

文章编号: 0258-7025(2005)03-0431-05

激光辅助机械修整金刚石砂轮的温度场分析

王 艳, 胡德金, 邓琦林, 许庆新

(上海交通大学机械与动力学院, 上海 200030)

摘要 激光辅助机械修整金刚石砂轮是一种金刚石砂轮修整新方法, 它利用激光束加热砂轮表面使得金刚石修整笔的修整材料模式从脆性断裂变为塑性流动, 从而提高砂轮表面修整质量, 降低金刚石笔的磨损。运用 ANSYS 软件建立了激光辅助机械修整过程中金刚石砂轮温度场的有限元模型, 并用热成像仪 NEC TH7100WX/WV 测量了实际工况下的温度场。结果表明, 在相同工况下运用仿真模型所得分析与实测值拟合得很好。利用所建立的金刚石砂轮温度场的计算机仿真系统可对砂轮修整过程进行前期预测、工艺参数调整及优化等, 避免加热温度过高使砂轮表面金刚石颗粒石墨化, 或加热温度不足使砂轮表面硬度下降不够等情况的发生, 从而减少了直接进行修整实验带来的盲目性。

关键词 激光技术; 金刚石砂轮在线修整; 有限元法; 温度场

中图分类号 TG 156.99; TN 249 **文献标识码** A

Analysis of Temperature Field for Laser Assisted Mechanical Dressing and Truing of Diamond Grinding Wheel

WANG Yan, HU De-jin, DENG Qi-lin, XU Qing-xin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract Laser assisted mechanical dressing and truing of diamond grinding wheel is a new truing and dressing method. The essential of the method lies in that laser irradiation makes deformation of diamond dresser material turn into ductile flow from brittle fracture, thereby improving the diamond wheel surface dressing and truing quality and reducing the wear of diamond dresser. A simulation model established by finite element methods using ANSYS software showed the distribution temperature field inside the diamond wheel. The actual temperature field under experimental condition is measured by infrared thermal imager (Model NEC TH7100WX/WV). The analyses show that the theoretical calculation results are consistent with those of experiments in the same experiment condition. The simulation model provides good effects on the quality forecast, parameter regulation and optimization in the process of truing and dressing diamond wheel. It also helps to avoid that high temperature make diamond grain graphitization or the temperature is not high enough to soften diamond wheel. The simulation model reduces the blindness to true and dress diamond wheel directly.

Key words laser technique; diamond wheel truing and dressing in process; finite element methods; temperature field

1 引 言

激光辅助机械修整金刚石砂轮是一个瞬态加热的复杂过程, 也是一个复杂的激光与砂轮材料相互

作用的过程, 为便于研究, 它可简化为移动点热源对半无限大平面物体进行加热的热传导过程。在金刚石砂轮表面的热影响区内, 砂轮表面材料要发生各种相变和组织变化, 一方面对激光再次扫描产生重

收稿日期: 2003-10-14; 收到修改稿日期: 2004-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(50375096)和上海市重点科技(021111125)资助项目。

作者简介: 王 艳(1969—), 女, 江苏镇江人, 副教授, 主要从事激光加工、电火花加工、磁力研磨等特种加工技术的研究。

E-mail: account909@sjtu.edu.cn

要影响,另一方面对修整后的砂轮的磨削性能也有重要影响。所以应采用合理方法分析修整过程中的热量传导过程,通过对热传导过程进行建模仿真,以便求得砂轮体内各点的温度场。通过选择施加适当的激光能量密度和控制加热时间,使得金刚石修整笔尖端部分的实际温度能够被预测和控制,减少了直接进行修整实验带来的盲目性。鉴于激光加热过程中边界条件复杂,本文采用数值模拟技术中的有限元法(FEM)来建立激光辅助机械修整金刚石砂轮温度场的仿真模型^[1]。

金刚石砂轮的修整包括整形和修锐两道工序。整形是使砂轮达到所要求的几何形状精度。修锐是去除磨粒间的结合剂,形成良好的表面地形。迄今为止,尚很难同时很好解决整形和修锐两问题,特别是在整形方面难以达到所需的精度。传统的机械修整法常采用单点金刚石修整笔对砂轮进行整形,但由于金刚石砂轮的高硬度使得单点金刚石修整笔很快被磨损。为了降低金刚石修整笔的磨损率,美国Purdue大学机械工程的Chunhe Zhang等^[2]提出了激光辅助陶瓷结合剂立方碳化硼砂轮修整法。它克服了机械修整法的缺点,具有修整效率高,修整质量好的优点。针对本课题的研究对象是MK9025数控光学曲线磨床金刚石砂轮的在线修整,考虑到修整时不得使用任何冷却液,我们采用了激光辅助机械法修整金刚石砂轮并进行了实验。

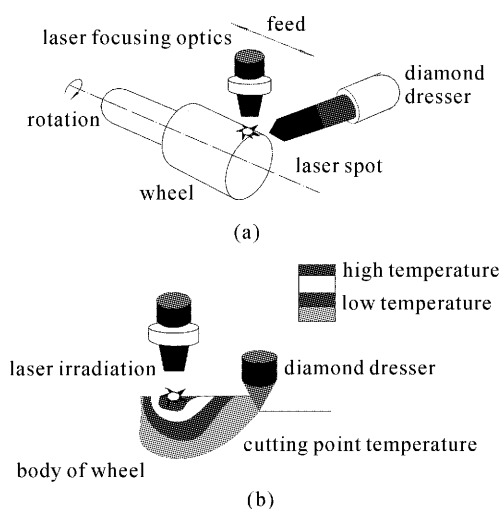


图1 激光辅助机械修整金刚石砂轮

(a) 机械装置;(b) 热模型

Fig.1 Laser-assisted mechanical truing and dressing diamond wheel

(a) mechanism setup; (b) thermal model

2 原理简介

激光辅助机械修整金刚石砂轮的原理如图1所示^[2]。单点金刚石修整笔沿轴向在砂轮表面移动,与此同时聚焦激光束在修整点前方对旋转的金刚石砂轮进行加热,如果选择适当的加热时间和激光能量密度,砂轮表面将软化甚至熔化,金刚石修整笔的修整材料模式将从脆性断裂变为塑性流动,因而砂轮表面修整质量得到了提高,降低了金刚石修整笔的磨损。图1(b)是激光辅助修整过程的概念热模型图。通过合理选择激光热参数和修整参数尤其是修整深度,金刚石修整笔尖端部分的实际温度能被控制,因而延长了修整笔的寿命。激光辅助金刚石砂轮整形和修锐实验参数略有不同,整形时金刚石修整笔的切削深度是100 μm,而修锐时切削深度仅仅10~20 μm。

3 温度场的有限元模型

激光辅助机械修整时,砂轮以一定的速度 v_w 旋转,为了问题的求解方便,可将激光辅助修整看作是移动点热源对半无限大平面物体进行加热的热传导问题。以速度 v 移动的热源三维热传导方程为^[3,4]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x dydz \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} dx dy dz = \\ & \rho C_p dx dy dz \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho L v dy dz, \quad (1) \end{aligned}$$

式中 K_x, K_y, K_z 分别为沿 x, y, z 轴方向的材料的导热系数(单位为 $W/(m \cdot K)$)。当材料为各向同性时, $K_x = K_y = K_z = K$;当材料为各向异性时, $K_x \neq K_y \neq K_z$ 。 T 为某一时刻的温度(单位为 K)。是待求的因变量。 \dot{q} 为单位体积内热量的产生速率(W/mm^3)。 ρ 为材料的密度(kg/m^3)。在进行仿真时,应采用经过计算出来的砂轮的密度。 v 为在修整过程中热源移动的速度(mm/s)。 C_p 为材料的比热($J/(kg \cdot K)$)。 L 为材料的气化潜热(J/kg)。

由于砂轮是一种非均质多相的各向异性的复合材料,并且砂轮内各点的属性随温度变化而变化,因此要对砂轮体内的每一点的属性作出计算,其计算量和计算难度都是相当大的。麦克斯韦研究了两相混合物的导热系数的计算表达式^[5]

$$\lambda_M = \lambda_1 \left[\frac{1 + 2x - 2\phi(x-1)}{1 + 2x + \phi(x-1)} \right]. \quad (2)$$

由于金刚石砂轮可以看成是由树脂结合剂或金属结合剂和金刚石颗粒组成的两相混合物,所以(2)式中的 λ_M 为金刚石砂轮混合物的导热系数; $x = \lambda_1/\lambda_2$ 为树脂结合剂或金属结合剂导热系数与金刚石磨粒导热系数之比; ϕ 为金刚石颗粒的体积分数。

另外科珀-奈曼定律^[5]给出了两相混合物的比热容的计算式为

$$C_p = C_{p(A)} \cdot M + C_{p(B)} \cdot N, \quad (3)$$

式中的 $C_{p(A)}$ 是A相金属的比热容,质量分数为 M ; $C_{p(B)}$ 是B相金属的比热容,质量分数为 N 。

运用有限元法把工件离散化,可得到磨削温度场有限元模型。由于激光加热时包括初始条件——工件的初始温度和第二、三类边界条件——热流输入和对流换热,且相变潜热对温度分布也有很大的影响,因此有必要考虑相变潜热。

激光辅助修整砂轮温度场所选择的单元类型为SOLID 90,由于激光束作用区域及其附近的温度梯度很大,为了获得高的计算精度,需要在该区域加密网格,工件划分网格后如图2所示。在激光束光斑扫描的砂轮工作表面内的单元既有热流输入又有对流换热作用,属于混合边界条件。但是在有限元分析中,不能对同一单元的不同表面上加载两种不同的边界条件。故引入了三维热效应单元SURF152,相当于把对流换热作用通过表面效应单元加诸于激光束扫描区域内。单元的大小形状与 $Z=0$ 处表面单元的形状大小相同,这样可使表面负载与每个单元相对应。

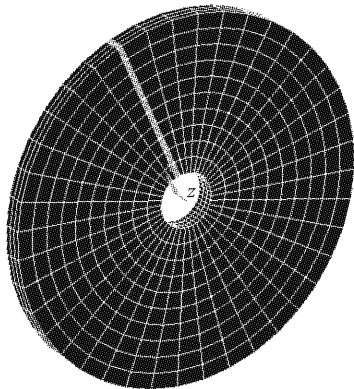


图2 金刚石砂轮温度场有限元计算模型

Fig. 2 FEM model of temperature field in diamond wheel

4 温度场的仿真过程和结果

4.1 有限元计算条件

边界条件的处理如下:激光辅助机械修整金刚

石砂轮相当于在其上施加一个局部瞬时热源,热流密度为 $P/(4\pi \times D^2)$, P 为激光功率, D 为光斑直径,作用时间为 D/V ;工作初始温度为砂轮周围环境温度 25°C ;对流换热系数为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;其他计算条件如表1所示。

表1 激光辅助机械修整金刚石砂轮的条件

Table 1 Experiment condition of laser assisted truing and dressing diamond wheel

Characteristics	Parameters
Diamond wheel	1A1/T2 100×10× 20×4 RVD 150 M75
Speed of wheel / (mm/s)	6
Power of continuous CO ₂ laser / W	16
Distance from laser focus / mm	+2

表2 聚酰亚胺和金刚石的热物理性能

Table 2 Thermal and physical properties of polyimide and diamond

	Polyimide	Diamond
Density		
/(g/cm ³)	1.38	3.48~3.56
Thermal conductivity		
/[W/(m·K)]	0.35~0.95	146
Specific heat		
/[J/(kg·K)]	1130~1297	509
Melting point		
/°C	350~400	3700~4000
Latent heat of vaporization		
/(J/kg)	200000	

实验采用的树脂结合剂金刚石砂轮 1A1/T2 100×10×20×4 RVD 150 M75 结合剂类型是聚酰亚胺,其热性能和物理性能见表2^[6]。金刚石磨料的热物理性能也在表2中列出。

金刚石砂轮的导热系数和比热容分别由聚酰亚胺、金刚石两组成分根据式(2)和(3)计算得到。

4.2 温度场的加载

激光束光斑扫描的砂轮工作表面内的单元有热流输入,存在第二类边界条件,其他激光束非扫描的砂轮圆周面和砂轮两端面有对流换热作用且初始温度为室温 25°C ,存在第三类边界条件。因此对激光修整中砂轮的加载过程为:先加载初始温度(一般为室温),然后将加热区域的热对流边界施加于表面效应单元,热流密度即第二类边界条件施加于实体单元表面。砂轮的其他表面加一换热系数处于恒定的对流负载,由于对流作用存在于整个修整过程中,故

直到加工结束删除负载。在修整过程中热源是移动的,故第二类边界条件是移动的,在此使整个过程离散化,在极短的时间内在某一加热区加载一固定热流,在下一时间段内移至另一区域加载等值的固定热流,移动速度为砂轮的旋转速度,并把上一次所得的计算结果作为下一次的初始条件,迭加后即得结果如图 3 所示。

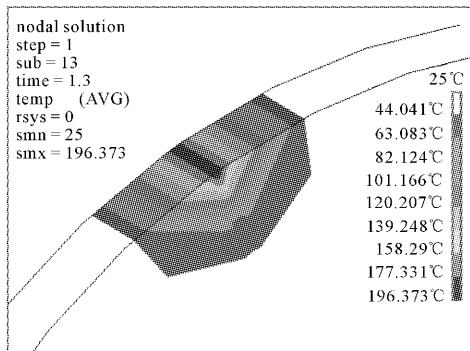


图 3 激光辅助修整金刚石砂轮 ANSYS 温度场云图
Fig. 3 Nephogram of temperature distribution in laser heating diamond wheel

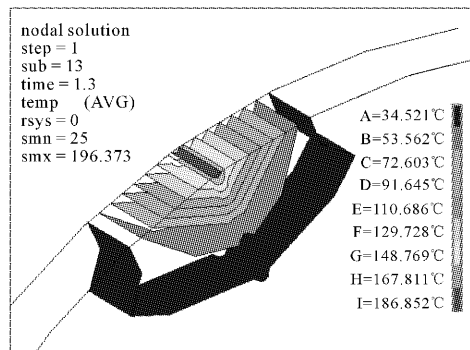


图 4 激光辅助修整金刚石砂轮 ANSYS 温度场等值线图

Fig. 4 Contour chart of temperature distribution in laser heating diamond wheel

4.3 温度场有限元分析结果

有限元分析会输出大量的计算数据,所以采用合适的表达方式是数值模拟技术的重要内容。ANSYS 热分析软件提供了强大的后处理功能,其结果可以通过黑白云图显示、矢量图显示、列表显示和动画演示。本文采用黑白云图和温度等值线图显示,图 3 为加载完毕求解得到的温度分布黑白云图,它给出了砂轮总体的温度分布状况。图 4 为金刚石砂轮温度场等值线图,它描绘了计算仿真后的温度场的量化宏观分布状况。砂轮在已知的激光束作用下沿径向 y 和周向 x 的温度分布的计算结果如

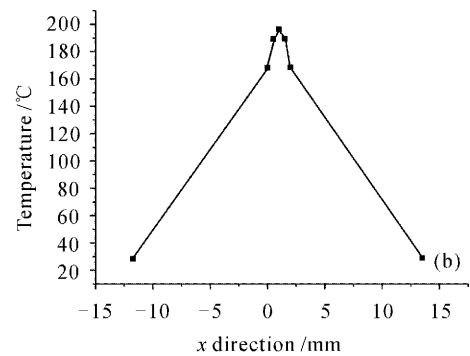
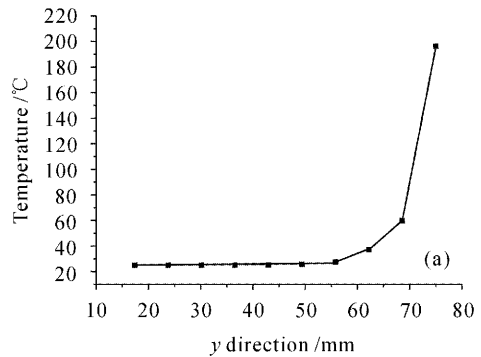


图 5 砂轮内 x 和 y 方向温度分布的计算结果
Fig. 5 Computed temperature distribution along x and y direction in diamond wheel

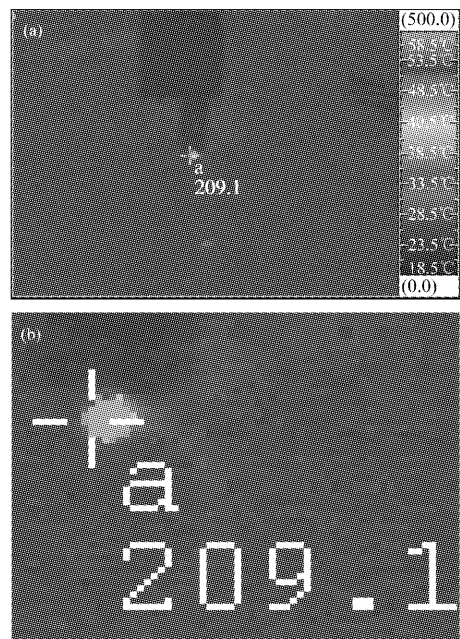


图 6 热成像仪所测的金刚石砂轮表面真实温度
(a) 总图;(b) 测温点局部放大图

Fig. 6 Actual temperature distribution on the surface of diamond wheel measured by infrared thermal imager
(a) general view; (b) partial enlarged drawing

图 5(a)和(b)所示。

5 实验验证

为了验证有限元分析激光辅助修整砂轮温度场的结果,在与有限元分析的相同工况条件下,用 NEC TH7100WX/WV 热成像仪,测量了激光辅助修整砂轮温度场,如图 6 所示。

由图 3 和图 6 所得的砂轮温度场仿真结果和实测结果比较可以看出,在相同工况下,运用仿真模型所得分析结果与实测值相差不大,最高温度值分别为 196.373℃ 和 209.1℃,误差在 10% 以内。由此可见,排除实验仪器测量误差的影响,只要建模时正确地划分有限单元网格,准确地处理温度场各影响因素,例如材料热物性参数一般随温度变化而变化,通常采用分段线性插值法来处理,边界条件的处理要综合考虑对流换热、辐射换热有时甚至还要考虑相变潜热对温度分布的影响。这样才能使仿真计算的结果更接近于实验结果。

6 结 论

激光辅助金刚石砂轮修整是金刚石砂轮修整的新方法。运用 ANSYS 有限元法建立了激光作用下砂轮温度场的数学模型,在综合考虑各种因素条件下可以得到与实际情况较为相近的温度场分布图,减少了运算量,所得结果简便直观。所建立的金刚

石砂轮温度场的计算机仿真系统可对砂轮修整过程进行前期预测、工艺参数调整及优化等,避免加热温度过高使砂轮表面金刚石颗粒石墨化,或加热温度不足使砂轮表面硬度下降不够等情况的发生,减少金刚石修整笔的磨损,提高砂轮表面修整质量。

参 考 文 献

- 1 Xiaoxia Li, Shifu Fan, Youquan Zhao *et al.*. A numerical simulation of photothermal response in laser medicine [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):157~159
- 2 Chunhe Zhang, Yung C. Shin. Wear of diamond dresser in laser assisted truing and dressing of vitrified CBN wheels [J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2003, **43**:41~49
- 3 Yang Shiming. Foundation of Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 29~79
杨世铭. 传热学基础[M]. 北京:高等教育出版社,1990. 29~79
- 4 Su Wei, Zhong Jingchang, Zhang Libo *et al.*. Numerical simulation study on field of temperature during the growth of Nd:YAG crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):334~340
苏 伟,钟景昌,张丽波等. Nd:YAG 晶体生长过程中温度场的数值模拟研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4):334~340
- 5 Chinese Metals Acad. and Chinese Nonferrous Metals Acad.. Manual of Metal Physical Properties (No. 1) [M]. Beijing: Metallurgy Technology Press, 1987. 264~322
中国金属学会,中国有色金属学会 编. 金属材料物理性能手册(第一册)[M]. 北京:冶金工业出版社,1987. 264~322
- 6 Committee Council. Manual of Mechanical Engineering Material Properties Data [M]. Beijing: China Machine Press, 1995. 835
《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,1995. 835