

镀锌钢-AISI 304 不锈钢非熔透型激光叠焊工艺

张群莉^{1,2} 周明召^{1,2} 陈智君^{1,2} 姚建华^{1,2*}

(¹ 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

² 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

摘要 采用脉冲式 Nd:YAG 激光器作为焊接热源,对镀锌钢板和 AISI 304 不锈钢板进行非熔透型激光叠焊,通过控制焊接工艺,使得焊接接头在满足强度要求的同时底面无痕迹,以保证不锈钢板的外观质量。通过研究电流、焊接速度、离焦量对焊缝熔深、熔宽和强度的影响规律,对工艺参数进行了优化;焊接最佳工艺参数为 $I=350\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$, $f=4\text{ Hz}$, $W=10\text{ ms}$, 此时的抗剪强度达到使用要求,不锈钢板表面无焊接痕迹;焊缝组织细而致密,为板条状马氏体组织和残余奥氏体,靠近镀锌板侧还有一定的珠光体组织;由于有马氏体硬化层的存在,焊缝区和焊接热影响区的显微硬度比母材高。

关键词 激光技术;激光焊接;非熔透型焊接;工艺参数;组织与性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603012

Technique of Non-Penetration Laser Lap Welding on Galvanized Steel and AISI 304 Stainless Steel

Zhang Qunli^{1,2} Zhou Mingzhao^{1,2} Chen Zhijun^{1,2} Yao Jianhua^{1,2}

¹ Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

² Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract Galvanized steel and AISI 304 stainless steel are lap-welded by a pulsed-Nd:YAG laser. The weld joint is of good surface quality based on the shear strength which reaches its work requirement. The effects of the laser welding process parameters such as laser current, welding speed and defocused distance on the shape of the weld seam are investigated. The optimum welding parameters are $I=350\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$, $f=4\text{ Hz}$, $W=10\text{ ms}$, and there is no weld trace on the back of AISI 304 stainless steel at the same time. The microstructure of the welded seam is martensite and residual austenite, and close to the side of galvanized sheet, there is a small amount of pearlite. Because of the existence of martensitic hardened layer, the microhardness in the weld seam and heat affected zone is higher than that of the base metal.

Key words laser technique; laser welding; non-penetration welding; process parameters; microstructure and performance

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 140.3530

1 引 言

镀锌钢板在腐蚀环境中能对钢基起到阳极保护作用,并在表面形成耐腐蚀性良好的薄膜,经镀锌之后的钢材,大幅地延长了使用寿命^[1]。AISI 304 不锈钢具有优异的抗腐蚀性、出色的成型性、焊接性及良好的装饰性^[2],广泛应用于机械、建筑、家电和厨

房用具等行业。将镀锌钢板作为内侧加强结构,与 AISI 304 不锈钢板组合成焊接结构,可充分利用这两种钢材各自的优点,在保证不锈钢表面优异质感的同时,提高组合结构的强度,因此要求镀锌钢板与 AISI 304 不锈钢板实现非熔透型焊接,即不锈钢板表面在焊接后没有痕迹,表面平整美观且与镀锌钢

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-04-01

作者简介: 张群莉(1979—),女,硕士,讲师,主要从事激光加工与制造技术等方面的研究。E-mail: zql@zjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

板有足够的连接强度。

镀锌钢板与 AISI 304 不锈钢板的传统连接方法是电阻点焊和胶接,前者存在着不锈钢板表面有可见焊疤、不平整和变形大等缺点,难以实现高质量的连接,且降低了外观质量^[3,4]。后者的强度不够高,易老化,效率低下,且会带来环境污染等问题^[5]。

激光焊接相对于电阻点焊而言具有焊接热输入量小、单面加工、焊接质量稳定、非接触式加工和焊接变形小等特点^[6,7],相对于胶接而言具有结构强度高、环境友好和焊接效率高等特点,非常适合于镀锌板和 AISI 304 不锈钢板的非熔透型焊接,使焊接结构的不锈钢板表面无焊接痕迹,平整美观。国内外对镀锌钢板或奥氏体不锈钢的连接已有了一些研

究成果^[8~11],但对镀锌钢-AISI 304 不锈钢的激光焊接及非熔透型焊接方面的研究未见报道,显然,研究开发镀锌钢-AISI 304 不锈钢非熔透型激光叠焊工艺具有很高的应用价值。

2 试验方法

试验采用尺寸为 60 mm×30 mm×1.1 mm 的镀锌钢板和 AISI 304(0Cr18Ni9)不锈钢板,化学成分如表 1 所示。镀锌钢的镀锌层厚度为 10 μm,基体组织为铁素体和珠光体;AISI 304 不锈钢焊前热处理状态为固溶 1010 ℃~1150 ℃快冷,组织特征为奥氏体型,组织为奥氏体加少量铁素体。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal (mass fraction, %)

Substrate	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
Galvanized steel	≤0.08	0.05	0.4	0.025	0.015	/	/	/	0.06	Bal.
AISI 304	0.06	0.7	1.2	0.03	0.014	18	8	0.18	/	Bal.

试验前除去材料表面的杂物与油渍,然后清洗。激光器采用脉冲 Nd:YAG 激光器,其输出波长为 1.06 μm,额定输出功率 300 W,接头形式如图 1 所示。为了使锌蒸气能够排出熔池,采用夹具使两板之间预留一定的间隙,约为 0.01 mm,氩气作为保护气体。试验中选用以下激光工艺参数:电流 I 为 320~380 A,扫描速度 V 为 60~140 mm/min,离焦量 ΔF 为 -3~1 mm,光斑直径 d 为 1~2 mm,载气流速为 15 L/min。由于焊接电流较大时,频率和脉宽可控制范围很小,且在试验中对焊接质量影响不明显,因此,频率和脉宽都取定值,频率 f 为 4 Hz,脉宽 W 为 10 ms。

按照金属材料室温拉伸试验方法 GB/T 228-002 国家标准来进行焊接接头的拉伸试验,将焊后试件用电火花线切割机切成标准试样,试样尺寸如图 2 所示。镀锌板和不锈钢板焊接结构有一定的偏

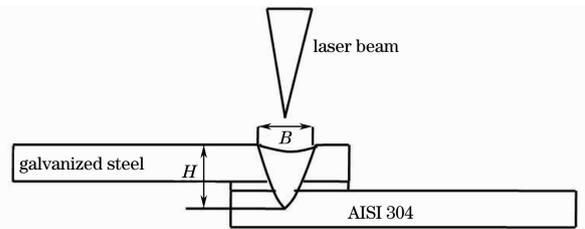


图 1 非熔透型激光叠焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-penetration laser lap welding

心,在剪切试验中,为了抵消偏心力矩,在试样夹头处垫上一块 1.1 mm 的不锈钢板。

为分析焊接接头的微观组织与显微硬度,焊后切取横截面,制作金相试样,经线切割、镶嵌、研磨、抛光和腐蚀等工序,采用光学显微镜观察微观组织,利用 HMV-2T 型显微硬度仪在载荷 200 g、加载时间 15 s 的条件下测试焊接接头的硬度。

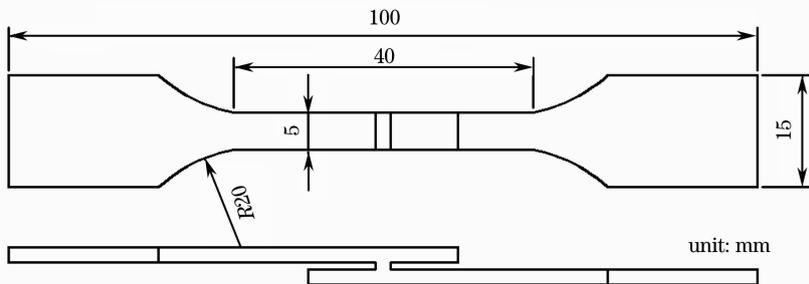


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of samples for shear tensile strength testing

3 试验结果及分析

3.1 激光工艺参数研究

电流大小与焊缝形状有着密切的关系,当焊接速度 $V=100\text{ mm/min}$, 离焦量 $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时,随着电流的增大,焊缝熔深和熔宽逐渐增大,如图 3(a) 所示。电流太低时,熔深较浅,强度较低;过大的电流虽然可以得到较高的强度,但会使不锈钢板表面外观变差,出现焊接痕迹,且变形增加。当熔深大于 1.57 mm 时不锈钢板表面开始出现焊接焊痕,因此为保证不锈钢板表面美观需控制电流的大小。

焊接速度是影响焊缝熔池形状及焊接质量的一个重要工艺参数。焊接速度不同,熔池中心及边缘的温度梯度、液态合金材料的散热情况、熔池形状也就不同。图 3(b) 给出了当电流 $I=350\text{ A}$, 离焦量

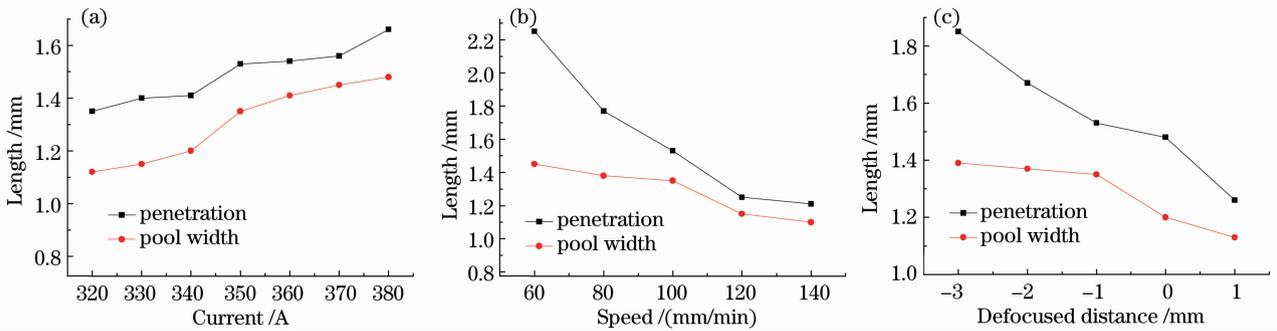


图 3 激光工艺参数对焊缝尺寸的影响。(a) 电流, (b) 焊接速度, (c) 离焦量

Fig. 3 Trend of penetration and pool width with laser parameters. (a) current, (b) speed, (c) defocused distance

离焦量是指激光束的焦点与焊接工件表面之间的距离,离焦量对焊接质量的影响很大^[12]。图 3(c) 表示在激光电流 $I=350\text{ A}$, 焊接速度 $V=100\text{ mm/min}$ 时熔深和熔宽随离焦量 ΔF 变化的曲线。随着离焦量从 -3 mm 增大到 $+1\text{ mm}$, 焊缝熔深和熔宽逐渐降低。这是因为,当焦点位置处于工件表面以下时,即 $\Delta F < 0$ 时,焦点处的能量密度高,致使产生激光深熔焊时小孔内产生聚焦效应,光束可在小孔侧壁反射后向孔底传播并进行二次聚焦^[13],使小孔内部保持着较高的功率密度,从而加大熔深;当 $\Delta F=0$ 时,光斑直径较小,但向空间有较多的辐射;当 $\Delta F > 0$ 时,工件上的光斑直径较大致使能量密度较小。由于熔深大于 1.57 mm 时,不锈钢板表面会出现焊接痕迹。根据以上分析,选定离焦量 $\Delta F=-1\text{ mm}$ 最佳。

3.2 焊缝宏观形貌及强度

典型的参数下焊缝横截面宏观形貌如图 4 所示,激光焊接时由于没有填充焊丝,焊缝上表面略有塌陷,从焊缝中心往外依次为焊缝区、热影响区和

$\Delta F=-1\text{ mm}$ 时熔深与熔宽随焊接速度的变化规律曲线。熔深和熔宽均随着焊接速度增大而降低,这是因为随着焊接速度的增大,线能量会减小。当焊接速度过小时,焊接线能量增加,焊接区过热,会造成材料过度熔化,导致焊缝塌陷、飞溅和工件烧穿。焊接速度过高时会造成熔深过浅,同时也会增大气孔和开裂倾向,影响焊接接头性能。当速度选取合适时,一方面可消除因焊接区过热而产生焊缝塌陷的缺陷,另一方面可改善焊缝背面成形。

由图 3(b) 可知在电流 $I=350\text{ A}$, 离焦量 $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时,为保证不锈钢板表面无焊接痕迹,焊接速度应大于 80 mm/min ,但过大会降低焊缝的连接强度,应控制在 120 mm/min 以内。在本实验条件下,焊接速度为 100 mm/min 时,焊缝成形良好。

母材,焊缝截面整体结构呈钉头状,镀锌板-不锈钢激光焊接接头热影响区比较窄。典型焊接接头的焊缝熔深和剪切强度如表 2 所示,当 $I=320\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时,焊缝熔深较浅,为 1.35 mm ,如图 4(a) 所示,此时的抗剪切强度较低,为 60 MPa 。当 $I=350\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时的焊缝横截面形貌如图 4(b) 所示,此时的焊缝熔深为 1.53 mm ,不锈钢板表面无焊接痕迹,抛光焊接接头表面,在光学电子显微镜下观察焊缝横截面,未发现气孔、裂纹等缺陷,抗剪切强度为 194 MPa 。当 $I=370\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时的焊缝横截面形貌如图 4(c) 所示,此时的熔深为 1.57 mm ,焊缝局部有裂纹,且不锈钢板表面存在焊接痕迹,抗剪切强度为 218 MPa 。当 $I=350\text{ A}$, $V=60\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时焊透,由于此时两块板之间的间隙较小,导致焊缝中局部存在气孔和裂纹,如图 4(d) 所示,此时的抗剪切强度最大,为 335 MPa 。

综合以上试验工艺参数对熔深和焊接痕迹的影

响,可知当熔深大于等于 1.57 mm 时不锈钢板表面开始出现焊接焊痕,在保证焊缝无明显缺陷且焊板背面无焊接痕迹时,得到最佳工艺参数为 $I=350$ A,

$V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, 此时的熔深为 1.53 mm, 抗剪切强度为 194 MPa, 达到了强度要求。

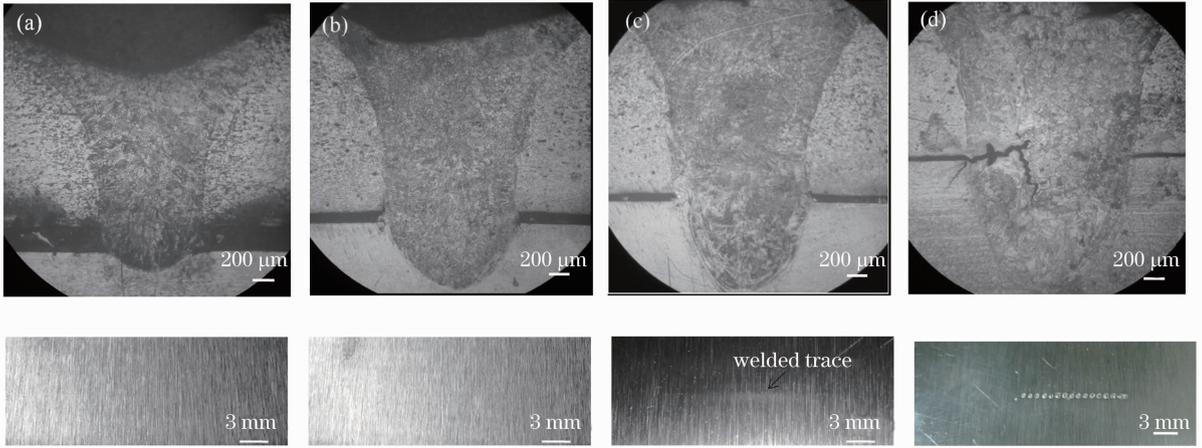


图 4 典型接头的截面宏观形貌与底面焊痕。(a) $I=320$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (b) $I=350$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (c) $I=370$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (d) $I=350$ A, $V=60$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm
 Fig.4 Macro-morphology of the joints and welded trace on the back surface. (a) $I=320$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (b) $I=350$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (c) $I=370$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm, (d) $I=350$ A, $V=60$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm

表 2 典型焊接接头的焊缝熔深和剪切强度
 Table 2 Weld penetration depth and shear strength of typical weld joints

Number	Current I/A	Speed $V/(mm/min)$	Defocused distance $\Delta F/mm$	Penetration depth L/mm	Shear strength τ/MPa	Welded trace
1	320	100	-1	1.35	60	No
2	350	100	-1	1.53	194	No
3	370	100	-1	1.57	218	Yes
4	350	60	-1	Penetration	335	Yes

3.3 激光焊接接头的微观组织

用光学显微镜对工艺参数为 $I=350$ A, $V=100$ mm/min, $\Delta F=-1$ mm 时的焊缝组织进行分析,图 5(a)为焊缝中心微观组织形貌,可以看出,焊缝组织细而致密,为板条状马氏体与残余奥氏体;图 5(b)为不锈钢侧焊缝的组织,从图中可以清楚地看到除存在板条状马氏体外,残余奥氏体也有所增

加;图 5(c)为靠近镀锌板侧的焊缝组织,既有马氏体,还有一定的珠光体。

图 6(a)为靠近镀锌板侧的热影响区,该区的合金元素含量呈现连续变化,导致马氏体转变温度 M_s 点也是连续变化的^[14]。由于这个特点,使得该区域中的马氏体在一个原奥氏体晶粒内,板条晶区表现得很散乱,而且存在许多板条交叉的区域。该区域

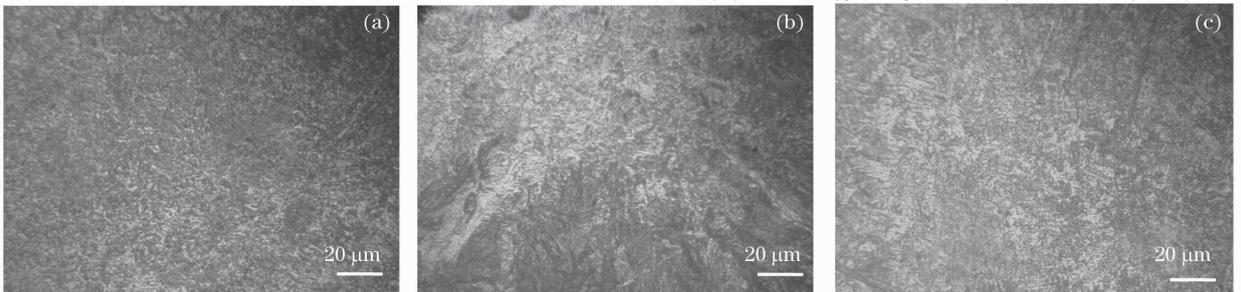


图 5 焊缝微观组织形貌。(a)焊缝中心,(b)靠近不锈钢侧,(c)靠近镀锌板侧

Fig.5 Microstructures of the weld. (a) weld center, (b) side of stainless steel, (c) side of galvanized steel

组织为少量马氏体、铁素体和珠光体。在靠近不锈钢侧的热影响区组织较为复杂,为奥氏体、少量 δ -铁素体,同时还有少量马氏体存在,如图6(b)所示。

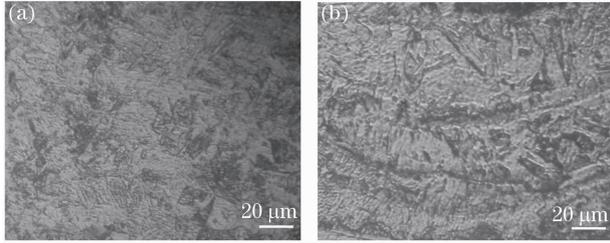


图6 热影响区组织形貌。(a)靠近镀锌板侧,
(b)靠近不锈钢侧

Fig. 6 Microstructures of the heat affected zone

(a) side of galvanized steel, (b) side of stainless steel

3.4 焊缝接头的显微硬度

激光焊接具有极快的加热和冷却速度,在熔池

区和热影响区会得到淬硬的马氏体组织,大大地增加了焊接接头的淬硬倾向,接头淬硬倾向一般可由显微硬度来反映。截取激光电流 $I=350\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$ 时得到的焊缝横截面做成试样,用HMV-2T式显微硬度仪测试焊缝横截面的显微硬度,测试位置如图7所示,并做出显微硬度沿焊缝横向的分布曲线如图8所示。

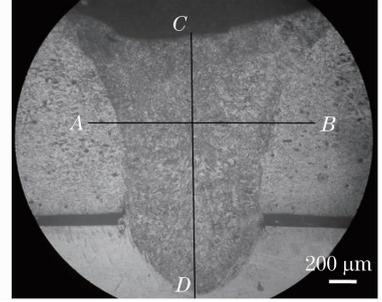


图7 显微硬度测试位置示意图

Fig. 7 Position of microhardness testing

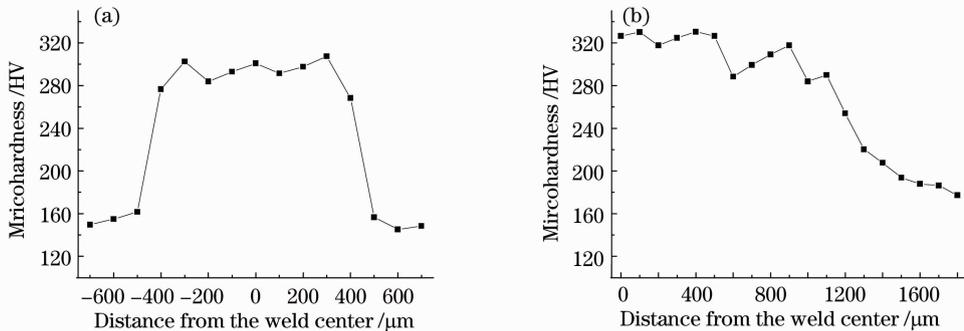


图8 焊缝横截面显微硬度分布。(a)截面横向(AB线),(b)沿着焊缝深度方向(CD线)

Fig. 8 Microhardness distribution of the weld cross section. (a) AB line, (b) CD line

AB线为镀锌钢横向焊缝方向,CD线为沿着焊缝深度方向,AB线上的最大硬度为 $307\text{ HV}_{0.2}$,焊缝和热影响区的平均显微硬度为 $291\text{ HV}_{0.2}$,镀锌钢母材硬度为 $153\text{ HV}_{0.2}$,焊缝和热影响区的平均显微硬度是镀锌钢母材的1.9倍。在焊缝深度方向(CD线),焊缝上表面略有塌陷,硬度总体上呈现递减的趋势,焊缝表面及附近硬度最高,依次递减至304不锈钢基体,最大硬度为 $330\text{ HV}_{0.2}$,焊缝和热影响区的平均显微硬度为 $295\text{ HV}_{0.2}$,不锈钢母材硬度为 $186\text{ HV}_{0.2}$,焊缝和热影响区的平均显微硬度是不锈钢母材的1.6倍。焊接接头组织获得了低碳马氏体,因而接头硬度并不是很高,焊缝区的硬度呈波动式变化,焊缝区和热影响区的平均显微硬度比母材高。由于冷却条件不同,热影响区的晶粒明显比熔池区的晶粒细小,且有马氏体硬化层的存在。所以,激光深熔焊接可以有效地避免镀锌钢热影响

区的软化。激光焊接时加热冷却速度非常快,接头热影响区的不完全重结晶区非常窄,而且生成了一定量的淬硬组织,组织强化使该区域硬度与强度高于母材。

4 结 论

1) 采用非熔透型激光叠焊工艺焊接镀锌钢和AISI 304不锈钢结构,可获得连接强度高且不锈钢板面无焊痕的精美焊接结构。

2) 激光叠焊最佳工艺参数为 $I=350\text{ A}$, $V=100\text{ mm/min}$, $\Delta F=-1\text{ mm}$, $f=4\text{ Hz}$, $W=10\text{ ms}$ 。此时熔深为 1.53 mm ,接头的抗剪切强度为 194 MPa ,达到了使用要求,不锈钢板表面无焊接痕迹。

3) 焊缝中心发生马氏体相变,焊缝组织细而致

密,生成板条状马氏体组织和残余奥氏体,靠近镀锌板侧的焊缝还有一定的珠光体组织;镀锌板侧的热影响区组织为铁素体、珠光体和少量马氏体,不锈钢侧的热影响区组织为奥氏体,少量 δ -铁素体和少量马氏体。

4) 激光深熔焊接可以有效地避免镀锌钢热影响区的软化。在接头的镀锌钢板横向,焊缝和热影响区的平均显微硬度是镀锌钢母材的1.9倍,在焊缝深度方向,硬度总体上呈现递减的趋势,焊缝和热影响区的平均显微硬度是不锈钢母材的1.6倍。

参 考 文 献

- 1 Zhang Yi, Li Shichun, Jin Xiangzhong *et al.*. Key technology of laser welding of galvanized steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 37~45
张屹,李时春,金湘中等. 镀锌钢板激光焊接关键技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 37~45
- 2 L. M. Martínez T, O. Sanz, M. I. Domínguez *et al.*. AISI 304 austenitic stainless steels monoliths for catalytic applications [J]. *Chem. Engng. J.*, 2009, **148**(1): 191~200
- 3 Wang Min. Research of galvanized steel sheet spot welding[J]. *Automobile Technology & Material*, 1999, (5): 4~8
王敏. 镀锌钢板点焊工艺研究[J]. *汽车工艺与材料*, 1999, (5): 4~8
- 4 Wen Jing, Wang Chunsheng, Xu Guocheng *et al.*. Analysis on dynamic resistance in resistance spot welding of stainless steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(11): 69~72
文静,王春生,徐国成等. 不锈钢电阻点焊过程中的动态电阻变化规律分析[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(11): 69~72
- 5 Zhou Jianfang, Li An, Rao Baolin. Effect of metal surface treatment and bonding technology on shear strength [J]. *Chemistry and Adhesion*, 2007, **29**(1): 30~32
周建芳,李安,饶保林. 金属工件的表面处理及胶接工艺对胶接剪切强度的影响[J]. *化学与黏合*, 2007, **29**(1): 30~32
- 6 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues laser welding of dissimilar metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268
虞钢,赵树森,张永杰等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268
- 7 Zuo Tiechuan, Wang Xubao. Characteristic short technological process of laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1660~1663
左铁钊,王旭葆. 激光制造的短流程优势[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1660~1663
- 8 Murat Vural, Ahmet Akkus. On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, (153-154): 1~6
- 9 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
伍强,陈根余,王贵等. 高强度镀锌钢的CO₂激光焊接[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 10 Luo Yi, Liu Jinhe, Xu Huilin *et al.*. Regression modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheet [J]. *Mater. Des.*, 2009, **30**(7): 2547~2555
- 11 H. Park, S. Rhee. Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO₂ laser welding of galvanized steel [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1999, **31**(2): 119~126
- 12 Wang Hailin, Huang Weilin, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 463~466
王海林,黄维玲,周卓尤等. 8 mm厚不锈钢板的Nd:YAG激光焊接[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 463~466
- 13 Wu Qiang, Xu Lanying, Chen Genyu *et al.*. Experimental study about CO₂ laser welding of galvanized sheet [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 571~574
伍强,徐兰英,陈根余等. CO₂激光焊接高强度镀锌板的实验研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(6): 571~574
- 14 Lu Jinbin, Wang Zhixin, Chen Jiantai. Microstructure analysis of 1Cr17Mn6Ni5N and Q235 heterogeneous steel welded joint [J]. *Welding Technology*, 2008, **37**(2): 15~17
卢金斌,王志新,陈建泰. 1Cr17Mn6Ni5N与Q235异种钢焊接接头组织分析[J]. *焊接技术*, 2008, **37**(2): 15~17