介质对圆柱滚子表面产生独特的力学行为,从而实现对圆柱滚子的光整加工。

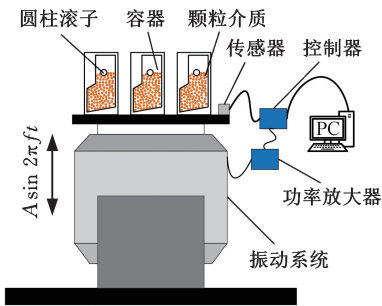


图 1 竖直振动超精滚抛加工原理

Fig.1 Schematic of vertical vibration superfinishing roll-throwing machining

### 2 EDEM-ADAMS 仿真设置

#### 2.1 三维仿真模型的建立及参数设置

采用竖直振动超精滚抛工艺加工圆柱滚子时,圆柱滚子在容器内自由放置,运动较为复杂,EDEM 难以实现对其运动状态的准确模拟。多体动力学软件 ADAMS 具有良好的动力学分析优势<sup>[33]</sup>,故通过 EDEM 和 ADAMS 进行双向耦合实现圆柱滚子运动的准确模拟。容器模型及尺寸如图 2 所示,振动方向为 Z 向,即重力方向,定义容器沿 Z 向的尺寸为容器高度,沿 X 向的尺寸为容器宽度,沿 Y 向的尺寸为容器长度,并以容器尺寸  $\alpha$ 、 $d$  作为变量进行分析,容器尺寸变化见表 1。

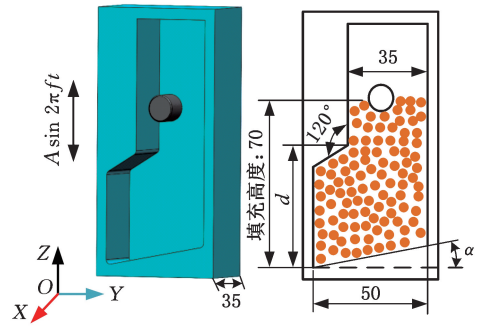


图 2 容器模型及尺寸

Fig.2 Container model and dimensions

表 1 容器尺寸参数变量

Tab.1 Variable of container size parameters

$\alpha / (^{\circ})$	$d / \text{mm}$	$\alpha / (^{\circ})$	$d / \text{mm}$
0	50	10	30
10			40
20			50
30			60
40			70

根据已有研究及加工案例,综合考虑后选择直径 3 mm 的球形高铝瓷作为加工介质<sup>[34-35]</sup>。在 EDEM 中填充直径为 3 mm 的球形高铝瓷,圆柱滚子尺寸为  $\phi 12 \times 14 \text{ mm}$ ,容器材料为尼龙,圆柱滚子材料为 GCr15,容器、圆柱滚子及颗粒介质的本征参数和接触参数见表 2 和表 3<sup>[36]</sup>。圆柱滚子初始放置于颗粒介质表面,轴线方向平行于 X 轴。在 ADAMS 中添加容器的运动,利用 Co-simulation 读取配置文件并建立耦合关系,实现双向耦合<sup>[37]</sup>。EDEM 模拟仿真中,采用 Hertz-Mindlin(no slip)模型作为接触模型。

表 2 各零件物理参数

Tab.2 Physical parameters of each part

零件	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切模量/GPa
容器	0.28	1150	3.2
颗粒	0.21	2675	124
滚子	0.30	7850	217

表 3 接触参数

Tab.3 Contact parameters

相互作用	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.75	0.3	0.03
颗粒-容器	0.36	0.3	0.15
颗粒-工件	0.20	0.5	0.01

#### 2.2 EDEM 仿真数据提取与处理

本文通过圆柱滚子运动特征及颗粒介质流场解释滚子表面颗粒介质力学行为变化的原因,加工过程中,圆柱滚子埋入颗粒介质中,难以用有效手段测量其运动,故通过建立圆柱滚子表面颗粒介质力学行为与表面粗糙度、表面形貌之间的联系来验证理论模型。文献<sup>[29, 38]</sup>已经证明,工件抛磨效果由工件表面与颗粒介质间的接触力及相

对速度共同决定,接触力及相对速度越大,颗粒介质与工件表面的相对作用就剧烈,粗糙度下降率越大,工件表面形貌越平整,而且接触力占据主要因素。故本文在 EDEM 后处理模块中提取滚子表面法向接触力及与颗粒介质间切向相对速度,据此预测抛磨效果,为工艺参数优化提供支撑。

为保证仿真的准确性,仿真共进行 10 s,圆柱滚子外径面划分  $4 \times 6$  个,端面划分  $2 \times 12$  个与圆柱滚子表面接触区域面积一致的数据块,如图 3 所示,提取圆柱滚子表面各区域 2~10 s 内的相关数据。

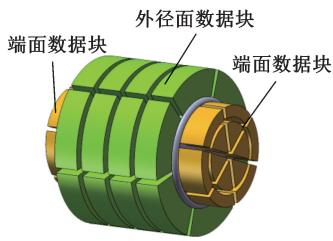


图 3 数据块分布

Fig.3 Distribution of datablocks

图 4 为圆柱滚子表面接触力及与颗粒介质间相对速度示意图,图中 C 为颗粒介质与滚子表面的碰撞位置。滚抛过程中,颗粒介质以一定的相对速度  $v_r$  撞击到滚子表面,产生一个碰撞力  $f$ ,使得滚子表面产生弹性及塑性变形,改变滚子表面的微观几何形状和物理性能<sup>[12]</sup>,随后在反作用力下以相对速度  $v'_r$  远离滚子表面。图中  $f_n$  为法向接触力, $v_{rt}$  及  $v'_{rt}$  为颗粒介质与圆柱滚子间切向相对速度,仿真提取的是上述参数的平均值。

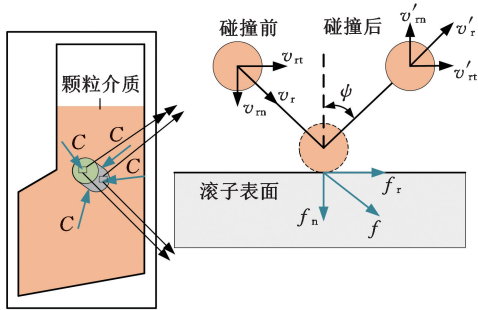


图 4 圆柱滚子表面接触力及与颗粒介质间相对速度<sup>[39]</sup>

Fig.4 Contact force on the surface of cylindrical rollers and relative velocity with granular media<sup>[39]</sup>

### 2.3 圆柱滚子运动的表征参数

#### 2.3.1 圆柱滚子高度

在竖直振动超精滚抛工艺中,能量主要从容器底部输入,向上传递,并逐渐衰弱。容器构形不变,输入能量一定时,圆柱滚子越靠近容器底部,其与颗粒介质间的相互作用越剧烈,且圆柱滚子主要沿着高度方向运动,故有必要对圆柱滚子在

容器内高度  $h_m$  变化进行研究。图 5 展示了圆柱滚子及容器各点位置,点 O 为坐标原点,即固定点,点 N 为容器内部最低点,点 m 及点 1 分别为圆柱滚子质心及端面圆心。圆柱滚子高度  $h_m$  计算公式为

$$h_{m(t)} = Z_{m(t)} - Z_{N(t)} \quad (1)$$

式中: $h_{m(t)}$  为圆柱滚子质心在  $t$  时刻的高度,mm; $Z_{m(t)}$ 、 $Z_{N(t)}$  分别为点 m、N 在  $t$  时刻相对于原点 O 沿 Z 轴坐标,mm。

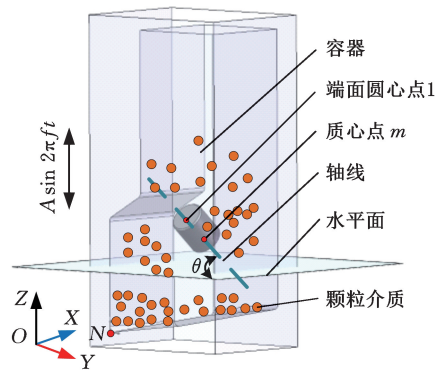


图 5 圆柱滚子各点位置及轴线与水平面夹角

Fig.5 The position of each point of the cylindrical roller and the angle between the axis and the horizontal plane

#### 2.3.2 圆柱滚子轴线与水平面偏离程度

在竖直振动超精滚抛工艺中,颗粒介质沿着竖直方向速度远大于水平方向速度,圆柱滚子主要受到颗粒介质竖直方向的冲击。当滚子处于图 5 所示位置时,圆柱滚子轴线与水平面夹角为  $\theta$ ,计算公式为

$$\theta_{(t)} = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{Z_{m(t)} - Z_{1(t)}}{7}\right) \quad (2)$$

式中: $\theta_{(t)}$  为  $t$  时刻圆柱滚子轴线与水平面的夹角, $^\circ$ ; $Z_{1(t)}$  为点 1 在  $t$  时刻相对于原点 O 沿 Z 轴坐标,mm。

此时外径面受到竖直方向冲击的面积  $S_1 = DL |\cos \theta|$  ( $D$  为圆柱滚子直径, $L$  为圆柱滚子长度),端面受到竖直方向冲击的面积  $S_2 = \pi D^2 |\sin \theta| / 4$ , $\theta$  绝对值越大,外径面受到竖直方向冲击面积越小,法向接触力越小,切向相对速度增大;端面受到竖直向冲击面积越大,法向接触力增大,切向相对速度减小。为衡量轴线与水平面的偏离情况,定义轴线与水平面偏离程度  $l$  (单位为  $(^\circ) \cdot s$ ) 进行量化描述, $l$  的计算公式为

$$l = \int_{t_1}^{t_2} |\theta_{(t)}| dt \quad (3)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$  分别为起始时刻与终止时刻,为与上文中提到的法向接触力及切向相对速度对应, $t_1 = 2 s$ , $t_2 = 10 s$ 。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 流场分析

图 6 为容器尺寸  $\alpha = 10^\circ$ 、 $d = 50 \text{ mm}$  时,颗粒

介质一个运动周期的速度矢量图,圆柱滚子及颗粒介质的运动可以描述如下:圆柱滚子在高度  $h_m = 50\text{ mm}$  左右及靠近容器左侧壁区域活动;容器内颗粒介质群垂直方向速度远大于水平方向速度;颗粒介质在上下器壁及回流颗粒群的作用下频繁发生对流运动,容器内绝大部分颗粒介质参与了对流运动。

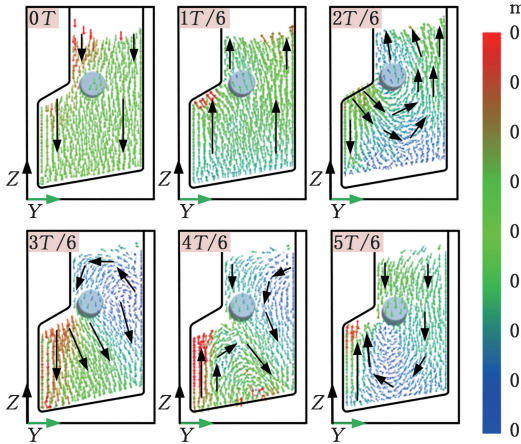


图 6 单个周期内颗粒介质速度矢量图

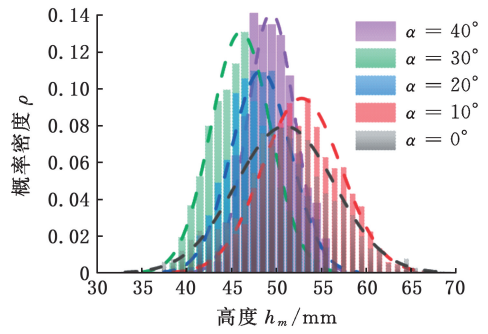
Fig.6 Vector diagram of particle medium velocity in a single cycle

### 3.2 圆柱滚子高度

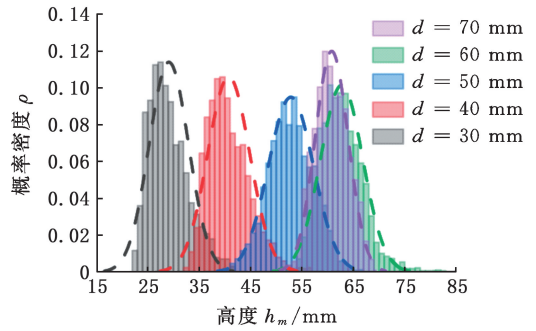
图 7 为 2 ~ 10 s 内圆柱滚子高度分布图,其高度服从正态分布,由图 7a 可知,随着  $\alpha$  的增大,圆柱滚子活动区域逐渐缩小,且活跃区域高度逐渐降低。这是由于当  $\alpha$  增大时,下器壁面积增大,输入到颗粒介质群的能量更多,容器内颗粒介质更为活跃,颗粒介质排列愈发疏松,而在颗粒排列紧密的情况下,当大颗粒向上移动产生孔隙时,其周围小颗粒能够在下部通过重新组合形成一个新的稳定结构而阻止大颗粒回落<sup>[40]</sup>,故圆柱滚子活跃区域高度逐渐降低。圆柱滚子活动区域越大,代表它其受颗粒介质的作用就越激烈,同时为避免圆柱滚子与上器壁过度碰撞,其活动区域应靠近容器上部(高于 50 mm),据此  $\alpha$  在 0 ~ 10° 时可在实现圆柱滚子高效加工的同时,避免过度碰撞。图 7b 显示圆柱滚子活跃区域高度随着  $d$  的增大逐渐增大,这是由于容器内颗粒介质对流中心的位置随着  $d$  改变,而圆柱滚子位置随着对流中心位置变化而改变,与李睿等<sup>[26]</sup> 在混合颗粒材料中对流对颗粒对流对颗粒分离行为的作用机制研究中发现的现象一致:在受竖直振动的混合颗粒系统中,当发生对流时,重颗粒主要集中在对流圈的中心区域,轻颗粒主要集中在对流圈的外部。

### 3.3 轴线与水平面偏离程度

图 8a 所示为  $\alpha$  改变时圆柱滚子轴线与水平



(a) 角度  $\alpha$  不同

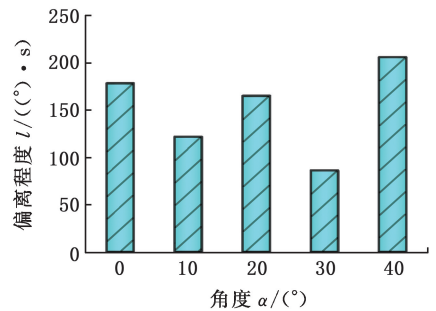


(b) 尺寸  $d$  不同

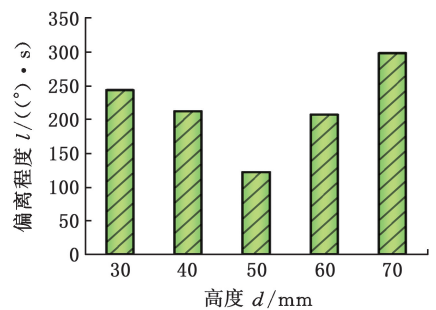
图 7 圆柱滚子高度分布

Fig.7 Cylindrical roller height distribution

面的偏离程度,当圆柱滚子位置出现在容器下方位置( $h_m$  为 34 ~ 50 mm) 次数较多且越靠近颗粒介质群表面时,圆柱滚子轴线与水平面的偏离程度越大,故  $\alpha = 30^\circ$  时偏离程度最低。图 8b 所示为尺寸  $d$  变化时轴线与水平面的偏离程度,当  $d$  增



(a) 角度  $\alpha$  不同



(b) 尺寸  $d$  不同

图 8 圆柱滚子轴线与水平面的偏离程度

Fig.8 The degree to which the axis of the cylindrical rollers deviates from the horizontal plane

大时,圆柱滚子位置越靠上,距离容器下器壁越远,受到颗粒介质的冲击越小,滚子运动的剧烈程度降低,轴线与水平面偏离程度降低, $d = 50 \text{ mm}$ 时,轴线与水平面偏离程度达到最低,随着 $d$ 继续增大,圆柱滚子位置愈发靠上,而上层颗粒介质群排列疏松,对圆柱滚子运动的限制较少,圆柱滚子运动更为剧烈,故轴线与水平面的偏离程度增大。

### 3.4 圆柱滚子表面颗粒介质力学行为

图 9a 所示为  $\alpha$  改变后圆柱滚子表面法向接触力及与颗粒介质相对切向速度的变化情况,随着  $\alpha$  的增大,外径面法向接触力先增大后减小,在  $\alpha = 10^\circ$  时达到最大。 $\alpha = 0^\circ$  时,轴线与水平面的偏离程度较大,故外径面与颗粒介质的法向接触力较小,随着  $\alpha$  的增大,容器下部体积减小,颗粒之间的碰撞愈发频繁,增大了能量损耗, $\alpha = 10^\circ$  之后,随着  $\alpha$  的增大,外径面接触力减小。圆柱滚子端面法向接触力和轴线与水平面的偏离程度变化趋势高度一致,虽然  $\alpha = 40^\circ$  时,轴线与水平面的偏离程度最大,但是由于能量损耗严重,故其端面法向接触力相对较小。 $\alpha = 30^\circ$  及  $\alpha = 40^\circ$  时,容器下部体积小,颗粒之间的碰撞较为频繁,故颗粒介质与圆柱滚子间的切向相对速度较低, $\alpha$  为  $10^\circ \sim 30^\circ$  时,外径面与颗粒介质切向相对速度变化趋势和轴线与水平面的偏离程度一致,端面与颗粒介质切向相对速度的变化趋势与之相反,主要受圆柱滚子在颗粒介质群中姿态的影响。

图 9b 所示为  $d$  改变后圆柱滚子表面法向接触力及与颗粒介质相对切向速度的变化情况,当圆柱滚子在容器内愈发靠近上部或下部时,轴线与水平面的偏离程度越大,故当  $d$  增大时,外径面法向接触力先增大后减小,在  $d = 50 \text{ mm}$  时达到最大;端面法向接触力先减小后增大,在  $d = 50 \text{ mm}$  时最小。由图 7b 可以看到,随着  $d$  的增大,圆柱滚子越靠近容器上部,容器上部颗粒介质疏松,运动幅度较大,则端面及外径面与颗粒介质的相对切向速度越大。由于  $d = 50 \text{ mm}$  时,轴线与水平面的偏离程度较小,其外径面切向相对速度相对于  $d = 40 \text{ mm}$  时有小幅减小。

据仿真结果,容器尺寸  $\alpha = 10^\circ$  时圆柱滚子外径面加工效率最高, $\alpha = 20^\circ$  时端面加工效率最高; $d = 50 \text{ mm}$  时外径面加工效率最高, $d = 70 \text{ mm}$  时端面加工效率最高。但是外径面作为圆柱滚子主要工作面,故以外径面加工效果作为主要评价指标,确定采用竖直振动超精滚抛工艺加工圆柱滚子的较优容器尺寸为: $\alpha = 10^\circ, d = 50 \text{ mm}$ 。

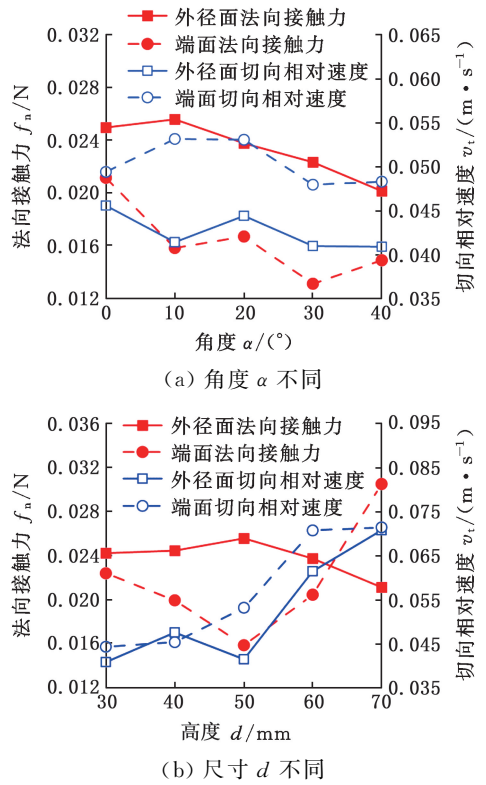


图 9 圆柱滚子表面与颗粒介质力学行为

Fig.9 Mechanical behavior of cylindrical roller surfaces and granular media

## 4 实验验证

### 4.1 实验条件

为了选出对圆柱滚子加工效果较优的容器尺寸参数并对离散元仿真结果进行验证,在苏试 DC-5000-50 振动台上进行加工实验,测试激振参数为 25 Hz、2 mm 时不同容器尺寸下圆柱滚子的加工效果。实验测试系统及加工组件如图 10 所示,容器采用白色尼龙 3D 打印制作,盖板及底板的材料为亚克力,容器与盖板、底板及底板与振动台之间通过螺栓连接。颗粒介质选用直径 3 mm 的高铝瓷球,填充高度 70 mm,磨剂为 HYF,并加入适量研磨粉,对颗粒介质润湿处理,每隔 90 min 润湿磨料一次。实验所使用的圆柱滚子尺寸

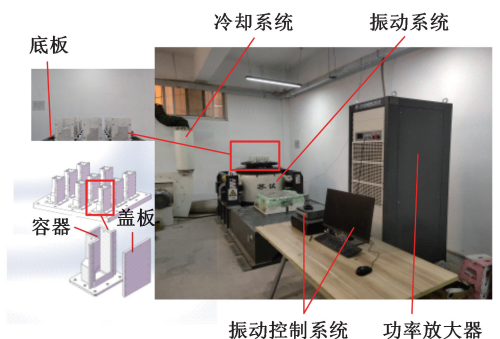


图 10 实验装置

Fig.10 Experimental equipment

为  $\phi 12 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ , 材料为 GCr15, 外径面经过油石超精研加工, 初始粗糙度  $Ra$  为  $(0.096 \pm 0.08) \mu\text{m}$ ; 端面经过磨削加工, 初始粗糙度  $Ra$  为  $(0.16 \pm 0.025) \mu\text{m}$ 。

### 4.2 测试方法

采用马尔 M300 粗糙度仪测量加工前后圆柱滚子表面粗糙度值, 上下端面各取 4 个测试位置作为测试点, 外径面沿着素线均匀选取 3 个点, 绕着圆周位置每隔  $90^\circ$  选 4 条素线, 共计 12 个点作为测试点, 每隔 90 min 进行测试, 并取平均值作为圆柱滚子表面的粗糙度值。为了减小圆柱滚子表面初始粗糙度值不同所造成的影响, 使用粗糙度下降率  $\Delta Ra$  来表征加工效果, 计算公式为

$$\Delta Ra = \frac{Ra_0 - Ra_t}{Ra_0} \quad (4)$$

式中:  $Ra_0$  为加工前圆柱滚子表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ ;  $Ra_t$  为加工时间  $t$  (单位 min) 后圆柱滚子表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ 。

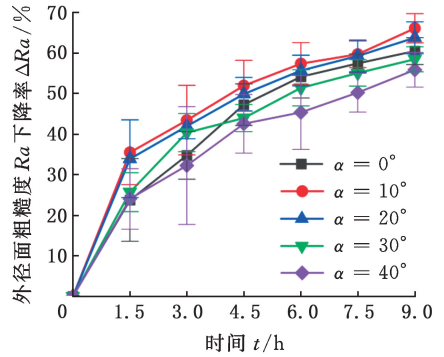
采用 OLYMPUS 超景深三维显微镜测试并对比加工前后圆柱滚子表面形貌。

### 4.3 实验结果与分析

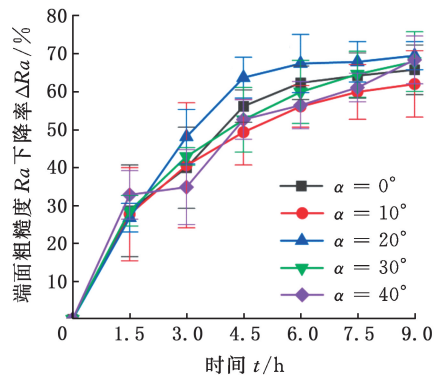
在不同容器尺寸下分别加工圆柱滚子 9 h, 记录圆柱滚子外径面及端面粗糙度值变化。图 11 所示为不同尺寸容器内圆柱滚子表面粗糙度下降率随时间的变化, 圆柱滚子外径面粗糙度下降率随着  $\alpha$  的增大先增大后降低, 在  $\alpha = 10^\circ$  时达到最大, 端面粗糙度下降率在  $\alpha = 20^\circ$  时达到最大; 与仿真结果进行对比后发现, 粗糙度变化与圆柱滚子表面法向接触力变化趋势一致, 滚子表面法向接触力越大, 颗粒介质对滚子表面的作用就愈发剧烈, 波峰波谷去除明显, 滚子表面粗糙度下降速率越快。随着  $d$  的增大, 外径面粗糙度下降率先升高后降低,  $d = 50 \text{ mm}$  时最大, 对比图 9, 粗糙度变化与外径面法向接触力的变化趋势一致; 随着  $d$  的增大, 端面粗糙度下降速率逐渐增大, 与仿真中端面颗粒介质力学行为对比, 虽然在  $d$  较小时, 端面法向接触力较大, 但是它与颗粒介质间切向相对速度较小, 难以造成表面材料的去除, 因此其表面粗糙度下降速率相对较低,  $d = 50 \text{ mm}$  之后, 端面法向接触力及与颗粒介质间的切向相对速度随着  $d$  的增大而增大, 颗粒介质对端面的加工能力增强, 粗糙度下降速率增大。

综上, 仿真与实验结果一致性较好, 采用 EDEM-ADAMS 耦合仿真可以较好地预测滚子抛磨效果, 为工艺参数优化提供支撑。最终确定竖直振动超精滚抛加工中较优的容器尺寸为:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $d = 50 \text{ mm}$ , 加工用颗粒介质为直径 3 mm 的高铝瓷球, 填充高度 70 mm, 外径面粗糙度由

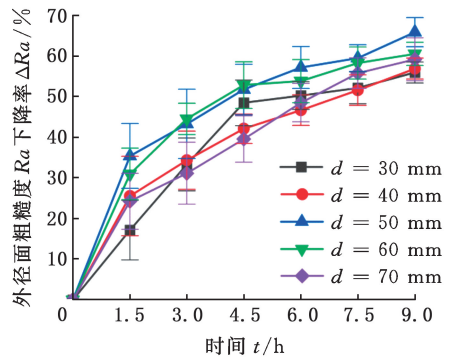
$0.105 \mu\text{m}$  降至  $0.036 \mu\text{m}$ , 下降率为 65.7%; 端面粗糙度由  $0.150 \mu\text{m}$  降至  $0.057 \mu\text{m}$ , 下降率为 62.0%。



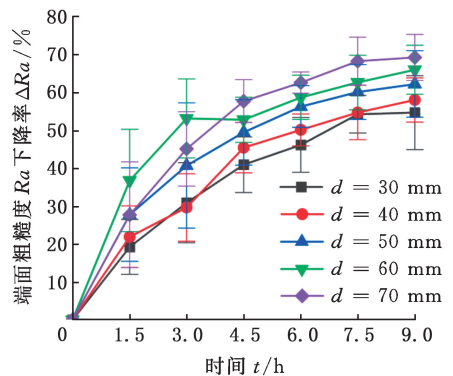
(a)  $\alpha$  改变后外径面粗糙度变化



(b)  $\alpha$  改变后端面粗糙度变化



(c)  $d$  改变后外径面粗糙度变化



(d)  $d$  改变后端面粗糙度变化

图 11 圆柱滚子表面粗糙度变化

Fig.11 Changes in the surface roughness of cylindrical rollers

图 12 及图 13 所示分别为加工效果较优的容器( $\alpha=10^\circ, d=50\text{mm}$ )滚抛前后圆柱滚子表面微观形貌和三维形貌,滚抛前,外径面三维形貌呈现沟壑状且存在着大量粗大的划痕;滚抛后,外径面粗大的划痕数量显著减少,表面形貌得到明显改善,取而代之的是一些细小的划痕,表面形貌呈现出各向同性;滚抛前端面存在一些粗大的划痕及凹坑,滚抛后粗大的划痕基本消失,只遗留部分较深的凹坑,且凹坑深度明显降低,端面表面形貌得到了极大改善。

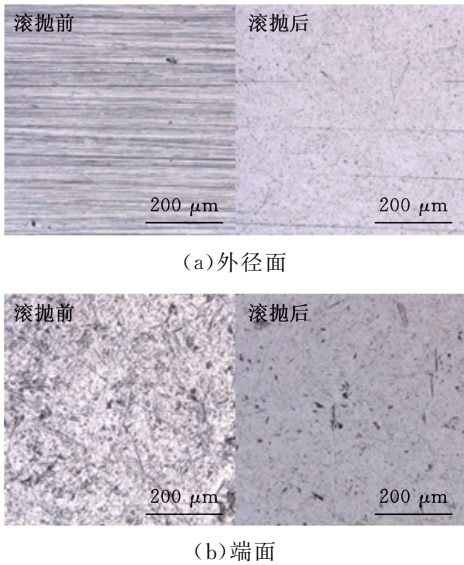


图 12 滚抛前后圆柱滚子表面微观形貌

Fig.12 Microscopic morphology of cylindrical roller surfaces before and after rolling

## 5 结论

本文提出了一种振动式多仓超精滚抛加工方法,实现了圆柱滚子大批量、全方位加工。以竖直振动超精滚抛加工中“反 L 形容器”的尺寸作为变量进行单因素仿真实验,研究了不同水平组合下圆柱滚子的运动特征,圆柱滚子表面法向接触力及与颗粒介质的切向相对速度,并通过加工实验进行验证。得出的结论如下:

1) 圆柱滚子在容器内的运动受容器尺寸的影响:随着角度  $\alpha$  的增大,圆柱滚子活跃区域高度逐渐降低,轴线与水平面的偏离程度在  $\alpha=30^\circ$  时最小;随着角度  $d$  的增大,圆柱滚子活跃区域高度逐渐增大,轴线与水平面的偏离程度先降低后增大。

2) 振动过程中颗粒介质对圆柱滚子表面的力学行为受容器尺寸的影响:外径面法向接触力及端面切向相对速度随着  $\alpha$  的增大先增大后减小,端面法向接触力在  $\alpha=30^\circ$  时最小,  $\alpha=0^\circ$  时最大;随着  $d$  的增大,外径面法向接触力先增大后减

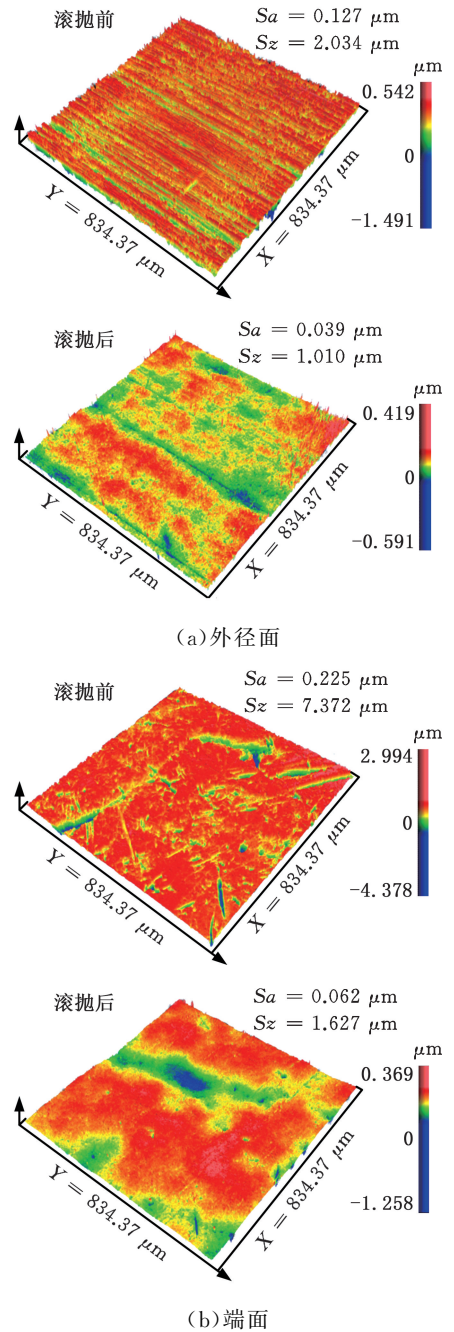


图 13 滚抛前后圆柱滚子表面三维形貌

Fig.13 Three-dimensional morphology of cylindrical roller surfaces before and after rolling

小,  $d=50\text{mm}$  时最大,端面法向接触力先减小后增大,  $d=50\text{mm}$  时最小,外径面及端面切向相对速度随着  $d$  的增大而增大。

3) 通过仿真及加工实验最终确定容器较优尺寸参数:  $\alpha=10^\circ, d=50\text{mm}$ 。在该参数下,圆柱滚子在加工 9 h 后,外径面粗糙度由  $0.105\ \mu\text{m}$  降至  $0.036\ \mu\text{m}$ ,端面粗糙度由  $0.150\ \mu\text{m}$  降至  $0.057\ \mu\text{m}$ ,表面轮廓相对平整,划痕基本去除。

4) 采用振动式超精滚抛加工方法加工圆柱滚子可以同时加工到外径面、端面及倒角,实现圆柱滚子全方位加工,简化圆柱滚子光整加工的工艺

流程;采用多仓分布可以实现圆柱滚子大批量加工,进而实现圆柱滚子高效滚抛。

5) 竖直振动超精滚抛工艺通过具有离散性质的颗粒介质与工件的相互作用实现材料去除,可用于超精加工复杂曲面零件,特别适用于具有凸度的曲面,以及球面、对数曲线型等特殊形状的圆柱滚子及球形滚珠的超精加工。

#### 参考文献:

- [1] 姚蔚峰,袁巨龙,钟美鹏,等. 圆柱滚子外圆精密加工技术综述[J]. 中国机械工程, 2019, 30(10): 1195-1206.  
YAO Weifeng, YUAN Julong, ZHONG Meipeng, et al. Review on Precision Machining Technology for Outer Diameters of Cylindrical Rollers[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(10):1195-1206.
- [2] 顿涌泉,吴鑫,王统建,等. 滚动轴承制造装备[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.  
DUN Yongquan, WU Xin, WANG Tongjian, et al. Rolling Bearing Manufacturing Equipment[M]. Beijing:China Machine Press, 2006.
- [3] LU Dun, ZHAO Wanhua, LU Bingheng, et al. Effects of Rolling Bearing Type and Size on the Maximum Eccentricity Ratio of Hydrodynamic Rolling Hybrid Bearings [J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2):225-229.
- [4] YE Zhenhuan, WANG Liqin, GU Le, et al. Effects of Tilted Misalignment on Loading Characteristics of Cylindrical Roller Bearings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 69:153-167.
- [5] 高作斌,马伟,邓效忠,等. 圆锥滚子超精研导辊的精确辊形及其磨削分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(17):2310-2316.  
GAO Zuobin, MA Wei, DENG Xiaozhong, et al. Analysis on Exact Shape Surface and Its Grinding of Guid Roller for Superfinishing of Tapered Rollers [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(17): 2310-2316.
- [6] MIURA K, YAMADA T, TAKAHASHI M, et al. Application of Superfinishing to Curved Surfaces [J]. Key Engineering Materials, 2013, 581: 241-246.
- [7] 魏泽飞,李蕾,余东生,等. 电化学机械加工对轴承滚子表面质量及凸度的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7):119-124.  
WEI Zefei, LI Lei, SHE Dongsheng, et al. Effect of Electrochemical Mechanical Machining on Surface Quality and Convexity of Bearing Rollers[J]. Surface Technology, 2018, 47(7):119-124.
- [8] 金沫吉,张锡水,王黎钦,等. 磁流体研磨法研磨陶瓷球的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(3):130-134.  
JIN Moji, ZHANG Xishui, WANG Liqin, et al. The Experimental Study on Magnetic Fluid Grinding for Ceramic Ball Grinding[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1995, 27(3):130-134.
- [9] 姚蔚峰,袁巨龙,江亮,等. 偏心运动双平面超精研抛圆柱面研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2327-2334.  
YAO Weifeng, YUAN Julong, JIANG Liang, et al. Study on Both-side Cylindrical Ultra-precision Lapping and Polishing Processes in Eccentric Rotations[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(19):2327-2334.
- [10] 何丽,王翔宇. 圆柱滚子双端面加工的探讨[J]. 哈尔滨轴承, 2011, 32(3):19-22.  
HE Li, WANG Xiangyu. Discussion on Processing Double End Faces of Cylinder Roller[J]. Journal of Harbin Bearing, 2011, 32(3):19-22.
- [11] 徐文骥,魏泽飞,孙晶,等. 轴承滚子电化学机械光整加工表面质量预测与加工参数选择[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5):525-530.  
XU Wenji, WEI Zefei, SUN Jing, et al. Surface Quality Prediction and Processing Parameters Determination on Electrochemical Mechanical Finishing of Bearing Roller[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5):525-530.
- [12] 杨胜强,李文辉,陈红玲,等. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.  
YANG Shengqiang, LI Wenhui, CHEN Hongling. Surface Finishing Theory and New Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [13] 李秀红,李文辉,王程伟,等. TC4钛合金滚磨光整加工的表面完整性与抗疲劳性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1):15-25.  
LI Xiuhong, LI Wenhui, WANG Chengwei, et al. Surface Integrity and Anti-fatigue Performance of TC4 Titanium Alloy by Mass Finishing[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1):15-25.
- [14] 樊荣,李秀红,李文辉,等. 基于ABAQUS/FE-SAFE的TC4钛合金板材疲劳寿命仿真与实验[J]. 表面技术, 2017, 46(1):158-163.  
FAN Rong, LI Xiuhong, LI Wenhui, et al. Fatigue Life Simulation and Experiment of TC4 Titanium Alloy Board Based on ABAQUS/FE-SAFE [J]. Surface Technology, 2017, 46(1):158-163.
- [15] 韩锐,李秀红,王嘉明,等. 水平强制振动光整加工对TC4钛合金表面完整性参数的影响[J]. 中国机械工程, 2023, 34(17):2037-2047.  
HAN Rui, LI Xiuhong, WANG Jiaming, et al.

- Influences of Horizontal Forced Vibration Finishing on Surface Integrity Parameters of TC4 Titanium Alloys [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(17):2037-2047.
- [16] WANG Xingfu, LI Xiuhong, MA Xiaolong, et al. Advance on Surface Finishing Technology of Precision Bearing Cylindrical Rollers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(5):2341-2363.
- [17] 王晔, 王玉红, 韩亭鹤, 等. 圆柱滚子倒角精加工工艺改进[J]. *轴承*, 2019(10):15-18.  
WANG Ye, WANG Yuhong, HAN Tinghe, et al. Improvement on Finishing Technology for Chamfer of Cylindrical Rollers[J]. *Bearing*, 2019(10):15-18.
- [18] 吴广山, 张岩. 光饰工艺在轴承滚子加工中的应用[J]. *哈尔滨轴承*, 2005, 26(1):12-13.  
WU Guangshan, ZHANG Yan. Application of Polishing Technology in Bearings Roller Process [J]. *Journal of Harbin Bearing*, 2005, 26(1):12-13.
- [19] 杨胜强, 李文辉, 李秀红, 等. 高性能零件滚磨光整加工的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(10):13-24.  
YANG Shengqiang, LI Wenhui, LI Xiuhong, et al. Research Development of Mass Finishing for High-performance Parts[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(10):13-24.
- [20] 杨军伟, 孙慧男, 张卓青. 离散元法及其在农业工程中的应用综述[J]. *现代食品*, 2015, 21(15):28-33.  
YANG Junwei, SUN Huinan, ZHANG Zhuoqing. A Review on Fundamentals of Distinct Element Method and Its Applications in Agricultural Engineering Realm[J]. *Modern Food*, 2015, 21(15):28-33.
- [21] WANG Jiaming, LI Xiuhong, LI Wenhui, et al. Convection and Motion Characteristics of Granular Media in Horizontal Vibratory Finishing[J]. *Granular Matter*, 2023, 25(4):76.
- [22] WANG Xiuzhi, YANG Shengqiang, LI Wenhui, et al. Vibratory Finishing Co-simulation Based on ADAMS-EDEM with Experimental Validation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1):1175-1185.
- [23] 刘瑜, 周甲伟, 荆双喜, 等. 垂直振动下二元混合颗粒分离的影响因素及能量分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(18):298-304.  
LIU Yu, ZHOU Jiawei, JING Shuangxi, et al. Influential Factors and Energy Analysis on the Segregation of Binary Mixture Particles under Vertical Vibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(18):298-304.
- [24] 赵永志, 江茂强, 郑津洋. 巴西果效应分离过程的计算颗粒力学模拟研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(3):1812-1818.  
ZHAO Yongzhi, JIANG Maoqiang, ZHENG Jinyang. Discrete Element Simulation of the Segregation in Brazil Nut Problem[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3):1812-1818.
- [25] 彭亚晶, 张卓, 王勇, 等. 振动颗粒物质“巴西果”分离效应实验和理论研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(13):273-280.  
PENG Yajing, ZHANG Zhuo, WANG Yong, et al. Experimental and Theoretical Investigations of the Effect of “Brazil Nut” Segregation in Vibrating Granular Matters[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13):273-280.
- [26] 李睿, 何子涵, 沈一浩, 等. 混合颗粒材料中对流对颗粒分离行为的作用机制研究[J]. *湖北第二师范学院学报*, 2021, 38(2):1-5.  
LI Rui, HE Zihan, SHEN Yihao, et al. Granular Segregation in Strongly Convective Granular Mixtures[J]. *Journal of Hubei University of Education*, 2021, 38(2):1-5.
- [27] Da SILVA MACIEL L, SPELT J K. Comparison of DEM Predictions and Measured Wall-media Contact Forces and Work in a Vibratory Finisher [J]. *Powder Technology*, 2020, 366:434-447.
- [28] 孔维姝, 胡林, 李世雄, 等. 探讨激振频率和容器宽度对颗粒层中对流的影响[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4):88-91.  
KONG Weishu, HU Lin, LI Shixiong, et al. Influence of Exciting Frequency and Container Width on Convection in Vibrating Granular Layers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4):88-91.
- [29] 牛啸, 李秀红, 王嘉明, 等. 容器尺寸对叶片竖直强制振动光整加工效果的影响[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(5):167-178.  
NIU Xiao, LI Xiuhong, WANG Jiaming, et al. Influence of Container Size on Processing Effect of Vertical Forced Vibration Finishing for Blades[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(5):167-178.
- [30] KNIGHT J B. External Boundaries and Internal Shear Bands in Granular Convection[J]. *Physical Review E*, 1997, 55(5):6016-6023.
- [31] 冯利东, 李文辉, 李秀红, 等. 容器结构对立式振动抛磨颗粒介质流动特性影响分析[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2024, 44(1):1-8.  
FENG Lidong, LI Wenhui, LI Xiuhong, et al. Analysis of the Influence of Container Structure on the Flow Characteristics of Vertical Vibration Polishing Granular Media[J]. *Diamond & Abrasives*

- Engineering, 2024, 44(1):1-8.
- [32] 李秀红, 王兴富, 李文辉, 等. 航发关重件形性协同滚抛工艺研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(13):629860.  
LI Xiuhong, WANG Xingfu, LI Wenhui, et al. Research Progress on Precision and Performance Synergistic Finishing for Aerospace Engine Critical Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(13):629860.
- [33] 高阳, 李学楠, 陈海滨, 等. 套圈整体抛磨的 EDEM-ADAMS 耦合数值模拟和试验[J]. 轴承, 2023(11):39-45.  
GAO Yang, LI Xuenan, CHEN Haibin, et al. EDEM-ADAMS Coupling Numerical Simulation and Experiment for Overall Grinding of Rings[J]. Bearing, 2023(11):39-45.
- [34] UHLMANN E, DETHLEFS A, EULITZ A. Investigation of Material Removal and Surface Topography Formation in Vibratory Finishing [J]. Procedia CIRP, 2014, 14:25-30.
- [35] 杨林滋, 李永刚, 何琼, 等. 退火和深冷处理对 7075 铝合金滚磨光整加工性能的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(10):145-149.  
YANG Linzi, LI Yonggang, HE Qiong, et al. Influence of Annealing and Cryogenic Treatment on the Barrel Finishing Performance of 7075 Aluminium Alloy [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(10):145-149.
- [36] 张荔, 李文辉, 杨胜强. 滚磨光整加工中磨料颗粒堆积角的离散元参数标定[J]. 中国科技论文, 2016, 11(16):1821-1825.  
ZHANG Li, LI Wenhui, YANG Shengqiang. Calibration of Discrete Element Parameters of Abrasive Particle in Mass Finishing Process[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(16):1821-1825.
- [37] 李臣, 姜志宏, 蔡改贫, 等. 基于 ADAMS-EDEM 耦合的振动慢剪挤压破碎机动力学分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(4):54-57.  
LI Chen, JIANG Zhihong, CAI Gaipin, et al. Dynamics Analysis on Vibration Slow Shearing Extrusion Crusher Based on ADAMS-EDEM Coupling [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(4):54-57.
- [38] 李昊, 李秀红, 王嘉明, 等. 叶片安装高度对水平振动抛磨介质作用行为影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(11):6-10.  
LI Hao, LI Xiuhong, WANG Jiaming, et al. Analysis of Action Behavior of Granular Medium on Blade in One-dimensional Vibration Polishing [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(11):6-10.
- [39] HASHIMOTO F, JOHNSON S P, CHAUDHARI R G. Modeling of Material Removal Mechanism in Vibratory Finishing Process [J]. CIRP Annals, 2016, 65(1):325-328.
- [40] DURAN J, RAJCHENBACH J, CLÉMENT E. Arching Effect Model for Particle Size Segregation [J]. Physical Review Letters, 1993, 70(16):2431-2434.

(编辑 陈 勇)

作者简介:梁振华,男,1997年生,硕士研究生。研究方向为精密零件表面光整加工。李秀红\*(通信作者),女,1972年生,教授、博士研究生导师。研究方向为精密零件表面光整加工。E-mail: xhli7489@sina.com。

**本文引用格式:**

梁振华,李秀红,王兴富,等.“反 L 形容器”尺寸对圆柱滚子竖直振动超精滚抛效果的影响[J]. 中国机械工程,2025,36(3):444-454.

LIANG Zhenhua, LI Xiuhong, WANG Xingfu, et al. Influences of Size of “Reverse L-Container” on Effect of Vertical Vibration Superfinishing Rolling of Cylindrical Rollers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):444-454.