

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.05.003

磁粒研磨中单颗磁性磨粒磁场力的实验研究

李奎, 韩冰*, 朱子俊, 李路杰, 陈燕

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为了解决单颗磁性磨粒其磁场力难以定量分析和测量的问题, 本文通过对现有磁场力理论进行分析, 利用特斯拉仪对永磁极轴线方向上的磁场强度进行测量, 并利用 MATLAB 对磁场强度的实际测量值进行数值拟合, 得出了磁场强度关于加工距离的函数曲线, 进而获得磁场强度变化率的函数曲线, 以其代替理论公式中的磁场强度梯度推导得出了便于定量分析的磁性磨粒所受磁场力的数学模型。同时设计了一种单颗磁性磨粒磁场力的测量装置, 在磁化后磁性磨粒磁场力的作用下, 精密电子天平上永磁极的重量发生改变, 其改变量即为一定体积磁性磨粒的磁场力, 通过体积比计算出单颗磁性磨粒磁场力的大小。结果表明, 在 1.5、3.5、5.5、7.5 和 9.5 mm 处, 相同体积、磁场强度下的数学模型计算值和实际测量值均方根误差为 0.01366, 验证了该数学模型的准确性。

关键词: 磁粒研磨; 单颗磁性磨粒; 磁场力; 磁场强度; 数值拟合; 体积比

中图分类号: TG147

文献标识码: A

Experimental Study on the Magnetic Field Force of a Single Magnetic Abrasive Particle in Magnetic Grinding

LI Kui, HAN Bing*, ZHU Zijun, LI Lujie, CHEN Yan

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

Abstract: In this paper, in order to solve the problem that it is difficult to quantitatively analyze and measure the magnetic force of a single magnetic abrasive particle, the existing magnetic force theory was analyzed, the magnetic field intensity along the axis direction of the permanent magnetic pole was measured with Tesla instrument, and MATLAB was used to fit the actual measured value of the magnetic field strength. The function curve of the magnetic field intensity with respect to the processing distance was obtained, then the function curve of the change rate of magnetic field intensity was acquired, which was used to replace the magnetic field gradient in the theoretical formula, and the mathematical model of the magnetic force on the magnetic abrasive particles was deduced, which is convenient for quantitative analysis. At the same time, a single magnetic abrasive particle magnetic field force measurement device was designed. Under the action of the magnetic field force of the magnetic abrasive particles after magnetization, the weight of the permanent magnetic pole on the electronic balance changed. The change of the weight of the permanent magnetic pole was the magnetic force of a certain volume of magnetic abrasive particles. The magnetic force of a single magnetic abrasive particle was

收稿日期: 2020-09-14

修回日期: 2020-10-06

作者简介: 李奎, 男, 硕士研究生, Email: likui199306@163.com

通信作者: 韩冰, Email: Hanb75@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775258); 辽宁省教育厅重点项目(2017LNZD02)

calculated by the volume ratio. The results show that at 1.5 mm, 3.5 mm, 5.5 mm, 7.5 mm and 9.5 mm, the root square error between the calculated value of the mathematical model and the measured value under the same volume and magnetic field intensity is 0.01366, which verifies the accuracy of the mathematical model.

Keywords: magnetic particle grinding; single magnetic abrasive; magnetic force; magnetic field intensity; numerical fitting; volume ratio

磁粒研磨作为一种先进的精密加工工艺,磁性研磨粒子在磁场力的作用下被束缚在磁感线上,形成了具有一定刚度特性和仿形特性的“磁粒刷”使得磁粒研磨工艺具有较强的适应性,适用于各种平面、曲面和空间弯管的内外表面光整加工,在精密加工行业有着良好的应用前景^[1-7]。影响磁粒研磨加工效果的主要工艺参数为:磁场强度、磁极形状、加工间隙、磨粒的磁学性能和粒径、磨粒与工件的相对转速、加工时间等^[8-10]。其中磁场强度、磁极形状、加工间隙、磨粒的磁学性能和粒径都与磁性磨粒所受的磁场力有关^[11]。

现有的磁性磨粒所受磁场力的理论公式较为复杂,适用于磁粒研磨加工过程中的定性分析,田录林^[12]等人利用永磁体等效电流模型,给出了圆柱形永磁极和长方形永磁极在轴线方向上的磁场解析公式,用来求解永磁铁贴合体间的磁场力,但该解析公式仅仅适用于两个永磁体之间,磁性磨粒为磁性材料但非永磁体,只有在磁场中被磁化后才具有永磁体的一定性质。顾晓安^[13]等人基于电磁场理论中的虚功原理和弹性力学中的应变能密度理论,给出了磁准静态场条件下的铁磁质所受磁场力的数学模型,但该数学模型中忽略了铁磁质本身的物理性质,不适用于磁性磨粒在非均匀磁场中受力分析。T. Shinmura^[14]等人给出了磁性磨粒在磁场中所受磁场力的理论公式,磁场力的大小与磨粒体积、磁化率、磁场强度和磁场梯度有关,但因为磁粒研磨加工时磁场为非均匀磁场,磁场空间内磁场强度较为复杂,其大小和方向均随着磁场空间内位置的变化而变化,很难定量分析磁性磨粒所受磁场力的具体大小,同时磁性磨粒的粒径较小、重量轻,很难对单颗磁性磨粒的磁场力进行精确的测量。因此,简化磁性磨粒所受磁场力的理论公式,推导出可定量分析磁性磨粒所受磁场力大小的数学模型以及测量出单颗磁性磨粒在磁粒研磨过程中所受的磁场力对于分析磁

粒研磨加工效率和预测实验效果有着重大意义。

基于以上原因,本文对磁性磨粒在磁场中所受磁场力进行理论分析,对永磁极的磁场强度进行测量,通过MATLAB对磁场强度的实际测量值拟合出一条磁场强度的函数曲线,对其求导从而得出磁场强度变化率的函数曲线来代替理论公式中的磁场强度梯度,推得磁性磨粒所受磁场力的数学模型,简化了理论公式,便于定量分析和数值计算。同时设计了一种单颗磁性磨粒的磁场力测量装置,对一定体积的磁性磨粒所受磁场力进行测量,通过体积比来求得单颗磁性磨粒所受磁场力的大小并对磁场力数学模型进行实验验证。

1 磁性磨粒磁场力测量原理

图1为磁性磨粒磁场力测量原理图,磁性磨粒存储在磨粒存储器中,磁性磨粒处于外部永磁极产生的非匀强磁场中,在外部磁场的作用下磁性磨粒会被磁化从而感生出新的磁场,感应磁场和外部磁场重叠在一起就形成了高梯度磁场。磁性磨粒在磁场力的作用下,沿磁力线排布贴附在磨料存储器的内表面。永磁极放置在精密电子天平上,当磁性磨粒的位置固定时,永磁极受到一个向上的由被磁化后的磁性磨粒所产生的磁场力,同时永磁极本身也受重力作用,因此在合力的作用下永磁极本身的质量不变,但受一个向上的额外磁场力作用下,显示在精密电子天平上的质量会减小,其减少的那部分重力就是永磁极所受到的被磁化后磁性磨粒所产生的磁场力。由物理学知识可知力的作用是相互的,永磁极所受到的被磁化后磁性磨粒所产生的磁场力和磁性磨粒所受的磁场力大小相等方向相反,所以通过测量出永磁极在精密电子天平上质量改变的多少就能得到磨粒存储器内磁性磨粒所受的磁场力大小。磨粒存储器内部是一个标准的球形空间,磁性磨粒是一种干燥的散体颗粒,由铁粉和氧化铝粉未经烧

结而成,颗粒与颗粒间间隙较小。为了方便分析本文假设磁性磨粒为均匀的球形颗粒,颗粒与颗粒间间隙为零。将磁性磨粒填满磨粒存储器,通过测得磨粒存储器内总的磁性磨粒所受磁场力,再通过单颗磁性磨粒与磨粒存储器的体积比来得到单颗磁性磨粒在磁场中所受磁场力的大小。

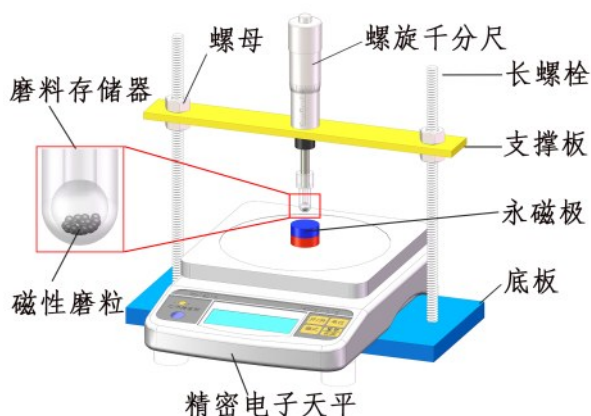


图 1 测量原理

Fig.1 Measuring principle

2 单颗磁性磨粒所受磁场力数学模型

2.1 受力理论分析

如图 2 所示,在永磁极产生的非均匀磁场中磁性磨粒受到磁力的作用。由于永磁极产生的磁场为非均匀磁场,在磁场的不同位置其磁场强度的大小和方向不同,磁场的非均匀性可用磁场梯度来表示,它表示为磁场空间内的某点沿着磁场强度变化率最

大的方向上,单位距离内的磁场强度变化率,记做 $\text{grad}H$ 。磁场梯度的大小为该距离上磁场强度变化率的最大值,方向为其变化率最大的方向。

在磁场不均匀性的作用下,单颗磁性磨粒所受磁场力的表达式为^[14]

$$F_m = V\chi H \text{grad}H \quad (1)$$

式中: V 为磨粒的体积, m^3 ; χ 为磨粒的物体比磁化率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; H 为外部磁场强度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$; $\text{grad}H$ 为磁场梯度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

将磁性磨粒视作球形,则单颗磁性磨粒所受磁场力 F_m 为

$$F_m = \frac{\pi d^3}{6} \chi H \text{grad}H \quad (2)$$

式中: d 为磨粒的直径, m 。

磁性磨粒在磁场中所受的磁力 F_m 的方向是沿着磁场梯度的方向,由磁场强度低的点指向磁场强度高的点。为了简化分析,把矢量磁力 F_m 在直角坐标系中分解成 X 、 Y 、 Z 三个方向上的标量。由 N 极的法面沿 Z 轴磁场强度逐步递减,磁场梯度逐步减小。当磁性磨粒的位置向 N 极法面接近时磁力 F_m 与 Z 轴方向上的分量 F_z 的夹角 θ 慢慢变小,分量 F_z 逐渐增大,分量 F_x 逐渐减小,假设磨粒只在 X 、 Z 平面内沿 Z 轴运动则分量 $F_y=0$,分量 F_x 很小可忽略不计,则磁力 $F_m=F_z$,为了简化计算,用磁力在 Z 轴上的分量 F_z 代替 F_m ,则

$$F_m = F_z = \frac{\pi d^3}{6} \chi H \text{grad}H = \frac{\pi d^3}{6} \chi H \frac{dH}{dz} \quad (3)$$

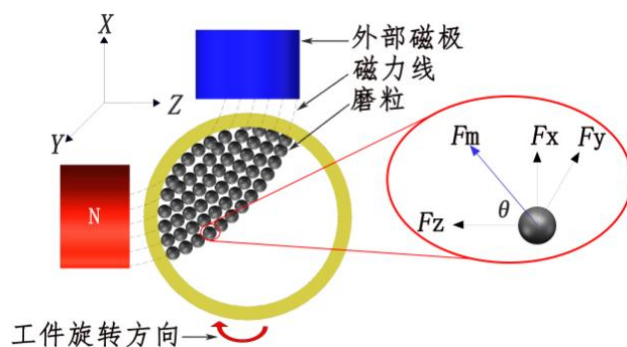


图 2 磁性磨粒受力

Fig.2 Force of magnetic abrasive particles

由于永磁极产生的非均匀磁场分布复杂,在磁场空间内不同位置处的磁场强度以及磁场梯度各不相同,通过特斯拉仪等仪器可以测得磁场空间内各

点处的磁场强度的大小,但磁场强度的方向是随位置的变化而变化的,所以很难通过仪器设备来精准测量,因此借助 Ansoft Maxwell 有限元仿真软件来

获取磁场空间内不同位置处磁场强度的方向及分布。

2.2 非均匀磁场仿真模拟分析

通过 Ansoft Maxwell 有限元仿真软件对圆柱形永磁极进行磁场强度仿真模拟。在永磁极产生的非均匀磁场中,磁场强度的大小随空间内位置的变化而变化。图 3(a)为永磁极在 YZ 平面上的磁场强度分布图,由图中可看出圆柱形永磁极在空气中其磁场强度大小的分布。圆柱形永磁极上下两个表面处磁场强度最大,沿永磁极表面向四周磁场强度依次减弱。在永磁极产生的非均匀磁场中,磁场强度的方向随空间内位置的变化而变化,如图 3(b)所示轴向充磁的圆柱形永磁极其磁场强度方向图。为了方便分析和计算,取特殊位置:沿 Z 轴方向上的磁场强度,由图可知 Z 轴方向上的磁场强度在近距离内方向变化较小,垂直于磁极的法面。Z 轴方向上的磁场强度大小随距离的增加而减小。使用特斯拉仪测量沿 Z 轴方向上的磁场强度大小。

2.3 磁场力参数测量及数学模型

2.3.1 磨粒物体比磁化率的测量

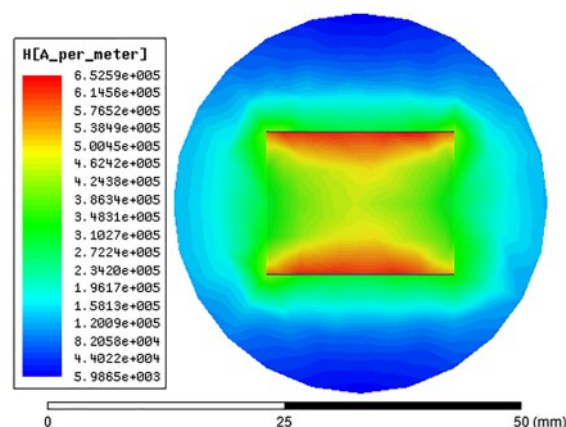
导磁性是磁性磨粒的重要性能,在磁场中导磁性是检验磁性磨粒所受磁场力大小的一种能力,磁性磨粒的导磁性大,在加工时所受的磁场力大,被磁化的能力较强使得磁性磨粒在加工区域内产生的研磨压力较强,可提高研磨加工时的效率。

如图 4 所示,选用 VSM 振动样品磁强计来测量磁性磨粒的磁化率。首先启动振动样品磁强计,定标后将被测磁性磨粒样品固定在振动头上,通过调整电流的大小来改变磁场的大小使得被测磁性磨粒样品磁化并达到饱和磁化状态,依次退零且距离 10 个点记录一次磁化强度值。换相后依次调至最大值距离 10 个点记录一次磁化强度值且重复测量一次,得到一组磁化曲线。

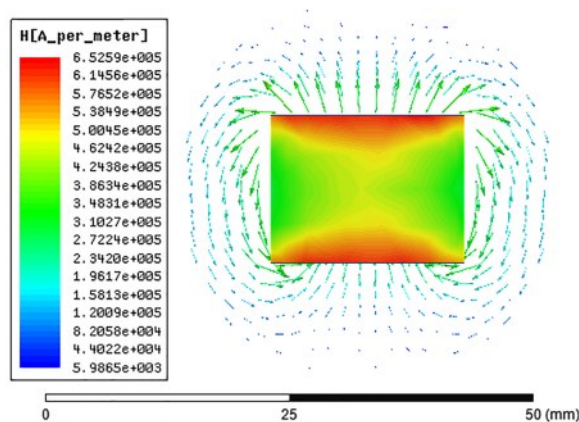
如图 5 所示,通过磁性磨粒的 $M-H$ 曲线可以获得磁性磨粒的物体比磁化率 χ , $\chi=0.763 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3.2 永磁极磁场强度的测量

如图 6 所示,将圆柱形永磁极吸附在车床三角卡盘上,特斯拉仪的测量探头夹持在刀架上并使之与圆柱形永磁极的轴线相对中,借助车床刀架上的滑板装置实现圆柱形永磁极轴线方向上不同位置磁场强度的测量。距离从零开始逐次递增,每隔 0.5 mm 记录一次磁感应强度数值,根据 $B=\mu_0 H$ 可以得



(a) 磁场强度分布



(b) 磁场强度方向

图 3 永磁极磁场强度模拟云图

Fig.3 Simulation cloud diagram of permanent magnetic pole magnetic field intensity



图 4 振动样品磁强计

Fig.4 Vibrating sample magnetometer

到相对应的永磁极磁场强度值,其中 μ_0 为真空磁导率。

圆柱形永磁极轴线方向上不同位置的磁场强度

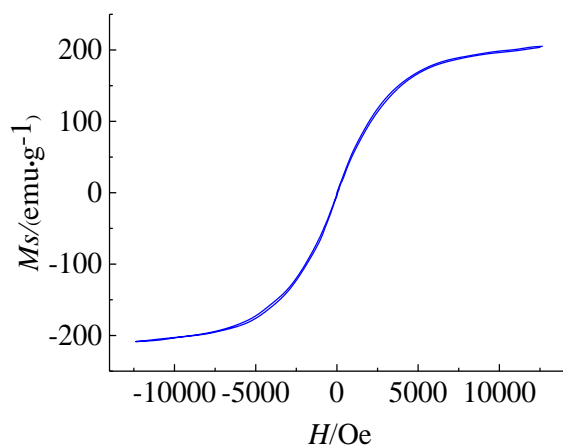
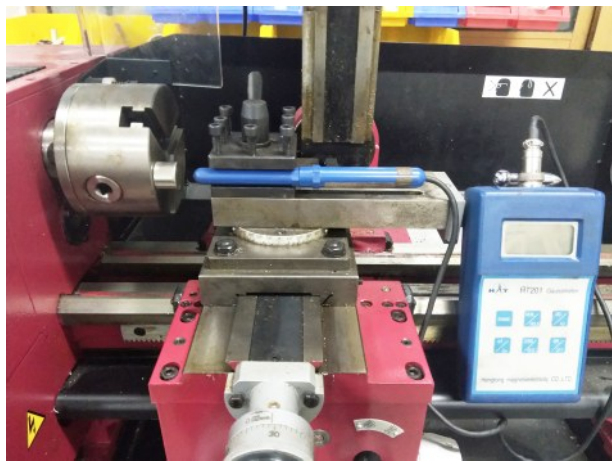
图 5 磁性磨粒的 $M-H$ 曲线Fig.5 $M-H$ curve of magnetic abrasive particles

图 6 磁场强度测量装置

Fig.6 Magnetic field strength measuring device

大小如表 1 所示。

2.3.3 磁场力数学模型

用 MATLAB 对所测量的轴线上不同位置磁场强度值进行曲线拟合,如图 7 所示。该拟合曲线的函数关系式为:

$$H=f(z)=0.0006699z^3+0.01445z^2+(-0.7308)z+9.999 \quad (4)$$

式中: z 为沿 Z 轴距离磁极法面的距离,mm。该拟合曲线的误差平方和 SSE 为 0.01436,复相关系数为 0.9997>0.9 接近 1,均方根 RMSE 为 0.02907。

已知 Z 轴上磁场强度的拟合曲线,便可用数值计算的方法求得 Z 轴方向上的磁场强度梯度,从而避免了非均匀磁场中复杂空间内磁场强度梯度的测量,从另一方面解决了磁场强度梯度难以测量的问

表 1 测量点磁场强度值

Tab.1 Magnetic field intensity value at measuring point

序号	距离/mm	磁场强度/($10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	0.0	9.952229299
2	0.5	9.633757962
3	1.0	9.315286624
4	1.5	8.996815287
5	2.0	8.598726115
6	2.5	8.280254777
7	3.0	7.961783439
8	3.5	7.643312102
9	4.0	7.324840764
10	4.5	7.006369427
11	5.0	6.767515924
12	5.5	6.528662420
13	6.0	6.289808917
14	6.5	6.050955414
15	7.0	5.812101911
16	7.5	5.652866242
17	8.0	5.414012739
18	8.5	5.254777070
19	9.0	5.095541401
20	9.5	4.936305732
21	10.0	4.777070064

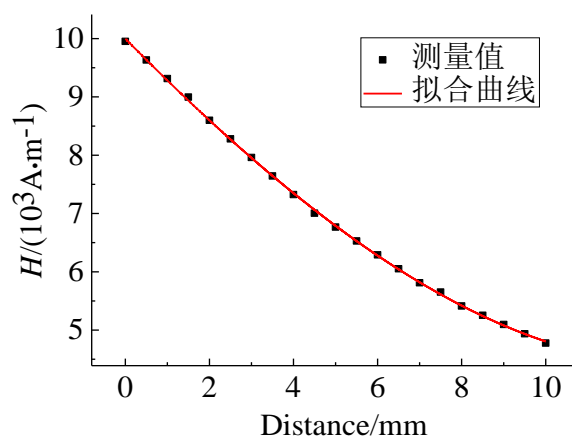


图 7 磁场强度拟合曲线

Fig.7 Magnetic field intensity fitting curve

题。通过磁场强度的拟合曲线可求得磁场强度梯度函数 $\text{grad}H$ 为:

$$\text{grad}H = \frac{dH}{dz} = f'(z) = 3 \times 0.0006699z^2 + 2 \times 0.01445z - 0.7308 \quad (5)$$

图8为磁场梯度函 $\text{grad}H$ 曲线图,由图8可知在起始点0 mm处的 $|\text{grad}H|$ 值最大,随着沿 Z 轴方向上距离的增大, $|\text{grad}H|$ 逐渐减小。说明在接近磁极表面的时候,磁场强度变化大,单颗磁性磨粒在非均匀磁场中所受到的磁场力大,当距离磁极表面较远时,磁场梯度慢慢减小磁场强度趋于稳定,可以预测当单颗磁性磨粒距离永磁极过远脱离非均匀磁场时,磁场强度和磁场梯度同时减弱至零,磁性磨粒将不受磁场力的作用。

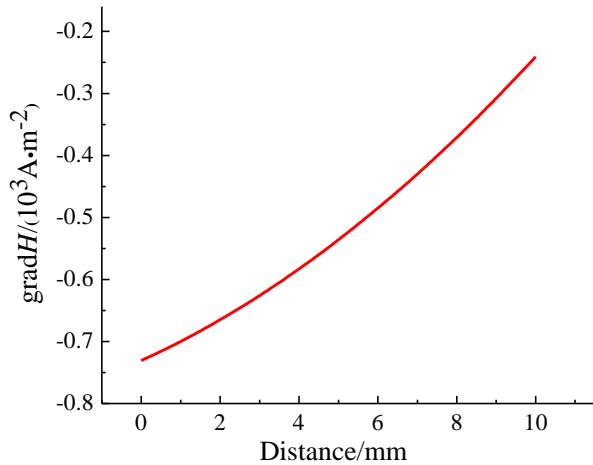


图8 磁场梯度曲线

Fig.8 Magnetic field gradient curve

将公式(4)、(5)代入式(3)中可推得磁性磨粒在沿 Z 轴方向运动中所受磁场力数学模型:

$$F_m = \frac{\pi d^3}{6} \times 0.763 H f'(z) = 0.127 \pi d^3 H (3 \times 0.0006699z^2 + 2 \times 0.01445z - 0.7308) \quad (6)$$

3 实验验证及结果分析

3.1 实验装置

图9为单颗磁性磨粒磁场力测量装置,所用圆柱形永磁极为强磁性材料钕铁硼(Nd-Fe-B),其直径15 mm、高度20 mm,重41 g。螺旋千分尺量程25 mm。磨粒存储器为SLA工艺的半透明树脂材料3D打印件,下端内径6 mm,外径8 mm。磁性磨粒为烧结法自制,材料构成是:铁磁相Fe与研磨相 Al_2O_3 其质量比为4:1,烧结温度1200 °C,烧结时间3 h。其平均粒径为0.25 mm,粒径误差为 $\pm 4\%$,总质

量为0.199 g。所用电子天平为沈阳龙腾电子有限公司生产的JD1000-3精密电子天平。将圆柱形永磁极放置在精密电子天平上,磁性磨粒装满磨粒存储器内部的球形空间,磨粒存储器的上端通过过盈配合与螺旋千分尺的螺杆连接并置于圆柱形永磁极的正上方。

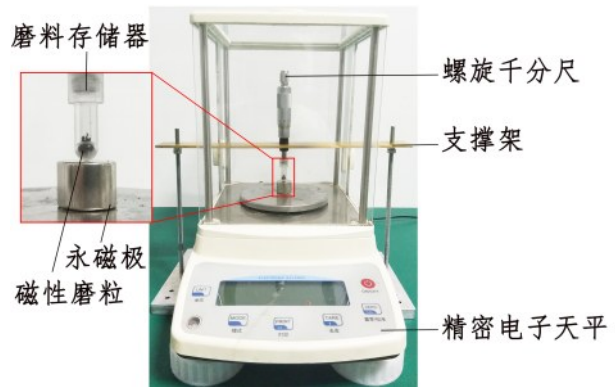


图9 磁场力测量装置

Fig.9 Magnetic field force measuring device

3.2 测量方法

将圆柱形永磁极放于精密电子天平上测得其质量 m_0 ,通过调节支撑架上螺母的位置来调节与螺旋千分尺相连的磨粒存储器距离圆柱形永磁极的位置,当精密电子天平稳定后记下示数 m_1 ,则磨粒存储器中所有磁性磨粒所受的磁场力 F_{m1} 为:

$$F_{m1} = \Delta m \cdot g = (m_0 - m_1) \cdot g \quad (7)$$

式中: g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

单颗磁性磨粒与磨粒存储器体积比为:

$$k = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 \quad (8)$$

式中: k 为体积比系数; d_1 为单颗磁性磨粒的粒径,mm; d_2 为磨粒存储器的直径,mm。

单颗磁性磨粒所受的磁场力 F_1 为:

$$F_1 = k F_{m1} \quad (9)$$

通过公式(9)可算出单颗磁性磨粒在磁场中所受的磁场力。

3.3 结果分析

依次调整磨粒存储器与圆柱形永磁极间的间隙为1.5、3.5、5.5、7.5和9.5 mm。可得到5组不同位置处磨粒存储器内磁性磨粒所受磁场力的大小,如表2所示。

将表2中试验点的坐标值与其坐标值相对应的磁场强度值分别代入所推导的数学模型公式(6)中,

表 2 不同位置处磁场力大小

Tab.2 Magnetic field force at different positions

序号	距离/mm	磁场力/N
1	1.5	0.5247
2	3.5	0.3775
3	5.5	0.2747
4	7.5	0.1794
5	9.5	0.1075

比较试验点的数学拟合值和实际测量值,以此来验证所推导数学模型的准确性。磨粒存储器内磁性磨粒磁场力的数学拟合值和实验值对比如图 10 所示。

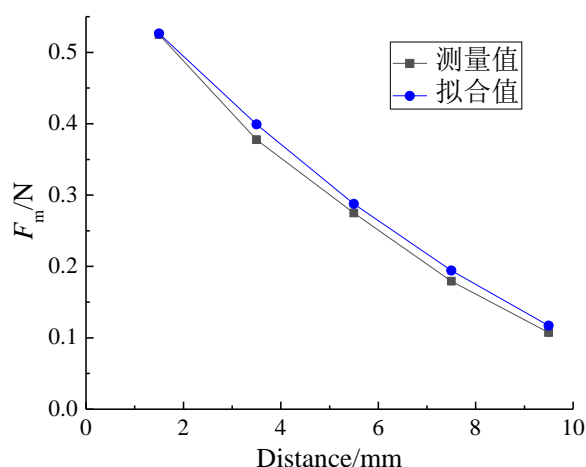


图 10 拟合值与测量值对比图

Fig.10 Comparison chart of fitted value and measured value

对比图 10 可知,所取的这 5 个试验点,其拟合值与实际测量值的均方根误差 RMSE 为 0.01366,拟合值与实际测量值的均方根误差小,表明拟合值与实际测量值间的偏差较小,所推导的磁场力数学模型具有较高的可靠性。

4 结论

(1)利用 Maxwell 软件对圆柱形永磁极进行磁场强度的仿真模拟,从仿真结果可以看出:圆柱形永磁极磁场强度的大小在磁极表面最强,向四周逐渐递减;圆柱形永磁极磁场强度的方向随空间位置的变化而变化,沿磁极轴线方向上的变化较小可作为特殊位置以测量磁场强度。

(2)通过对永磁极轴线方向上磁场强度的测量,

利用 MATLAB 对所测磁场强度值进行数值拟合,建立测量间隙与磁场强度的数值方程,对所得数值方程进行求导得出沿永磁极轴向方向上磁场强度梯度的数值方程,结合磁性磨粒在磁场中所受的磁场力公式,推得便于数值计算及定量分析的单颗磨粒所受磁场力数学模型。

(3)设计了一种新的单颗磁性磨粒所受磁场力测量装置,利用精密电子天平,测得在被磁化后一定体积磁性磨粒磁场力的作用下,永磁极重量的改变量来计算一定体积磁性磨粒所受磁场力的大小,通过体积比来计算单颗磨粒所受磁场力的大小。通过实际测量一定体积磁性磨粒磁场力的大小与相同体积、相同磁场强度下的数学拟合值相对比,得出其均方根误差为 0.01366,验证了所得磁场力数学模型的准确性。

参考文献

- [1] 陈燕,赵杨,陈松,等. 基于旋转磁场的 6061 铝合金弯管内表面光整加工[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 73-81.
Chen Y, Zhao Y, Chen S, et al. Finishing internal surface of 6061 aluminum alloy bend pipe based on rotating magnetic field[J]. China Surface Engineering, 2018, 31 (5): 73-81 (in Chinese).
- [2] 杨海吉,邓祥伟,韩冰,等. 超声波辅助磁力研磨 TC4 薄壁细长管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, 60(2): 30-33.
Yang H J, Deng X W, Han B, et al. Study on the inner surface of TC4 thin-walled tube by ultrasonic vibration assisted MAF[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, 60(2): 30-33 (in Chinese).
- [3] 邓超,韩冰,陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(3): 61-63.
Deng C, Han B, Chen Y. Inner surface polishing of titanium alloy elbow pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(3): 61-63 (in Chinese).
- [4] 张龙龙,焦安源,陈燕,等. 磁粒复合研磨 SUS304 不锈钢孔道的机理与试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 259-266.
Zhang L L, Jiao A Y, Chen Y, et al. Mechanism and experimental study of SUS304 stainless steel hole by magnetic particle compound grinding[J]. Surface Technolo-

- gy, 2018, 47(11): 259-266 (in Chinese).
- [5] 张萍萍, 张桂香. 平面磁力研磨装置及磁极设计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(6): 67-70.
Zhang P P, Zhang G X. Design of a plane magnetic abrasive finishing device and the magnetic pole[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 25(6): 67-70 (in Chinese).
- [6] 吴金忠, 邢百军, 邹艳华, 等. 低频交变磁场超精密平面磁力研磨加工研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 291-299.
Wu J Z, Xing B J, Zou Y H, et al. Ultraprecision surface magnetic grinding by low frequency alternating magnetic field[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 291-299 (in Chinese).
- [7] Singh D K, Jain V K, Raghuram V, et al. Analysis of surface texture generated by a flexible magnetic abrasive brush[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1254-1261.
- [8] 刘冬冬, 韩冰, 陈燕, 等. 超声磁粒研磨 Al6061 管内表面光整试验研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(12): 14-19.
Liu D D, Han B, Chen Y, et al. Experimental study on internal surface finishing of Al 6061 tube by ultrasonic magnetic particle grinding[J]. Plating and Finishing, 2019, 41(12): 14-19 (in Chinese).
- [9] 赵传营, 赵玉刚, 刘宁, 等. 基于神经网络遗传算法的磁粒研磨 TC4 材料工艺参数优化[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 316-321.
Zhao C Y, Zhao Y G, Liu N, et al. Optimization of process parameters of magnetic abrasive finishing TC4 material based on neural network and genetic algorithm[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 316-321 (in Chinese).
- [10] 王杰, 陈燕, 吕旖旎, 等. 开槽仿形磁极在轴承内圈滚道光整中的应用[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(5): 32-37.
Wang J, Chen Y, Lv Y N, et al. Application of slotted profiling magnetic pole in bearing inner ring groove finishing[J]. Plating and Finishing, 2020, 42(5): 32-37 (in Chinese).
- [11] 李文龙, 陈燕, 吕旖旎, 等. 聚磁盘形状对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 354-359+367.
Li W L, Chen Y, Lv Y N, et al. Influence of shape of aggregate magnetic iron plate on inner surface of pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 354-359+367 (in Chinese).
- [12] 田录林, 贾嵘, 杨国清, 等. 永磁铁磁贴合体的磁场及磁力[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 7-13.
Tian L L, Jia R, Yang G Q, et al. The magnetic field and magnetic force of permanent magnet affixed to a plane magnetizer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 7-13 (in Chinese).
- [13] 顾晓安, 许庆新, 沈荣瀛, 等. 磁性材料在磁场中所受磁场力的数学模型[J]. 噪声与振动控制, 2002, 22(4): 10-11+15.
Gu X A, Xu Q X, Shen R Y, et al. A survey of mathematical model of magnetic forces in magnetic materials under magnetization[J]. Noise and Vibration Control, 2002, 22(4): 10-11+15 (in Chinese).
- [14] Shinmura T, Takazawa K, Hatano E, et al. Study on magnetic abrasive finishing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1990, 39(1): 325-328.