

热输入对纳米析出强化钢激光焊接接头组织及 纳米力学性能的影响

王海生^{1,2} 王 卫^{1,2} 王晓南^{2*} 朱广江¹ 陈长军³ 张 敏³ 朱国辉^{1,2}

¹安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002

²苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215201

³苏州大学机电工程学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021

摘要 研究了激光焊接热输入对纳米析出强化钢焊接接头熔深、显微组织及纳米力学性能的影响。利用体视显微镜和扫描电子显微镜对焊接接头的熔深、显微组织进行了分析,通过纳米压入实验对激光焊接接头各区域的纳米硬度和弹性模量进行了研究。实验结果表明:随着焊接热输入增加焊缝熔深逐渐增大,两者之间呈一元线性关系;当焊接热输入低于94 J/mm²时,焊缝为全马氏体组织;当焊接热输入超过125 J/mm²时,焊缝中出现贝氏体组织和铁素体组织;且随着热输入的增加,贝氏体和铁素体含量有所增加。随着焊接热输入的增加,焊缝区的纳米硬度逐渐降低,其原因为热输入增大致使贝氏体和铁素体的形成。焊接热输入对焊缝的弹性模量影响不明显,弹性模量在200 GPa左右。

关键词 激光技术;显微组织;激光焊接;纳米硬度;力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0703004

Effect of Heat Input on Weld Joints Microstructure and Nano Mechanical Properties of Nano Precipitation Hardening Steel

Wang Haisheng^{1,2} Wang Wei^{1,2} Wang Xiaonan² Zhu Guangjiang¹ Chen Changjun³
Zhang Min³ Zhu Guohui^{1,2}

¹School of Metallurgy and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China

²Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

³Laser Processing Research Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Influence of heat input on the penetration, microstructure and nano mechanical properties of laser welding joint is studied. The penetration and microstructure of joints are tested by stereo microscope and scanning electron microscope. The nanohardness and elastic modulus of joints are tested by nanoindentation. The result shows that the penetration increases with the increase of heat input, there is a linear relationship between penetration and heat input. Microstructure of weld seam is consist of full martensite when the heat input is below 94 J/mm². Bainite and ferrite appear in the weld seam when the heat input is over 125 J/mm², the volume of bainite and ferrite increases with the increase of heat input. With the increase of the welding heat input the nanohardness decreases gradually, the reason for the decrease is the formation of bainite and ferrite. The influence of welding heat input on the elastic modulus is not obvious, the modulus of elasticity is around 200 GPa.

Key words laser technology; microstructure; laser welding; nanohardness; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305285)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20130315)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金资助项目(GZ201304)

作者简介: 王海生(1989—),男,硕士研究生,主要从事高强钢激光焊接方面的研究。E-mail: 511213174@qq.com

导师简介: 朱国辉(1959—),男,博士,教授,主要从事钢铁材料研究开发方面的工作。E-mail: zhugh@ahut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wxn@suda.edu.cn

1 引言

近年来,汽车、工程设备等都在向轻量、安全、高效的方向发展,因此在汽车制造和机械工程领域等对于先进高强钢的需求不断增加^[1-2]。目前,先进高强钢主要包括铁素体马氏体双相钢、贝氏体钢以及热轧高强钢等,其中热轧高强钢主要有热轧双相钢、热轧贝氏体钢、纳米析出强化钢等^[3-5]。

焊接作为上述钢材的重要连接技术,焊接接头的质量控制对钢材的实际应用有着至关重要的作用。高能束激光焊接为高强度钢铁材料的连接提供了一种新的途径,有关激光焊接接头的研究国内外的学者做了大量工作^[6-10]。Mikhail Sokolov等^[6-7]研究认为,在S355结构钢和超低碳贝氏体钢中,随着激光焊接热输入增加焊缝显微硬度降低,但是焊缝和热影响区硬度均高于母材。Perez-Medina等^[8]研究了激光焊接TRIP-800钢焊缝和热影响区的组织演变,焊缝和热影响区发生了贝氏体和铁素体转变,与传统的CO₂气体保护焊相比,热影响区与焊缝的马氏体的量显著增多。李亚玲等^[9]对汽车用高强钢板B450LAD的激光焊接的组织力学性能研究发现,焊缝区为全马氏体组织,并且焊缝硬度约为母材硬度的2倍。上述研究表明,激光焊接在高强度钢连接上具有其他焊接方式无可比拟的优势,如焊缝深宽比高、热影响区窄、焊接接头质量佳、生产效率高等突出优点^[10]。

本文以新开发700 MPa级热轧Nb-Ti微合金化高强钢^[11]为研究对象,采用光纤激光焊接技术,研究激光焊接热输入对焊接接头熔深、显微组织的影响。由于激光焊接焊缝和热影响区极窄,为更精确的研究其力学性能,采用纳米压痕技术对焊接接头的纳米硬度、弹性模量变化规律进行分析。研究工作为后续实际应用及理论研究提供必要的理论基础。

2 实验材料及方法

实验材料为4.6 mm厚热轧Nb-Ti微合金化高强钢,其化学成分(质量分数)如表1所示。表2为实验钢的力学性能。实验钢通过控制轧制和控制冷却工艺,综合运用细晶强化、析出强化、固溶强化、位错强化及相变强化的强化机制,获得良好的组织形态和大量弥散分布的尺寸在10 nm以下的(Nb, Ti)C析出物,析出强化的强度贡献量可达300 MPa,因此也将其定义为纳米析出强化钢。实验钢具有优良的力学性能及成形性能,在汽车用钢领域具有良好的应用前景^[11]。

表1 实验用钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of tested steel

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	N	Fe
0.09	0.15	1.9	0.0035	0.001	0.03	0.03	0.1	0.005	余量

表2 实验用钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of tested steel

Yield strength σ_s /MPa	Tensile strength σ_b /MPa	Elongation A /%
650	700	21

激光焊接实验在美国IPG公司的YLS-4000光纤激光器上完成,激光器的光纤直径为200 μm ,焦距为300 mm。焊接时采用纯氩气(Ar)作为保护气体,气体流量为10 L/min。焊接方式为对接拼焊。实验通过改变焊接速度来改变焊接时热输入的大小,进而研究热输入对于焊接接头的焊接质量的影响。在实验过程中控制焊接功率为3000 W、离焦量为-2 mm不变,而焊接速度分别为50.0、40.0、30.0、25.0、23.2、16.6 mm/s,共分为6组进行施焊。

实验中激光焊接热输入 E 计算公式为^[12]:

$$E = \frac{P}{vd}, \quad (1)$$

式中 P 为焊接功率(W), v 为焊接速度(mm/s), d 为光斑直径(0.80 mm);由(1)式可得,当焊接速度为50.0、40.0、30.0、25.0、23.2、16.6 mm/s时,对应的焊接热输入分别为75、94、125、150、162、226 J/mm²。

焊接接头样品经打磨、抛光后用4%硝酸酒精溶液腐蚀,采用南光ZOOM1020体视显微镜对接头宏观形貌进行观察;采用日立S-4700扫描电子显微镜对焊接接头精细显微组织进行观察;采用瑞士CSM纳米压入/划入测试系统对焊接接头各个区域的纳米硬度进行测定,实验载荷为300 mN,保载时间为10 s。采用经典

力学方法,即 oliver-Phar 法分析材料的纳米硬度和弹性模量。纳米硬度 H 定义为^[13]:

$$H = \frac{P}{A}, \quad (2)$$

复合响应模量 E_r 定义为:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}}, \quad (3)$$

式中 P 为任意压痕深度的实时载荷; A 为在 P 作用下接触表面的投影面积; $S = dP/dh$ 为卸载曲线的端部斜率; β 为与压头形状有关的常数。

而被测试样的弹性模量 E_i 可由

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (4)$$

得到,式中 E_i , ν_i 分别为被测材料的弹性模量和泊松比, E_i , ν_i 分别为压头的弹性模量和泊松比。

3 实验结果与分析

3.1 热输入对焊接接头熔深的影响

图 1 为不同焊接热输入下焊缝宏观形貌。由图可见,随着焊接热输入的增加,焊缝熔深逐渐增加。当热输入 (E) 分别为 75、94、125、150、162 J/mm² 时,熔深 (D) 分别为 2.96、3.29、3.64、3.85、3.98 mm。利用 origin 软件对上述焊接热输入 (E) 和熔深 (D) 进行线性回归,两者关系为: $D = 0.0113E + 2.1738$ 。

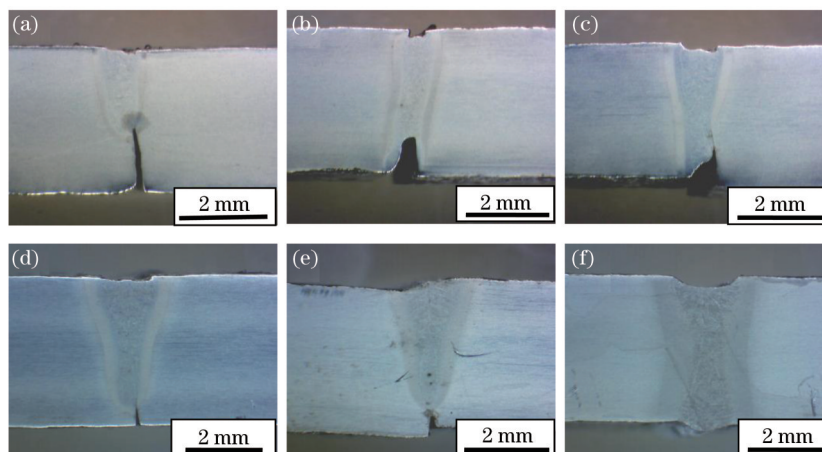


图 1 不同焊接热输入下的焊接接头的宏观形貌。(a) 75 J/mm²; (b) 94 J/mm²; (c) 125 J/mm²; (d) 150 J/mm²; (e) 162 J/mm²; (f) 226 J/mm²

Fig. 1 Macro morphology of the welded joints at different heat input. (a) 75 J/mm²; (b) 94 J/mm²; (c) 125 J/mm²;

(d) 150 J/mm²; (e) 162 J/mm²; (f) 226 J/mm²

激光焊接的过程中,被焊金属材料发生气化的同时在蒸汽压力的作用下会形成小孔^[14]。由于“小孔效应”的存在使得激光在小孔壁内经过多次反射被吸收,从而使得激光的能量几乎 100% 地被吸收^[15]。当焊接的热输入较小时(不大于 162 J/mm²),小孔吸收的能量较少,焊缝的熔深小,如当焊接热输入为 75 J/mm² 时,熔深仅仅为 2.96 mm;而随着热输入的增大,小孔吸收的能量增大,使焊缝底部的金属蒸发增多,焊缝熔深增大,当焊接热输入为 162 J/mm² 时,熔深达到 3.98 mm;当焊接热输入为 226 J/mm² 时可完全焊透,即熔深不小于 4.60 mm。

3.2 热输入对焊接接头的微观组织的影响

图 2 是焊接热输入为 226 J/mm² 时焊接接头宏观和微观形貌。如图 2(a) 所示,激光焊接接头可分为母材区 (BM)、热影响区 (HAZ) 和焊缝 (WS),而热影响区又可细分为热影响区混晶区 (MG-HAZ)、热影响区细晶区 (FG-HAZ) 和热影响区粗晶区 (CG-HAZ)。并且焊接接头的宏观形貌基本沿焊缝中心线对称分布。如图 2(b) 所示,母材组织以铁素体组织 (F) 为主,并且弥散分布少量的碳化物 (C)。

焊缝的扫描电镜形貌如图 2(c) 所示,与传统的 CO₂ 气体保护焊相比,由于激光焊接热输入小,冷却速度快,焊后冷却速率远远大于实验钢的马氏体转变的速度,过冷奥氏体发生切变型马氏体相变转变为马氏

体^[16-18],因此在焊缝处形成了大量的板条状马氏体组织(LM),同时有一定的贝氏体(B)和铁素体组织(F)形成。图2(d)所示为热影响区粗晶区扫描电镜照片,由于热影响区粗晶区靠近焊缝,因此发生过热而使得奥氏体化的晶粒发生严重的长大,随着快速冷却长大的奥氏体晶粒迅速发生马氏体相变生成粗大的板条马氏体组织(LM)。由于细晶区距焊缝中心远,焊接热循环的峰值温度相对较低,完全奥氏体化后迅速冷却晶粒来不及长大,因此细晶区形成细小的铁素体和少量的马氏体组织,从图2(e)可以发现,相对于粗晶区,细晶区的晶粒尺寸明显细化。图2(f)为不完全相变的混晶区,由于焊接热循环峰值温度相对较低,只发生局部奥氏体化转变,所以热影响区混晶区为铁素体组织和少量的马氏体组织或M/A组元。

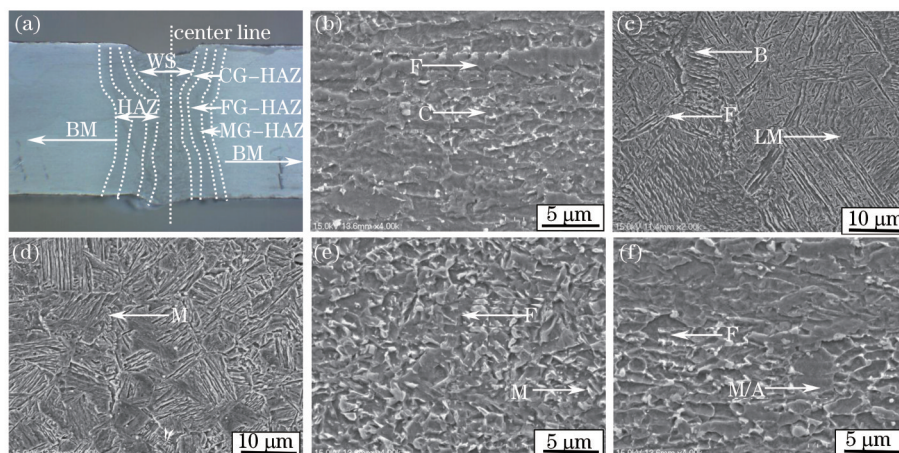


图2 焊接接头的宏观及微观组织(热输入 226 J/mm²)。 (a) 宏观形貌; (b) 母材; (c) 焊缝; (d) 粗晶区; (e) 细晶区; (f) 混晶区
Fig.2 Macro and micro morphology of weld joint (heat input of 226 J/mm²). (a) Macro morphology; (b) BM; (c) WS; (d) CG-HAZ; (e) FG-HAZ; (f) MG-HAZ

图3为不同焊接热输入下的焊缝区形貌。如图3(a)和图3(b)所示,当焊接热输入为 75 J/mm²和 94 J/mm²时,在焊缝处形成的均为马氏体组织。根据雷卡林模型^[19]中有关焊接热输入的计算公式可知,热输入 E 越小,焊后冷却时间 Δt 越小,即冷却速度越快。当热输入为 75 J/mm²和 94 J/mm²时,冷却速度极快导致焊缝中的碳和合金元素来不及扩散而形成全马氏体组织。随着焊接热输入的增大,当焊接热输入达到 125 J/mm²时,如图3(c)所示,开始有少量的贝氏体组织生成,而且在原始奥氏体晶界处析出了少量的铁素体组织,析出的铁素体呈长条状并且沿奥氏体晶界分布^[20],此外,随着热输入的增加,焊缝区贝氏体和铁素体含量逐渐增加。当焊接热输入达到 226 J/mm²时,如图3(f)所示,贝氏体以及铁素体含量显著增加。

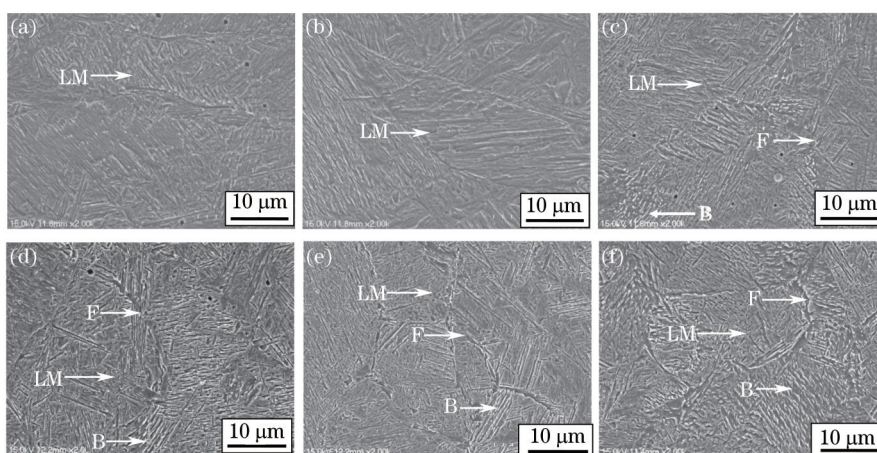


图3 不同焊接热输入下的焊缝的显微组织。 (a) 75 J/mm²; (b) 94 J/mm²; (c) 125 J/mm²; (d) 150 J/mm²; (e) 162 J/mm²; (f) 226 J/mm²
Fig.3 Microstructure of weld seam at different heat input. (a) 75 J/mm²; (b) 94 J/mm²; (c) 125 J/mm²; (d) 150 J/mm²; (e) 162 J/mm²; (f) 226 J/mm²

3.3 热输入对焊接接头纳米硬度和弹性模量的影响

图4为焊接接头纳米压入实验测得的载荷-位移曲线(热输入226 J/mm²)。表3为纳米压痕实验测得的焊接接头不同区域的实验结果。由图4及表3可知,母材的纳米硬度显著低于焊缝和粗晶区,略低于细晶区和混晶区。粗晶区和焊缝区的纳米硬度分别为4.73 GPa和3.85 GPa,母材的纳米硬度仅为3.22 GPa。

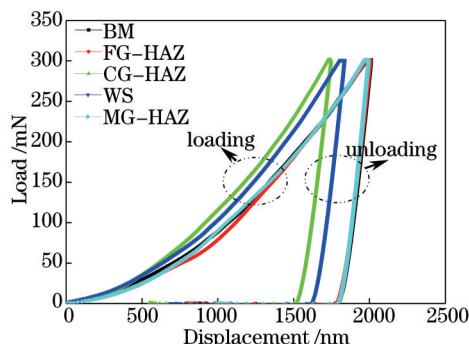


图4 焊接接头纳米压痕载荷-位移曲线(热输入226 J/mm²)

Fig.4 Nanoindentation load-displacement curves of weld joint (heat input of 226 J/mm²)

表3 纳米压痕实验结果(热输入226 J/mm²)

Table 3 Result of nanoindentation testing (heat input of 226 J/mm²)

Position	Nanohardness H/GPa	Displacement h/nm	Elastic modulus E_r/GPa	Indentation size $A/\mu m$
WS	3.85	1836.71	202.38	12.50
CG-HAZ	4.73	1676.51	202.52	11.56
FG-HAZ	3.26	2009.63	169.90	13.42
MG-HAZ	3.31	1997.12	168.69	13.40
BM	3.22	2011.96	173.75	13.44

由表3中的弹性模量测量结果可知,焊缝区、粗晶区的弹性模量在202 GPa左右,而细晶区、混晶区和母材的弹性模量约为170 GPa。弹性模量是原子间结合力的一种表征,对材料的组织不十分敏感^[21]。初步分析焊缝区弹性模量高的原因为:由于激光焊接过程中焊缝温度可达3000 °C,将会使得母材中原有的析出相(Nb, Ti)C发生回溶,而C原子直径仅仅为0.15 nm,回溶过程中形成间隙固溶体,使得原子间距大大减小,原子结合更加紧密,弹性模量相应提高^[22]。而焊接过程中粗晶区由于距离焊缝较近,焊接过程中最高温度可接近1500 °C,因此焊接过程中间隙原子(H、C等)向粗晶区偏聚,导致相邻原子间距缩小,原子间结合力增加而致使弹性模量升高。文献[23]的研究中也观察到相似的研究结果。

图5给出了不同区域纳米压痕的形貌。对于钢铁材料而言,几种典型组织的硬度由大到小依次为马氏体、贝氏体、珠光体、铁素体。由于母材为较软的铁素体组织和少量的碳化物,因此纳米压痕的尺寸相对较大,所得纳米硬度较小。而由于在粗晶区形成的为板条马氏体组织,如图5(c)所示,压痕全部作用于马氏体组织上,而马氏体组织较硬,其压痕尺寸最小(11.56 μm),因此纳米硬度最高(4.73 GPa)。如图5(d)所示,焊缝由板条马氏体、铁素体和贝氏体组成,纳米压痕部分区域作用在贝氏体组织上,因此其硬度相对粗晶区降低。

图6为焊接热输入为75、125、162和226 J/mm²的焊缝中心纳米压痕载荷-位移曲线。表4为在不同焊接热输入下纳米压痕实验测得数据。通过纳米压痕实验测得,在焊接热输入为75、125、162、226 J/mm²的情况

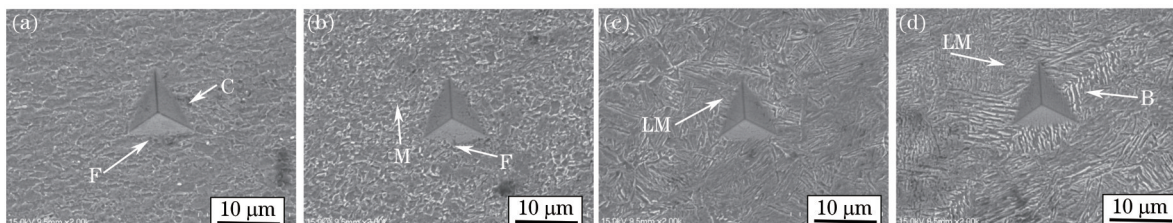


图5 热输入为226 J/mm²时纳米压痕形貌。(a)母材;(b)细晶区;(c)粗晶区;(d)焊缝

Fig.5 Nanoindentation morphology at heat input 226 J/mm². (a) BM; (b) FG-HAZ; (c) CG-HAZ; (d) WS

下所得纳米压痕的深度的最大值(h_{max})由热输入为 75 J/mm^2 时的 1553.93 nm 增加到 226 J/mm^2 时的 1836.71 nm , 而对应的纳米硬度(H)由 5.70 GPa 下降到 3.85 GPa , 这表明压痕深度随热输入的增大而增大, 焊缝硬度随着焊接热输入的增加硬度降低。同时测得不同热输入下的弹性模量(E_i)分别为 197.01 、 200.36 、 199.90 、 202.39 GPa , 可见焊缝的弹性模量在 200 GPa 左右, 变化不明显。这主要是由于虽然焊接热输入有所变化, 但是焊缝处的纳米析出相(Nb, Ti)C 均会发生回溶, 因此弹性模量无明显变化。

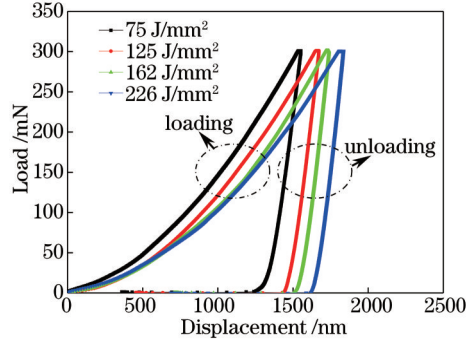


图6 不同热输入下焊缝中心纳米压痕载荷-位移曲线

Fig.6 Nanoindentation load-displacement curves of weld at different heat input

表4 不同焊接热输入下焊缝区的纳米压痕实验结果

Table 4 Nanoindentation results of welded seam at different heat input

Heat input $E /(\text{J/mm}^2)$	Nanohardness $H /(\text{GPa})$	Displacement $h /(\text{nm})$	Elastic modulus $E_i /(\text{GPa})$	Indentation size $A /(\mu\text{m})$
75	5.70	1553.93	197.01	11.57
125	4.77	1673.84	200.36	11.91
162	4.38	1740.87	199.90	12.28
226	3.85	1836.71	202.38	12.50

图7给出的是不同热输入条件下焊缝区纳米压痕照片。造成纳米压痕尺寸的变化的主要原因是焊缝的显微组织的变化。如图7(a)所示, 由于热输入为 75 J/mm^2 时, 焊缝组织为板条马氏体组织, 纳米压痕作用在在马氏体组织上, 所得的压痕尺寸最小。随着焊接热输入增大, 随着贝氏体和铁素体含量的不断增加, 纳米压痕作用在这些相对较软的组织上的比例逐渐增大, 导致纳米硬度逐渐降低。如图7(b)所示, 因为约 $1/3$ 压痕作用在贝氏体组织上, 所得压痕尺寸相对图7(a)增大。而如图7(d)所示, 由于焊接热输入为 226 J/mm^2 时形成的铁素体和贝氏体最多, 而测得压痕大部分作用于贝氏体和铁素体组织上, 因此所得压痕尺寸最大, 纳米硬度最低。

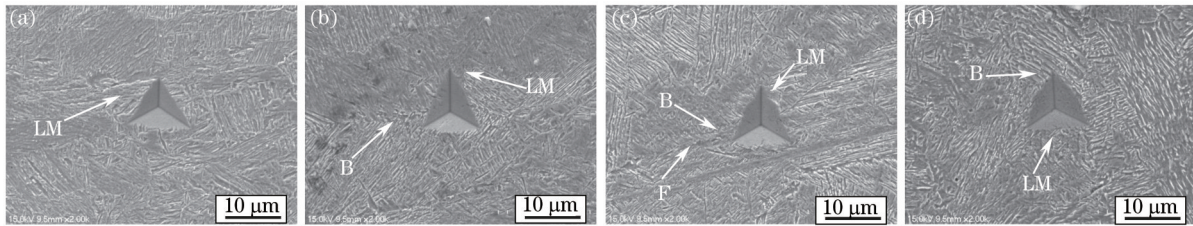


图7 不同焊接热输入时纳米压痕形貌。(a) 75 J/mm^2 ; (b) 125 J/mm^2 ; (c) 162 J/mm^2 ; (d) 226 J/mm^2

Fig.7 Nano indentation morphology at different heat input. (a) 75 J/mm^2 ; (b) 125 J/mm^2 ; (c) 162 J/mm^2 ; (d) 226 J/mm^2

4 结 论

采用 4 kW 光纤激光器对热轧纳米析出强化钢进行了焊接实验, 分析了激光焊接热输入对焊接熔深、显微组织及纳米力学性能的影响。结论如下:

- 1) 当焊接功率为 3.0 kW , 离焦距为 -2 mm 时, 随着焊接热输入的增加, 焊缝的熔深和熔宽均增大, 热输入(E)与熔深(D)之间满足 $D=0.0113E+2.1738$; 当焊接热输入达到 226 J/mm^2 时可获得全熔透焊缝。
- 2) 当焊接热输入低于 94 J/mm^2 时, 焊缝发生全马氏体转变; 当焊接热输入超过 125 J/mm^2 时, 焊缝中出现

贝氏体转变和铁素体转变,铁素体主要在原始奥氏体晶界上形核,且随着热输入的增加,贝氏体和铁素体含量有所增加。

3) 随着焊接热输入的增加,焊缝区域的纳米硬度逐渐降低,弹性模量在 200 GPa 左右。在热输入分别为 74 J/mm²和 226 J/mm²时,焊缝纳米硬度分别为 5.702 GPa 和 3.851 GPa,其原因为热输入增大致使贝氏体和铁素体的形成。由于焊缝区纳米析出相(Nb, Ti)C 的回溶和粗晶区原子偏聚导致其弹性模量高于细晶区、混晶区和母材。

参 考 文 献

- 1 Peng Yun, Peng Xingna, Zhang Xiaomu, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of GMAW weld metal of 890MPa class steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 21(5): 539–544.
- 2 L Karlsson, H K D H Bhadeshia. The latest trend of welding materials in Europe[J]. Journal of the Japan Welding Society, 2011, 80(1): 110–119.
- 3 Kang Yonglin, Han Qihang, Zhao Ximeng, *et al.*. Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanisms of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium[J]. Materials and Design, 2013, 44: 331–339.
- 4 R D K Misra, H Nathani, J E Hartmann, *et al.*. Microstructural evolution in a new 770 MPa hot rolled Nb – Ti microalloyed steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 394(1–2): 339 – 352.
- 5 Wang Xiaonan, Du Linxiu, Xie Hui, *et al.*. Effect of deformation on continuous cooling phase transformation behavior of 780 MPa Nb–Ti ultra-high strength steel[J]. Steel Research International, 2011, 82(12): 1417–1424.
- 6 Mikhail Sokolov, Antti Salminen, Mikhail Kuznetsov. Laser welding and weld hardness analysis of thick section S355 structural steel[J]. Materials and Design, 2011, 32(10): 5127–5131.
- 7 Zhao Lin, Chen Wuzhu, Zhang Xudong. Microstructure and mechanical properties of laser welded heat affected zone in new ultra low carbon bainitic steel[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 408–412.
赵琳, 陈武柱, 张旭东. 新一代超低碳贝氏体钢激光焊接热影响区的组织和性能[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 408–412.
- 8 G Y Perez–Medina, H F Lopez, P Zambrano, *et al.*. Microstructural effects on the mechanical integrity of a TRIP–800 steel welded by laser–CO₂ process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(2): 602–612.
- 9 Li Yaling, Huang Jian, Gao Zhiguo, *et al.*. Structure and properties of high power laser welding of high strength steel B450 LAD for vehicles[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 2047–2051.
李亚玲, 黄坚, 高志国, 等. 高功率激光焊接汽车用高强度钢 B450LAD 组织与性能[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2047–2051.
- 10 Wang Xiaonan, Chen Changjun, Zhu Guangjiang, *et al.*. Research progress on laser– arc hybrid welding of steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030008.
王晓南, 陈长军, 朱广江, 等. 钢铁材料激光–电弧复合焊接技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 030008.
- 11 Sun Qian, Wang Xiaonan, Zhang Shunhu, *et al.*. Effect of microstructure on fracture toughness of new type hot–rolled nano–scale precipitation strengthening steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(12): 1501–1507.
孙茜, 王晓南, 章顺虎, 等. 显微组织对新型热轧纳米析出强化钢断裂韧性的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(12): 1501–1507.
- 12 H N Moosavy, M R Aboutalebi, S H Seyedein. An analytical algorithm to predict weldability of precipitation–strengthened nickel–base superalloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 212(11): 2210–2218.
- 13 W C Oliver, G M Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564–1583.
- 14 Zhu Lihong. Study on Effect of Laser Welding Heat Input on Microstructures and Properties of Stainless Steel Joints[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
朱立红. 激光焊接线能量对不锈钢接头组织及性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- 15 Zuo Zhuchuan. Laser Processing of High Strength Aluminum Alloy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 25–29.
左铸钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 25–29.
- 16 Liu Huijie. Welding Metallurgy and Welding[M]. Haerbin: Machinery Industry Press, 2007: 85–126.
刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 哈尔滨: 机械工业出版社, 2007: 85–126.
- 17 Wang Wenquan, Ma Kai, Sun Daqian, *et al.*. Microstructure and properties of CO₂ laser welded 600 MPa DP steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 25–28.

- 王文权, 马 凯, 孙大千, 等. CO₂激光焊接 600 MPa DP 钢接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 25-28.
- 18 Liu Qibin, Bai Lifeng. Microstructure and properties of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A by laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2182-2186.
- 刘其斌, 白丽锋. 超高强度 30CrMnSiNi2A 钢的激光焊接组织及性能[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2182-2186.
- 19 Niu Jitai. Physical Simulation in Materials and Hot-Working[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 77-83.
- 牛济泰. 材料和热加工领域的物理模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 77-83.
- 20 Adam Grajcar, Maciej Rozanski, Sebastian Stano. Effect of heat input on microstructure and hardness distribution of laser welded Si-Al TRIP-type steel[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014: 974182.
- 21 Ren Mingxing, Li Bangsheng, Yang Chuang, *et al.*. Hardness and elastic modulus of microcastings by nanoindentation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 231-236.
- 任明星, 李邦盛, 杨 闯, 等. 纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模量[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(2): 231-236.
- 22 Wang Junsheng. Influence of alloying elements on the elastic modulus[J]. Chinese J Rare Metals, 1979, (4): 1-11.
- 王俊陞. 合金化元素对弹性模量的影响[J]. 稀有金属, 1979, (4): 1-11.
- 23 Lan Liangyun, Qiu Chunlin, Zhao Dewen, *et al.*. Structure and micromechanical properties of a weld joint using steel with low sensitivity to weld cracking[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(4): 505-508.
- 兰亮云, 邱春林, 赵德文, 等. 低焊接裂纹敏感性钢焊接接头组织及微观力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 505-508.

栏目编辑: 刘丰瑞