

文章编号: 0258-7025(2010)12-3150-05

激光拼焊板组织定量分析及其力学性能预测

李新城¹ 高豪荣¹ 朱伟兴² 陈 炜¹

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013
²江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了预测并控制激光拼焊板的力学性能,通过对 0.8~1.5 mm 的 St12 板及其镀锌板拼焊板接头组织的定量分析,结合其组织-性能变化规律,得出影响力学性能的首要因素为马氏体含量,继而可得工艺优化控制方法。在此基础上建立了以焊接工艺及板厚为输入变量的偏最小二乘回归拼焊板力学性能预测模型。实例验证发现,所建预测模型对拼焊板抗拉强度及延伸率的预测精度均达 91% 以上,充分表明该模型与试验结果吻合良好,验证了该预测模型的合理性及适用性。

关键词 激光技术;激光拼焊板;组织定量分析;力学性能预测;偏最小二乘回归

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3150

Microstructural Quantitative Analysis and Mechanical Property Forecasting of Laser Tailored Welded Blank

Li Xincheng¹ Gao Haorong¹ Zhu Weixing² Chen Wei¹

(¹ College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² School of Electrical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract For the prediction and control of mechanical property of laser tailor-welded blanks, combining its microstructure-property rule microstructural qualitative analysis of joint microstructure of 0.8~1.5 mm St12 steel and galvanized steel sheet is constructed. The predominant influencing factor is martensite content and the optimal control process is obtained. On the basis of the research, prediction models of mechanical properties of tailor-welded blanks trained with welding processes and sheet thickness as input variables are put forward based on partial least-squares regression. According to the testing results, the forecasting accuracy of tensile strength and elongation is above 91%. Therefore, the proposed models are reasonable and applicable to examine deep-drawing steel for demonstrative purposes.

Key words laser technique; laser tailor-welded blanks; microstructural quantitative analysis; mechanical property prediction; partial least squares regression

1 引 言

近年来,随着国民经济的增长,经济实用的汽车以其质量轻、耗油少、安全性高而备受关注。由于激光拼焊板的应用减低了车身质量及生产成本,因而被广泛应用于汽车生产企业。但是,长期以来关于各种高性能激光拼焊板的研发工作均局限于实验观察和一般性理论探讨,很少能给出定量的工艺模拟

及其预测结果,从而大大增加了其研发费用及周期。若能利用计算模拟和预测技术,则可迅速而准确地预测激光拼焊板的力学性能并及时调整激光焊接工艺,对高性能激光拼焊板的研发具有十分重要的工程意义。然而,此类研究的相关成果在国内外均鲜见报道^[1~5]。

本文通过对 0.8~1.5 mm 的 St12 及其镀锌板

收稿日期: 2010-01-25; 收到修改稿日期: 2010-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(50775102)资助课题。

作者简介: 李新城(1956—),女,博士,教授,主要从事钢铁材料组织细氏技术与组织性能预测及控制等方面的研究。

E-mail: lixincheng@ujss.edu.cn

等厚/差厚拼焊板接头组织-拼焊板性能变化规律的深入分析,建立了基于偏最小二乘回归(PLS)的力学性能预测模型。为了尽量减少非组织因素对拼焊板力学性能的影响,试样均取自焊缝成形好且无焊缝缺陷的焊件。将这类焊件焊接组织相变的机理与数学建模相结合,探索实现了对激光拼焊板力学性能的预测。阐述了焊缝组织的定量分析与力学性能预测过程,并对预测值与真实值进行比较。

2 试验材料及方法

试验材料为攀钢冷轧厂生产的 St12 及其镀锌板,其中 St12 板的金相组织为铁素体+游离渗碳体,晶粒度级别 II 8.5~II 9.0;镀锌板组织为铁素体+珠光体,晶粒度级别 I 9.5~I 11.0。St12 及其镀锌板的抗拉强度(小于 2 mm)和延伸率分别为 297~319 MPa,366~380 MPa 和 41%,40%。

焊接设备为 2.5 kW 的 PRC 快轴流二氧化碳激光器,激光焊接工艺参数:功率 $P=1525\sim 1850$ W,焊接速度 1.6~2.0 m/min,光斑直径 $\phi=0.3\sim 1$ mm,保护气体为 Ar,气体压力 0.12 MPa,流量 15 L/min,焊接用透镜的焦距为 127 mm。选取不同焊接工艺参数下板厚为 0.8,1.0,1.5 mm 的 St12 板与镀锌板进行

组合拼焊,焊后采用 INSTRON 5569 型试验机进行拉伸试验。并对焊接接头进行金相检验及相关定量分析。

3 试验结果及分析

3.1 焊缝组织的微观及定量分析

图 1 为激光焊接功率 $P=1600$ W,焊接速度 1.8 m/min 和光斑直径 $\phi=0.3$ mm 时的 St12 及其镀锌板接头微观组织。焊缝均无缺陷,且应力、变形较小。焊件由于试件板厚差的变化引起了散热条件的不同,使得两种试样的焊缝呈现出不同的微观组织形貌。利用 Leica 光学显微镜对焊接接头进行显微组织分析。图 1(a),(b)分别对应于试样 a,b,由图 1(a)可见,焊缝主体组织为各类铁素体,如大量的多边形铁素体、晶界处的先共析铁素体以及向晶内生长的贝氏体铁素体(BF)^[6-9],另有少量低碳马氏体。这是由于试样 a 的厚度(0.8/1.5 mm)较薄造成其冷速较慢所致。众所周知,厚板的热传导性好于薄板,故厚板的散热性能要大于薄板,在焊缝冷却时,厚板的冷速要大于薄板。因而,试样 a 中 C 处产生了更多的高、中温区转变产物。

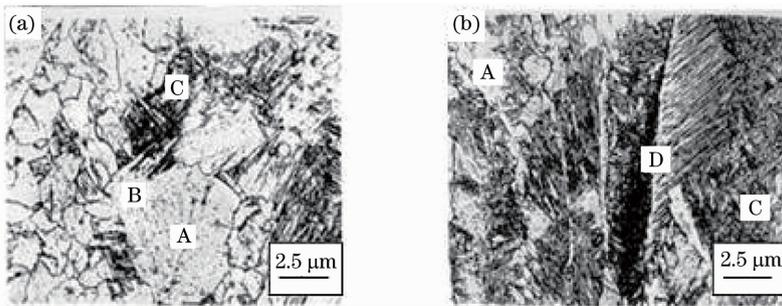


图 1 焊缝微观组织。(a)0.8 mm/1.5 mm,(b)1.5 mm/1.5 mm。(A-铁素体;B-贝氏体铁素体;C-低碳马氏体;D-上贝氏体)

Fig. 1 Microstructure of welding seam. (a) 0.8 mm/1.5 mm, (b) 1.5 mm/1.5 mm. (A-ferrite; B-bainite ferrite; C-low carbon martensite; D-upper bainite)

这里,值得关注的是贝氏体铁素体对焊缝韧性和强度的有益影响。在现代低碳、合金钢奥氏体连续冷却过程中形成的 BF 是由相互平行的铁素体板条束构成的,其形态特征为板条界为小角度晶界,板条束界面为大角度晶界。通常 BF 是在连续冷却时形成的,当形成温度较高时板条不够发达,有些板条形成后还会发生回复,使得塑、韧性提高。从性能上看,由于 BF 的亚晶强化、位错强化和晶粒细化的综合作用对强度和韧性有益^[9],故就拼焊板性能而言,希望得到更多的贝氏体铁素体。

由图 1(b)可见,焊缝主体组织为上贝氏体和低碳马氏体,另有少量铁素体。这主要起因于该试样的厚度(1.5/1.5 mm)较厚造成其冷速较快,故所获 C 处的中低温转变产物更多。由于 BF 中碳化物弥散度很差,分布于铁素体板条之间,使铁素体板条成裂纹扩展通道,显著降低拼焊板塑性。

为对焊缝组织组成物进行定量分析,以精确评价它们对焊件力学性能的影响规律,利用 SISC 图像软件对图 1 所示的焊缝微观组织进行定量分析,得到的结果如表 1 所示。其中 F, D_F 分别为铁素体

体积比和铁素体粒径; $\Delta F, \Delta D_F$ 则为铁素体体积相对比和铁素体粒径相对比, 其余依此类推。由表 1 可见, 试样 a 中铁素体质量分数高达 81.58%, 比试样 b 高出了 66.18%, 且其铁素体晶粒更细。分析认为, 这些细小的铁素体与其高的形核密度有关, 高形核率将导致已形核铁素体的生长空间狭小, 限制铁素体的生长, 从而细化铁素体。故从整体效果看,

表 1 焊缝组织定量分析测试结果

Table 1 Results of microstructural quantitative analysis of seam

Specimen	$F / \%$	$D_F / \mu\text{m}$	$\Delta F / \%$	$\Delta D_F / \%$	$B / \%$	$D_B / \mu\text{m}$	$\Delta B / \%$	$\Delta D_B / \%$	$M / \%$	$D_M / \mu\text{m}$	$\Delta M / \%$	$\Delta D_M / \%$
a	81.58	9.18	66.18	46.03	trace	—	68.32	63.91	16.08	13.50	50.10	1.03
b	24.21	17.01			51.58	7.12			24.21	12.01		

3.2 拉伸试验

对图 1 中的两个试样进行垂直于焊缝的横向拉伸。试样拉伸所得应力-应变曲线及其力学性能分别如图 2 和表 2 所示。由图 2 可见, 当拼焊板因两边母材厚度、强度不同时, 拉伸时的应力应变亦显著不同。首先是低强度的 St12 板发生屈服, 其后高强度的镀锌板发生屈服, 当拉伸载荷继续增加达到 St12 薄板的抗拉强度时, 镀锌厚板远未达到其抗拉强度。试验现象表明, 随着拼焊板的板厚差增大, 其抗拉强度值依次降低。这是因为板厚差越大, 等效于薄侧板材的厚度、强度越小, 其变形越大; 厚侧板材的厚度、强度越大, 其变形越小, 因而塑性变形更多集中在薄侧板材, 使得该侧发生破裂。这也正是本次试验所焊试件的断裂均发生在非焊缝区的低强度母材 St12 处的原因所在。

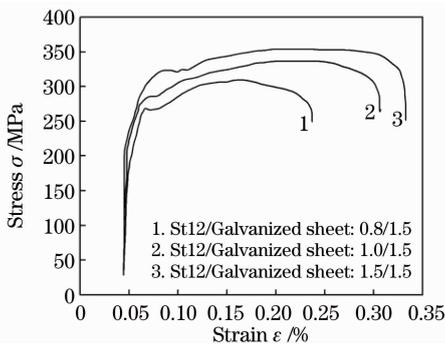


图 2 拼焊板试样应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of tailor-welded blanks

表 2 拼焊板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of tailor-welded blanks

St12/Galvanized Sheet /mm	R_m / MPa	$\delta / \%$	Remarks
0.8/1.5	330	25	Fracture St12
1.0/1.5	339	26	Fracture St12
1.5/1.5	350	28	Fracture St12

铁素体粒径必然随其含量增加而减小, 加之试样 a 的马氏体含量亦很少(仅为试样 b 的 2/3), 使得试样 a 表现出更高的塑性、韧性及较低的强度^[6,10,11]。而试样 b 因马氏体含量较多(为试样 a 的 2 倍), 表现为强度更高, 但因上贝氏体含量过高(质量分数 51.58%), 使其塑性、韧性恶化。

由表 2 可见, 拼焊板延伸率 δ 相对于母材均有下降, 下降幅度随板厚差增大而增大, 增幅达 35%~60%。分析认为, 这主要起因于: 1) 焊缝中淬硬组织的增加及固溶体组织的减少; 2) 薄侧板因应力集中引起大量变形; 3) 应力应变场差异增大造成薄侧板主应力和主应变增大。此外, 拼焊板抗拉强度 R_m 高于 St12 母材, 这主要起因于: 1) 焊缝形成时的冷速较快, 使熔合区、过热区均很窄, 从而大幅削弱了这两个区域对强度的负面影响; 2) 较快的冷速促使焊缝淬硬组织增加、晶粒细化。

3.3 焊接接头组织-性能变化规律

为定量分析各组织组成物对力学性能的影响规律, 利用 Matlab 软件对试验数据进行回归分析。鉴于拼焊板力学性能对母材厚度和焊缝组织都较敏感, 存在较大波动性。对此, 需要对试验数据求标准偏差, 以保证其可靠性。标准偏差若在均值的 10% 以内, 则数据有效; 否则说明数据可靠性差, 不宜采用。对焊件随机选取的样本(共 36 个)进行上述可靠性处理后, 采用样本为 33 个。以 St12 板厚、镀锌板板厚、焊缝铁素体含量、贝氏体含量和马氏体含量作为自变量 $x_1 \sim x_5$, 以拼焊板的抗拉强度和延伸率作为因变量 y_1 和 y_2 , 回归分析算出的公式为

$$y_1 = 4.5618x_1 + 4.8186x_2 - 0.1147x_3 + 0.1166x_4 + 0.5961x_5 + 318.8636, \quad (1)$$

$$y_2 = -2.1024x_1 - 0.4553x_2 - 0.2983x_3 - 0.1009x_4 - 0.3385x_5 + 54.8823. \quad (2)$$

由(1)、(2)式可见, 马氏体含量对抗拉强度和延伸率均为最显著的组织因素, 且其权重与其他组织因素(x_3, x_4)相比均很高, 其范围高达 45.88%~72.04%, 由此得出了增加抗拉强度和降低延伸率的首要因素为焊缝马氏体含量的结论。由回归公式(1)、(2)可得出力学性能较优的相应组织组成物含

量,继而反求得到了产生马氏体较少的优化焊接工艺窗口。由此即可进行最有效的工艺优化控制,意即在建立力学性能的预测模型时,所选焊接工艺参数均在优化焊接工艺窗口内取值。

4 拼焊板力学性能的预测模型

为了克服实物试验人力、物力消耗过大的弊端以及焊接工艺参数之间的多重相关性,在工艺优化控制及组织预测工作的基础上^[12,13],将偏最小二乘回归方法用于拼焊板力学性能预测工作,探索建立了相应的预测模型。试验材料为工艺优化后的 36 个焊件试样(18 个用于建立模型,另 18 个用于模型检验)。

4.1 力学性能预测模型的建立

为预测拼焊板力学性能,必须考虑焊件的工艺参数及母材厚度对其力学性能的映射关系。鉴于简化模型之需,首先应用模式识别最优判别平面方法分析工艺参数及母材厚度中对力学性能的主要影响因素及其权重,按照权重值找出了影响抗拉强度及延伸率的 5 个最主要因素为:St12 板厚度(x_1)、镀锌板厚度(x_2)、焊接功率(x_3)、焊接速度(x_4)和光斑直径(x_5),以此大大简化模型。即只考虑以上 5 个

输入变量对输出变量——拼焊板抗拉强度(y_1)和拼焊板延伸率(y_2)的映射关系。然后利用 Matlab 软件对所确定的 5 个因素进行 PLS 线性回归计算。通过交叉有效性原则,当选取主成分个数为 5 时,均方差 MSE 最小,即所建模型对输入变量和输出变量的累计解释能力最高。最后,求解得偏最小二乘多元回归方程系数矩阵,建立力学性能预测模型

$$y_1 = 18.5897x_1 + 19.9262x_2 - 0.0062x_3 + 6.7853x_4 - 7.0759x_5 + 292.1152, \quad (3)$$

$$y_2 = -2.0535x_1 - 8.2979x_2 + 0.0007x_3 - 0.1152x_4 + 1.4267x_5 + 37.4323. \quad (4)$$

4.2 力学性能预测模型的结果与分析

将 18 组拼焊板数据代入预测模型进行拼焊板强度及伸长率预测,并将预测值与实物试验值进行了对比,其结果如图 3 所示。由图 3 可见,由于工艺优化的效果,使拼焊板的强韧性配合更好,拼焊板抗拉强度和延伸率的预测值与实际值吻合度均较高。计算得到抗拉强度的相对误差为 0.3577%~7.4113%,延伸率的相对误差为 0.9868%~8.5888%。表明所建预测模型具有良好工业实用价值,可推广应用于生产中激光拼焊板力学性能的预测。

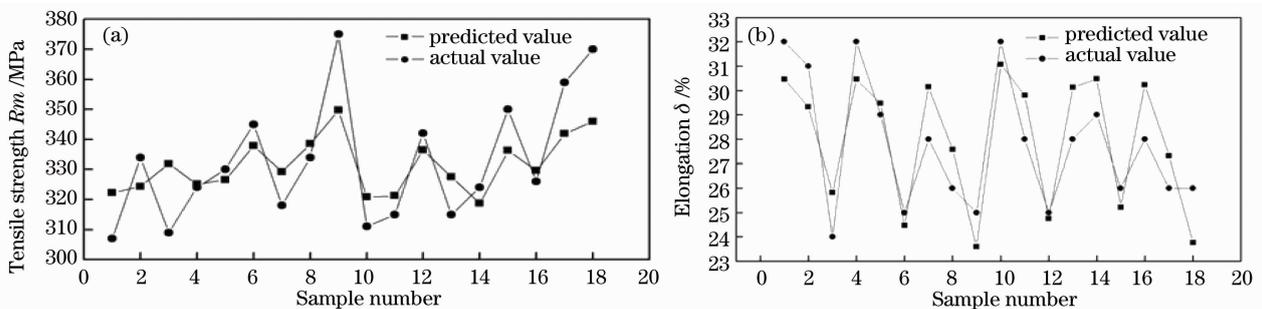


图 3 拼焊板抗拉强度(a)和延伸率(b)的预测值与实际值

Fig. 3 Predicted and actual value of tensile strength (a) and elongation (b)

5 结 论

通过对 St12 板及其镀锌板拼焊板接头组织的微观定量分析,得出了影响力学性能的首要组织因素为焊缝马氏体含量,继而反求得到了产生马氏体较少的优化焊接工艺窗口。在焊缝组织定量分析的基础上建立了以焊接工艺及板厚为输入变量的偏最小二乘回归拼焊板力学性能预测模型。

通过实例验证发现,所建力学性能预测模型对抗拉强度及延伸率的预测精度均达 91% 以上。充分表明该模型与试验结果的一致性,验证了该模型的合理性及适用性。

参 考 文 献

- 1 C. Sujit, S. Rajib, M. Ray *et al.*. Evaluation of formability and mechanical behavior of laser-welded tailored blanks made of interstitial-free and dual-phase steels[J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2009, **40**(5): 1142~1152
- 2 G. Sadok, R. Jean-Marc, P. Fabrice *et al.*. Experimental and numerical assessment of tailor-welded blanks formability[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(1): 387~395
- 3 Qiang Wu, Jinke Gong, Genyu Chen. Research on laser welding of vehicle body [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(2): 420~426
- 4 P. Sushanta Kumar, D. K. Ravi. Study of formability of tailor-welded blanks in plane-strain stretch forming[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, **44**(7-8): 675~685
- 5 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777

- 吴东江, 尹波, 张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 6 Weng Yuqing. Ultrafine Grained Steel - Theory on Structural Refinement and Control Technology of Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003
- 翁宇庆. 超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- 7 G. Krauss, S. W. Thompson. Ferrite microstructure in continuously colled low-and-ultralow-carbon steels [J]. *ISIJ Int.*, 1995, **35**(8): 937~945
- 8 H. K. D. H. Bhadeshia. Alternatives to the ferrite-pearlite microstructure[J]. *Mater. Sci. Forum.*, 1998, **284-286**: 39~50
- 9 Fang Hongsheng. Bainite transformation[M]. Beijing: Science Press, 1999
- 方鸿生. 贝氏体相变[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 10 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
- 曹子文, 邹世坤, 刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 316~320
- 11 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying *et al.*. Novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 罗曦, 陈培锋, 王英等. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 12 Li Xincheng, Luo Guanghong, Zhu Weixing *et al.*. The design and application of microstructure control system applied to vehicles using sheet[C]. *ITIC*, 2006, **11**: 1034~1038
- 13 Li Xincheng, Feng Xiaotian, Zhu Weixing *et al.*. Weld shapes prediction and grain size forecasting of deep-drawing laser tailored welded blank (LTWB)[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, **41**(6): 222~226
- 李新城, 冯晓天, 朱伟兴等. 深冲钢激光拼焊板焊缝形状及其晶粒尺寸预测[J]. 农业机械学报, 2010, **41**(6): 222~226

2011 年《中国激光》“激光制造”专题 征 稿 启 事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》在成功组织 2008 年、2009 年“激光制造”专题的基础上,计划在 2011 年 6 月正刊(EI 核心收录)上推出第三期“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光制备新材料技术
- 激光表面工程技术
- 激光连接技术
- 激光去除技术
- 激光直接制造技术
- 激光复合制造技术
- 激光微加工技术
- 激光纳米制造技术
- 激光器、光学元器件与加工系统
- 激光宏观制造过程模拟、检测与控制技术
- 其他

特邀组稿专家:

钟敏霖 教授(《中国激光》常务编委) 清华大学机械工程系激光加工研究中心

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期:2011 年 2 月 28 日

投稿方式以及格式:

通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>)直接上传稿件(留言中说明“激光制造”专题投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn;电话:021-69918427-802。

《中国激光》杂志社

2010-09-22