

热影响区软化焊接接头应力分布特征及强度预测

朱亮, 陈剑虹

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点试验室, 兰州 730050)

摘要: 细晶粒钢焊接接头热影响区晶粒粗化引起强度的局部下降, 对接头承载能力的影响需要做出定量评价。有限元分析发现, 在热影响区软化焊接接头的拉伸试样上, Mises 等效应力分布具有确定的特征: 在软化的热影响区减小, 在与之相邻的焊缝区和母材区相应升高, 分布规律符合指数函数规律, 在热影响区与焊缝及母材的交界面上发生突变, 突变的幅度与交界面两侧材料的屈服应力差值及外加载荷有一定相关性; 在焊缝及母材区 Mises 等效应力增加量的积分等于热影响区减少量的积分。在此基础上提出了预测热影响区软化焊接接头强度的方法, 其预测结果与有限元分析有很好的 consistency, 可用于热影响区软化焊接接头强度的预测和高匹配接头的强度设计。

关键词: 焊接接头; 抗拉强度; 强度匹配; 有限元分析; 热影响区软化

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)03-48-04



朱亮

0 序 言

由于细晶粒钢在不增加合金元素的情况下, 可获得高韧性及高强度, 在工程上得到了广泛的关注。它所遇到的一个不可避免的问题是焊接接头热影响区晶粒粗化, 从而引起热影响区的局部软化^[1,2]。为了保证焊接接头的安全性, 有必要对这种焊接接头的局部软化对整个接头的承载能力做出客观评价。另外, 工程上为了不损失整个接头的承载能力, 在设计上采用高匹配的焊接接头, 需要知道焊缝及热影响区的不均匀屈服应力及几何尺寸与接头强度之间的定量关系, 给高匹配焊接接头的设计提供依据。利用有限元分析方法, 已经从屈服强度和抗拉强度两个方面对热影响区软化的焊接接头的强度进行了分析^[3~5]; 对软化的热影响区宽度及软化程度对接头强度的影响及其作用机制有了一定的认识。为了便于工程上的设计计算, 文中基于有限元分析结果, 研究热影响区软化的接头的应力分布规律, 提出预测这类接头屈服强度和抗拉强度的模型。

1 热影响区软化接头应力分布特征

文献[4]基于有限元计算, 已对热影响区软化接头的拉伸试样, 在加载过程中的主应力和 Mises 等效应力分布进行了分析, 并定性分析了软化热影

响区的宽度及软化程度对接头变形的影响。为建立预测热影响区软化焊接接头强度的预测模型, 对该类接头的单轴拉伸试样上 Mises 等效应力的分布规律作定量描述。

图 1 是热影响区软化接头单轴拉伸试样, 在加载过程中某一载荷下, Mises 等效应力 σ_m 在 x 方向的分布。母材的屈服强度 $\sigma_{0b} = 600$ MPa, 焊缝的屈服强度为 σ_{0w} 、热影响区的屈服强度为 σ_{0h} 。用

$$\beta_w = \sigma_{0w} / \sigma_{0b}, \beta_h = \sigma_{0h} / \sigma_{0b},$$

分别定义焊缝、热影响区的相对屈服强度, 用 δ 表示试样的长度方向上距焊缝中心的距离与试样厚度 t 的比值。用 $\delta_w = W_w / t$, $\delta_h = W_h / t$, $\delta_b = W_b / t$ 分别表示焊缝、热影响区、母材的相对长度, 其中 W_w 、 W_h 、 W_b 的意义见图 1 所示。为了说明 σ_m 的分布规律, 先假设试样中的焊缝相对半宽 δ_w 足够大, 如 $\delta_w = 5$, 而热影响区的相对宽度 $\delta_h = 0.5$, 对其进行有限元分析, 图 1 中实线表示了这种情况下 σ_m 的分布。显然, σ_m 在热影响区与焊缝和母材的交界处发生突变, 当离开交界面 2~3 倍的试样板厚的距离后趋于均匀分布, 而且接近于主应力 σ 。也就是说该区域的应力状态与力学性能均匀的单轴拉伸试样相同, 用该区域的主应力 σ 表示外加载荷的大小。以 σ 为基准, 对焊缝与热影响区及热影响区与母材交界面上 σ_m 的突变参数分别定义为 S_{wh} 、 S_{hw} 、 S_{hb} 和 S_{bh} , 其意义如图 1 所示。在热影响区两侧的焊缝区和母材区域, σ_m 的变化可以用指数函数来描述, 即

收稿日期: 2003-05-28

基金项目: 甘肃省科技攻关项目(GS002-A52-021)

$$\sigma_{mw} = \sigma + S_{wh} e^{a_w \eta_w}, \quad (1)$$

$$\sigma_{mb} = \sigma + S_{bh} e^{a_b \eta_b}, \quad (2)$$

式中: σ_{mw} 和 σ_{mb} 分别为焊缝区和母材区的 σ_m ; η_w 、 η_b 分别定义为在焊缝和母材区离开它们与热影响区的交界面的距离与板厚 t 的比值, 始终取正; a_w 和 a_b 是指数函数的系数。分析发现, 当 $\delta_w > 4$ 时, 在不同的载荷下它们都等于 -4 。在 $\delta_h < 0.8$ 的情况下, 热影响区的 Mises 等效应力的变化接近于线性, 可近似表示为

$$\sigma_{mh} = \sigma - S_{hw} + \frac{(S_{hw} - S_{hb})}{\delta_h} \eta_h, \quad (3)$$

式中: σ_{mh} 为热影响区的 σ_m ; η_h 定义为在热影响区中离开热影响区与焊缝的交界面的距离与板厚 t 的比值, 始终取正。

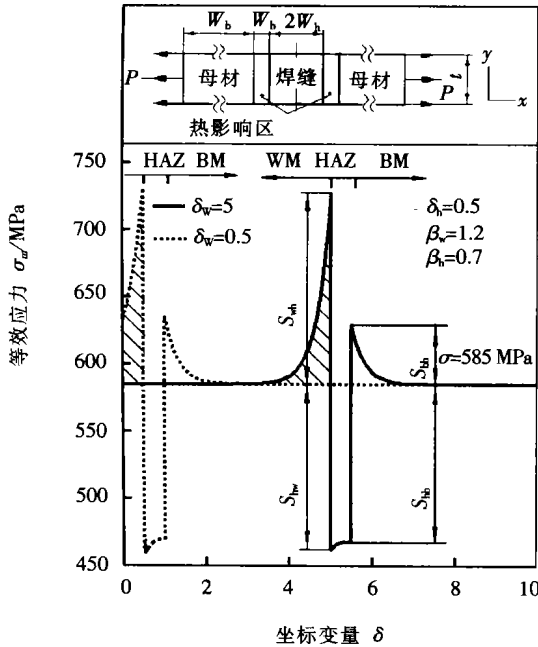


图1 Mises 等效应力的分布(BM—母材, WM—焊缝, HAZ—热影响区)

Fig. 1 Distribution of Mises equivalent stress

如果以远离热影响区的单轴拉伸应力状态区的应力 σ 为基准线, 将 Mises 等效应力 σ_m 与 σ 的差值沿试样的长度方向求积分, 即

$$I_m = \int (\sigma_m - \sigma) d\delta, \quad (4)$$

式中: δ 是沿试样的长度方向上的坐标变量。图 2 中的实线是 $\delta_w = 5$ 时 I_m 的分布。可以看出, 当 δ 大于 8 时, I_m 已接近于零。而 δ 等于试样相对半长时的 I_m 应该为 $(\sigma_m - \sigma)$ 在各区的长度上的定积分之和, $(\sigma_m - \sigma)$ 在焊缝和母材区的定积分为正, 而在热

影响区为负, 三者之和为零, 即

$$\int_0^{\delta_w} (\sigma_m - \sigma) d\eta_w + \int_0^{\delta_b} (\sigma_m - \sigma) d\eta_b = \int_0^{\delta_h} (\sigma_m - \sigma) d\eta_h. \quad (5)$$

图 1 中虚线表示了热影响区相对宽度仍为 $\delta_h = 0.5$, 焊缝的相对宽度 δ_w 减小到 0.5 的时, σ_m 沿试样的长度方向上的分布。可以看出, 在热影响区及母材区, σ_m 分布与实线所表示的情况相同, 但在焊缝区发生了一定变化, 尽管分布规律仍满足式 (1) 的指数规律, 指数函数的系数 a_w 明显改变了。图 2 中的虚线是这种情况下式 (4) 所表示的积分沿试样的长度方向上的分布, 可以看出, 式 (5) 仍满足, 而且, 在焊缝与热影响区的交界面处, 实线与虚线所表示的两种情况下的 I_m 相等, 也就是说, 在两

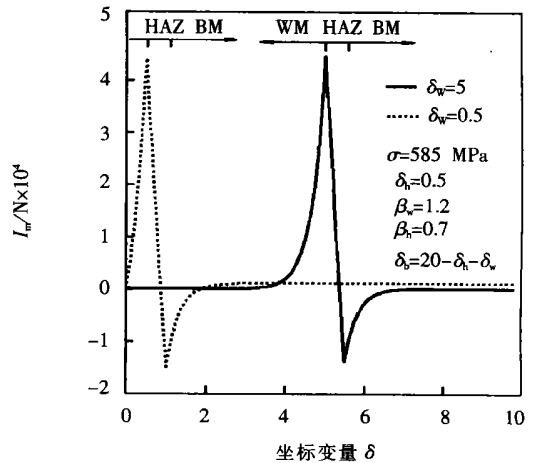


图2 Mises 等效应力沿试样长度方向的积分

Fig. 2 Integration of Mises equivalent stress along longitude of specimen

种情况下 $(\sigma_m - \sigma)$ 在焊缝区长度上的定积分相等, 即图 1 中虚线下的阴影面积等于实线下的阴影面积。因此, 当 $\delta_w < 4$ 时, 在焊缝区的 σ_{mw} 满足以下的方程

$$\int_0^{\delta_w} (\sigma_{mw} - \sigma) d\eta_w = \int_0^4 (\sigma_{mw} - \sigma) d\eta_w. \quad (6)$$

当 $\delta_w < 4$ 时, 式 (1) 中系数 a_w 可由式 (6) 来求得。

通过分析各种不同匹配形式的热影响区软化焊接接头的有限元计算结果, 发现以上所述的 σ_m 分布特征有一定的共性, 其特殊性只表现在各区交界面上 σ_m 的突变参数 S_{wh} 、 S_{hw} 、 S_{hb} 和 S_{bh} 的差异, 定义

$$Z = \frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_{0b}} (\frac{\sigma}{\sigma_{0b}} - \beta_h)^2, \quad (7)$$

式中: $\Delta\sigma_0$ 是交界面两侧的材料屈服应力的差值。通过分析各种不同形式匹配接头的有限元计算结果发现, 不管哪一种类型的交界面, 交界面上 Mises 等效应力的突变的幅度与参数 Z 有一定的相关性, 即

$$\Delta\sigma_m = (1.5748Z^3 - 0.4530Z^2 + 0.0540Z + 0.0005) \times 10^{11}, \quad (8)$$

式中: $\Delta\sigma_m = S_{wh} + S_{hw}$ 或 $\Delta\sigma_m = S_{bh} + S_{hb}$ 。

式(3)中的 $(S_{hw} - S_{hb})$ 主要取决于焊缝相对屈服强度和母材相对屈服强度的差; 同时与外加载荷有关。在载荷较小时, 尤其是在试样屈服以前, $(S_{hw} - S_{hb})$ 很小, 可以忽略; 在试样屈服以后的流变过程中, 满足以下方程

$$S_{hw} - S_{hb} = 145 \times 10^6 (\beta_w - \beta_b) (\frac{\sigma}{\sigma_{0b}} - \beta_h). \quad (9)$$

2 热影响区软化接头的强度预测

以上基于有限元计算结果的分析, 对热影响区软化接头应力分布进行了定量描述。根据以上的结论, 提出预测热影响区软化焊接接头强度的模型。

设在焊缝区离开它与热影响区的交界面的相对距离为 η_w 处, 取一微小段 $d\eta_w$, 根据单轴拉伸试样的真应变定义, 该微小段上的真应变为

$$\epsilon_w = \ln(\frac{d\eta_w}{d\eta_{w0}}), \quad (10)$$

式中: $d\eta_w$ 为变形过程中 $d\eta_{w0}$ 的当前长度; 同时考虑到幂函数规律加工硬化材料真应力应变关系

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{0w}} = (\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{0w}})^n, \quad (11)$$

式中: σ_w 、 ϵ_w 为焊缝区 η_w 处真应力和真应变, σ_{0w} 、 ϵ_{0w} 为焊缝金属屈服强度和屈服应变, n 为加工硬化指数。根据式(10)和式(11), 焊缝区变形过程中的当前长度可表示为

$$l_w = \int_0^{\delta_w} e^{\frac{\sigma_w}{E} (\frac{\sigma_w}{\sigma_{0w}})^{\frac{1}{n}}} d\eta_w. \quad (12)$$

同理可得母材和热影响区在流变过程中的当前长度

$$l_b = \int_0^{\delta_b} e^{\frac{\sigma_b}{E} (\frac{\sigma_b}{\sigma_{0b}})^{\frac{1}{n}}} d\eta_b, \quad (13)$$

$$l_h = \int_0^{\delta_h} e^{\frac{\sigma_h}{E} (\frac{\sigma_h}{\sigma_{0h}})^{\frac{1}{n}}} d\eta_h, \quad (14)$$

式中: E 为弹性模量; σ_w 、 σ_h 和 σ_b 分别为焊缝、热影

响区和母材区真应力, 根据式(1)、(2)、(3)可表示为

$$\sigma_w = \sigma + S_{wh} e^{a_w \eta_w}, \quad (15)$$

$$\sigma_b = \sigma + S_{bh} e^{a_b \eta_b}, \quad (16)$$

$$\sigma_h = \sigma - S_{hw} + \frac{(S_{hw} - S_{hb})}{\delta_h} \eta_h, \quad (17)$$

式中: σ 为单轴拉伸应力状态区的主应力。

根据式(7), 分别求得热影响区与焊缝和热影响区与母材交界面的参数 Z

$$Z_w = (\beta_w - \beta_h) (\frac{\sigma}{\sigma_{0b}} - \beta_h)^2. \quad (18)$$

$$Z_b = (\beta_b - \beta_h) (\frac{\sigma}{\sigma_{0b}} - \beta_h)^2. \quad (19)$$

代入式(8)可得

$$S_{wh} + S_{hw} = (1.5748Z_w^3 - 0.4530Z_w^2 + 0.0540Z_w + 0.0005) \times 10^{11}, \quad (20)$$

$$S_{bh} + S_{hb} = (1.5748Z_b^3 + 0.4530Z_b^2 + 0.0540Z_b + 0.0005) \times 10^{11}. \quad (21)$$

根据式(9)

$$S_{hw} - S_{hb} = 145 \times 10^6 (\beta_w - \beta_b) (\frac{\sigma}{\sigma_{0b}} - \beta_h), \quad (22)$$

根据式(5),

$$\int_0^{\delta_w} \int_0^{\delta_h} (\sigma_w - \sigma_h) d\eta_w d\eta_h \int_0^{\delta_b} (\sigma_b - \sigma) d\eta_b = \quad (23)$$

根据名义应力应变的定义,

$$\epsilon_{nom} = \frac{(l_w + l_h + l_b) - (\delta_w + \delta_b + \delta_h)}{\delta_w + \delta_b + \delta_h}, \quad (24)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{\sigma}{1 + \epsilon_{nom}} = \frac{(\delta_w + \delta_b + \delta_h)}{(l_w + l_h + l_b)} \sigma, \quad (25)$$

式中: ϵ_{nom} 和 σ_{nom} 分别为名义应变和名义应力。给定焊缝、热影响区和母材的相对宽度 δ_w 、 δ_h 和 δ_b , 以及相对屈服强度 β_w 和 β_h , 取 $a_b = -4$, 并根据式(6)确定 a_w 的值。对式(12)~(25)进行求解, 可得到试样的名义应变和名义应力的关系, 用引起 0.2% 塑性变形的名义应力来确定屈服强度。

根据抗拉强度的测定方法, 在最大载荷点,

$$\frac{d\sigma_{nom}}{d\epsilon_{nom}} = 0. \quad (26)$$

对式(12)~(26)进行求解, 得到最大载荷点时, 单轴拉伸应力状态区的主应力 σ , 代入式(25)即可得到抗拉强度。

图3和图4分别是热影响区和焊缝的相对宽度

与接头的相对屈服强度和抗拉强度关系的预测结果,并与有限元分析结果^[4]进行对比,其中, σ_{vj} 和 σ_{lj} 分别为接头的屈服强度和抗拉强度, σ_{yb} 和 σ_{lb} 分别为母材的屈服强度和抗拉强度。可以看出,预测曲线与有限元分析结果有较好的一致性。

焊缝金属的屈服应力和相对宽度对接头的屈服强度影响很小,接头的抗拉强度随焊缝的宽度的增加而增加,当焊缝的相对宽度增加到0.5,对接头的抗拉强度不再有影响。

利用以上模型,一方面可以对热影响区软化的焊接接头进行强度预测,另一方面根据热影响区的宽度及软化程度,对焊缝的强度加以设计,以保证整个接头的强度不损失。

3 结 论

(1) 热影响区软化焊接接头的拉伸试样,在加载过程中 Mises 等效应力分布具有确定的特征:在软化的热影响区减小,在与之相邻的焊缝区和母材区相应升高,分布规律符合指数函数规律,在离开热影响区 3~5 倍板厚的距离处仍为单轴拉伸状态;在热影响区与焊缝及母材的交界面上发生突变,突变的幅度与交界面两侧材料的屈服应力差值及外加载荷有一定相关性;在焊缝及母材区 Mises 等效应力增加量的积分等于热影响区减少量的积分。

(2) 根据热影响区软化焊接接头应力分布变化的规律,提出热影响区软化的焊接接头强度的预测方法,与有限元分析结果有很好的 consistency。

参考文献:

[1] Bang K S, Kim W Y. Estimation and prediction of HAZ softening in thermomechanically controlled-rolled and accelerated-cooled steel [J]. Welding Journal, (2002), 81(8): 174s~179s.
 [2] 李午申. 我国合金结构钢的新发展及其焊接性[J]. 焊接学报, 2001, 22(5):83~86.
 [3] Toyada M, Mochizuki M, Shintomi T, et al. Analytical study on deformation and strength in HAZ-softened weld joints of fine-grained steels[A]. the 54th Annual Assembly of the International Institute of Welding[C]. IIW Doc. X-1503-2002.
 [4] 朱亮,陈剑虹. 热影响区软化焊接接头的强度及变形[J]. 焊接学报, 2004, 25(2):61~65.
 [5] 朱亮,陈剑虹. 细晶粒钢热影响区软化焊接接头的力学性能[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 24(4):19~22.

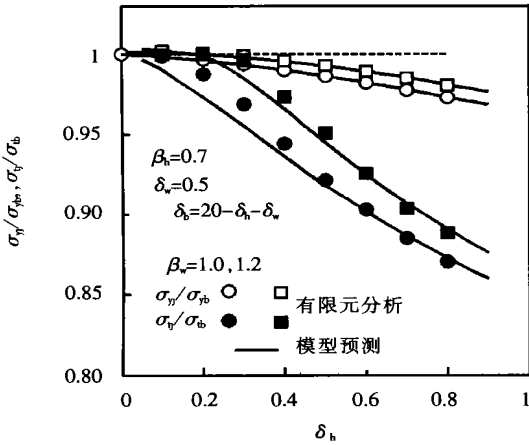


图3 热影响区宽度与接头强度的关系
 Fig.3 Correlation between width of HAZ and strength of joints.

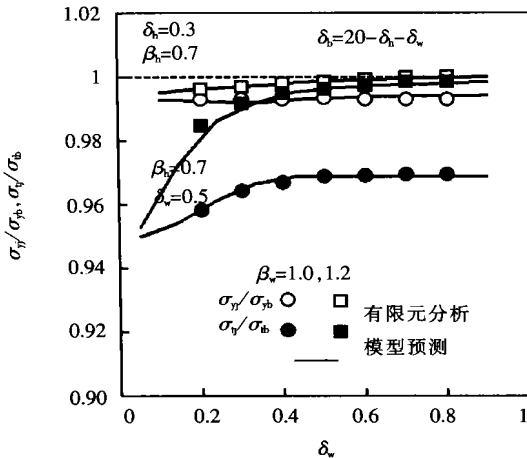


图4 焊缝宽度与接头强度关系
 Fig.4 Correlation between width of weld metal and strength of joints.

从图3可以看出,软化的热影响区宽度对接头的屈服强度影响较小,而对其抗拉强度有较大的影响,值得注意的是,当热影响区宽度较小时,其影响很小,当热影响区的相对宽度超过某一临界值时,接头相对抗拉强度会骤然下降,通过采用高匹配的焊接接头可以使这一临界值提高。从图4可以看出,

作者简介: 朱亮,男,1964年12月出生,教授。主要从事焊接工艺及设备,焊接结构强度及断裂研究。发表论文40余篇。

Email: zhul@gsut.edu.cn

Key words: single chip computer; inverter; pulsed metal inert gas arc welding

Transient liquid phase bonding mechanism and microstructure of MGH⁹⁵⁶ joints ZHANG Sheng, HOU Jin-bao, Guo De-lun, ZHANG Lei (Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p43-47

Abstract: Tile interlayer alloy KCo1 is developed for transient liquid-phase (TLP) diffusion bonding of MGH⁹⁵⁶ superalloy. The relative aspects have been analyzed about the microstructure of the joint, elements and bonding technologies. The TLP bonding mechanism of MGH⁹⁵⁶ superalloy has been verified. At the same time, the residues in the joints of MGH⁹⁵⁶ superalloy are analysed further. The experimental results show that the integrated joints without the residues could be attained on the condition of 1 240 %/8 h. Key words: oxide dispersion strengthened superalloy; Co based interlayer; transient liquid phase bonding; microstructure

Characteristics of stress distribution and prediction of strength in heat-affected zone softened welded joints ZHU Liang, CHEN Jian-hang (State Key Lab. of Advanced Non-Ferrous Materials, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p48-51

Abstract: The effects of yield stress decrease due to coarsening grain in the HAZ (heat-affected zone) of fine-grained steels welded joints on the load capacities of the joint are required to be evaluated. The finite element analyses are carried out on tensile plate specimen of butt-welded joint with softened HAZ. The stress distribution in such joints shows the characteristics as follows: the Mises equivalent stress increase with the exponential law in the welds and base metal adjacent to softened HAZ, and that in softened HAZ decrease correspondingly. At the boundaries between HAZ and weld metal and base metal Mises equivalent stresses rapidly changes, amplitudes of which are related to the differences of yield stresses in the both sides around the boundary, and applied stress. The integration of the decrease in the Mises equivalent stress in the softest zone equals to that of the increase over the weld metal and base metal zones. Based on above results, an approach to predict the tensile strength of such joint is suggested. The prediction results using this method are consistent with the results calculated with finite element analysis method. This approach is suitable for prediction of strength of the HAZ-softened welded joints, and design for tensile strength in overmatched welded joints.

Key words: welded joint; tensile strength; strength matching; finite element analysis; heat-affected zone softened

Off-line programming system of arc-welding robot based on boiler LIU Yong, XU Yue-lan, WANG Ke-hong, YU Jin, YANG Jing-yu (Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China). p52-56

Abstract: Off-line programming system of welding robot used in boiler is studied. Characteristics of boiler and its coordinates of complex spaced weld are entered in the system. The paths and positions of torch are laid out. The

environments such as boiler are built, according to the robot language format. The robot program is built by the system automatically. Simulation of boiler welded by sk6 robot are performed. It proved the system is available.

Key words: boiler; arc welding robot; off-line programming

Influence of deep cryogenic treatment on electrodes wear for aluminum alloy spot welding LIU Cui-rong¹, YAN Xian-guo¹, GUO Jian-gang¹, WU Zhi-sheng², SHAN Ping², CHENG Fang-jie² (1. Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China). p57-60

Abstract: In order to study the influence of deep cryogenic treatment on electrode wear in the spot welding of aluminum alloy, spot welding experiments are carried out by the non deep cryogenic treatment electrodes and the deep cryogenic treatment electrodes. The appearance of spot welds and the appearance of electrode tips are observed when the number of spot welds is 620 which is the non deep cryogenic treatment electrodes life. The micro-hardness of the deep cryogenic treatment electrode tips is tested when the number of spot welds is 620. The non deep cryogenic treatment electrode tips and the deep cryogenic electrode tips are observed by X-ray diffraction. Experiment results show that the appearance of the non deep cryogenic treatment electrode tips changes sharply, but the appearance of the deep cryogenic treatment electrode tips changes little; the non treatment electrode pick up and the splash become worse than that of the deep cryogenic treatment electrode; the micro-hardness of the deep cryogenic treatment electrode tips is lower than that of the non treatment electrode tips; the deep cryogenic treatment electrode wear is improved.

Key words: deep cryogenic treatment; aluminum alloy; spot welding; electrode wear

Effect of B⁴C particles on microstructure and wear resistance of Co-based alloy laser cladding SI Song-hua, YUAN Xiao-min, XUKun, He Yi-zhu (School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China). p61-64

Abstract: Laser cladding of Co-based alloy (C⁵⁵) and Co-based alloy with 25 vol% B⁴C (B⁴C/Co) on low carbon steel substrate has been obtained by 5 kW CO₂ continuous wave laser. The effect of B⁴C particles on microstructure, microhardness and wear resistance of Co-based alloy coating is investigated. The results show that microstructures of the two coatings were the dendrites of the sub-eutectic structure. Co⁵⁵ coating is consisted of γ-Co and (Cr, Fe)₇C₃, and B⁴C/Co coating is consisted of γ-Co, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, Fe₂₃(C, B)₆ and CrB₂. B⁴C particles had completely dissolved in the Co-based alloy during the laser cladding. The dendrites of the B⁴C/Co coatings were much finer than that of the Co⁵⁵ coating. Microhardness and sliding wear resistance of the B⁴C/Co coating were higher than that of the Co⁵⁵ coating. The strengthen mechanism of the coatings is analyzed.

Key words: laser cladding; Co-based alloy coating; B⁴C; structure; wear resistance