

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.01.001

钛合金平面磁粒研磨轨迹的均匀性实验研究

陈宇辉, 韩冰*, 齐琦, 赵杨, 崔维启

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 鞍山 114051)

摘要: 为了获得更好的研磨加工质量和高效、高均匀度的加工效果, 采用磁力研磨法, 利用 ADAMS 模拟单颗磨粒运动轨迹, 并运用数值计算对运动轨迹的均匀性作出评判。通过搭建实验平台, 在不同条件下, 对钛合金平面进行研磨抛光, 获取其表面粗糙度的变化与加工时间的关系, 并在加工区域取 3 点测量其表面粗糙度, 探讨研磨轨迹的均匀性对加工平面粗糙度的影响。

关键词: 磁力研磨; 运动轨迹; 表面粗糙度; 平面均匀性

中图分类号: TG669

文献标识码: A

Experimental Exploration of Plane Magnetic Particle Grinding Trajectory of Titanium Alloy

CHEN Yuhui, HAN Bing*, QI Qi, ZHAO Yang, CUI Weiqi

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: In order to obtain better grinding quality and high-efficiency and high-uniformity processing effect, this paper uses magnetic grinding method, simulates the movement track of single abrasive particle by ADAMS, and evaluates the uniformity of track by numerical calculation. An experimental platform was set up to determine the grinding and polishing of titanium plane under various experimental conditions. The relationship between the change of surface roughness and processing time was obtained, and the surface roughness was measured at three points in the processing area. Thus, the influence of the uniformity of grinding track on the flatness of the processing plane was discussed.

Keywords: magnetic abrasive finishing; motion trajectory; surface roughness; plane uniformity

高精度、低损伤的表面质量是磨粒加工领域发展的重要方向。平面研磨加工是获取光学元件、蓝宝石衬底、单晶硅衬底等高精度表面的重要手段之一, 在电子、计算机、航空航天等技术领域有着广泛的应用^[1]。研磨是一种重要的精密机械加工工艺, 目前在我国量具、仪器、机床、航空以及动力机械等

各行业的制造、装配和修理工作中应用非常广泛。在研磨时, 工件和研具之间的相对运动, 实现切削作用的磨料的运动方式和轨迹直接影响工件的质量和效率。例如, 在量块生产中, 由于改进研磨运动轨迹, 使量块的表面光洁度提高了一级, 而且效率得到提高^[2]。平面磁力研磨技术属于精密机械

收稿日期: 2019-07-15

修回日期: 2020-03-20

作者简介: 陈宇辉, 男, 硕士生, email: 136058505@qq.com

通信作者: 韩冰, email: hanb75@126.com

加工工艺,具有加工品质高、柔性好、自适应性强等优势,以磁场束缚磁性磨粒对工件表面进行光整的方法结构简单、成本低廉。本文针对其优势,搭建实验平台对钛合金平面进行研磨抛光^[3-5]。通过ADAMS模拟单个磨粒运动轨迹,并实验探究磨具加工平面的均匀效果及质量变化情况^[6]。

1 平面磁粒研磨加工原理

平面磁粒研磨加工原理如图1所示,将圆柱轴向磁极装夹于铣床主轴上,磁性研磨粒子含有铁磁相,可吸附在磁极上,在磁极磁场力作用下沿着磁力线方向形成“磁粒刷”,调整铣床主轴,使其靠近工件表面,留有1~2 mm加工间隙,磁粒刷可仿形压附在工件表面,随着机床主轴旋转及工作台的运动,磁性研磨粒子的研磨相与工件之间产生划擦、磨削作用,微量去除工件表面的材料,去除毛刺、淡化凹坑划痕,提高表面粗糙度,完成加工。

磁粒研磨加工中,磁性研磨粒子对工件表面的研磨压力 P 由公式(1)所示。

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{1 - \mu_m} \right) \quad (1)$$

式中: B 为磁通密度; μ_0 为真空导磁率; μ_m 为磨粒相对导磁率。

当磁极旋转运动时,磁性磨粒受到离心力的作用,当离心力过大时,磁性粒子摆脱磁场力的束缚,部分磨粒会飞出加工区域,因此,适当增大磁场力以束缚磁性研磨粒子是必要的。

在研磨过程中,实现均匀研磨最直观的形式即材料去除量相等,在实际的研磨过程中,材料的去除量是一个复杂的变量,很多不确定的因素都会对其造成影响。Preston方程是广泛应用在磨削加工中的经验公式。此方程是由Preston在1927年提出的。在一定条件下,可以用Preston方程描述磨粒加工对工件表面的材料去除量与各种工艺参数及磨粒特性的关系。在方程中,将磨粒的速度和磨粒对壁面压力之外的所有因素的作用都归为一个比例常数 k_p ,称为Preston常数。

$$\Delta z = \int_0^t k_p v p dt \quad (2)$$

式中: Δz 为磨削去除量; v 为磨粒与工件表面的相对运动速度; p 为磨粒的研磨压力; k_p 包括:与磨粒本身相关的部分因素(磨粒的大小、形状和硬度)、

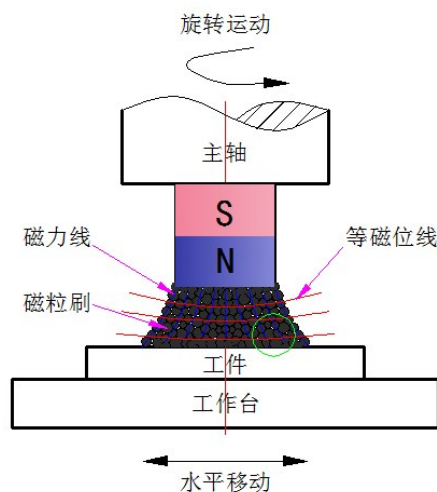


图1 平面磁粒研磨加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of plane magnetic particle grinding

磨粒与表面发生作用时的因素(磨粒与表面的撞击角度)以及被加工工件自身因素(如硬度)等。

由公式(2)可知:材料去除量 Δz 与相对运动速度 v 和研磨压力 p 呈正比。所以增大磨粒与工件表面的相对运动速度和研磨压力都会提高研磨效率。在实际平面磁粒研磨加工中,磁粒刷依靠磁场力吸附在磁极表面,过大的主轴转速会增大磨粒所受的离心力,当离心力大于磁场力会甩出加工区域,导致大量研磨粒子不能参与研磨。但在保证加工均匀性理论的情况下适当增大工作台的运动速度可提高相对运动速度,且适当缩小加工间隙可增大研磨压力,从而提高材料的去除量,研磨效率得以提高。

2 实验

2.1 实验装置及过程

实验设备是在铣床的基础上改进的,添加了旋转移动工作台。平面研磨装置如图2所示。该研磨装置中,机床主轴由电机驱动,以主轴旋转运动为主运动,旋转移动工作台做自转或往复移动。被磨、抛材料放于平整的工作台上,同工作台一起绕Z轴做自转或水平移动运动。磁极装夹在铣床主轴上并带动其旋转,且以一定压力对工件表面施压,获得一定研磨压力。等同于磁极外表面吸附的磁性磨料在加工间隙中形成弹性磁粒刷以一定压力压向工件表面,产生磨削作用。

同时,工件与磁极间作相对运动,起到切削、磨擦的效果,来达到研磨抛光目的。工作台的转速、移动距离及速度可根据计算机运动控制系统软件连接 PLC 控制器编写程序控制滑台的旋转移动来实现。即工件与研磨盘的位置随着联动实时发生

变化。根据工件的形状尺寸及使用磁极的尺寸大小设计最佳运行方案,旋转中的磁极外圈线速度最大,材料去除量最大,选取磁极外圈的一点模拟运动轨迹,评判轨迹的均匀度,以获得更加平整、均匀的加工表面。

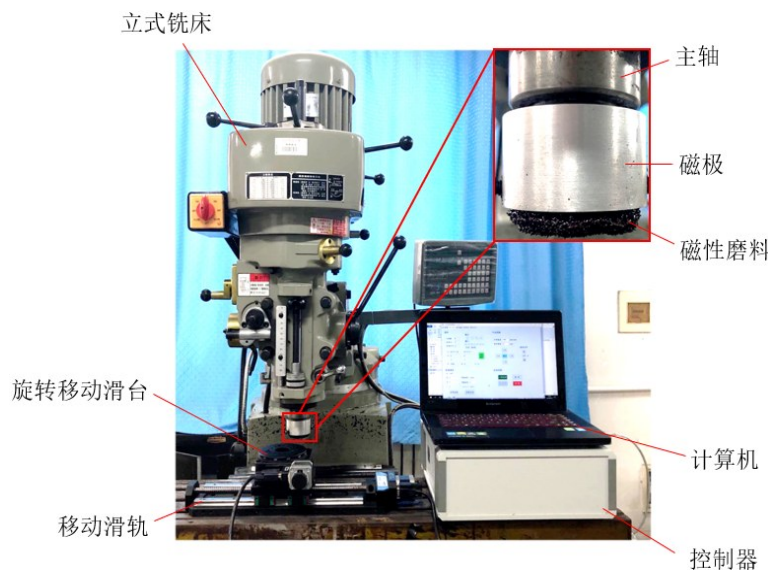


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental device

2.2 基于 ADAMS 的平面研磨均匀性

在预先进行了实验分析后,实验过程由铣床主轴的旋转及工作台的移动或旋转同时进行。加工工件为直径 60 mm 的圆形钛合金平面,采用 $\Phi 30$ mm 的圆柱轴向磁极。为了达到均匀的加工效果,研究决定施加 X 方向 30 mm 的往复运动和定偏心旋转加工方法(工件随工作台自转)进行对比,吸附在圆柱轴向磁极表面的磁粒刷内外线速度不同,在线速度最大的外圈选一点研究其运动轨迹,使用 ADAMS 软件模拟仿真。

均匀性定量分析评价方法如下:对平面进行区域划分,通过数值计算,统计平面内每一划分区域内的研磨轨迹点密度记为 x_i ;采用统计方法计算对角线上各区域内研磨轨迹密度的标准差值作为平面研磨轨迹均匀性的定量评价价值。

采用极坐标的形式对工件表面进行划分,将工件的半径 5 等分,再将圆周 20 等分,一等分为 18° ,总共分割成 100 个区域。由于轨迹点沿圆周均匀分布,为了减小计算量,选择表面四分之一的区域进行统计计算,并由内向外将各个区域标上号,以

便精确计算各个区域内轨迹点的个数(如图 3 所示)。

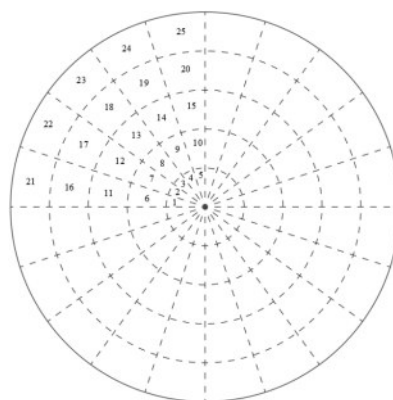


图 3 工件网格划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of workpiece meshing

仿真步数为 2000,时间为 1 s。直线往复运动仿真结果的研磨轨迹及均匀性标准差阶梯图如图 4 所示,定偏心旋转运动转速比(磁极转速/工件转速)为 16 时,仿真结果的研磨轨迹及均匀性标准差阶梯图如图 5 所示。

对两种运动方式形成的研磨轨迹进行均匀性

评价分析,并进行标准差的计算。阶梯图中,横坐标是工件上划分的25个区域标号,纵坐标是每个区域中轨迹点的密度 x_i 。从标准差数值上说明这两种研磨方式所生成的研磨轨迹均匀性大致相同,从直线式轨迹图看出,中间部位及四条边线处有轨迹重叠,更加密集的轨迹线所对应的中间轨迹点密度要大于四周区域。定偏心的轨迹密集仅体现在中心小部区域,其余大部区域轨迹的均匀性较好。以下采用此两种运动方式进行实验探究。

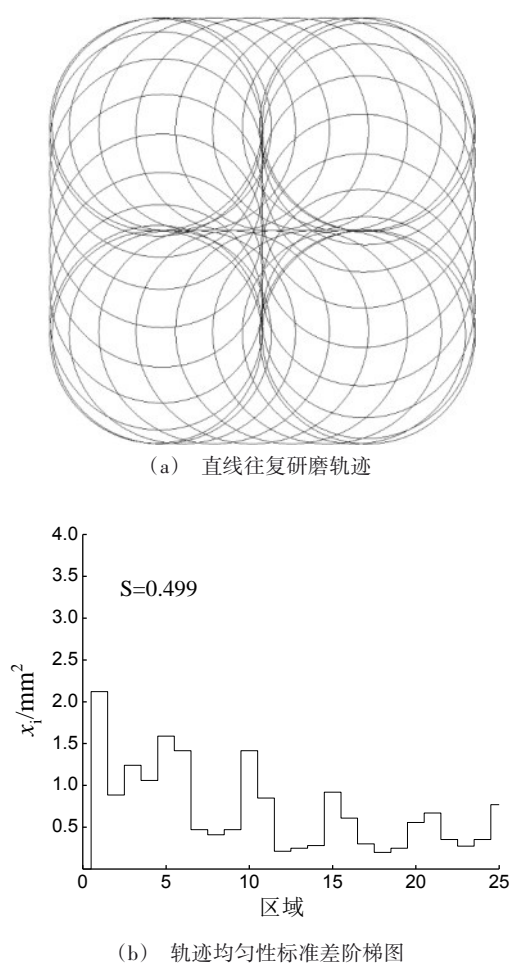


图4 直线往复研磨轨迹及均匀性标准差阶梯图

Fig.4 Linear reciprocating grinding trajectory and standard deviation ladder diagram of uniformity

2.3 实验条件

影响磁力研磨效果的因素有很多,如有效研磨区域大小、磁极转速、磁粒成分和粒径、滑台运动速

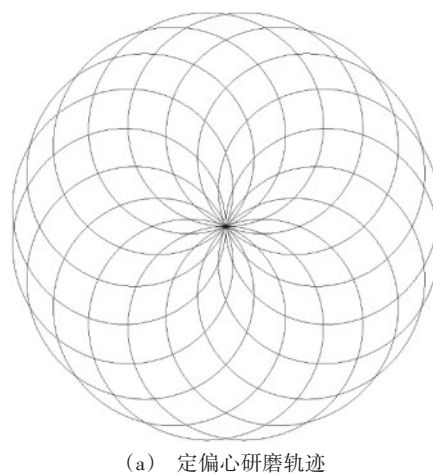


图5 定偏心研磨轨迹及均匀性标准差阶梯图

Fig.5 Step diagram of fixed eccentric grinding track and uniformity standard deviation

度、研磨间隙、运动轨迹、研磨液种类和工件材质等。因此,在实验之前要确定实验条件,最终确定实验条件如表1所示。

3 结果与分析

研磨完成后,分别对工件表面粗糙度、表面形貌进行检测,具体检测位置如图6所示。在平板上从左到右分别取3个位置进行标记并检测,通过测量ABC三处的表面粗糙度值数据变化来判断研磨的效果和均匀度。

3.1 粗糙度测量

使用JB-8E触针式粗糙度测量仪进行粗糙度的测定,测量长度为3.2 mm,比较研磨前后的粗糙度变化规律。直线往复运动粗糙度变化规律如图7

表 1 实验条件

Tab.1 Experimental condition

名称	参数
工件	$\Phi 60$ mm 圆形钛板
磁极	$\Phi 30$ mm 钕铁硼永磁体
磨料	100 目 Fe-Al ₂ O ₃ 磨料 3.5 W 金刚石研磨膏
研磨液	水性研磨液
工作台移动距离/mm	X 方向为 30
工作台转速/(r·min ⁻¹)	15
滑台移动速度/(mm·s ⁻¹)	2
加工时间/min	10、20 和 30
检测仪器	超景深显微镜 JB-8E 触针式粗糙度测量仪

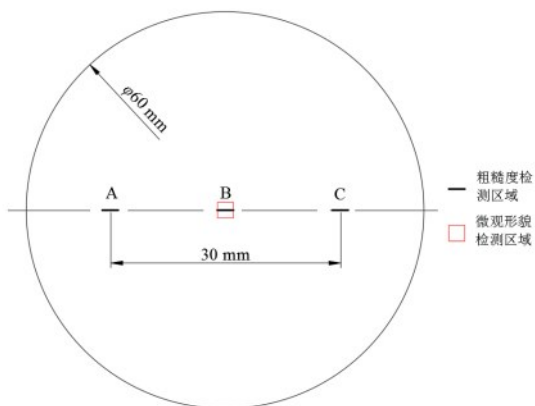


图 6 粗糙度与微观形貌检测位置

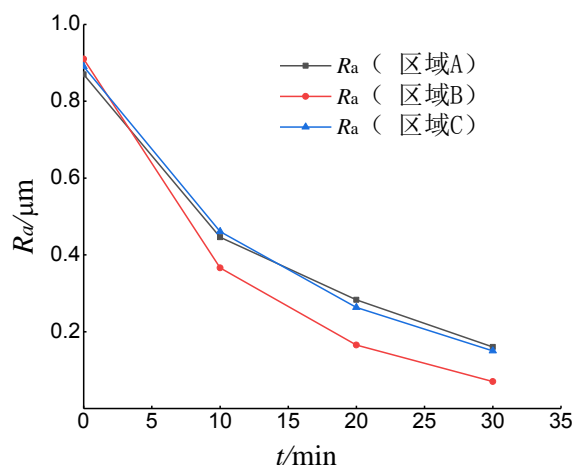
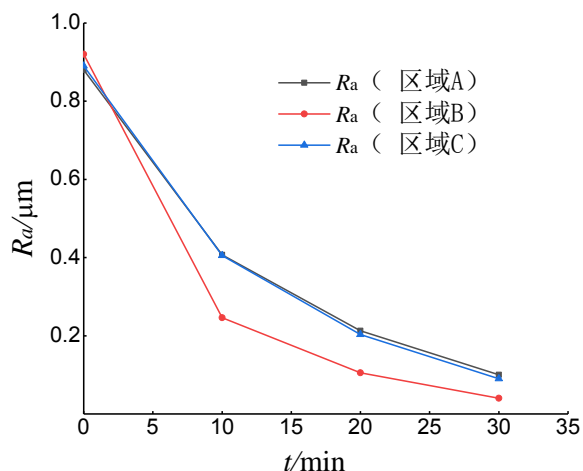
Fig.6 Roughness and micro-morphology detection position

所示,ABC 三处的表面粗糙度均随着研磨加工时间的增加而减小,由于工件无自转,直线研磨纹理较明显。研磨 30 min 后,A 处粗糙度值由原始 0.87 μm 下降至 0.16 μm ;B 处由原始 0.91 μm 降低到 0.07 μm ;C 处由原始 0.89 μm 减小到 0.15 μm 。

定偏心旋转运动粗糙度变化规律如图 8 所示。ABC 三处加工较为均匀,研磨效率一致,且研磨效率高于直线式往复运动。经 30 min 研磨加工,A 处粗糙度由 0.88 μm 降为 0.10 μm ,B 处粗糙度由 0.92 μm 减小到 0.04 μm ,C 处粗糙度由 0.89 μm 降低至 0.09 μm 。

结果表明:采用直线往复和定偏心旋转运动方式后,直线往复式加工后工件不同位置表面粗糙度值不一,从粗糙度可以明显看到轨迹重叠处表面质

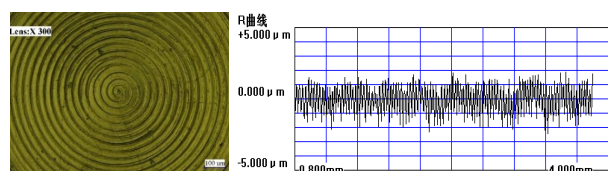
量要好于其他区域,研磨均匀性较差;定偏心式加工后,除工件中心区域研磨次数略多粗糙度值较低外,其余部位获得的表面粗糙度值相近,研磨均匀性较好。

图 7 直线式粗糙度 R_a 与研磨时间 t 的关系Fig.7 Relationship between linear roughness R_a and grinding time t 图 8 定偏心式粗糙度 R_a 与研磨时间 t 的关系Fig.8 Relationship between fixed eccentric roughness R_a and grinding time t

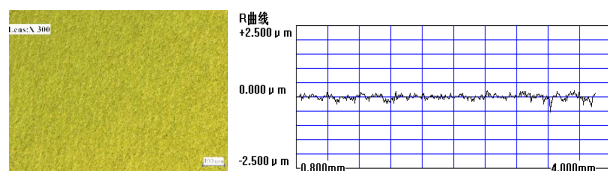
3.2 实验结果

如图 9 所示,利用超景深 3D 电子显微镜和 JB-8E 触针式粗糙度测量仪检测工件表面 B 处的微观形貌及表面粗糙度,结果如图 9 所示。从 9(a)可以看出,未经研磨的工件表面暗淡无光泽并且具有较深的加工纹理。如图 9(b)所示,直线往复运动研磨 30 min 后,由于研磨轨迹较为单一,原始沟状纹理得到有效去除但还有些许纹理残留。如图 9(c)所

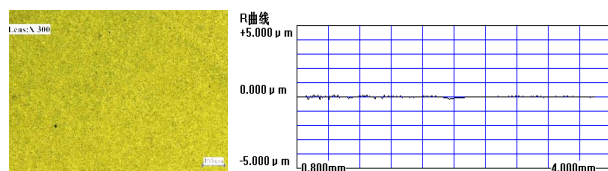
示,定偏心旋转运动研磨 30 min 后,原始表面加工纹理基本去除,复杂、均匀的研磨轨迹,使得研磨的均匀性更好,研磨后的表面光泽度明显提高,获得了较好的表面质量。



(a) 原始数据($R_a=0.89 \mu\text{m}$)



(b) 直线往复运动研磨 30 min($R_a=0.07 \mu\text{m}$)



(c) 定偏心旋转运动研磨 30 min($R_a=0.04 \mu\text{m}$)

图9 工件研磨前后微观形貌及表面粗糙度变化

Fig.9 Changes of micro-morphology and surface roughness of workpiece before and after grinding

4 结论

(1)构建了平面磁力研磨实验装置,对不同加工方式下线速度最大的单颗磁粒运动轨迹进行模拟,并进行合理分析评价。

(2)采用直线往复运动轨迹对工件研磨加工,相对运动方式单一,研磨轨迹不均匀,无法保证平面加工的均匀性且研磨效率低。

(3)采用定偏心旋转运动研磨,能够促进磁性研磨粒子的翻滚更新,研磨轨迹复杂,研磨质量均匀。钛合金板的生产加工纹理得以有效的去除,表面光泽度得到较大提升。

参考文献

- [1] 姬孟托,洪滔,文东辉,等.无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究[J].机电工程,2016,33(5): 532-536.
Ji M T, Hong T, Wen D H, et al. Analytical study on uniformity of path distribution with irrational rotational speed ratio in plan lapping process [J]. Journal of Mechanical Electrical Engineering, 2016, 33(5): 532-536 (in Chinese).
- [2] 王琦.平面研磨轨迹的研究[J].机械工程师,2012(5): 149-150.
Wang Q. Research on plane grinding trajectory [J]. Mechanical Engineer, 2012(5): 149-150 (in Chinese).
- [3] 焦安源,李宗泽,邹艳华.基于恒压的平面磁力研磨效果分析[J].制造技术与机床,2014(8): 37-41.
Jiao A Y, Li Z Z, Zou Y H. Analysis of plane magnetic grinding effect based on constant pressure [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2014(8): 37-41 (in Chinese).
- [4] 张萍萍,张桂香,赵玉刚,等.SUS304不锈钢平面磁力研磨加工试验研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2011,25(5): 103-105.
Zhang P P, Zhang G X, Zhao Y G, et al. Experimental research on plate magnetic abrasive finishing of stainless steel SUS304 [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 25(5): 103-105 (in Chinese).
- [5] 焦安源,全洪军,邹艳华.平面研磨中磁粒刷运动轨迹规划的试验研究[J].机械设计与制造,2015(10): 84-87.
Jiao A Y, Quan H J, Zou Y H. Experimental study on planning the trajectory of magnetic abrasive brush in plane finishing [J]. Machinery Design and Manufacture, 2015(10): 84-87 (in Chinese).
- [6] 郁炜,吕冰海,姚蔚峰,等.基于ADAMS的球体双自转研磨方式下研磨盘转速优化研究[J].中国机械工程,2013,24(7): 866-872+881.
Yu W, Lu B H, Yao W F, et al. Speed optimization for lapping plates in RDP lapping mode base on ADAMS [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 866-872+881 (in Chinese).