

激光熔覆层表面皱折成因的研究

黄国栋 王新林

(中南工学院激光加工技术研究所, 衡阳, 421001)

摘要: 本文就激光熔覆过程中, 熔覆层表面极易出现的波纹皱折等缺陷的成因及解决途径进行了深入的分析研究。

关键词: 表面皱折 激光熔池 对流传质

Investigation of reason of causing surface fold in laser melting-cladding layer

Huang Guodong, Wang Xinlin

(Institute of Laser Processing Technology, Central-South Institute of Technology)

Abstract: In laser melting-cladding process, the surface fold easily happen. In this paper, the reason of causing surface fold in laser melting-cladding layer is investigated, and it shows the solution way.

Key words: surface fold laser clad pool convective mass transport

一、引 言

激光熔覆技术从70年代初提出至今已近二十年了。这项新技术近十余年在国外发展很快,在某些发达国家已经进入部分工业应用阶段,开辟了材料加工的新领域,特别是在军工、汽

22 Allik T H, Chai B H T, Merkle L D. Crystal growth and spectroscopic analysis of Cr⁴⁺-doped melilite compounds, in advanced solid-state lasers, Vol. 10 of the OSA proceeding series, George Dubé and Lloyd Chase, eds., Optical Society of America, Washington, D. C., 1991, 84~86

* 作者简介: 张国威, 男, 1933年3月出生。教授。主要从事染料和固体可调谐激光器, 分光技术, 应用激光光谱技术和红外光波导等领域的教学和研究工作。

徐天华, 男, 1942年7月出生。高级工程师。主要从事晶体生长及品质鉴定研究工作, 先后进行了 YAG: Nd, YAG: Er, YAG: Tm, YAG: Cr, Ho, Tm, YAG: Ho, Tm, YAG: Nd, Lu, YAG: Cr⁴⁺, La_(1-x)Nd_xMgAl₁₁O₁₉ (LNA 或 LMA: Nd), LMA: Er, Mg₂SiO₄: Cr⁴⁺, KNP, LN 等晶体的生长研究。

收稿日期: 1994-06-27

车和能源等工业领域应用相当广泛,并取得了极好的经济效益和社会效益。

近些年国内从事激光熔覆研究的单位逐渐增多,关于工艺试验的资料报导陆续递增;但是结合实验关于激光熔覆合金层质量缺陷的成因和预防措施的研究报导却极为少见,国内科技部门对此也未组织专项攻关,因此限制了激光熔覆技术在国内迅速推广应用。作者根据多年从事这方面的研究实践,对激光熔覆过程中极易出现的覆层表面波纹皱折缺陷的成因进行了深入的分析研究。现分述如下。

二、试验方法

1. 试样的制备

试样材料为 Ni-Cr 不锈钢,锻成 25mm×20mm×10mm 条块,核阀零件为秦山核电站用 20HJ63Y 截止阀阀瓣和阀座(优质 Ni-Cr 不锈钢)。工件表面的覆层是根据核阀工况条件专门设计炼制的合金粉末,并采用本所自行研制的 J105 系列强化结合剂和相应的覆层工艺进行制备。

2. 试验条件

采用 HGL-90 型 5kW 横流 CO₂ 连续波激光器进行研试,输出多模光束,波长 10.6μm,导光系统由反射镜、GaAs 透镜和光闸等部件组成。将激光束聚焦成具有一定光强、功率密度均匀和一定尺寸的矩形光斑,射向工件表面进行激光熔覆加工。

试样、零件夹固在三维激光加工机上,用 MNC801 微机系统控制三维工作台,使工件按工艺要求沿三维轨迹作相对于光束以一定的速度进行扫描。

采用奥地利产 MeF₃ 大型光学金相显微镜及附件显微硬度计、测微尺进行金相组织、硬度和熔覆层厚度分析;用 EDAX 能谱仪进行微区成分和熔覆层稀释率分析;用快速滑动磨损试验机对工件进行抗擦伤磨损试验分析;用高温冲击磨损试验机对工件进行高温疲劳冲击磨损试验;用电热恒温水浴锅对工件进行腐蚀试验对比分析。

三、激光熔覆层表面皱折成因的分析

1. 表面皱折产生的基本原因

在激光熔覆过程中,在激光作用下,熔体中从内到外、从上到下都存在着温度梯度 $\frac{dT}{dx}$,在熔体表面上存在表面张力梯度 $\frac{d\sigma}{dT}$ ^[1]。两者的综合作用使熔体形成如图 1 所示的表面张力梯度及由它决定的液流方向。正是这个表面张力梯度驱使熔池中心熔体向边界流动,结果使得熔池边界高于中心熔体,出现了熔体的“落差”;由于熔体“落差”重力的驱动,又使得熔体由边界底部向中心流动,如图 1 所示。当表面张力和重力达到平衡状态后,出现了对流现象,对流的出现,在激光熔池中起到了传质作用。T. R. Anthony 认为熔池中

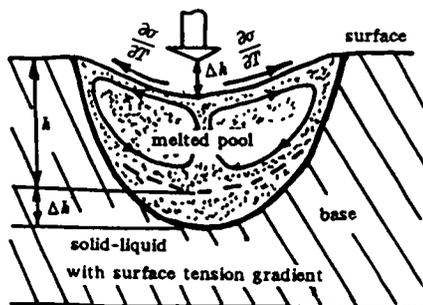


Fig. 1 Surface tension flow in melting pool

对流现象的出现,正是激光熔覆层表面极易产生凹凸波纹皱折缺陷的基本原因。另一方面激光熔池中的对流现象,有利于减少熔覆层中的气体夹杂物,有利于熔池中合金成分的均匀搅拌和

净化作用。

利用苈烯-三环烯合金的透明性,可以直接观察到熔池中的对流和稳流过程,如图 1 所示;激光单道和多道熔覆层表面的波纹皱折如图 2 所示。

2. 影响熔池中熔体对流的因素

在激光熔覆过程中,当激光与金属的交互作用达到稳态时,可分别从三个方面建立激光熔覆的物理方程:连续方程、运动方程和能量方程。

熔体的温度梯度 $\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}\right)$ 、表面张力温度系数 $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)$ 、熔体材料的粘度 (α, μ) 及其密度 ρ 等因素都在不同程度直接影响熔池中合金熔体的能量传递及其传质的特征。

从上述对激光熔池对流作用影响因素的分析可知,概括起来在激光熔覆过程中影响熔池中合金熔体的对流因素可分为两大类:

(1) 工艺性因素 例如激光功率、扫描速度、光斑模式、离焦量、光束能量分布特性等,由于它们的综合作用,决定了熔体的表面温度梯度,进而影响到熔池中合金熔体的对流和波纹皱折的形成。

(2) 材质性因素 如熔池中合金熔体的成分、浓度、粘度、密度、热物性参数等,由于这些因素的变化,影响了熔池中的传热和传质,进而影响熔体的运动和快速凝固后熔覆层表面形成凹凸波纹皱折,因而影响熔覆层表面的质量。

上述激光熔池中合金熔体的连续方程、运动方程、能量方程和特定情况下的边界条件联立解,可以定量地描述在激光作用下的某一时刻,激光熔池内的合金熔体对流状态。但是这种联立解比较繁复,近年多采用多种近似方法,例如差分法、有限元法,辅以计算机运算而获得某些特定解。

3. 从激光熔覆规律分析熔层皱折的成因

(1) 熔覆速度极限与熔层皱折的关系 Savage 提出研究焊接过程的模型,可用于对激光熔覆层的熔化和凝固的研究^[2]。由此发现熔池的形状决定于熔化速度 v 和凝固速度 R ,两者之间存在如下关系:

$$R = v \cos \varphi \tag{1}$$

φ 为指定点上固液界面的法线与熔化速度矢量之间的夹角如图 3 所示。

(1) 式是在假定熔池形状保持不变时成立的。

在激光束中心线上(E 点 $\varphi=0$),具有最大的凝固速度($R=v$)。当激光束功率一定,扫描速度 v 增大到某一值时,激光束仅能使粉末层熔化,而基体未能被熔化,基体和粉末之间界面能增大,熔体的表面张力占了

优势,因此激光熔覆层呈现不连续泪滴状、凹凸不平的皱折。定义出现这现象的最小扫描速度为激光熔覆速度极限。

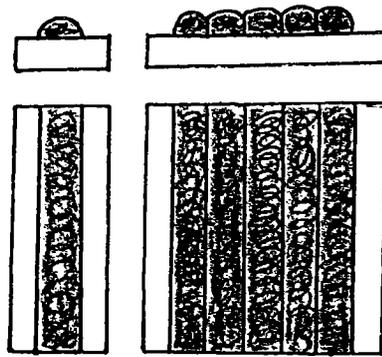


Fig. 2 Surface fold of laser melting-cladding layer in one line and several line scanings

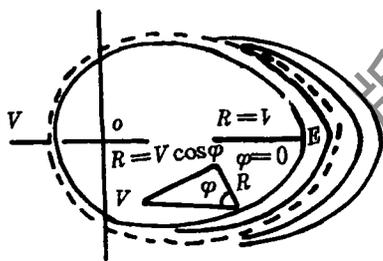


Fig. 3 Schematic diagram of moving melting pool

对不同的合金熔覆层和基体材料,由于其物理性能存在着相当大的差别,因此激光熔覆速度极限是不相同的。

(2)熔覆工艺参数对熔层表面形态的影响 当采用同步供粉熔覆时,会出现三种典型的单道激光熔层形状,如图4所示。

图4a为高供粉速率和低功率密度条件下形成的。

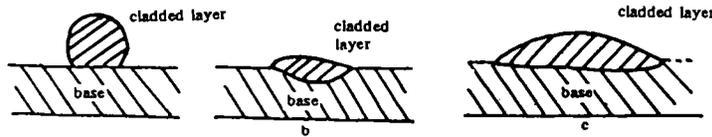


Fig. 4 Cross sectional view of three kinds of typical laser melting-cladding layers

图4b为低供粉速率、高功率密度条件下形成的。

图4c为最佳供粉速率和功率密度条件下形成的。三种熔层形状相比较,图4c是最理想的熔覆层,而图4a熔层与基体结合不牢;图4b熔层被基体严重稀释,两者均导致形成皱折熔覆层。

此外,在激光重迭扫描时,重迭带之间也极易形成凹凸不平的皱折,若保证重迭有足够的带宽(一般为50%~60%的重迭度),可以获得平整光滑的激光熔覆层。

四、试验结果

项目研究在初、中期段,由于没有深入了解激光熔层皱折形成的基本原因,未能从工艺、材质两方面综合因素来调控激光熔池的对流传质、熔体运动和熔覆速度极限,从而未能控制覆层皱折的形成,因此熔覆的试样常常出现泪滴状、冰棱状皱折覆层或凹凸波纹状的皱折覆层。

经过攻关探索、总结经验,深入研究激光熔覆的基本规律,探求皱折的成因,采取一系列有效措施,严格控制熔覆过程中工艺性和材质性等多因素的综合影响,成功地处理了一大批试样和核阀零件,激光一次覆层厚度已能稳定达到3.0~3.5mm,激光熔覆层表面光滑平整,完全消除了熔覆层极易出现的泪滴状和波纹状皱折缺陷,核阀激光熔覆层经国内权威单位用高精度进口仪器检测,已达到或超过了核阀零件的各项技术指标,研究成果已在北京通过了部级鉴定,获得专家们的高度评价。目前这一科技成果正在进入市场推广应用之中。

参加项目前期工艺研试工作的有华中理工大学激光重点实验室的郑启光教授和陶星芝副教授。

参考文献

- 1 Anthony T R, Cline H E. J A P. 1977;48(9):3888~3893
- 2 Giordaw L, Ranous E. 激光在奥氏体钢表面焊覆司太立合金方面的应用. 第三届国际热处理会议论文集,北京:机械工业出版社,1985:483~487

作者简介:黄国栋,男,1938年出生。副教授。现从事激光熔覆、表面改性等项加工技术研究工作。

王新林,男,1970年出生。助教。现从事激光器件和激光熔覆加工技术研究工作。

收稿日期,1994-05-10 收到修改稿日期,1994-06-02