

文章编号: 1002-2082(2008)01-0076-05

金属陶瓷复合涂层的激光熔覆与无裂纹的实现

周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室激光科学与技术研究部, 湖北 武汉 430074)

摘要: 鉴于传统的激光熔覆金属陶瓷复合涂层技术主要存在 2 方面不足:其一,熔覆效率低,导致大面积熔覆时成本昂贵;其二,由于激光熔覆本身的特点,即快速加热与快速凝固,在激光熔覆过程中,热应力极易诱导熔覆层开裂。基于此,综述了国内外激光熔覆金属陶瓷复合涂层的研究进展,指出其存在的主要问题,并提出了激光感应复合快速熔覆的新方法,即感应预热基材的同时快速激光熔覆。该方法不仅可使熔覆效率大大提高而且获得了无裂纹的金属陶瓷复合涂层。

关键词: 金属陶瓷;复合涂层;激光感应复合快速熔覆

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Realization of laser cladding and crack-free ceramic-metal composite coatings

ZHOU Sheng-feng, ZENG Xiao-yan, HU Qian-wu

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The conventional technique for the laser cladding ceramic-metal composite coating mainly has two disadvantages. Firstly, the efficiency of its powder deposition is low and it limits the cladding rate, makes the process rather expensive for cladding on large areas. Secondly, due to some inherent characteristics in laser cladding technique, such as rapid heating and rapid solidification, the residual stress induced during laser cladding could lead to the crack formation in the composite coatings. The status quo of the domestic and foreign research on laser cladding ceramic-metal composite coating technique is reviewed. The existing problems are pointed out and a new solution for laser induction hybrid rapid cladding (LIHRC) is put forward, which preheats the substrate before the laser cladding. The efficiency of this new solution is higher than that of the conventional laser cladding and crack-free ceramic-metal composite coatings prepared by LIHRC.

Key words: ceramic-metal; composite coating; laser induction hybrid rapid cladding (LIHRC)

引言

对关键机械零配件表面进行修复,虽然传统方法如堆焊和热喷涂等的效率高,涂层厚度均匀且与基材接合牢固,但由于受热过程缓慢,导致稀释率与热影响区大,陶瓷相烧损严重,而且只适合在平整表面进行熔涂。而激光熔覆技术具有能量密度

高、热变形与热影响区小、稀释率低、激光加工位置可以精确定位等优点,正成为汽车、冶金、交通等领域的关键技术,具有广阔的应用前景^[1-3]。但由于激光熔覆自身的特点即快速加热与快速冷却凝固,在材料表面极易形成裂纹,这已成为阻碍激光熔覆技术工业化应用难以逾越的障碍之一。为解决熔覆层

裂纹问题,加快推动激光熔覆技术的工业化应用,总结了国内外激光熔覆金属陶瓷复合涂层的研究现状,提出了激光感应复合快速的新方法,熔覆效率相对于传统激光熔覆技术也大大提高而且金属陶瓷复合涂层无气孔与裂纹。

1 激光熔覆金属陶瓷复合涂层的研究现状

1.1 工艺特点

文献[4]系统地总结了预置粉末法与同步送粉法的工艺特点。预置粉末法首先采用粘结剂将合金粉末调和成膏状涂于基材表面,然后进行激光熔覆。该方法虽然简单易操作,但主要缺点是激光加工窗口窄、熔覆效率低,仅局限于平整表面的工件,且有机粘结剂在熔覆过程中极易形成气孔,导致熔覆层开裂。同步送粉法又分为同轴送粉法与离轴送粉法,见图1所示。其基本原理是利用高能束激光辐照基材的同时,将金属陶瓷复合粉末送入熔池,低熔点的金属吸收激光能量后首先被熔化,经激光扫描后,熔化的金属作为粘结剂将高熔点的陶瓷相包覆其中,然后快速冷却凝固形成金属陶瓷复合涂层。相对于预置粉末法而言,同步送粉法具有粉末利用率高、稀释率低、与基材结合牢固、熔覆层宏观

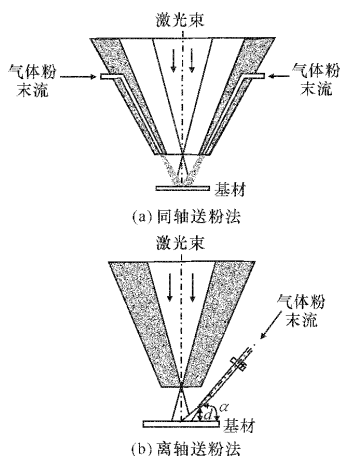


图1 自动送粉法激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic of laser cladding with auto-feeding powder

尺寸可控及加工窗口宽等优点。但同步送粉法由于粉末流在与激光束作用前要先聚焦,且聚焦的粉末流尺寸不能大于激光光斑直径,导致粉末喷嘴与基材间可调节的距离很窄,且粉末流量不能过大,否则会对激光能量形成“屏蔽”效应,导致涂层中陶

瓷相大量烧损且不能与基材形成冶金结合。而离轴送粉法的粉末流量与激光束能量可以单独控制,粉末喷嘴与基材间的距离和角度可在较大范围内调节,因此,可使熔覆效率大大提高,特别是多道搭接激光熔覆金属陶瓷复合涂层时,可以大大降低陶瓷相的烧损与熔解,提高熔覆涂层的抗开裂与耐磨损性能。

1.2 组织与性能特征

用于激光熔覆的金属陶瓷复合粉末主要是在合金粉末如镍基、钴基与铁基粉末中掺入陶瓷相如WC, TiC, SiC等硬质化合物以满足熔覆层各种性能的要求。相对于TiC与SiC而言,由于WC的密度较大,在激光熔覆过程中不存在上浮与高温氧化的问题,在熔覆涂层内可以保持其高硬度的性能,因此,WC在激光熔覆金属陶瓷复合涂层中被广泛地使用。李强等人[5]应用预置粉末法在中碳钢上进行了激光熔覆镍基铸造WC复合涂层的实验,研究发现:复合涂层的显微组织为外延生长的平面晶、胞状晶与柱状晶。XRD分析结果表明,复合涂层主要由WC, W_2C , γ -Ni, η_1 - M_6C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 及 Ni_4B_3 与 Ni_3B 等相结构组成。涂层硬度分布为 $HV_{0.2} 960\sim 1040$,表明从熔池底部到顶部熔池温度伴随着升高,铸造WC的烧损与熔解变得严重。Chiang等人[6]采用相同的方法也在高碳钢上应用激光熔覆方法获得了stellite 12+WC的复合涂层。研究发现,显微组织主要是由树枝晶、共晶、多面状枝晶与未熔解的WC组成,WC与Co基合金相互作用及烧损后生成 σ -Co+ $M_{23}C_6$ + M_6C + M_7C_3 等物相结构。试验结果表明[7],WC在复合涂层中存在不同形式的烧损。粗颗粒如粒度为 $(600\sim 900)\mu m$ 的烧结WC主要发生“黑心”式烧损;当WC的粒度为 $(125\sim 530)\mu m$ 时,主要发生溶解扩散式烧损;对于粒度小于 $100\mu m$ 的铸造WC,则主要发生溃散式烧损与非均匀长大式烧损。后来吴新伟等人[8]应用差热分析法证明了激光熔覆镍基WC复合涂层时还存在反应扩散式烧损。

1.3 数学模型

综上所述,陶瓷相的粒度、烧损特征与分布对复合涂层的耐磨损性能与抗开裂性能都有重要的影响。因此,建立激光熔覆金属陶瓷复合涂层的数学模型,对正确理解激光束、复合粉末与基材三者之间的相互作用过程,合理选择陶瓷相颗粒的粒径与激光加工工艺参数都有重要的理论意义与实用价值。曾晓雁等人[9]应用网格与定量金相法提出了计算碳化钨颗粒平均间距的模型,即:

$$d = \frac{2}{\pi} \bar{D} \left[\sqrt{\frac{0.785}{f_5} - 1} \right] \quad (1)$$

式中: d 表示碳化钨颗粒间的平均间距; f_5 表示碳化钨的面积分数; \bar{D} 表示碳化钨颗粒的平均粒径。该式表明碳化钨颗粒间的平均间距与颗粒粒径成正比,而随碳化钨面积分数的增加而减小。因此,碳化钨颗粒的质量百分数越高,平均粒径越小,对粘结金属的“阴影保护效应”越强,复合涂层也就具有更优异的耐磨损性能。

早在 1992 年, Hoadly 等人^[10]应用有限元方法模拟了离轴送粉法激光熔覆过程的温度场,在建立模型时他们假设激光熔覆是一个准静态二维模型,并且认为熔覆粉末被吹入激光熔池后快速地混合均匀。后来 Picasso 等人^[11]也应用有限元方法建立了激光熔覆过程的二维静态模型,研究了热毛细管效应与粉末喷射力对熔池的形状、温度场与速度场的影响。由于实际的激光熔覆是一个动态三维过程,因此,上述二维模型的建立虽然对理解激光熔覆过程有一定的帮助,但模型与实际激光熔覆过程相差较大,导致计算结果的实用性并不强。近年来,激光熔覆模型的建立向三维动态方向发展,使模型与实际激光熔覆过程越来越接近,向在线预测与控制熔覆层质量迈进了一大步。Toyerkani 等人^[12-13]建立了离轴送粉法激光熔覆过程的三维有限元模型,研究了激光加工工艺参数如激光功率、扫描速度、脉冲形状以及粉末流速对熔覆层几何形状的影响。后来加拿大 A. Fathi 等人^[14]将上述模型进行了延伸与发展,在该模型中他们认为激光热源由无限个点热源组成,因此,使用移动点热源与重叠原理求解热传导方程。利用该模型可以根据熔覆层的厚度及激光扫描速度精确预测熔池深度、稀释率及激光加热区的温度分布,可实时控制应用,从而为控制与提高熔覆质量奠定了基础。

2 存在的问题与解决方法讨论

从以上文献的研究结果可以看出,激光熔覆金属陶瓷复合涂层技术并未在工业中得到广泛应用,关键原因是激光熔覆效率低且熔覆层极易产生裂纹。解决激光熔覆金属陶瓷复合涂层开裂的途径主要有:预热与后热、开发专用合金粉末、优化工艺参数、加入稀土元素等。预热与后热方法被认为是最有利于消除裂纹的方法之一,一般是采用加热炉或气体火焰对基材进行预热与后热处理,从而来减小熔覆层与基材间的温度梯度,达到提高熔覆层抗开裂性能的目的。但由于该方法受热过程缓慢,会引起熔覆层组织粗化,从而导致机械性能恶化。此外,

对于大型零部件如大型轧辊、曲轴等,需要大型的加热炉,长时间的加热与保温容易氧化铁皮,而且装卸极不方便,不但工作效率低,而且还容易灼伤操作人员,应用前景不容乐观。专用合金粉末开发周期长,并在实用期间需要进行大量的实验,导致开发成本高居不下,而通过调整激光工艺参数来抑制熔覆层开裂的作用也有限。添加稀土元素是否有助于提高熔覆层抗开裂性能目前还存在着很大的争议,因此,寻找一种运行成本低、易操作且能提高激光熔覆效率与消除熔覆层裂纹的方法成为了研究人员梦寐以求的目标。

3 激光感应复合快速熔覆新方法

尽管国内外的专家学者提出了许多防止激光熔覆金属陶瓷复合涂层开裂的措施^[15],但都未从根本上消除裂纹。基于此,本文提出了激光感应复合快速熔覆的新方法,其基本原理是伦兹定律,即随时间变化的电磁场会形成涡流,根据焦耳效应,涡流可以产生热。因此,利用高频感应加热线圈在工件表面产生的集肤效应^[16],可使工件表面的温度只需几秒钟就可达到红热状态,然后将激光束定位到感应加热区,实现激光热源与感应加热源的复合,同时快速进行激光熔覆。本实验室已在 A3 钢表面进行了激光感应复合快速熔覆实验,熔覆粉末为 Ni60A+20 wt% WC 的复合粉末,采用图 2 所示的装置进行激光感应复合快速熔覆时,激光扫描速度达 3 000 mm/min,粉末沉积率为 (52.24~82.67)g/min,获得了熔覆层宽度为 (3~5)mm,厚

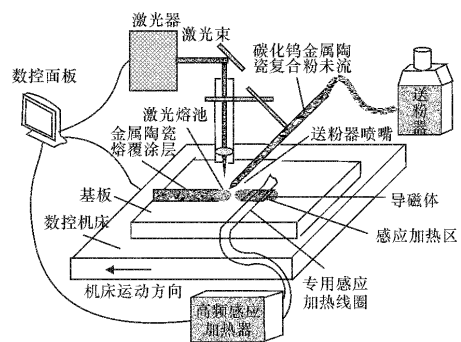


图 2 激光感应复合快速熔覆装置示意图

Fig. 2 Schematic for setup of laser induction hybrid rapid cladding

度为 (0.6~1.2)mm 的金属陶瓷复合涂层,经检测没有气孔与裂纹。通过引入高频感应加热器,激光熔覆的效率得到大大提高,其显著的优点如下:

1) 感应加热装置尺寸小,开启迅速,可取代体

积大、启动和关闭时间较长、效率低的加热炉;

2) 被加热的工件不需要同感应器接触,加热时间短,装卸方便,而且可以对工件进行实时加热并同时激光熔覆,比传统激光熔覆的效率高一~5倍;

3) 可对需要加热的区域精确定位,而不必对工件进行整体加热,因此对工件尺寸与形状无限制。对于修复大尺寸工件如大型轧辊、曲轴等优势十分明显,应用前景十分广阔。

4 结束语

相比于传统的表面处理技术,激光熔覆技术在关键零部件表面修复与三维快速制造领域具有广阔的应用前景。关于激光熔覆的工艺、组织与性能演变规律的研究报道很多,而且取得了长足的进步。为了理解激光熔覆过程的机理,合理选择激光加工工艺参数,优化熔覆层的组织与性能,国内外的众多学者提出了许多关于激光熔覆的数学模型,对于在线控制与预测激光熔覆层的几何形貌与质量具有重大的理论意义与实用价值。目前,激光熔覆技术最大的问题是熔覆层容易产生裂纹,特别是在大型机械零部件以及难焊接基材上进行表面修复时更加明显,严重阻碍了激光熔覆技术的广泛应用。虽然解决熔覆层开裂的途径有很多,但都未从根本上解决熔覆层开裂与熔覆效率的问题,导致激光熔覆技术的发展现状远未达到预期的目标。基于此,本文提出了激光感应复合快速熔覆的新方法,获得了无气孔与裂纹的金属陶瓷复合涂层,而且熔覆效率相对于传统的激光熔覆技术可以提高1~5倍,为提高熔覆效率与消除熔覆层的裂纹开辟了一种新的途径,使激光熔覆金属陶瓷复合涂层技术走出实验室,实现工业化应用指日可待。

参考文献:

[1] 王勇刚,马晓宇. 激光在汽车工业中的发展现状与应用[J]. 应用光学,2004,25(5):1-2.
WANG Yong-gang, MA Xiao-yu. The application and present situation of lasers in the automobile industry [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25 (5):1-2. (in Chinese)

[2] 李胜,胡乾午,曾晓雁. 激光熔覆专用铁基合金粉末的研究进展[J]. 激光技术,2004,28(6):591-599.
LI Sheng, HU Qian-wu, ZENG Xiao-yan. Research development of Fe-based alloy powder for laser cladding [J]. Laser Technology, 2004, 28(6):591-594. (in Chinese)

[3] 杨胶溪,左铁钊,徐文清,等. 球墨铸铁表面激光熔覆

钴基合金涂层的研究[J]. 激光技术,2006,30(5):517-519.

YANG Jiao-xi, ZUO Tie-chuan, XU Wen-qing, et al. The research of laser cladding Co-based alloy coating on ductile cast iron [J]. Laser Technology, 2006, 30 (5):517-519. (in Chinese)

- [4] 曾晓雁,陶曾毅,朱蓓蒂,等. 激光制备金属陶瓷复合涂层技术的现状与展望[J]. 材料科学与工程,1995,13(4):8-14.
ZENG Xiao-yan, TAO Zeng-yi, ZHU Bei-di, et al. Laser producing ceramic-metal composite coating technology-state of the art [J]. Materials Science & Engineering, 1995,13(4):8-14. (in Chinese)
- [5] 李强,雷延权,张永忠,等. 激光熔覆(WC+W₂C)p/Ni 基金属复合涂层的微观结构特征[J]. 材料科学与工艺,2002,10(1):5-10.
LI Qiang, LEI Ting-quan, ZHANG Yong-zhong, et al. Microstructure of laser clad (WC + W₂C)p/Ni based alloy composite coatings [J]. Material Science and Technology, 2002,10(1):5-10 (in Chinese)
- [6] CHIANG K A, CHEN Y C. Microstructural characterization and microcopy analysis of laser cladding Stellite12 and tungsten carbide [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (2):297-302.
- [7] 曾晓雁. 激光熔覆金属陶瓷复合层中陶瓷相的行为研究[D]. 武汉:华中理工大学,1993.
ZENG Xiao-yan. Behavioral investigation of ceramic phase in laser cladding ceramic-metal composite coating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1993. (in Chinese)
- [8] 吴新伟,曾晓雁,朱蓓蒂,等. 镍基WC金属陶瓷激光熔覆涂层的熔化烧损规律[J]. 金属学报,1997,33(12):1282-1288.
WU Xin-wei, ZENG Xiao-yan, ZHU Bei-di, et al. Heat damage of laser clad Ni-based WC coating [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(12):1282-1288. (in Chinese)
- [9] 曾晓雁. 激光熔覆金属陶瓷复合层中陶瓷相的分布[J]. 华中理工大学学报,1995,23(2):76-80.
ZENG Xiao-yan. Distribution of ceramic phases in laser-cladded ceramic-metal composite coatings [J]. Journal of Huazhong university of Science and Technology, 1995,23(2):76-80. (in Chinese)
- [10] HOADLEY A F A, RAPPAZ M. A thermal model of laser cladding by powder injection [J]. Metallurgical Transaction B, 1992, 23 (10): 631-642.
- [11] PICASSO M, HOADLEY A F A. Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool [J]. International

Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1994,4(1):61-83.

- [12] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Three-dimensional finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of powder federate and travel speed on the process [J]. Journal of Laser Application, 2003, 15 (3):153-160.
- [13] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004,41(6):849-867.
- [14] FATHI A, TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, et al. Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006(39):2613-2623.
- [15] 赵亚凡,陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施[J]. 激光技术,2006,30(1):16-22. ZHAO Ya-fan, CHEN Chuan-zhong. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer[J]. Laser Technology, 2006,30(1):16-22. (in Chinese)
- [16] JANG J Y, CHIU Y W. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating [J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27(11/12): 1883-1894.