

文章编号: 1001-3806(2009)02-0124-03

激光-感应复合熔覆 Ni 基 WC 复合层的工艺研究

周圣丰¹, 曾晓雁², 胡乾午², 黄永俊²

(1. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063; 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了提高熔覆效率与消除熔覆层的裂纹, 采用激光-感应复合熔覆的方法在 A3 表面获得了无气孔与裂纹的 Ni 基 WC 复合层。研究了不同的加工参量对复合层质量的影响, 结果表明, 随着激光比能的增加, 粉末面密度增加; 在相同的激光比能条件下, 随着粉末面密度增加, 熔覆层的高度增加, 稀释率减小; 在相同的粉末面密度条件下, 随着激光比能的增加, 熔覆层的宽度略有增加。此外, 相对于单纯的激光熔覆技术, 激光-感应复合熔覆的效率约可以提高 5 倍。在激光-感应复合熔覆过程中, 熔覆层与基材间的温度梯度大大降低, 这是 Ni 基 WC 复合层无裂纹的关键原因。

关键词: 激光技术; 激光-感应复合熔覆; 激光熔覆; 激光比能; 加工参量; Ni 基 WC 复合层

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Process study of Ni-based WC composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding

ZHOU Sheng-feng¹, ZENG Xiao-yan², HU Qian-wu², HUANG Yong-jun²

(1. School of Material Science and Engineering, Nanchang University of Aeronautics, Nanchang 330063, China; 2. School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To increase the cladding efficiency and eliminate the cracks in the cladding layer, laser-induction hybrid cladding was adopted to obtain Ni-based WC composite coatings without porosities and cracks. The influence of processing parameters on the composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding was investigated. The results showed that the area density of deposition powder had an increase with increasing laser specific energy. At the same laser specific energy, the cladding height increased and the dilution decreased with increasing area density of deposition powder. When the area density of deposition powder kept constant, the cladding width slightly increased and the contact angle decreased with increasing laser specific energy. Moreover, due to introduction of induction heater, the efficiency of laser-induction hybrid cladding was increased about five times higher than that of the individual laser cladding. As a result, the temperature gradient during laser-induction hybrid cladding was much lower than that during the general laser cladding, which was the main reason that no cracks appeared in Ni-based WC composite coatings.

Key words: laser technique; laser-induction hybrid rapid cladding; laser cladding; laser specific energy; processing parameters; Ni-based WC composite coatings

引言

激光熔覆效率低以及熔覆层极易产生裂纹, 是阻碍激光熔覆技术工业化应用的主要障碍^[1-3]。采用加热炉或气体火焰等预热基材, 被认为是消除裂纹的最有利方法^[4-5]。但是长时间的保温极易导致关键零部

件的表面氧化, 降低熔覆效率以及恶化加工条件。为了克服这些不足, 在以前的论文中, 作者提出了激光-感应复合熔覆的方法, 激光熔覆效率相对于单纯激光熔覆技术明显提高, 获得了无气孔与裂纹的 Ni 基 WC 复合层^[6-7]。但是, 激光加工工艺参量对熔覆层质量的影响; 采用激光-感应复合熔覆技术, 为什么获得的金属陶瓷复合层无气孔与裂纹? 这些在论文中并没有详细讨论。因此, 本文中的重点是研究激光-感应复合熔覆过程中, 激光加工工艺参量对 Ni 基 WC 复合层质量的影响以及分析 Ni 基 WC 复合层无气孔与裂纹的原因。

作者简介: 周圣丰(1977-), 男, 博士, 主要从事材料加工工程、表面激光强化与改性的研究。

E-mail: zhousf1228@163.com

收稿日期: 2007-10-12; 收到修改稿日期: 2008-08-23

1 实验方法

实验中采用的基材为 A3 钢,其尺寸为 100 mm × 40 mm × 7 mm。粘结金属采用平均粒径为 60 μm 的自溶性合金粉末 Ni60A。陶瓷相采用平均粒径小于 40 μm 的铸造 WC。实验前将 Ni60A 与 WC 粉末按质量比 $m(\text{Ni60A}):m(\text{WC})=4:1$ 均匀混合,采用实验室的造粒法制备成流动性好且适合于旁轴同步自动送粉的复合粉末。

采用参考文献[6]中的实验装置在 A3 钢表面进行激光-感应复合熔覆的实验。实验中采用德国 Rofin-TR050 型 5kW 轴快流 CO₂ 激光器,经过光束处理装置将激光光斑调节成椭圆形光斑,平行于激光扫描方向的尺寸为 8mm,垂直于激光扫描方向的尺寸为 6mm,激光扫描速度为 1000mm/min ~ 3000mm/min。感应加热设备为 100kW 集成模块型感应器,感应加热频率为 30kHz,调节感应加热功率使工件表面的平均温度为 1203K。自动送粉器为 HUST-VI 型旁轴同步送粉器,采用氩气将复合粉末吹入激光熔池,复合送粉量为 39.1g/min ~ 80.22g/min。粉末喷嘴与工件的距离为 12mm,与工件的夹角为 45°。

将试样沿垂直于激光扫描方向切开,按标准方法制成金相试样,经研磨抛光后用王水腐蚀,利用光学显微镜观测其组织特征与几何形貌,用能谱仪测定涂层的微区成分。

2 实验结果与讨论

2.1 激光比能对几何形貌的影响

在激光-感应复合熔覆过程中,当采用椭圆形光斑时,激光比能计算为^[8]:

$$E = 60 \frac{P}{v_s \cdot D} \quad (1)$$

式中, E 表示激光比能 (J/mm^2), P 表示激光功率 (W), v_s 表示激光扫描速度 (mm/min), D 表示垂直于激光扫描速度方向的光斑的尺寸 (mm)。

在基材表面进行激光熔覆时,单位面积沉积的粉末质量定义为粉末面密度,计算式为:

$$\Psi = 10000 \frac{v_p}{v_s \cdot D} \quad (2)$$

式中, Ψ 表示粉末面密度 (g/dm^2), v_p 表示送粉量 (g/min)。

图 1 为激光比能与粉末面密度及熔覆高度的关系曲线,从图 1 可以看出,激光比能与粉末面密度呈线性关系,即随着激光比能的增加,粉末面密度逐渐增加。这可以解释为:当椭圆光斑尺寸保持不变时,随着激光比能的增加,基材与复合粉末吸收激光的能量均增加,

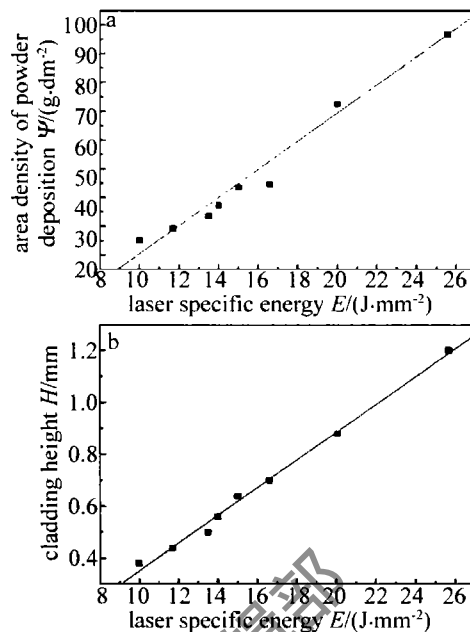


Fig. 1 Effect of laser specific energy on area density of deposition powder and cladding height
a—relationship between laser specific energy and powder distribution rate
b—relationship between laser specific energy and cladding height

则复合粉末的利用率增加,因此,单位时间内在基材上可以沉积更多的复合粉末,相应地,熔覆层的高度增加。

图 2 为激光比能与熔覆层宽度的关系,从图 2 可

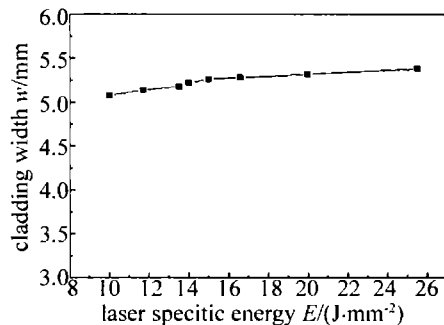


Fig. 2 Effect of laser specific energy on cladding width

以看出,随着激光比能的增加,熔覆层的宽度略有增加,但变化幅度不大。那是因为随着激光比能的增加,基材吸收的激光能量增加,则基材表面的熔池也增加。此外,由于复合粉末对激光能量的屏蔽效应,导致基材表面的熔池在垂直于激光扫描速度方向的尺寸始终小于垂直于激光扫描速度方向的椭圆光斑尺寸。因此,熔覆层的宽度仅依赖于垂直于激光扫描速度方向的尺寸,且随着激光比能的增加,熔覆层的宽度略有增加,但变化不大。

图 3 为粉末面密度与熔覆层高度及稀释率的关系,从图 3 可以看出,随着粉末面密度的增加,熔覆层的高度逐渐增加。在激光-感应复合熔覆过程中,作用在基材表面的激光能量是被复合粉末吸收与反射后剩余的能量,复合粉末衰减的激光能量与复合粉末的流

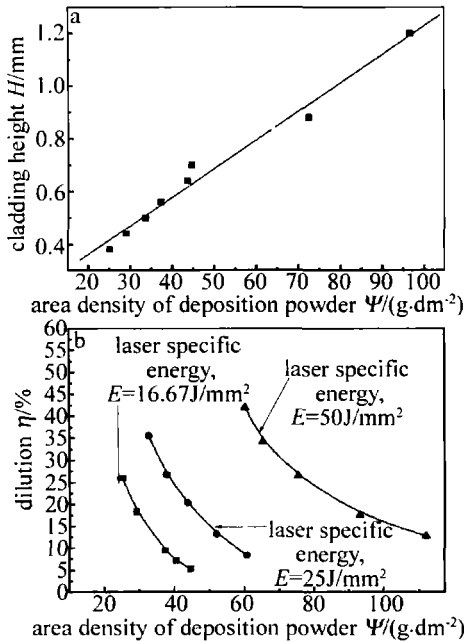


Fig. 3 Effect of area density of deposition powder on cladding height and dilution

a—relationship between area density of deposition powder and cladding height b—relationship between area density of deposition powder and dilution

量成比例。因此,当激光比能保持不变时,随着复合送粉量的增加,复合粉末衰减的激光能量增加,则将会有更多的激光能量被复合粉末而不是被基材吸收,导致熔覆层高度增加而稀释率降低。

2.2 与单纯激光熔覆技术的对比

图4为单纯激光熔覆与激光-感应复合熔覆Ni基WC复合层的加工参量对比图,从图中可以看出,激

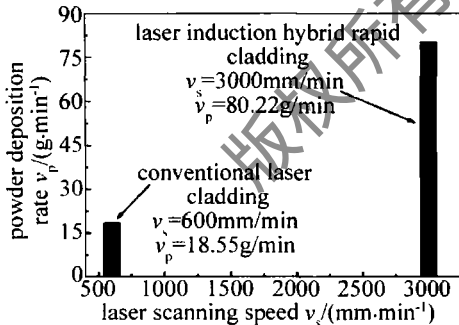


Fig. 4 Comparison between laser-induction hybrid cladding and the individual laser cladding

光-感应复合熔覆技术相对于单纯的激光熔覆技术,熔覆速度提高了4倍,而送粉量提高了3倍多。

在单纯的激光熔覆过程中,由于激光扫描速度较低,WC颗粒极易发生分解,沉积出的石墨C与大气中的氧气发生反应而形成CO与CO₂,在随后的快速凝固过程中,残留在熔覆层内形成气孔。因此,降低WC颗粒的熔解可以有效地抑制复合层内气孔的形成。成分分析结果表明,对于激光-感应复合熔覆而言,当激光扫描速度为3000mm/min时,复合层内的平均碳含

量的质量分数0.0265。但是,对于单纯的激光熔覆技术,当激光扫描速度为600mm/min时,复合层内的平均碳含量的质量分数为0.0596。可见,由于激光扫描速度的大幅度提高,WC颗粒熔解而沉积出的石墨C减小,使残留在复合层内的气孔也大大降低。而且获得了表面平整光滑而且与基材呈冶金结合的Ni基WC复合层,经探测无裂纹(见图5a),其主要原因是

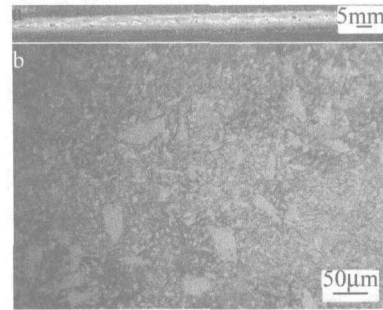


Fig. 5 Structure of Ni-based WC composite coating by laser-induction hybrid cladding ($v_s=3000\text{mm/min}$, $v_p=80.22\text{g/min}$)

a—microstructure of the composite coating b—microstructure of the composite coating

熔覆层与基材间的温度梯度被降低了。为了简化计算,在激光扫描速度过程中的温度梯度可以通过下式计算:

$$G = \frac{2\kappa \cdot (T - T_0)^2}{\eta \cdot P} \quad (3)$$

式中, G 表示熔覆层与基材间的温度梯度, T 表示Ni基合金的液相线温度, T_0 表示基材的预热温度, η 表示基材对激光能量的吸收系数, P 表示激光功率, κ 表示材料的热导率。当激光功率为5kW且基材没有被预热时,计算的温度梯度 $G = 5.37 \times 10^2 \text{K/mm}$ ($P = 5\text{kW}$, $\kappa = 82.9 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $T = 1573\text{K}$, $T_0 = 300\text{K}$, $\eta = 10\%$)。当基材被预热到1203K时,计算的温度梯度 $G = 22.7\text{K/mm}$ ($\eta = 20\%$)。

对于在Ni基WC复合层内的残余应力,可以用下式计算^[9]:

$$\sigma_{th} = E_c \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T / (1 - \nu_c) \quad (4)$$

式中, E_c 与 ν_c 分别为熔覆层的弹性模量与泊松比, $\Delta\alpha$ 为复合层与基材间的热膨胀系数之差, ΔT 表示熔化熔覆材料的凝固温度与室温之差。根据上面的计算,对于激光-感应复合熔覆而言,基材被预热到1203K后,熔覆层与基材间的温度梯度仅是单纯激光熔覆技术的1/25。根据(4)式可知,在激光-感应复合熔覆过程中诱导产生的热应力也大大降低,即熔覆层的裂纹敏感性降低。此外,由于激光扫描速度较高,激光比能较低,WC颗粒的熔解也相应地较低,即WC颗粒保持了结构的完整性(见图5b)。

(下转第137页)

量了其光阱力的大小。利用粘滞拖动原理,测量了2维囚禁下6条干涉条纹处粒子所受的最大光阱力,测量数据表明,当只考虑光束的束腰半径和光功率两个因素时,实验数据与理论分析吻合得很好。同时还给出了3维光镊的实验系统,并对系统的一些性能参量进行了理论分析和实验验证。

干涉式多光镊技术适合用来囚禁和操纵两个或多个具有对称形状的条形粒子,它所具有的独特的条状分布的光阱可以非常有效地排列和固定雪茄状粒子,以便于下一步的操作,它还可以用来产生光栅格来囚禁、旋转和分离多个微米级粒子,可广泛应用与生物学、生物医学以及纳米科技等领域^[12-13]。

参 考 文 献

- [1] ASHKIN A, DZIEDZIC J M, BJORKHOLM J E. Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Opt Lett*, 1986, 20(6): 288-290.
- [2] ARTHUR E, CHIOU A, WANG W. Interferometric optical tweezers [J]. *Opt Commun*, 1997, 26(9): 7-10.
- [3] TAN A L, ZHAO Y, SHI J Sh. The analysis of the optical trap force in a single optical trap based on MATLAB [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 373-375 (in Chinese).
- [4] KRONER A, RINALDI F, KARDOSH I, *et al.* Towards ultra-compact optical tweezers without external optics [C]//*Laser and Electro-Op-*

tics Europe, 2005. Munich: CLEO, 2005: 633.

- [5] GARY J, HENRY T, ALAN J, *et al.* Advanced optical tweezers for the study of cellular and molecular biomechanics [J]. *Transaction on Biomedical Engineering*, 2003, 50(1): 57-62.
- [6] ASHKIN A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particles, atoms, and molecules [J]. *Selected Topics in IEEE J Q E*, 2000, 6(6): 841-856.
- [7] HANSEN P M, FLYVBJERG H. Tweezercalib 2.0: faster version of MATLAB package for precise calibration of optical tweezers [J]. *Computer Physics Communications*, 2006, 47(11): 518-520.
- [8] TAGUCHI K, ATSUTA K, NAKATA T, *et al.* Levitation of a microscopic object using plural optical fibers [J]. *Opt Commun*, 2000, 29(8): 43-47.
- [9] WRIGHT W H, SONEK G J, BERNS M W. Parametric study of the forces on microspheres held by optical tweezers [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(9): 1735-1748.
- [10] CHIOU A. Photorefractive phase-conjugate optics for optical image processing, trapping, and manipulation of microscopic objects [J]. *Devices and Applications*, 1999, 87(11): 2072-2074.
- [11] ROHRBACH A, KRESS H. Three-dimensional tracking of small spheres in focused laser beams: influence of the detection angular aperture [J]. *Opt Lett*, 2003, 37(5): 411-413.
- [12] BERG-SORENSEN K, FLYVBJERG H. Power spectrum analysis for optical tweezers [J]. *Science Instrument*, 2004, 75(10): 594-612.
- [13] LUO Y Q, WANG W P, LI J F. Investigation of an optical limiting mechanism in carbon nanotube suspension [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 46-48 (in Chinese).

(上接第126页)

3 结 论

(1)对于激光-感应复合熔覆而言,随着激光比能的增加,粉末面密度增加,熔覆层的高度增加,而熔覆层的宽度略有增加,其尺寸仅依赖于垂直于激光扫描速度方向的光斑尺寸。在相同的激光比能下,随着粉末面密度的增加,复合层的高度增加而稀释率减小。而在相同的粉末面密度条件下,随着激光比能的增加,复合层的稀释率增加。

(2)在相同的椭圆光斑尺寸以及激光功率条件下,激光-感应复合熔覆的激光扫描速度约是单纯激光熔覆技术的5倍,其粉末沉积率约是单纯激光熔覆技术的4倍。此外,在激光-感应复合熔覆过程中,熔覆层与基材间的温度梯度仅是单纯激光熔覆技术的1/25,这是采用激光-感应复合熔覆技术,获得无气孔与裂纹的Ni基WC复合层的关键原因。

参 考 文 献

- [1] CHAO M J, YU J M, LIANG E J, *et al.* Effect of Nb₂O₅ on the cracking susceptibility of laser clad Fe-based coating [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 568-571 (in Chinese).

- [2] YANG J X, ZUO T C, XU W Q, *et al.* The research of laser cladding Co-base alloy coating on ductile cast iron [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 517-519 (in Chinese).
- [3] ZHAO Y F, CHEN C Z. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 16-19 (in Chinese).
- [4] YOSHIWARA S, KAWANAME T. Method for surface alloying metal with a high density energy beam and an alloy steel: United States, 4750947[P]. 1988-06-14.
- [5] CHOI J, CHOUDHURI S K, MAZUMDER J. Role of preheating and specific energy input on the evolution of microstructure and wear properties of laser clad Fe-Cr-C-W alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(13): 3213-3219.
- [6] ZHOU S F, HUANG Y J, ZENG X Y, *et al.* Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *Materials Science & Engineering*, 2008, A480(1/2): 564-572.
- [7] ZHOU S F, HUANG Y J, ZENG X Y. A study of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding with elliptical spot [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(10): 3110-3119.
- [8] COELHO J P, ABREU M A, PIRES M C. High speed laser welding of plastic films [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4/6): 385-395.
- [9] MCDONALD G, HPENDRICKS R C. Effect of thermal cycling on ZrO₂-Y₂O₃ thermal barrier coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1980, 73(2): 491-496.