

文章编号: 1001-3806(2010)05-0587-04

复杂曲面有色金属3维激光拼焊的跟踪控制研究

龚时华, 喻俊峰, 黄禹, 杨建中, 王平江

(华中科技大学 制造装备数字化国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为实现复杂曲面有色金属高功率激光拼焊过程中3维拼缝的精确跟踪, 采用拼缝实时测量并进行拼缝形变动态补偿的方法, 开展了基于7轴联动的3维拼缝焊接-测量一体化控制算法和关键技术的研究, 包括运动控制数学模型、焊接与测量路径规划、焊接过程的实时检测与动态补偿等, 并用4kW光纤激光器进行了厚度3mm以下有色金属焊接试验, 验证了所提出的算法。结果表明, 研究的3维拼缝焊接-测量一体化控制系统能够快速、准确地实现3维拼缝的实时焊接与动态补偿, 满足3维焊接的跟踪控制精度要求。

关键词: 激光技术; 激光焊接-测量一体化; 3维拼缝; 动态补偿; 跟踪控制

中图分类号: TN249; TG439.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.004

Study on 3-D joint seam tracking control in non-ferrous metal complicated curve surface laser welding

GONG Shi-hua, YU Jun-feng, HUANG Yu, YANG Jian-zhong, WANG Ping-jiang

(State Engineering Research Center of Manufacturing Equipment Digitization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to realize 3-D joint seam tracking accurately in the process of non-ferrous metal complicated curve surface laser welding, the 3-D joint seam real-time measurement was adopted to compensate for the joint seam deformation dynamically. The control arithmetic and key technologies for 3-D seam welding-measuring integration control system were studied, including the mathematics model of motion control, the scheme of welding path and measuring path, the real time inspection and dynamic compensation in welding, etc. The proposed arithmetic was testified by the experiment in which the non-ferrous metal with less than 3mm thickness was welded by 4kW fiber laser. The test indicates that the 3-D joint seam welding-measuring integration control system can achieve the 3-D joint seam's online inspection, real time welding and dynamic compensation quickly and precisely, which satisfies the measuring system's precision requirement.

Key words: laser technique; laser welding-measuring integration; 3-D joint seam; dynamic compensation; tracking control

引言

随着航空工业的发展, 航空整体结构件的制造正在由铆接过渡到激光焊接来完成, 以此减轻飞行器的重量。航空结构件一般是由铝合金、铝锂合金等有色金属构成, 具有形貌复杂、薄壁、变厚度、刚度差等特点, 使得激光焊接过程中容易出现拼缝变形。对于大型有色金属结构件, 影响拼缝变形的因素主要有3个方面^[1]: (1) 由于工件的尺寸大, 安装定位时往往存在一定的位置偏差; (2) 受工件加工精度限制, 很难保证

整条拼缝尺寸的一致性和重复性; (3) 在焊接过程中, 焊接热应力会导致拼缝形状和间隙宽度发生变化。

为保证焊接质量, 基于现场拼装状态的3维拼缝焊接必须通过实时测量实现对焊接头位置、姿态和激光能量的动态调整, 此时需要处理的信息量大, 控制过程也十分复杂^[2-3]。目前, 3维拼缝的激光焊接一般采用多自由度机器人配上视觉来完成^[4-5], 但随着3维拼缝焊接要求的提高, 如焊接速率达到5m/min、拼缝宽度小于0.1mm, 采用机器人焊接就不能满足焊接的速率和精度要求, 需要研究基于视觉测量的3维拼缝多轴联动激光拼焊的跟踪控制理论及关键技术。

1 3维拼缝焊接-测量一体化控制模型

当焊接对象为3维拼缝曲线, 并采用视觉测量装置对其进行测量时, 根据激光焊接工艺要求, 激光焊接装置(焊接头)与测量装置(测量头)在焊接过程中必

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875097)

作者简介: 龚时华(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光及相关特种加工、机电一体化、专用特种装备、数控技术等方向的科研及教学工作。

E-mail: gongshihua1@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-05-13

须满足如下约束条件:(1)焊接头轴线与拼缝法矢夹角保证在一定范围内(小于 7°);(2)焊接激光焦点运动轨迹严格处于待焊拼缝中心位置;(3)测量头到拼缝曲面的距离,使其尽可能在测量景深范围内;(4)测量头的偏转角度,使激光扫描光带与焊缝垂直或基本垂直;(5)测量头的俯仰角度,使其主光轴基本垂直于拼缝曲面;(6)测量头相对于焊接头存在前导偏置距离,即拼缝测量点在焊接点前方。

在该几何约束条件进行分析的基础上,确立了如图1所示的焊接机床结构方案。机床的结构为 X ,

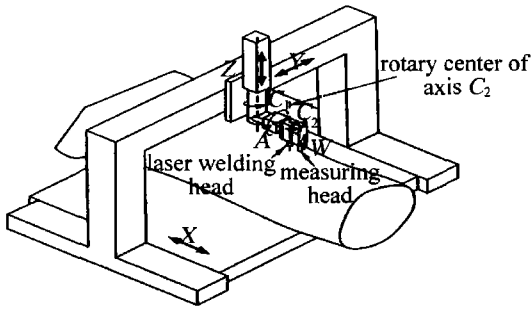


Fig. 1 Machine tool motion and its structural scheme

Y, Z, C_1, A, C_2 和 W 共7个轴,其中前5轴 X, Y, Z, C_1, A 保证焊接头位置和姿态,后2轴与前5轴一起配合保证测量头的位置和姿态。

为满足3维拼缝激光焊接-测量一体化的控制要求,控制平台采用PC+NC并行双CPU结构的开放式数控系统,上位机由工业控制计算机(industrial personal computer, IPC)构成,实现后台管理及人机交互;下位机选用开放式运动控制器,实现前台的实时运动控

$$\begin{cases} x_i = x_{2i} - x_{3i}(\cos C_{1i}\cos C_{2i} - \sin C_{1i}\cos A_i\sin C_{2i}) + y_{3i}(\cos C_{1i}\sin C_{2i} + \sin C_{1i}\cos A_i\cos C_{2i}) + \\ z_{3i}\sin C_{1i}\sin A_i - D_{45X}(\cos C_{1i}\cos C_{2i} - \sin C_{1i}\cos A_i\sin C_{2i}) + \\ D_{45Y}(\cos C_{1i}\sin C_{2i} + \sin C_{1i}\cos A_i\cos C_{2i}) - (D_{45Z} + W_i)\sin C_{1i}\sin A_i - \\ D_{34X}\cos C_{1i} + D_{34Y}\sin C_{1i}\cos A_i - D_{34Z}\sin C_{1i}\sin A_i - D_{23X}\cos C_{1i} + D_{1WX} \\ y_i = y_{2i} - x_{3i}(\sin C_{1i}\cos C_{2i} + \cos C_{1i}\cos A_i\sin C_{2i}) + y_{3i}(\sin C_{1i}\sin C_{2i} - \cos C_{1i}\cos A_i\cos C_{2i}) - \\ z_{3i}\cos C_{1i}\sin A_i - D_{45X}(\sin C_{1i}\cos C_{2i} + \cos C_{1i}\cos A_i\sin C_{2i}) + \\ D_{45Y}(\sin C_{1i}\sin C_{2i} - \cos C_{1i}\cos A_i\cos C_{2i}) + (D_{45Z} + W_i)\cos C_{1i}\sin A_i - \\ D_{34X}\sin C_{1i} - D_{34Y}\cos C_{1i}\cos A_i + D_{34Z}\cos C_{1i}\sin A_i - D_{23X}\sin C_{1i} + D_{1WY} \\ z_i = z_{2i} - x_{3i}\sin A_i\sin C_{2i} - y_{3i}\sin A_i\cos C_{2i} + z_{3i}\cos A_i - D_{45X}\sin A_i\sin C_{2i} - \\ D_{45Y}\sin A_i\cos C_{2i} - (D_{45Z} + W_i)\cos A_i - D_{23Y}\sin A_i - D_{23Z}\cos A_i + D_{1WZ} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i, y_i, z_i 为 X, Y, Z 这3个轴的运动量; A_i, C_{1i}, C_{2i} 为旋转轴 A, C_1, C_2 的角度; W_i 为测量头上 W 轴的运动量; $D_{45X}, D_{45Y}, D_{45Z}, D_{34X}, D_{34Y}, D_{34Z}, D_{23X}, D_{23Y}, D_{23Z}, D_{1WX}, D_{1WY}, D_{1WZ}$ 为与机床结构有关的常数。

3维拼缝视觉测量系统由具有远心特性的远心镜头、CCD相机、两个绿色线光源发生器和两个红色线光源激光发生器等元件构成,如图2所示,通过基于灰度统计特征的信息提取算法,实现对3维拼缝宽度、中

制(即实现7个轴的运动控制)。

1.1 焊接头控制模型

焊接头由 X, Y, Z, C_1, A 这5个轴控制(X, Y, Z 为平动轴, C_1 是绕 Z 轴的旋转轴, A 为绕 X 轴的旋转轴)。焊接过程中,当焊接头姿态调整的同时必须保证激光焦点的空间位置不变,这就要在调整光头姿态的同时补偿姿态的变化对焦点空间位置的影响。

由于 A, C_1 两轴的旋转对 X, Y, Z 轴的空间位置将产生影响,所以要得到 X, Y, Z 轴电机实际运动的坐标位置,还需将空间绝对坐标转换为机床运动坐标,假设 $P_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ 为焊接点绝对坐标, R_A, R_{C_1} 为 A 和 C_1 两轴的旋转半径, A_i, C_{1i} 为 A 和 C_1 两旋转轴的角度,机床各轴运动的位移关系可由下式求出:

$$\begin{cases} x_i = x_{1i} + R_A\sin A_i\sin C_{1i} - R_{C_1}\cos C_{1i} \\ y_i = y_{1i} - R_A\sin A_i\cos C_{1i} - R_{C_1}\sin C_{1i} \\ z_i = z_{1i} + R_A\cos A_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_i, y_i, z_i 为 X, Y, Z 这3个轴的运动量。

1.2 测量头控制模型

测量头除了共用焊接头 X, Y, Z, C_1, A 5个轴外,还在焊接头上另外加了 C_2 和 W 两个轴,通过 C_2 轴调整测量头的 X 和 Y 值,保证测量装置激光扫描光带与拼缝基本垂直,通过 W 调整测量装置的轴向高度,使其满足景深要求。

假设 $P_{2i}(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ 为测量点在工件坐标系下的绝对坐标, $P_{3i}(x_{3i}, y_{3i}, z_{3i})$ 为测量坐标系得到的坐标,机床各轴运动的位移关系可由下式求出:

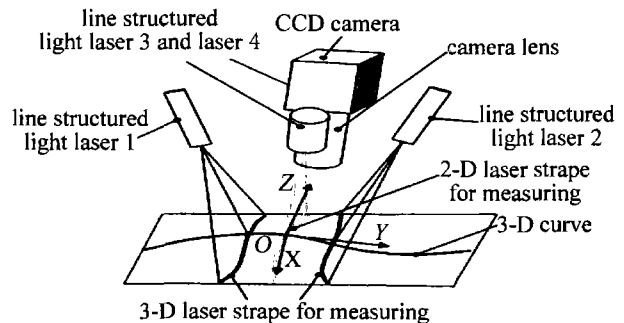


Fig. 2 Measuring unit for 3-D joint seam

心位置及其曲面法矢的精确测量^[6-7]。

2 3维拼缝激光焊接-测量轨迹规划及其跟踪控制

3维拼缝的激光焊接过程中,需要在焊接的同时对拼缝状态进行实时监测,并实时检测拼缝中心的位置变化和宽度变化,为焊接过程的动态补偿提供前处理。研究平台中,测量头与焊接头集成在一起,因此,需要引入如下焊接点与测量点之间的约束条件(见图3),来规划激光焊接与实时测量的运动轨迹:(1)测量

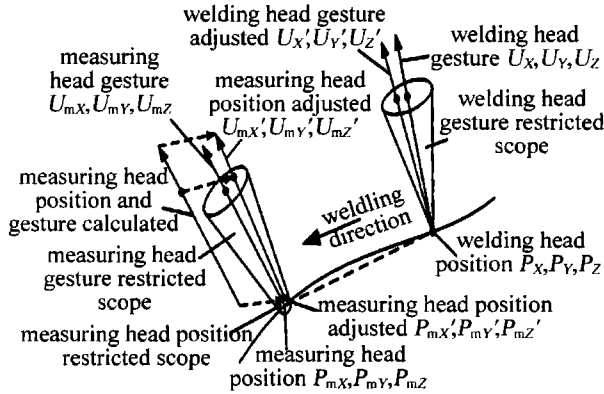


Fig. 3 Motion trajectory planning for measuring and welding

位姿强约束:测量装置的姿态与焊缝法矢的夹角小于 7° ,测量景深为 $\pm 1.5\text{mm}$;焊接头要保持激光焦点位置恒定,测量头要保持拼缝在视场范围;(2)焊接位姿强约束:焊接头的姿态与焊缝法矢的夹角小于 7° ;(3)测量与焊接位姿强相关:测量头与焊接头共用5个运动轴,测量头位姿受焊接头位姿的影响。

通过计算,在满足焊接和测量条件(焊接头和测量头轴线与焊接点和测量点处的法矢夹角控制在 7° 范围内)的情况下,通过调整焊接头与测量头的轴向方向,控制其与法矢的夹角在 7° 范围内。为了使焊接头和测量头位置和姿态满足功能要求,采用优化的方

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C_{1i} \sin \theta - \sin C_{1i} \cos A_i \\ \sin C_{1i} \cos A_i \cos \theta \\ \sin C_{1i} \cos \theta + \sin C_{1i} \sin A_i \cos \theta \\ -\cos A_i \sin C_{1i} & \cos A_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中, A_i, C_{1i} 为A和 C_1 两旋转轴的角度, θ 为测量光轴与焊接激光光轴的夹角, L 为 C_1 轴旋转中心到B轴中心与测头交点的距离。

偏差量 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 由控制系统进行实时补偿,保证控制系统进行实时拼缝跟踪,实现焊接轨迹的精

确控制。调整测量头的位置,即严格保证焊接头位置要求,通过微调焊接头姿态,从而调整测接头的位置和姿态到达满足测量的要求范围。目标函数为:

$$\min \sqrt{\Delta U_{mx}^2 + \Delta U_{my}^2 + \Delta U_{mz}^2} = \min \sqrt{(U_{mx}' - U_{mx})^2 + (U_{my}' - U_{my})^2 + (U_{mz}' - U_{mz})^2} \quad (3)$$

式中, $\Delta U_{mx}, \Delta U_{my}, \Delta U_{mz}$ 为测量头的姿态调整范围, (U_{mx}, U_{my}, U_{mz}) 为测量头在拼缝曲线上的法矢, $(U_{mx}', U_{my}', U_{mz}')$ 为测量头在拼缝曲线上调整后的法矢。

为了实现焊接过程中变形检测及补偿,在规划焊接点与测量点时,采用了测量点与焊接点匹配技术,使前面测量得到的拼缝曲线上某点的变化量能准确补偿到后面相应的焊接点上。如图4所示,测量点 P_2 规划

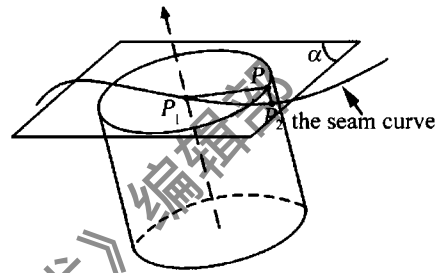


Fig. 4 Matching of the welding point and the measuring point

在以焊接点 P_1 为中心、以焊接点法矢方向为母线且以焊接头和测量头之间的距离为半径的圆柱柱面上,且柱面半径 PP_1 为测量头与焊接头之间的距离 L 。

3维拼缝的激光焊接过程中,由焊接头之前的测量头对拼缝进行实时检测,当检测到实际拼缝曲线与理论模型发生偏差时,就需要进行动态补偿,实现3维拼缝的精确跟踪。假设测量坐标系下测得拼缝轨迹某点的偏差为 $(\Delta y_{3i}, \Delta z_{3i})$,将该偏差分解到工件坐标系为 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$,根据机床结构及坐标系之间的关系,得到:

$$\begin{bmatrix} \cos C_{1i} \sin \theta + \cos C_{1i} \cos A_i \cos \theta \\ \cos C_{1i} \cos A_i \cos \theta \\ \cos C_{1i} \sin \theta - \cos C_{1i} \cos A_i \cos \theta \\ \cos A_i \sin \theta \\ -L \cos C_{1i} \cos \theta - L \sin C_{1i} \sin A_i \cos \theta \\ L \sin C_{1i} \cos A_i \\ -L \sin C_{1i} \sin \theta + L \sin C_{1i} \sin A_i \sin \theta \\ L \sin C_{1i} \cos A_i \\ -L \sin A_i \sin \theta + L \cos A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta y_{3i} \\ \Delta z_{3i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

确控制。

3 试验验证

为验证提出的算法,对5轴联动激光焊接机床(配备4kW高功率光纤激光器)进行了改造,将测量头

集成在焊接头上,以缝宽约为0.1mm、板厚3mm以下系列的有色金属3维拼缝为试验对象,采用视觉传感器对拼缝进行测量,如图5所示。



Fig.5 3-D joint seam measuring in non-ferrous metal

测量单元采集到的拼缝图像及测量结果如图6所示,图中3条平行线表明拼缝的宽度与方向角度,交叉点为测得的拼缝中心点。



Fig.6 Measuring results for a joint seam at different angle

将测量后的拼缝数据建立3维拼缝曲线模型,按1mm间隔进行粗插补,按照测量点与焊接点匹配的原则规划焊点与测点,如图7所示。图7中,对于每一行

-1399.9997 -160.8680 178.6846 0.1725 -0.2372 0.9571	-1297.2917 -163.6085 185.0259 -0.3225 -0.1914 0.9270
-1398.9746 -160.8449 178.5076 0.1684 -0.2327 0.9579	-1296.2781 -163.6935 185.3641 -0.3277 -0.1906 0.9253
-1397.9487 -160.8226 178.3350 0.1643 -0.2326 0.9586	-1295.2658 -163.7796 185.7078 -0.3330 -0.1898 0.9236
-1396.9221 -160.8013 178.1664 0.1602 -0.2325 0.9593	-1294.2577 -163.8669 186.0568 -0.3382 -0.1890 0.9219
.....
-1297.2917 -163.6085 185.0259 -0.3225 -0.1914 0.9270	-1207.1139 -174.1265 229.1791 -0.4577 -0.1627 0.8741
-1296.2781 -163.6935 185.3641 -0.3277 -0.1906 0.9253	-1206.2191 -174.2330 229.6276 -0.4569 -0.1628 0.8745
-1295.2658 -163.7796 185.7078 -0.3330 -0.1898 0.9236	-1205.3230 -174.3394 230.0763 -0.4561 -0.1629 0.8749
-1294.2577 -163.8669 186.0568 -0.3382 -0.1890 0.9219	-1204.4254 -174.4458 230.5249 -0.4554 -0.1630 0.8752

Fig.7 Scheme of welding points and measuring points

数据,左边是焊接点,右边是测量点,前面行规划的测量点数据出现在后面行的焊接点中。

按照上述规划方式,经过后置处理并结合激光焊接工艺^[8-10],并保证焊接速率的均匀性,生成相应数控程序代码。根据板厚选激光输出功率为3500W左右,焊接速率为3m/min,考虑到激光焊接的收尾效应,在规划焊接引出段焊接参量时,采取在焊接速率降低的同时降低激光功率的工艺措施,直到焊接结束。

本控制平台能实现焊接过程中的实时测量与动态补偿,为演示算法效果,设计了如下试验:将示教拼缝进行人为偏移来模拟拼缝变形,即固定拼缝曲线起始点,将拼缝曲线末端人为偏移4mm,则实际拼缝轨迹与编程的示教轨迹具有偏差,用焊接激光的同轴光走一遍轨迹,则光点逐渐偏离拼缝中心,如图8a所示。打开测量装置,并开启动态补偿功能,通过实时测量及动态补偿,焊接激光准确地落在拼缝中心,并沿拼缝前进,如图8b所示。

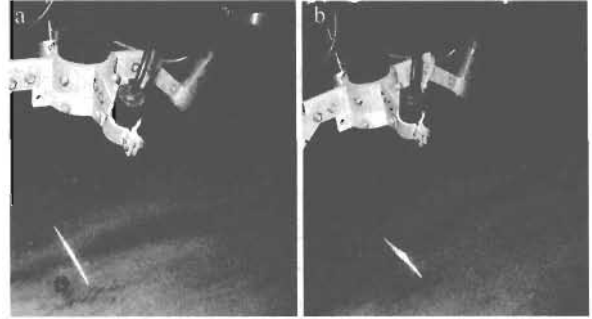


Fig.8 a—running without dynamic compensation b—running with dynamic compensation

对上述3维拼缝进行激光焊接的焊缝图像如图9所示。经检测,焊缝平均上宽2.64mm、下宽1.89mm、上余高0.34mm、下余高0.71mm,拉伸强度为213.65MPa,满足焊接质量要求。

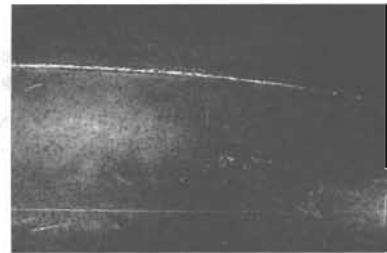


Fig.9 3-D welded seam image

4 结论

研究了基于视觉测量的3维拼缝激光拼焊的跟踪控制理论及关键技术,构建了基于7轴联动的3维拼缝激光焊接-测量一体化控制系统,能够快速、准确地实现3维拼缝的激光焊接与实时动态补偿。经实际检测,本控制平台能实现拼缝宽度小于0.1mm,焊接速率为5m/min的激光3维焊接及其跟踪控制,满足有色金属结构件3维激光焊接速率和精度要求。

参考文献

- [1] CHEN Zh X, SONG Y L, ZHANG J. Laser vision sensing based adaptive welding for aluminum alloy[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(8):714-718(in Chinese).
- [2] WANG Ch M, HU L J, HU X Y. Design of multi-sensor on-line monitoring system for laser welding[J]. Laser Technology, 2007, 31(5):503-506(in Chinese).
- [3] ZHU Q Y, WU S P, HU L J. Coaxial real time monitoring of gap defect in CO₂ laser welding process[J]. Laser Technology, 2006, 30(5):455-461(in Chinese).
- [4] MILLER M, MI B, KITA A, et al. Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring[J]. Mechatronics, 2002, 12(9/10):1259-1269.
- [5] SUN F Ch, LI H X, LI L. Robot discrete adaptive control based on dynamic inversion using dynamical neural networks[J]. Automatica, 2002, 38(11):1977-1983.
- [6] XU D, TAN M, LI Y. Visual measurement and control for robots[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:282-291(in Chinese).

(下转第595页)

3 结论

(1) 以 Fe 基合金粉末为基体材料, 添加 Cr₃C₂ (质量分数为 0.25), 采用激光熔覆技术可以制备出性能较好的 Cr₃C₂/Fe 基合金复合涂层, 而且涂层与母材结合良好。

(2) Fe 基合金涂层主要组成相为 α -Fe, Cr₂₃C₆ 等; 加入 Cr₃C₂ 后, 涂层中出现多种硬质相且 γ -Fe 的含量有所增加。

(3) Fe 基合金涂层显微组织由发达的 α -Fe 枝晶和多元共晶组织所组成, Cr₃C₂/Fe 基合金复合涂层典型组织为等轴固溶体和其间细小的共晶组织, 以及弥散分布其中的颗粒状组织, 同时分解的 Cr 融入枝晶, 起到固溶强化作用。Cr₃C₂ 的加入可以显著改变熔覆层的组织形貌, 细化熔覆层的组织, 抑制枝晶生长。

(4) 加入 Cr₃C₂ 可提高 Fe 基合金涂层显微硬度和高温抗氧化性。

参 考 文 献

- [1] ZHOU E H, ZENG X Y, WU X W, *et al.* Study on laser cladding of Fe-WC ceramic metal composite coating [J]. *Laser Technology*, 1997, 21(1):34-37(in Chinese).
- [2] HU M L, XIE Ch Sh, WANG A H. Development of material consistency of laser cladding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, 26(1): 1-6(in Chinese).
- [3] WANG Y H, TU D R, CUI L Sh. The ceramic phases in metal/ceramic composite coatings produced by laser cladding and their wear mechanism[J]. *China Surface Engineering*, 1998, 11(4):29-33(in Chinese).
- [4] PEI Y T, OUYANG J H, LEI T Q. Development of laser clad wear resistant composite coatings[J]. *Materials Review*, 1996, 10(1):60-63(in Chinese).
- [5] LI M X, HE Y Zh, SUN G Q. Microstructure of laser cladding Co-based alloy on Ni-based superalloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(6):17-20(in Chinese).
- [6] LI M X, LI H Sh, YUAN X M, *et al.* Effect of nano Al₂O₃ on Co-based alloy coating by laser cladding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(6):35-39(in Chinese).
- [7] YU X Q, YI W Zh, CHENG B D, *et al.* Binary alloy state atlas [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987:201-202(in Chinese).
- [8] LI Y Q, LIU J Y. High-temperature alloy grain boundary phase space [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1990:113-114(in Chinese).
- [9] ZHANG D W. Structure and wear behavior of laser cladding Ni + Cr₃C₂ composite coating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999:25-58(in Chinese).
- [10] ZHANG D W, ZHANG X P. Microstructure of laser clad Ni-based alloy and Ni + Cr₃C₂ composite coatings[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 32(2):152-157(in Chinese).
- [7] WU J Y, WANG P J. Vision system of bntt joint gap width measurement for laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 19(8):105-108(in Chinese).
- [8] WANG H H, YU G, PANG M, *et al.* Cylinder welding control technology of Integrated laser manufacturing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(11):1571-1576(in Chinese).
- [9] PHANIKUMAR G, MANJINI S, DUTIA P, *et al.* Characterization of a continuous CO₂ laser-welded Fe-Cu dissimilar couple [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2005, A36(8):2137-2147.
- [10] YANG W G, LIU Ch, CHEN W Zh, *et al.* Study on the control system for the weld appearance quality during laser welding with filler wire[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3):193-196(in Chinese).

(上接第 590 页)