

激光钎涂金刚石残余应力的有限元分析及实验研究

朱宏涛, 秦建, 井培尧, 苏旭, 赵赫, 宋昕怡

(中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司,河南 郑州 450001)

摘要: 基于宏观形貌将金刚石模型简化为六八面体,建立了激光钎涂金刚石的有限元模型,并对此模型进行了钎料爬升方面的优化。得到了金刚石涂层最大残余应力的分布特征,并结合实验探究了最大残余应力对涂层表面缺陷的作用机制。拉曼光谱对金刚石焊后残余应力的实测趋势与计算结果吻合较好,金刚石焊后残余应力为压应力。最后,结合耐磨实验探究了金刚石焊后残余应力对涂层耐磨失效的影响机制。结果表明,金刚石受到适当的残余压应力有助于提高钎料层对金刚石的把持力,随着金刚石焊后残余应力的提高,涂层耐磨性能呈现先增强后下降的趋势。

关键词: 激光钎涂; 金刚石; 残余应力; 拉曼光谱; 耐磨失效

中图法分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)12-3077-07

1 引言

受限于金刚石和钎料的冶金特点,金刚石钎涂需要在真空条件下进行^[1-3],难以满足高效化、低成本需求,亟待开发非真空金刚石钎涂技术研究^[4-6]。激光钎涂金刚石技术具有能量密度高、热影响区小、绿色环保等特点,有助于提高经济效益^[7]。目前已有学者针对激光钎涂金刚石开展了大量实验研究。Huang等^[8]利用激光加热Ag-Cu-Ti钎料,将35/40目的金刚石磨粒钎焊到AA7075合金基体上。Zhang等^[9]采用光纤激光钎焊技术,使用Ni-Cr钎料将金刚石磨粒钎焊在钢基体上。Long等^[10-11]开展了激光钎涂金刚石成形研究,探究了激光扫描速度、激光功率对涂层完整性的影响,结果表明:激光功率增大,金刚石石墨化程度加剧,晶体边缘不清晰、不完整,发生了热损伤。秦建等^[12]借助高速摄像对金刚石涂层成形行为及其机制进行分析,结果表明,钎料粉末的熔合铺展过程可分为粉末熔化、液态钎料聚合、粉末吸附熔合、润湿铺展和涂层凝固成形5个阶段。

提高金刚石与钎焊层之间的结合强度已成为亟待解决的问题^[13-14]。同时由于激光钎涂过程中温度梯度较大,金刚石与钎料合金之间的热膨胀系数差异较大^[15],焊后会产生大量残余应力。涂层内部过大的残余应力会导致微裂纹的形成,进一步导致金刚石断裂或者脱落,显著降低了金刚石工具的耐磨性能。

目前预测钎焊金刚石的残余应力分布主要通过拉曼光谱测量或有限元分析实现^[16-18]。Liu等^[17]通过测量拉曼光谱峰偏移量的方法,计算得到了真空钎焊金刚石的

残余应力分布。很多学者通过有限元分析模拟了不同工艺参数对钎焊金刚石残余应力的影响机制,但金刚石常被简化为球形^[18],这导致了接头处结构约束度的改变,计算结果与实验结果存在较大差异。

调控涂层的残余应力有助于提高钎料层对金刚石的把持力同时抑制钎焊过程中热裂纹的形成。因此,合理优化激光钎涂金刚石有限元模型具有重要意义。本研究根据激光钎焊金刚石的宏观形貌,对其有限元模型进行了优化。采用基于热弹塑性力学的有限元方法分析了不同工艺参数下残余应力的分布趋势,并通过拉曼光谱实验证明了仿真结果的可靠性。最后,通过实验探究了涂层最大残余应力对金刚石涂层表面缺陷的作用机制,并结合耐磨实验探究了金刚石焊后残余应力对涂层耐磨失效的影响机制。

2 实验

2.1 激光钎涂金刚石的有限元模型

金刚石与钎料层的接头形式会直接影响其结合处的残余应力分布,金刚石的有限元模型常简化为球形^[18],会导致残余应力分布特征与实际情况不符。为使仿真结果趋于可靠,将金刚石模型简化为六八面体,并对此模型进行了钎料爬升方面的优化。使用ANSYS软件采用基于热弹塑性力学的热力耦合有限元方法分析了不同激光功率对钎涂金刚石残余应力的影响。钎料在激光的作用下形成熔池,此时熔池为零应力状态,因此将钎料温度高于其熔点时对应的杨氏弹性模量设置为零值,从而考虑了

收稿日期:2024-12-15

基金项目:国家自然科学基金(U2004186);河南省重点研发项目(241111233300)

作者简介:朱宏涛,男,1999年生,硕士生,中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司,河南 郑州 450001, E-mail: 731954717@qq.com

钎料熔化再凝固过程对应力分布的影响。

激光钎涂金刚石的有限元模型如图1所示,由金刚石,0.2 mm 厚的Ni-Cr钎料合金,45钢基底组成,金刚石被钎料层包裹的深度为0.1 mm。激光钎涂过程中,钎料熔化铺展后会沿着金刚石进行爬升。为了使应力的模拟结果更加可靠,在激光钎涂金刚石的几何模型中考虑了钎料的爬升,钎料的爬升高度为0.1 mm,如图1中右上角所示。由于金刚石尺寸较小,为确保残余应力的计算精度,对金刚石与钎料层结合处的网格加密处理。激光钎涂金刚石局部网格划分如图2所示,共划分节点6790个,网格单元17 325个。

2.2 热传导与热源模型

激光钎涂过程中,温度场随着时间变化显著,因此对钎涂过程进行瞬态传热分析。由于材料的热物理特性随着温度变化而变化,本模型考虑了材料热物性的非线性特征,即 $[C]=[C(t)];[K]=[K(t)]$ 。导热微分方程如式(1)所示:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

式中, $[K]$ 为热传导矩阵, $[C]$ 为比热矩阵, $\{Q\}$ 为热流密度矩阵。

热传导遵循傅里叶定律,如公式(2)所示:

$$q = -k \frac{dT}{dX} \quad (2)$$

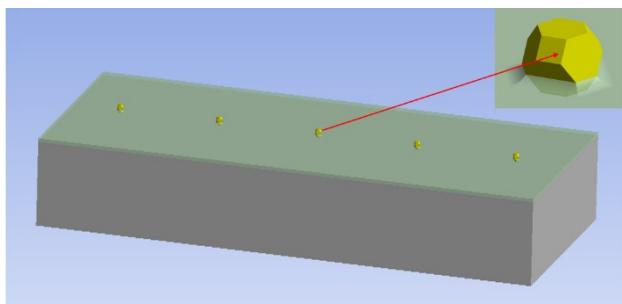


图1 激光钎涂金刚石的有限元模型

Fig.1 Finite element model of laser brazed diamond

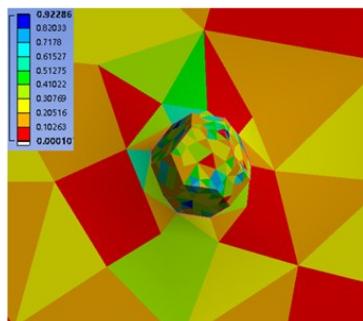


图2 激光钎涂金刚石局部网格划分

Fig.2 Local meshing of laser brazed diamonds

基于激光焊接规范与激光器IPG 4000 W的特性,此模型选取移动GAUSS面热源,作用面为钎料层与金刚石的上表面。高斯热源的热流密度受激光功率、光斑半径、扫描速度三者共同影响,如公式(3)所示:

$$q_1 = q_{\max} \exp \left[\frac{3R(x - x_0 - vt)^2 + (y - y_0)^2}{r^2} \right] \\ = (3 \times 0.42 \frac{P}{\pi r^2}) \cdot \exp \left[\frac{3R(x - x_0 - vt)^2 + (y - y_0)^2}{r^2} \right] \quad (3)$$

式中,3为热通量系数,0.42为Ni-Cr钎料对激光的吸收率,P为激光功率,r为光斑半径,v为扫描速度, (x_0, y_0) 为激光中心的初始位置坐标, (x, y) 为热源内一点的位置坐标。本模型采用Ni-Cr合金钎料的焓近似替代相变潜热的计算。焓的计算公式如式(4)所示。考虑热边界条件为对流边界条件,热初始条件为室温。

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} \rho c(T) dT \quad (4)$$

2.3 Von Mises 屈服准则

Von Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力,利用 Von Mises 屈服准则确定金属材料的临界应力状态。Ni-Cr 合金钎料的屈服条件如式(5)所示:

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - \frac{\sigma_{s0}^2}{3} = 0 \quad (5)$$

式中, S_{ij} 是偏应力张量, σ_{s0} 为初始的屈服应力。

2.4 边界与加载条件

初始温度设置为25 °C,激光功率分别设置为650、700、750、800 W,光斑半径(r)设置为2.5 mm,扫描速度(v)设置为3 mm/s,采用有限元方法分析了不同工况下激光钎涂金刚石残余应力的分布特征。

2.5 实验材料与方法

激光钎涂金刚石实验的原理图如图3所示。用砂纸抛光45钢基体,直至表面无明显划痕。选用175目的Ni-Cr合金钎料与粘结剂按照质量比7:1的混合并搅拌均匀,在45钢基体上预制成厚度为0.2 mm的钎料层,并在钎料层表面放置35/40目的金刚石。使用IPG 4000 W 激

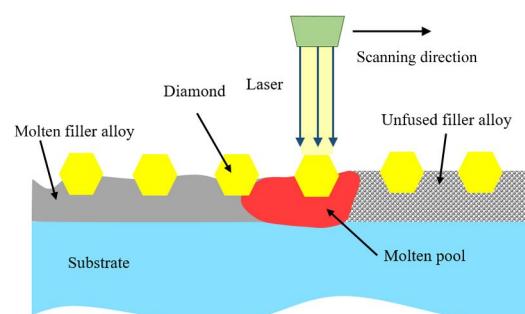


图3 激光钎涂金刚石实验原理图

Fig.3 Schematic diagram of laser brazing diamond experiment

光器系统,采用650、700、750、800 W的激光功率,2.5 mm的光斑半径,3 mm/s的扫描速度进行多组钎涂金刚石实验。使用体式显微镜观测样品的光学形貌,并对比涂层的平整性与表面缺陷程度。使用超景深显微镜观测样品的3D形貌并对比金刚石的出露度。利用拉曼光谱仪测量了不同工艺参数下金刚石的拉曼峰值位移,并据此计算了残余应力值。由于金刚石涂层较薄且涂层研磨厚度难以精准测量,因此选取失重法评价涂层的耐磨性。采用数控平面磨床进行耐磨实验并同步记录摩擦系数,其中 Al_2O_3 砂轮转速为500 r/min,磨损时间为60 min,对不同工艺参数下的激光钎焊试样的耐磨性进行了研究。采用精度为0.001 g的电子天平称量实验前后试样的质量,计算得到失质量。

3 结果与讨论

3.1 金刚石涂层残余应力分布

激光钎涂过程中,金刚石吸收能量的原理如图4所示。通过改变热源的加载方式分别为:只加载于钎料层的上表面、只加载于金刚石的上表面,从而实现对不同方式下金刚石温度变化曲线的计算。不同方式下金刚石的温度变化曲线如图5所示。金刚石从钎料层借助热传导吸收能量能达到900 °C;由于金刚石对激光的吸收率仅

为0.2,并且金刚石与激光的作用时间、面积均较小,因此金刚石直接从激光中吸收能量只能达到约100 °C。由图5结果表明,金刚石主要从熔池中通过热传导吸收能量,金刚石的升温降温速率快,温度梯度较大,冷却过程中易产生大量残余应力。

本研究通过有限元分析计算得到了残余应力场的瞬态分布,其中最大残余应力出现在激光扫描金刚石过后1.8 s的时刻。金刚石涂层的最大残余应力分布如图6所示。金刚石工具冷却至室温后残余应力的分布如图7所示。金刚石钎料层的最大残余应力出现在钎料层表面与金刚石磨粒之间的结合处,最大残余应力分布方向垂直于激光加载的方向。金刚石被钎料层包裹的部分受到较大残余应力的作用,残余应力随着包裹的深度增加而增大,其底部受到最大的残余应力;金刚石未被包裹的部分受到较小残余应力的作用。

由于金刚石主要从熔池中利用热传导吸收能量,钎料层先于金刚石吸收能量并发生热膨胀变形,并且钎料的热膨胀系数远高于金刚石^[15],其热膨胀受到了金刚石的限制作用,冷却过程中热应力主要作用在金刚石与钎料的结合界面处。由于金刚石与钎料层的接头结构约束度较高,结合处存在应力集中。钎焊接头处钎料层的几何结构为凹陷型,凹陷结构处相较于突出结构处更易引发残余应力的聚集^[19],因此钎料层上表面的残余应力值远高于金刚石内部的残余应力值。

3.2 激光功率对残余应力的影响

不同工艺参数下金刚石涂层的最大残余应力与焊后残余应力如图8所示。随着激光功率的增大,能量密度升高,温度梯度增大且金刚石与钎料层的热膨胀系数增大,导致冷却过程中最大残余应力的值显著增加。当 $P=800$ W时,涂层最大残余应力值为492.6 MPa,极易导致热裂纹的形成。焊后金刚石工具的残余应力远低于钎涂过程中金刚石工具受到的最大残余应力。激光钎涂后金刚石涂层不再受到热载荷的作用且缓慢冷却至室温,这

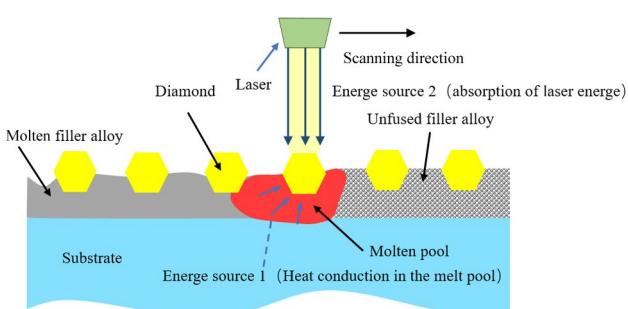


图4 金刚石吸收能量的原理图

Fig.4 Schematic diagram of diamond energy absorption

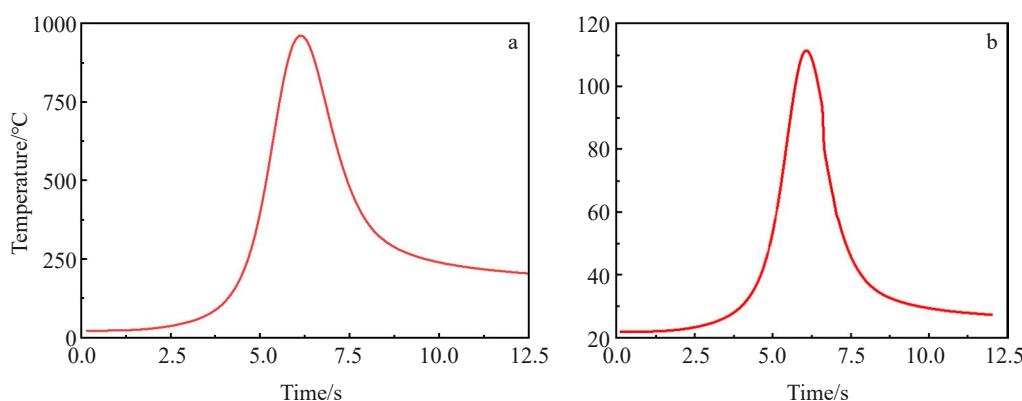


图5 不同方式下金刚石的温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation curves of diamond in different ways: (a) energy souce 1 and (b) energy souce 2

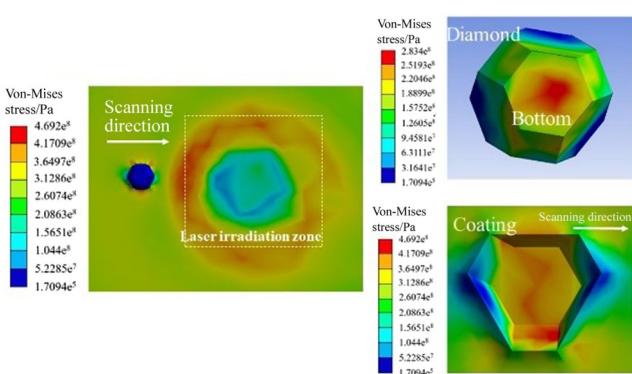


图 6 金刚石涂层最大残余应力分布

Fig. 6 Maximum residual stress distributions of diamond coating

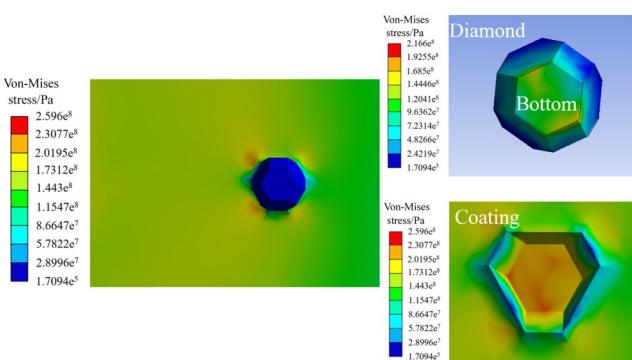


图 7 金刚石涂层冷却至室温后的残余应力分布

Fig. 7 Residual stress distributions of diamond coating after cooling to room temperature

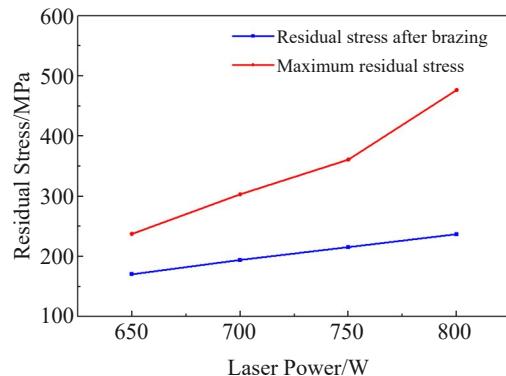


图 8 不同激光功率下金刚石涂层的残余应力值

Fig. 8 Residual stress values of diamond coatings under different laser powers

一过程中最大残余应力会向钎料层中扩散,最终释放掉约 50%,残余应力对金刚石工具加工性能的影响降低。

金刚石的晶格畸变程度受到残余应力的影响^[20],在拉曼光谱中晶格畸变以特征峰位移的形式存在。因此可以由拉曼光谱特征峰的偏移量计算残余应力,如式(6)^[21]所示:

$$\sigma_m = \frac{v_0 - v}{p} \quad (6)$$

式中, v_0 为焊前金刚石的拉曼特征峰位移, v 为焊后金刚石的拉曼特征峰位移, p 是与金刚石 Grueneisen 常数、泊松比有关的常数,根据经验取为 2.88^[22]。

不同工艺参数下金刚石的拉曼光谱图如图 9 所示。

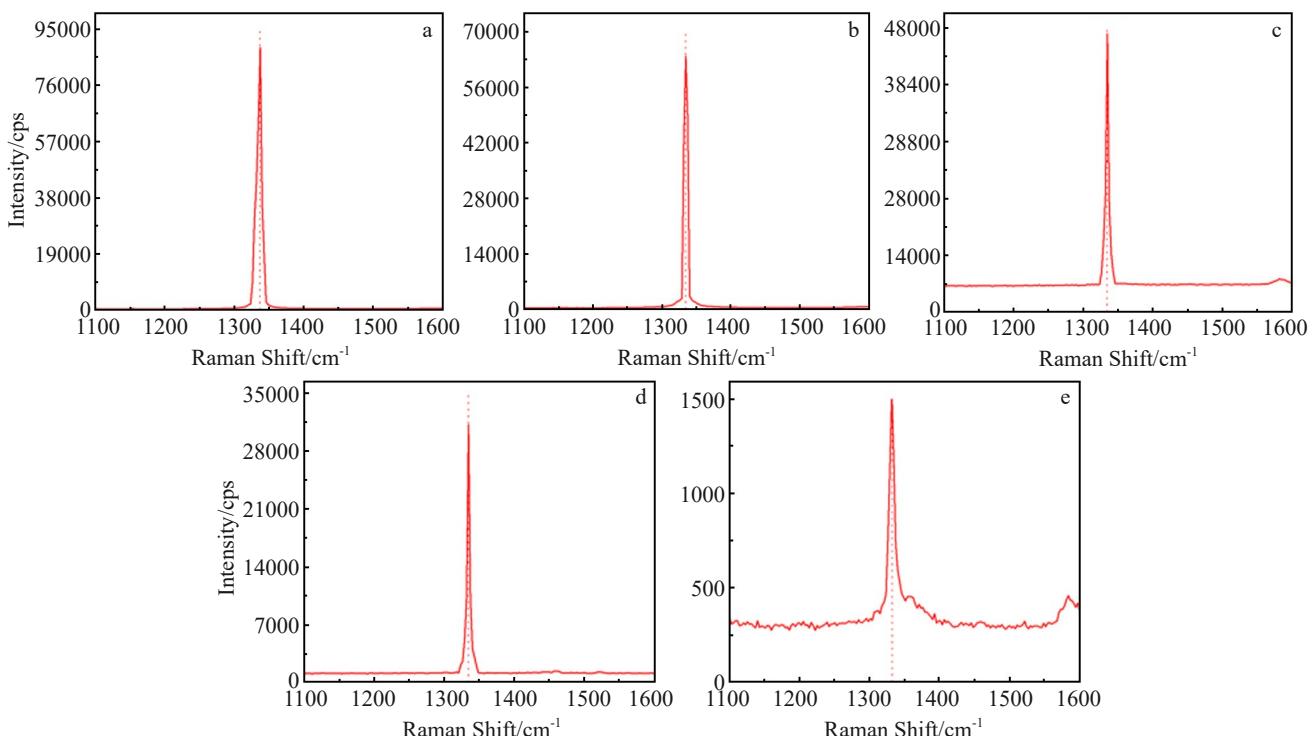


图 9 不同激光功率下金刚石的拉曼光谱

Fig. 9 Raman spectra of diamond under different laser powers: (a) pre-experimental, (b) 650 W, (c) 700 W, (d) 750 W, and (e) 800 W

图中金刚石的拉曼特征峰向右偏移,根据式(6),表明金刚石包裹在钎料层中的部分主要受到残余压应力的影响,提高了涂层对金刚石的把持力。石墨的特征峰约为1580^[22]。特别当 $P=800$ W 时,拉曼光谱中检测到石墨特征峰的存在,该工艺参数实验下的金刚石发生了较为严重的石墨化。

金刚石焊后残余应力的模拟值与实际测量值如图10所示。不同工艺参数下残余应力的变化趋势与有限元模拟结果一致,表明有限元方法可以有效预测金刚石的残余应力,为参数优化提供理论参考。

3.3 最大残余应力对涂层表面缺陷的影响

激光钎涂金刚石样品的光学形貌和超景深形貌如图11~图12所示。由于金刚石受到的最大残余应力均远

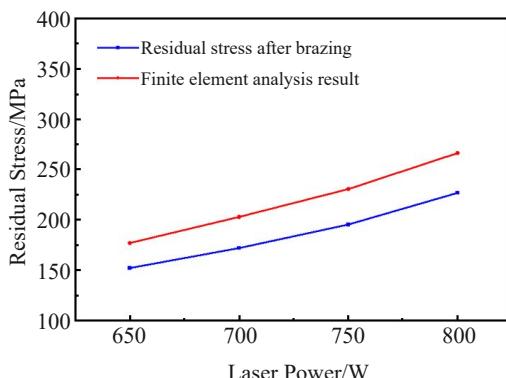


图10 不同激光功率下金刚石焊后残余应力的模拟值与实际测量值
Fig.10 Simulated and measured values of residual stress of diamond after welding under different laser powers

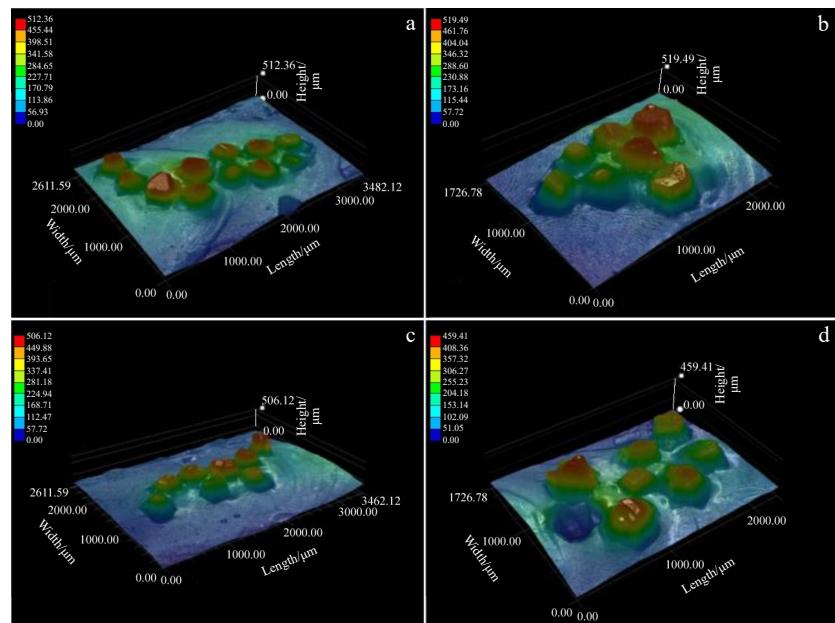


图12 超景深显微镜下试样的3D形貌
Fig.12 3D morphologies of diamond samples under super depth-of-field microscope: (a) $P=650$ W, $v=3$ mm/s; (b) $P=700$ W, $v=3$ mm/s; (c) $P=750$ W, $v=3$ mm/s; (d) $P=800$ W, $v=3$ mm/s,

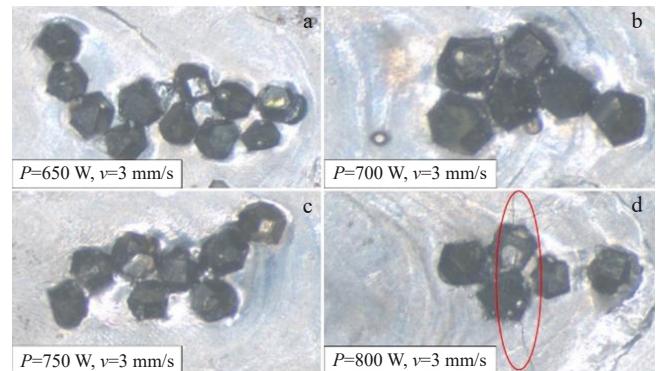


图11 样品的光学形貌

Fig.11 Optical morphologies of the diamond sample: (a) $P=650$ W, $v=3$ mm/s; (b) $P=700$ W, $v=3$ mm/s; (c) $P=750$ W, $v=3$ mm/s; (d) $P=800$ W, $v=3$ mm/s

小于其断裂应力(2 GPa),金刚石表面完整均未出现裂纹。当涂层结合处最大残余应力为492.6 MPa时,在金刚石涂层表面观察到宏观裂纹。裂纹萌生于金刚石与钎料层的结合处,裂纹扩展方向垂直于激光加载的方向。超景深实验中,均观察到各试样钎料对于金刚石磨粒有一定爬升,爬升高度约为0.1 mm,且残余应力对金刚石出露度影响不大。

钎焊接头处的钎料铺展受到了金刚石的制约,钎料的熔化铺展不均匀会导致钎料层局部断裂强度降低^[23]。涂层与金刚石的结合处存在着残余应力集中,并且最大残余应力超过了钎料合金的断裂强度,导致局部微裂纹

形成。由于激光持续热作用,激光扫描方向上的钎料不断熔化形成局部熔池,温度梯度较小,残余应力在此方向上快速释放,并聚集在垂直于激光扫描的方向上,局部微裂纹沿着残余应力聚集的方向生长,形成宏观裂纹。涂层最大残余应力的分布与实验结果相吻合。

3.4 残余应力对耐磨性能的影响

金刚石涂层的耐磨失效机制如图 13 所示,其主要失效方式分为:金刚石脱落、金刚石破碎。金刚石为 sp^3 杂化结构^[24],屈服强度约为 2 GPa,因此金刚石工具磨削与切削时,金刚石破碎相较于金刚石脱落发生较少。被钎料层包裹的金刚石主要受到残余压应力的影响,残余压应力提高了涂层对金刚石的把持力。基于金刚石涂层耐磨失效机制,提高涂层对金刚石把持力有助于抑制金刚石的脱落,从而提高金刚石涂层的耐磨性能。

金刚石涂层的耐磨实验结果如图 14 所示。结合图 10 的分析可知,随着激光功率的不断提高,金刚石涂层

受到的残余应力提高,涂层耐磨性能呈现先增强后下降的趋势,其中 $P=750$ W 时,金刚石的焊后残余压应力为 172.9 MPa,钎料层对金刚石的把持力较高,涂层耐磨性能最佳。当 $P=800$ W 时,涂层最大残余应力过大,涂层中形成的宏观裂纹严重影响了金刚石的磨削性能,更容易造成金刚石的脱落。

4 结 论

1) 金刚石主要从熔池中利用热传导吸收能量,钎料层先于金刚石吸收能量并发生热膨胀变形,并且钎料的热膨胀系数远高于金刚石,其热膨胀受到了金刚石的限制作用,金刚石与钎料层的接头结构约束度较高,冷却过程后热应力集中在金刚石与钎料的结合界面处。

2) 由于金刚石与钎料层的接头结构约束度较高,金刚石涂层的最大残余应力出现在钎料层底部与金刚石磨粒之间的结合处,最大残余应力分布方向垂直于激光加载的方向。钎焊接头处钎料层的几何结构为凹陷型,凹陷结构处相较于凸出结构处更易引发残余应力的聚集,钎料层上表面的残余应力值远高于金刚石内部的残余应力值。

3) 当金刚石与钎焊层结合处的最大残余应力超过 469.2 MPa 时,涂层表面会出现宏观裂纹,严重影响金刚石工具的使用寿命。裂纹扩展方向垂直于激光的加载方向,与有限元模拟得到的最大残余应力分布方向一致。

4) 随着金刚石焊后残余应力的提高,涂层耐磨性能呈现先增强后下降的趋势。当 $P=750$ W, $v=3$ mm/s, $r=2.5$ mm 时,此工艺下制备的金刚石涂层热损伤小、耐磨性高。

参考文献 References

- [1] Ma Wei, Xiao Haozhong, Wang Shuyi et al. Vacuum[J], 2022, 198: 110897
- [2] Long Weimin, Lu Quanbin, Zhong Sujuan et al. Welding in the World[J], 2022, 66(5): 1
- [3] Cui Bing, Liu Zhengwei, Zuo Ruzhong et al. Diamond and Related Materials[J], 2022, 126: 109091
- [4] Si Hao(司浩), Qin Jian(秦建), Zhong Sujuan(钟素娟) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(3): 1027
- [5] Long Weimin(龙伟民), Liu Dashuang(刘大双), Wang Bo(王博) et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)[J], 2021, 42(12): 67
- [6] Long Weimin(龙伟民), Liu Dashuang(刘大双), Wu Aiping(吴爱萍) et al. Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)[J], 2023, 59(12): 225
- [7] Qin Jian, Jing Peiyao, Zhu Hongtao et al. Welding in the World[J], 2024, 68(9): 2391
- [8] Huang Guoqing, Wang Yingda, Zhang Merqin et al. Chinese

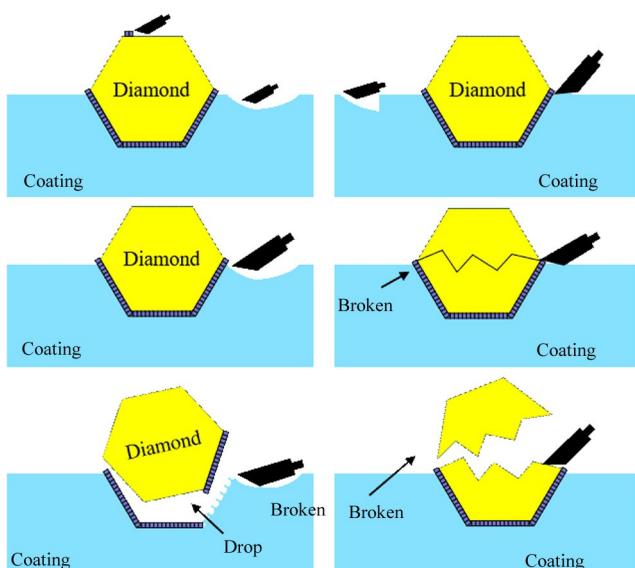


图 13 金刚石涂层的耐磨失效机制

Fig.13 Wear-resistant failure mechanism of diamond coatings

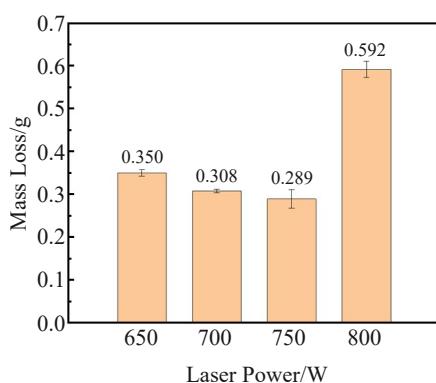


图 14 金刚石涂层耐磨实验结果

Fig.14 Wear-resistant experimental results of diamond coating

- Journal of Aeronautics*[J], 2021, 34(6): 67
- [9] Zhang Mingjun, Li Xiong, Mao Cong. *Diamond and Related Materials*[J], 2022, 125: 108969
- [10] Long Weimin, Liu Dashuang, Dong Xian *et al.* *Surface Engineering*[J], 2020, 36(12): 1315
- [11] Long Weimin, Liu Dashuang, Wu Aiping *et al.* *Diamond and Related Materials*[J], 2020, 110: 108085
- [12] Qin Jian(秦建), Long Weimin(龙伟民), Wei Shizhong(魏世忠) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2024(7): 1
- [13] Qin Jian(秦建), Long Weimin(龙伟民), Lu Quanbin(路全彬) *et al.* *Materials Reports(材料导报)*[J], 2020, 34(S2): 1457
- [14] Liu Dashuang, Long Weimin, Wu Mingfang *et al.* *Coatings*[J], 2019, 9(6): 364
- [15] Li Xin, Zhang Jian, Xu Qi *et al.* *Diamond and Related Mater*[J], 2022, 130: 109486
- [16] Akbari M, Buhl S, Leinenbach C *et al.* *Mechanics of Materials*[J], 2012, 52: 69
- [17] Liu Junyi, Zhang Jian, Zhang Mingjun *et al.* *Diamond and Related Materials*[J], 2023, 139: 110350
- [18] Li Qilin(李奇林), Su Honghua(苏宏华), Xu Juhua(徐九华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(12): 3250
- [19] Uzun F, Basoalto H, Liogas K *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2024, 81: 104027
- [20] Ren Jie, Han Fuzhou, Guo Wenbin *et al.* *Materials Characterization*[J], 2024, 207: 113532
- [21] Nance J, Subhash G, Sankar B *et al.* *Acta Materialia*[J], 2021, 217: 117164
- [22] Harish D V N, Bharatish A, Murthy H N N *et al.* *Ceramics International*[J], 2021, 47: 3498
- [23] Li Qiubo, Chen Yihui, Chen Yanfei *et al.* *Applied Composite Materials*[J], 2022, 29(3): 1
- [24] Anokhin A S, Strel'nikova S S, Andrianov M A *et al.* *Glass and Ceramics*[J], 2019, 11–12(75): 475

Finite Element Analysis and Experimental Study of Residual Stresses in Laser Braze Diamonds

Zhu Hongtao, Qin Jian, Jing Peiyao, Su Xu, Zhao He, Song Xinyi

(China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The diamond model was simplified to hexahedron based on the macroscopic morphology, and the finite element model of laser brazing diamond was established, and this model was optimized for brazing material climbing. The distribution characteristics of the maximum residual stress of the diamond coating were obtained, and the mechanism of the maximum residual stress on the surface defects of the coating was investigated with experiments. The measured trend of diamond residual stress by Raman spectroscopy agrees well with the calculated results, and the diamond post-weld residual stress is compressive stress. Finally, the mechanism of the influence of diamond post-soldering residual stress on the wear resistance failure of the coating was explored in combination with the wear resistance experiments. The results show that diamond is subjected to appropriate residual compressive stress to help improve the brazing layer's hold on diamond, and with the increase in diamond post-soldering residual stress, the wear resistance of the coating shows a tendency of first enhancement and then decreasing.

Key words: laser brazing; diamond; residual stress; Raman spectroscopy; wear failure

Corresponding author: Qin Jian, Senior Engineer, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 450001, P. R. China, E-mail: qinjianzzu@163.com