

# 不锈钢-碳钢层合板激光熔覆制备方法试验研究

高美娜 王续跃 徐文骥 郭东明

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** 针对不锈钢-碳钢层合板制备方法中结合面存在的缺陷问题,采用激光熔覆法制备金属层合板。调整激光功率和扫描速度两个主要工艺参数,研究其对层合板金相组织的影响。通过不锈钢-碳钢层合板金相组织分析以及拉伸试验研究,优化层合板激光熔覆工艺参数。结果表明:随着激光能量密度的增大,不锈钢-碳钢层合板界面波高依次呈 0.01~0.03 mm、0.08~0.10 mm 和 0.11~0.14 mm 三种形态,且熔覆层厚度逐渐增加。随着界面波高的增大,屈服强度逐渐增大,当不锈钢-碳钢层合板界面金相组织形态呈波高为 0.11~0.14 mm 时,屈服强度为 410 MPa。激光熔覆制备方法获得了不锈钢-碳钢冶金结合及组织性能均良好的层合板,屈服强度和延伸率均达到了不锈钢层合板的标准要求,表明此工艺方法是可行的,为激光熔覆制备层合板的广泛应用提供了理论和试验依据。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;不锈钢-碳钢层合板;金相组织;波高;拉伸强度

**中图分类号** TN249;TG113.25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.021403

## Experimental Study on the Stainless-Carbon Steel Laminated Plates Prepared by Laser Cladding

Gao Meina Wang Xuyue Xu Wenji Guo Dongming

*School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*

**Abstract** Due to quality defects on the surface of stainless and carbon steel laminated plates prepared conventionally, laser cladding is introduced for preparing metal laminated plates. By adjusting two main process parameters of the laser power and scanning speed, their influences on the metallographic structure of laminated plates by laser cladding are investigated. Then the parameters are optimized according to metallographic structure analysis and tensile test of stainless-carbon steel laminated plates. The results show that: with the decrease of the energy density of the laser, stainless steel laminated plates interface is arranged in three microstructure morphology, which have wave heights of 0.01~0.03 mm, 0.08~0.10 mm and 0.11~0.14 mm, and the layer thickness increases gradually. Meanwhile, the yield strength increases as the interface wave height increases. When the wave height of the interface of stainless steel laminated plates is 0.11~0.14 mm, the high yield strength of 410 MPa is obtained. Stainless-carbon steel laminated plates prepared by laser cladding have strong metallurgy bonding quality and good microstructure properties. The tensile strength and elongation indicators have met the requirements of the standard of stainless-carbon steel laminated plates. This method is feasible, and provides theoretical and experimental basis for the wide application of laser cladding preparation of laminated plates.

**Key words** laser technique; laser cladding; stainless-carbon steel laminated plates; metallographic structure; wave height; tensile strength

**OCIS Codes** 140.3390; 140.3430; 160.3900; 160.3380

## 1 引言

不锈钢-碳钢层合板充分发挥了两种材料的特性优势,既具有不锈钢的耐腐蚀、耐热、耐氢、耐磨、光亮

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-10-25; 网络出版日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 50975041)

作者简介: 高美娜(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: 1842219026@qq.com

导师简介: 王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工等方面的研究。

E-mail: wbzzd@dlut.edu.cn(通信联系人)

等性能,同时又能兼具碳钢的高强度、易加工性、可焊接性等优点,同时在其使用价格上具有不锈钢冷轧板无法比拟的优势,是一种既能满足实际需求又能节省资源的复合材料。不锈钢层合板具有良好的工艺性能,可以进行热压、冷弯、切割、焊接等各种加工,也可以加工成各种所需形状的耐磨、耐腐蚀容器。不锈钢层合板被广泛应用于石油化工领域的减压塔、分馏塔、气提塔、热交换器等,真空制盐领域中的蒸发罐,水利工程领域中的排沙钢管管衬<sup>[1-3]</sup>,其需求量也呈逐年递增的趋势。设计和制备层状金属复合材料成为材料科学与工程领域中一个重要的发展方向,国内外学者对此做了大量的研究。Kacar等<sup>[4-8]</sup>分别对层状金属复合板组织特性和制备技术进行了研究。其中Kacar等<sup>[4]</sup>采用爆炸复合法焊接了316L不锈钢-P355GH钢板层合板,对显微组织、硬度和拉伸强度进行了评估,金属结合界面显示波浪形态;刘环等<sup>[7]</sup>在阐述层状金属复合板新的制备技术时提到激光熔覆复合法,即在基材表面添加熔覆材料,并利用高能密度激光束辐照加热,使熔覆材料和基材表面薄层发生熔化,并冷却快速结晶,从而在基材表面形成冶金结合的熔覆层;而堆焊复合法用添粉式埋弧堆焊装置将焊丝送入,于基板之间形成电弧,通过送粉器将制好的金属颗粒送入熔池,从而将金属颗粒复合到基板上形成分层状复合板。

目前,工业上一般应用爆炸法和轧制法来生产不锈钢-碳钢层合板<sup>[9-10]</sup>。爆炸法可使性能差异悬殊的金属实现复合,产品规格主要为几百毫米的中厚板,但不适合生产总厚度小于10 mm的较薄的复合钢板,且基、复板间的厚度匹配难于控制,成材率较低,同时由于炸药的存放、爆破地点的选择、噪音的处理、人身安全的保障及污染严重等一系列问题而使得该法不易被推广使用。轧制法包括热轧法和冷轧法。热轧法的生产工艺较为复杂,加工工序耗时较长,两复合金属材料的界面处易存在氧化物及金属夹杂物等缺陷造成界面结合强度下降,同时还必须对加热温度和保温时间加以严格控制,否则会不利于金属化合物的生成;冷轧法的首次轧制量较大,一般要达到60%~70%,对于难变形的复合金属材料冷轧法不易实现复合。由于上述工艺方法中存在着各方面难以克服的缺点而使层合板的生产技术一直处于瓶颈状态,这使得国内层合板市场一直供不应求,每年仍有大量的层合板需要靠进口。由于这种供求关系的不匹配,迫切需要开发一种新的层合板制备技术,且此种技术要求覆层与基板的结合良好、无氧化、无微裂纹、无开裂、有较高的界面结合力等。同时,越来越严格的环保标准也要求钢铁材料制造企业寻找新型低碳环保的生产技术,其中一个新的研发方向就是激光熔覆技术。

激光熔覆具有应用灵活、耗能小、热输入量较低、引起的热变形较小、不需要后续加工或加工量很小、污染少等优点。近年来激光熔覆技术在材料表面改性方面受到了高度重视<sup>[11-12]</sup>。激光熔覆过程中由于部分基体熔化,激光加热作用促使扩散的形成,从而异种金属形成冶金结合,使其具有很高的结合强度。激光热处理工艺的特点是快速加热和快速冷却,熔池金属在很短的时间内凝固,所以熔覆层致密<sup>[13-14]</sup>。由于在熔覆过程中,熔覆温度低于高熔点纯金属组元的熔点,同时复合材料的熔覆层厚度沿激光熔覆方向比较均匀,所以熔覆层的组织性能非常均匀与稳定,是爆炸法和轧制法的有益补充。

本文将采用激光熔覆法制备不锈钢层合板,调整制备熔覆层的激光熔覆中的扫描速度和激光功率两个主要工艺参数,分析其对基、复材界面结合金相组织形态及拉伸力学性能的影响,进而优化其工艺参数范围,为激光熔覆制备层合板的广泛应用提供理论和试验依据。

## 2 层合板激光熔覆制备方法

图1为激光熔覆原理示意图。激光熔覆是通过在基材表面添加熔覆材料,并利用高能密度激光束辐照加热,使熔覆材料和基材表面薄层发生熔化,在接触界面上发生原子间的扩散,并快速凝固,从而在基材表面形成冶金结合的熔覆层。把不锈钢粉末与激光束同步送粉,进行平面扫描,熔覆在碳钢基板表面上,得到不锈钢-碳钢层合板。激光熔覆过程由于能量密度高,熔覆层凝固的时间短,冷却速度大,晶粒的形核率高,晶粒细小,组织致密,且在冷却条件下熔覆层生成非平衡相或过饱和固溶体,从而使其具有优异的性能。根据层合板使用的技术要求,设计层合板的尺寸,通过控制工艺参数调整层合板熔覆层厚度;在保证熔覆层与基体形成冶金结合的前提下,保持原熔覆材料的优异性能。

试验用基板为Q235A碳钢,尺寸为60 mm×40 mm×1.5 mm,化学成分如表1所示;试验用覆层材料为304不锈钢粉末,粉末粒度大小为45~90 μm,化学成分如表2所示;不锈钢层合板材料性能参数如表3所

示。国家标准 GB/T 8165-2008《不锈钢复合钢板和钢带》中层合板总公称厚度为 0.8~6 mm,如表 4 所示,同时还可以根据不同用户的需要提供厚度自由组合的层合板。采用 JK1002 型连续 Nd:YAG 固体激光器,激光熔覆前将碳钢板待复合面进行修磨处理露出新鲜平整干净的加工表面,利于在熔覆过程中两种金属原子间的相互扩散,实现冶金结合。同时将 304 不锈钢粉末干燥以提高粉末流动性,采用氩气作为保护气体。激光熔覆固定工艺参数:送粉量 2 g/min,搭接率 30%,光斑直径 2 mm,载粉气体压力和保护气体流量分别保持在稳定值 0.2 MPa 和 5 L/min。

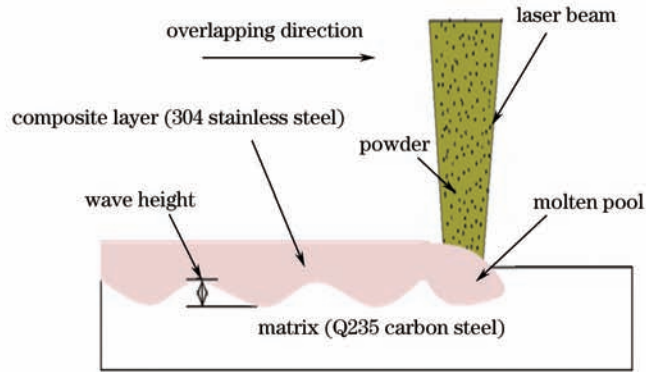


图1 激光熔覆原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser cladding

表1 Q235A 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q235A steel (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr, Ni, Cu
Content	0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	≤0.30	≤0.05	≤0.045	≤0.03

表2 304 不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Content	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.03	17.00 ~ 19.00	8.00 ~ 11.00

表3 不锈钢层合板材料性能参数

Table 3 Characteristic parameters of stainless steel laminated plates

Parameter	Matrix (Q235A)	Surface layer (304)
Density /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	7.86	7.93
Melt point / $^{\circ}\text{C}$	1400	1398~1454
Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	465	500
Heat conductivity / $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	80.3	16.3
Coefficient of linear expansion / $(10^{-6} \text{K}^{-1})$	10.6	17.2
Yield strength /MPa	235	205
Tensile strength /MPa	370	520
Young's modulus /GPa	200~210	200

表4 不锈钢层合板的厚度规格

Table 4 Thickness specification for stainless steel laminated plates

Total nominal thickness of laminates/mm	Low limit of layer thickness /mm
0.8	0.09
1.0	0.12
1.2	0.14
1.5	0.16
2.0	0.18
2.5	0.22
3.5 ~ 6	0.30



因不锈钢中的合金元素 Cr、Ni 与碳钢基体中的铁可以无限互溶形成连续固溶体,在复合面无有害化合物生成,激光熔覆过程中易于结合,因此可采用常规熔覆工艺参数进行熔覆,对 304/Q235 不锈钢层合板激光熔覆工艺采用单因素试验方案,其相关工艺参数如表 5 所示。激光熔覆制备出的层合板,须进行相应的界面结合金相组织形态、力学性能指标等方面的检验。力学性能试验结果均达到 GB/T 8605-2008 规定值,以验证激光熔覆制备金属层合板的可行性和有效性。试验结果为:激光熔覆层合板试件覆层厚度范围 0.1~0.32 mm。

表 5 层合板激光熔覆工艺参数

Table 5 Laser cladding process parameters of laminated plates

Test number	Power $P/W$	Speed $V/(mm/min)$
1	550	500
2	550	400
3	550	300
4	520	400
5	580	400
6	640	400

激光熔覆过程中由于熔覆层与部分基体熔化,激光加热作用促使扩散的形成,从而两种金属形成冶金结合,使其具有很高的结合强度。同时,复合材料的覆层厚度沿激光熔覆方向比较均匀,所以,激光熔覆制备的层合板组织性能均匀与稳定,激光熔覆法是轧制法和爆炸法制备层合板技术的有益补充。

### 3 激光熔覆制备层合板的界面金相组织与拉伸性能分析

#### 3.1 激光熔覆制备层合板界面金相组织分析

文献[6,15-16]表明,层合板复合界面结合金相组织形态一般有三种类型:1)金属间的直接结合,2)界面形成波状结合,3)金属间形成均匀连续的熔化层。在这三种形式当中,只有形成波状结合,界面间原子作用力形成原子扩散,才能使复合板在具有较高界面强度的同时,还可实现在较宽的工艺参数范围内的加工,是理想的结合方式。类似地,文献[17]在爆破不锈钢复合板界面组织和性能分析及应用中报道爆炸焊接的结合界面呈波形,这种波形界面的有无,被视作结合是否良好的重要标志。将激光熔覆制备出的试样经抛光侵蚀后在光学显微镜下进行金相组织分析研究,可以清楚地显示出不同工艺参数下,不锈钢与碳钢复合界面呈三种金相组织形态,如图 2 所示,对应称之为小波状、中波状、大波状,其波高分别为 0.01~0.03 mm、0.08~0.10 mm 和 0.11~0.14 mm,周期为 0.62~1.15 mm。

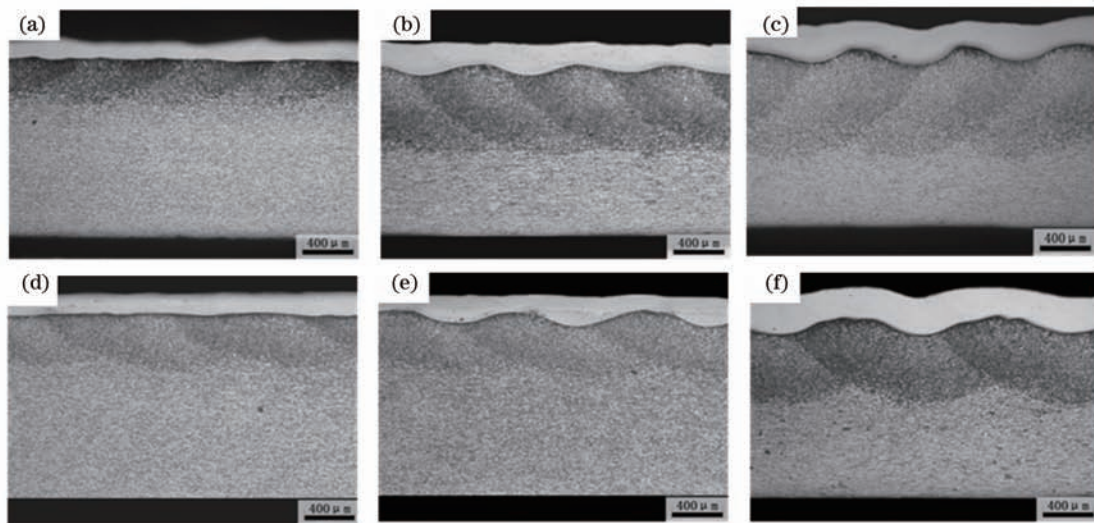


图 2 不同工艺参数下层合板金相组织。(a)  $V=500$  mm/min,小波状;(b)  $V=400$  mm/min,中波状;(c)  $V=300$  mm/min,大波状;  
(d)  $P=520$  W,小波状;(e)  $P=580$  W,中波状;(f)  $P=640$  W,大波状

Fig. 2 Metallographic structure of laminated plates under different process parameters. (a)  $V=500$  mm/min, small wave;  
(b)  $V=400$  mm/min, middle wave; (c)  $V=300$  mm/min, big wave; (d)  $P=520$  W, small wave; (e)  $P=580$  W, middle wave; (f)  $P=640$  W, big wave

不锈钢层合板金相组织形态波形的出现,是激光熔覆时激光加热作用在基体表面局部出现熔化层的原因所在。研究表明:在激光照射下,激光光斑中心附近其熔体的表面温度高,而偏离熔池中心区域越远,熔体的表面温度越低,这样由于熔池内温度分布不均匀,造成表面张力大小不等,温度越高的地方张力越小,这种表面张力驱使液体从低张力区流向高张力区,而这样流动的结果就使液面产生了高度差。文献[18]在激光熔覆过程中的温度分布和涨落对熔覆工艺的影响,探讨了熔池表面的温度分布及变化,表明在激光辐照下粉末熔化形成熔池。由于熔池边缘温度低,熔池中央温度高,故在表面张力作用下熔池中的熔体流向熔池边缘。

层合板界面金相组织、覆层厚度与激光能量输入的大小是紧密相连的,试验中激光光斑直径是一定的,所以主要取决于扫描速度与激光功率的大小。在其他熔覆条件不变的情况下,随着扫描速度的降低或者激光功率的增大,其界面金相组织由趋于平直的小波状演化到大波状,熔覆层的厚度也随之增大。这是因为随着扫描速度的降低,单位面积上获得的激光能量密度变大,光束与材料的作用时间变长,或者激光功率的增大使作用于材料的激光能量变大,对流强度增强,对流的循环次数越多,搅拌越充分,输入熔池的能量增大,熔池尺寸也就增大;同时单位时间内熔池熔化粉末量增多,使其熔覆层的厚度从0.1 mm增大到0.32 mm。

从图3中的界面微观组织形貌可知熔覆层与基体结合紧密。熔覆层内部组织比较致密、均匀,熔覆层304不锈钢主要为奥氏体,熔覆层由大量的树枝晶和等轴晶组成。而且越靠近熔覆层顶部组织越细密,因为越靠近基体的熔覆层由于热传导的作用,吸收的热量越小,冷却的速度越慢,而熔覆层顶部吸收的热量最大,冷却速度最快,因此组织更加致密。而基体上层部分由于激光热作用形成一定深度的热影响区域,相当于进行了退火,使晶粒更加细密。304不锈钢粉末中含有大量的合金元素,激光熔覆过程属于快速凝固,铁基固溶体中固溶了大量的Cr、Ni、Mn、Si等元素,处于一种过饱和状态,固溶强化显著,凝固结晶速度快,组织得到细化,这样的特征为熔覆层具有较高的拉伸性能提供了保证。

轧制法制备不锈钢-碳钢层合板的结果如图4(b)所示,在界面附近分布着细小弥散的氧化物颗粒,此缺

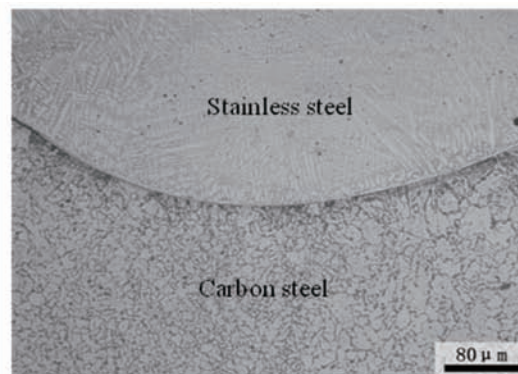


图3 不锈钢复合钢板微观组织形貌

Fig.3 Microstructure of composite stainless steel

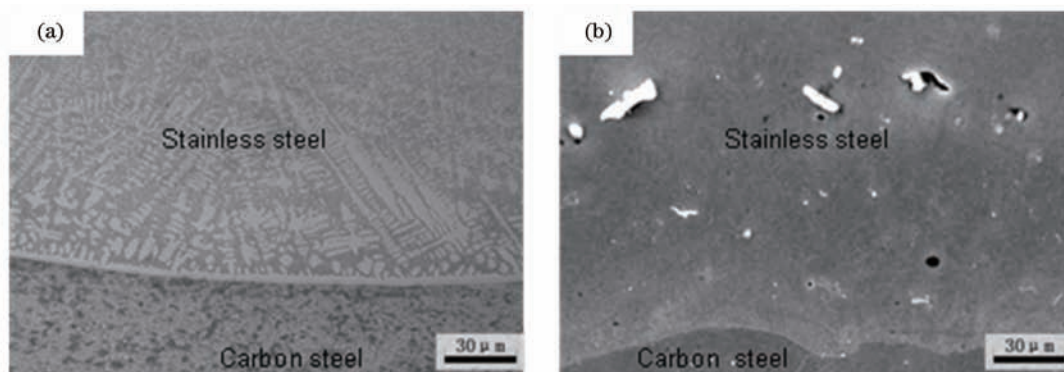


图4 不同工艺下不锈钢/碳钢层合板的微观组织。(a)激光熔覆;(b)轧制

Fig.4 Microstructure of stainless steel/carbon steel laminated plates under different process systems. (a) Laser cladding; (b) rolling

陷易造成界面结合强度下降。激光熔覆制备层合板如图4(a)所示,较好地抑制了复合界面氧化等缺陷,界面存在一条微小的亮白过渡带,即合金元素交互扩散结合带,结合良好,因此该制备方法提高了层合板的性能。

### 3.2 激光熔覆制备层合板的拉伸试验及其性能分析

不锈钢层合板的界面强度与界面金相组织密切相关。为了研究层合板激光制备方法对层合板力学性能的影响,对小波状、中波状、大波状3种界面金相组织形态的层合板进行了拉伸试验。根据GB/T 228-2008《金属拉伸试验方法》,在DNS100电子万能试验机上测定力学性能,如图5所示。激光熔覆制备层合板力学性能试验结果如表6所示。

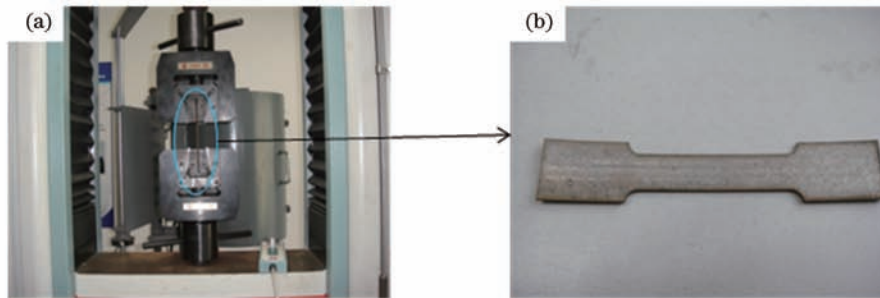


图5 层合板拉伸试验。(a) DNS100电子万能试验机; (b)拉伸试件

Fig.5 Tensile test of laminated plates. (a) DNS100 electronic universal testing machine; (b) tensile specimen

表6 不锈钢层合板拉伸试验结果

Table 6 Tensile test results of stainless composite plate

Test number	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Layer thickness/mm
Standard value	235	370	20	>0.16
1	400	405	23	0.10
2	405	410	21.5	0.24
3	410	419	20	0.32
4	403	407	22	0.12
5	407	413	21	0.22
6	408	415	20.5	0.3

由表6可以看出,激光熔覆制备的不锈钢层合板的覆层厚度除试验1#和4#外,均控制在标准设计尺寸范围内,其屈服强度高于层合板中两种基材的值,抗拉强度介于两种材料之间,在理想复合条件范围之内,即不同金属组合的复合界面的拉伸强度要比两组合材料中较弱的一个高<sup>[19]</sup>。由表6可知,力学性能试验结果均达到GB/T 8605-2008规定的值,此种方法制备的层合板具有较高的屈服强度、抗拉强度及良好的塑性,可以实现不锈钢-碳钢层合板界面的冶金结合且组织性能良好。从表6还可看出,层合板的屈服强度远超过标准规定的值(235 MPa),同时也超过其他方法制备层合板的屈服强度。文献[1]报道热轧复合不锈钢-碳钢复合板屈服强度为260 MPa,文献[20]爆炸焊接2205双相不锈钢与碳钢Q235屈服强度为326 MPa。同时屈强比为0.99,大的屈强比对应的塑性指标延伸率会相对较小。屈强比大可以充分发挥构件的使用性能,屈强比大的钢材用来做结构零件可靠性高。拉伸强度一般由材料直接决定,而屈服强度除材料外,还可以利用加工工艺做一定的提高。屈服强度较高是因为304不锈钢粉末中含有大量的合金元素,激光熔覆过程属于快速凝固,固溶强化显著,凝固结晶速度快,晶粒得到细化。同时较高的屈服强度提高了其在变形突然增大很多时的材料抵抗外力的能力。文献[21]通过控制轧制加热温度及均热温度来防止奥氏体晶粒的长大,使得奥氏体晶粒细化,起到细化铁素体晶粒的作用,使Q345B板材的弹性极限和强度得到显著提高,提出细化晶粒作用是提高屈服强度的主要机制。

对三种复合界面金相组织形态的层合板进行拉伸试验,表明激光熔覆制备不锈钢层合板的界面金相组织形态呈大波状结合时具有较高的屈服强度(410 MPa)和符合标准要求的延伸率(达20%),有良好塑性,同时随着层合板界面金相组织波高的增大,其屈服强度从400 MPa增大到410 MPa。界面波高越大,基复板的结合就越紧密和牢固,受拉时波状区域产生挤压力来抑制拉伸方向作用力,同时熔覆层厚度越大截面所能



承受的力越大,分离就越困难,强度就越高。还可以看出随着速度的降低或者激光功率的增大,获得的从小波状到大波状界面金相组织形态的激光熔覆层合板屈服强度依次增大。另外,随着扫描速度的降低,激光与材料的作用时间将增加,或者激光功率的增大将使单位面积上获得的激光输入能量增大,这都有利于基复材互扩散的进行,扩散使更大面积的新鲜金属不断地达到原子间力的作用范围,从而提高了层合板的力学性能。

## 4 结 论

1)对不锈钢层合板的金相分析研究表明,在试验条件范围内,随着激光能量密度的增大,其界面依次呈波高为0.01~0.03 mm、0.08~0.10 mm和0.11~0.14 mm三种金相组织形态,熔覆层厚度逐渐增大,同时界面呈大波高时激光熔覆制备的层合板具有较高的拉伸强度。

2)对三种复合界面金相组织形态的层合板进行拉伸试验,表明力学性能指标均达到了不锈钢层合板的标准要求,同时随着界面波高的增大屈服强度逐渐增大,且当其界面波高为0.11~0.14 mm的金相组织形态时屈服强度达到410 MPa,高于相关国家标准规定的235 MPa。

3)用此工艺方法获得了不锈钢-碳钢冶金结合及组织性能均良好的层合板,表明激光熔覆制备层合板是可行的,为激光熔覆制备不锈钢层合板的应用提供了理论和试验依据。

## 参考文献

- 1 Ding Haimin, Fan Xiaoliang, Wang Jinfeng, *et al.*. Interface characterization of hot-rolled stainless steel/carbon steel clad [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, 32(11): 18-22.  
丁海民, 范孝良, 王进峰, 等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征[J]. *材料热处理学报*, 2010, 32(11): 18-22.
- 2 Yang Bingbing, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Experiments on laser bending of stainless steel-carbon steel laminated sheet [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091430.  
杨冰冰, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯曲试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091430.
- 3 Han Linqing, Wang Zidong, Lin Guobiao, *et al.*. Investigation on microstructure and property of TA2/316L composite plate prepared by explosive welding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(1): 107-110.  
韩丽青, 王自东, 林国标, 等. 爆炸复合TA2/316L板的组织和性能研究[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(1): 107-110.
- 4 Kacar R, Acarer M. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel P355GH steel [J]. *J Mater Process Technol*, 2004, 152(1): 91-96.
- 5 Manesh H D. Assessment of surface bonding strength in Al clad steel strip using electrical resistivity and peeling tests [J]. *Mater Sci Technol*, 2006, 22(6): 634-640.
- 6 Rao N V, Sarma D S, Nagarjuna S, *et al.*. Influence of hot rolling and heat treatment on structure and properties of HSLA steel explosively clad with austenitic stainless steel [J]. *Mater Sci Technol*, 2009, 25(11): 1387-1396.
- 7 Liu Huan, Zheng Xiaoran. The manufacturing technique of clad metals sheet [J]. *Mater Rev*, 2012, 26(Z1): 131-135.  
刘 环, 郑晓冉. 层状金属复合板制备技术[J]. *材料导报*, 2012, 26(Z1): 131-135.
- 8 Jianli Song, Qilin Deng, Changyuan Chen, *et al.*. Rebuilding of metal components with laser cladding forming [J]. *Appl Surf Sci*, 2006, 252(22): 7934-7940.
- 9 Fang Jianmin, Zhang Xingyao, Shan Aidang, *et al.*. Microstructure and properties of stainless steels processed by accumulative roll-bonding [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(8): 16-18.  
方建敏, 张杏耀, 单爱党, 等. 累积叠轧焊不锈钢的组织和性能[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(8): 16-18.
- 10 Zhao Feng, Li Xuanming, Wang Hunian. The bonding property of the explode-rolled Ti/steel clad metal [J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(1): 30-34.  
赵 峰, 李选明, 王虎年. 爆炸-轧制钛/钢复合板界面结合性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(1): 30-34.
- 11 Xu Ning, Zhang Qunli, Yao Jianhua. Microstructure of in-site synthesis TiC hardened coating by laser irradiation [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2653-2657.  
徐 柠, 张群莉, 姚建华. 激光原位反应制备TiC强化涂层的显微结构[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2653-2657.
- 12 Li Yangliang, Jin Haixia, Bai Xiaobo, *et al.*. Research progress and development trend of laser cladding technology [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2009, 30(4): 1-5.

- 李养良, 金海霞, 白小波, 等. 激光熔覆技术的研究现状与发展趋势[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(4): 1-5.
- 13 Zhang Guangjun, Wu Peigui, Xu Jianing, *et al.*. Development of basic research for application of laser cladding technology [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(1): 5-13.  
张光钧, 吴培桂, 许佳宁, 等. 激光熔覆的应用基础研究进展[J]. 金属热处理, 2011, 36(1): 5-13.
- 14 Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.*. Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.  
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 15 Xu Wei, Zhu Ming, Guo Shengli, *et al.*. Interfaces of titanium-aluminum clad sheet and affecting to processing performance [J]. Chinese J Rare Metals, 2011, 35(3): 342-348.  
徐卫, 朱明, 郭胜利, 等. 钛-铝复合板界面组织及其对加工性能的影响[J]. 稀有金属, 2011, 35(3): 342-348.
- 16 Zhang Yueju, Yang Xusheng, Li Xiaojie, *et al.*. An experimental research on explosive welding of titanium/steel clad plate [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 103-107.  
张越举, 杨旭升, 李晓杰, 等. 钛/钢复合板爆炸焊接试验[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 103-107.
- 17 Wang Lixin, Li Guoping. Interface structure, performance analysis and application of exploded stainless and carbon steel clad plates [J]. Iron and Steel, 2005, 40(11): 71-74.  
王立新, 李国平. 爆破不锈钢复合板界面组织和性能分析及应用[J]. 钢铁, 2005, 40(11): 71-74.
- 18 Wei Xueqin, Zheng Qiguang, Gu Jianhui, *et al.*. Influences of inhomogeneous distribution and ripple of temperature on technique of laser cladding [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(2): 150-153.  
魏学勤, 郑启光, 辜建辉, 等. 激光熔覆过程中的温度分布和涨落对熔覆工艺的影响[J]. 中国机械工程, 2001, 12(2): 150-153.
- 19 Dong Chengwen, Li Yanfang, Ren Xueping. Joint interface characteristics of TA1/Q235 clad plates manufactured by accumulative roll-bonding [J]. J University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(3): 249-253.  
董成文, 李艳芳, 任学平. TA1/Q235钢复合板累积叠轧焊界面特性[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(3): 249-253.
- 20 Bi Zongyue, Zhang Feng, Jin Shilin, *et al.*. Performance analysis of large area 2205/Q235 duplex stainless steel composite plate [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(3): 25-28.  
毕宗岳, 张峰, 金时麟, 等. 2205/Q235大面积双相不锈钢复合板性能分析[J]. 焊管, 2010, 33(3): 25-28.
- 21 Zhang Huairan. Study on Increasing Yield Strength of Q345B Plate in JISCO[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. 32-46.  
张怀仁. 提高酒钢Q345B板材屈服强度研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003. 32-46.