

材料导报

Materials Reports

ISSN 1005-023X, CN 50-1078/TB

《材料导报》网络首发论文

题目: Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层的组织与性能
作者: 李越, 李玉龙, 李学文
网络首发日期: 2020-07-16
引用格式: 李越, 李玉龙, 李学文. Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层的组织与性能. 材料导报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20200716.1114.040.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.11896/cldb.19040192

Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层的组织与性能

李越¹, 李玉龙¹, 李学文^{1,2,✉}

1 南昌大学机电工程学院机器人及焊接自动化重点实验室, 南昌 330031

2 南昌大学机电工程学院工程训练中心, 南昌 330031

为了研究不同堆焊热输入对非晶涂层的组织与性能的影响, 采用 TIG 焊堆焊方法在 Q235 基板上制备了铁基非晶合金涂层。通过 X 射线衍射、光学显微镜、扫描电镜、纳米压痕仪和差热分析仪等设备对堆焊层的物相组成、组织形貌、力学性能以及热稳定性进行了分析。结果表明: 涂层均匀致密, 与基体呈冶金结合; 涂层的晶化现象随焊接热输入增大而加剧, 其晶化相为 α -Fe、 $\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{36}\text{Mo}_{10}$ 和 CrFe_4 ; 涂层的平均硬度随焊接热输入的增大而减少, 最高可达 7.55 GPa, 为基体的三倍; 涂层的起始晶化温度随焊接热输入的增大而降低, 最高为 506.8 °C。

关键词: 堆焊 铁基非晶合金 组织性能 堆焊电流 纳米压痕

通讯作者: 李学文, lixuwen@ncu.edu.cn

中图分类号: TG455 **文献标识码:** A

Microstructure and Properties of Fe-based Amorphous Coating on Q235 Steel Substrate by TIG Welding

LI Yue¹, LI Yulong¹, LI Xuewen^{1,2,✉}

1 Key Laboratory for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2 Engineering Training Center, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China

In order to study the effects of different heat input on the microstructure and properties of Fe-based amorphous coatings, Fe-based amorphous alloy coatings were prepared on Q235 substrate by TIG deposition. The microstructures, phase composition, mechanical properties and thermal stability of the coatings were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), nanoindentation and
请访问期刊网站以获取该文的补充信息 (Supplementary Information)

基金项目: 江西省主要学科学术和技术带头人项目(20182BCB22001)

This work was financially supported by the Academic and Technical Leaders Founding Project of Major Disciplines of Jiangxi Province (20182BCB22001).

differential scanning calorimetric (DSC). The results show that the coating is uniform and compact, and metallurgical combined with the substrate. The degree of crystallization of the coating increases with the increase of the heat input of the weld, and the Crystallized phases are α -Fe, $\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{36}\text{Mo}_{10}$ and CrFe_4 . The average nanohardness of the coating decreases with the increase of the heat input, the maximum nanohardness reaches 7.55 GPa, which is three times that than of the substrate. The crystallization temperature of the coating decreases with the increase of the welding heat input, and the maximum crystallization temperature is 506.8 °C.

Keywords: surfacing, Fe-based amorphous alloy, microstructure and properties, surfacing current, nanoindentation

Correspondence: Xuewen Li, lixuewen@ncu.edu.cn

0 引言

铁基非晶合金因优异的力学性能、软磁学性能、耐腐蚀性能而受到广泛关注,而且制备铁基非晶合金体系相对于其他体系的非晶合金成本较低,因此,铁基非合金有着广阔的应用前景。然而非晶合金的临界尺寸较小,难以应用于结构零件^[1-2]。由于非晶涂层的制备相对容易,非晶合金应用于涂层成为研究热点之一。随着研究的深入,人们相继开发了热喷涂^[3]、激光熔覆^[4]、电镀层^[5]等一系列制备非晶合金涂层的方法。然而这些方法制备的涂层存在厚度较薄、与基体结合力较弱、熔敷效率低等问题,在应用范围上受到限制。

利用电弧堆焊工艺可以相对容易地得到厚度较厚、与基体结合良好的涂层,且堆焊方法操作简单、成本较低^[6-7]。然而堆焊的焊接速率不高、热输入量大、焊后冷却速度较慢导致难以制备性能优异的非晶涂层^[8]。如何利用堆焊的方法制备综合性能优异的涂层受到研究人员的关注。邹因素等^[9]利用 TIG 焊在 13Mn 钢基体上堆焊非晶涂层,得到了非晶含量 31.06%(体积分数)的堆焊层,该涂层具有较高的硬度和耐磨性能。李峰伟等^[10]采用等离子堆焊在 35CrMo 钢基体上制备了非晶含量超过 80%的非晶涂层,涂层硬度为基体的 3 倍,耐磨性为基体的 12 倍。陈姗姗等^[11]采用气体保护焊的方法在 A3 钢基体上制备了铁基非晶涂层,结果表明涂层与基体结合良好,堆焊层均匀致密,硬度和耐磨性都较好。王斌等^[12]利用手工电弧焊在 Q235 钢基体上堆焊制备铁基非晶合金涂层,堆焊层硬度和耐磨性均可达到基体的 8 倍左右。晏涛等^[13]采用自保护堆焊工艺在 45 号钢基体上制备了非晶含量为 21.48%(体积分数)的铁基非晶合金涂层,涂层具有较高的硬度和耐磨性,而且热稳定性良好。

TIG 堆焊技术具有成本低、保护效果好、电弧稳定、可靠性高且易于实现自动化等一系列优点^[14-15]。本工作采用 TIG 焊堆焊制备了铁基非晶合金涂层,研究了焊接热输入对堆焊层的组织形貌、力学性能的影响,以期开拓一条廉价、简易的方法制备与修复非晶涂层,这对拓宽非晶合金的应用范围有着积极的意义。

1 实验

基板材料为 Q235 钢板(200 mm × 120 mm × 25 mm),焊前分别用 400#、600#、1000#砂

纸打磨基板去掉基板表面的铁锈、氧化皮，然后用丙酮清洗擦拭基板。选用的堆焊焊丝为一种自主制备的铁基非晶合金 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ (质量分数, %) 焊丝，直径为 1.6 mm。Q235 钢和焊丝的化学成分如表 1 所示。采用氩弧焊机（福尼斯 TT2200）进行单层单道堆焊实验，焊前不预热，保护气为 99.99% 工业纯氩，气体流量为 12 L/min，焊接电流为 120~140 A，焊接速度约 130 mm/min，送丝速度约 400 mm/min，焊后空冷至室温。

堆焊所制得的试件经切割、镶嵌、粗磨、细磨、抛光进行标准金相制样。采用盐酸、硝酸体积比 1: 3 配制成王水做腐蚀剂对涂层区域腐蚀 90 s；采用 4% 的硝酸酒精溶液对基体与热影响区腐蚀 5 s。采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 分析堆焊层的物相；采用 OLYMPUS GX71 型光学显微镜 (Optical microscope, OM) 观察基体与热影响区的组织；采用 FEI Quanta 200F 型扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观察堆焊层的显微组织；采用 Nanomechanics iMicro 型纳米压痕仪对堆焊层进行力学性能测试与表征；采用 NETZSCH STA449F5 型差热分析仪 (Differential scanning calorimeter, DSC) 对堆焊层进行非晶热力学分析。

表 1 Q235 钢和焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 The chemical compositions of Q235 steel and Welding wire (mass fraction, %)

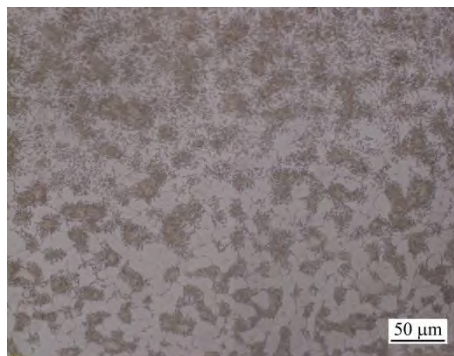
Materials	Fe	Co	Cr	Mo	C	B	Y	Mn	Si	S	P
Q235	Bal	-	-	-	0.14	-	-	0.41	0.1	0.017	0.038
Welding wire	41	7	15	14	15	6	2	-	-	-	-

2 结果与分析

2.1 焊接接头热影响区的组织形貌



(a)



(b)

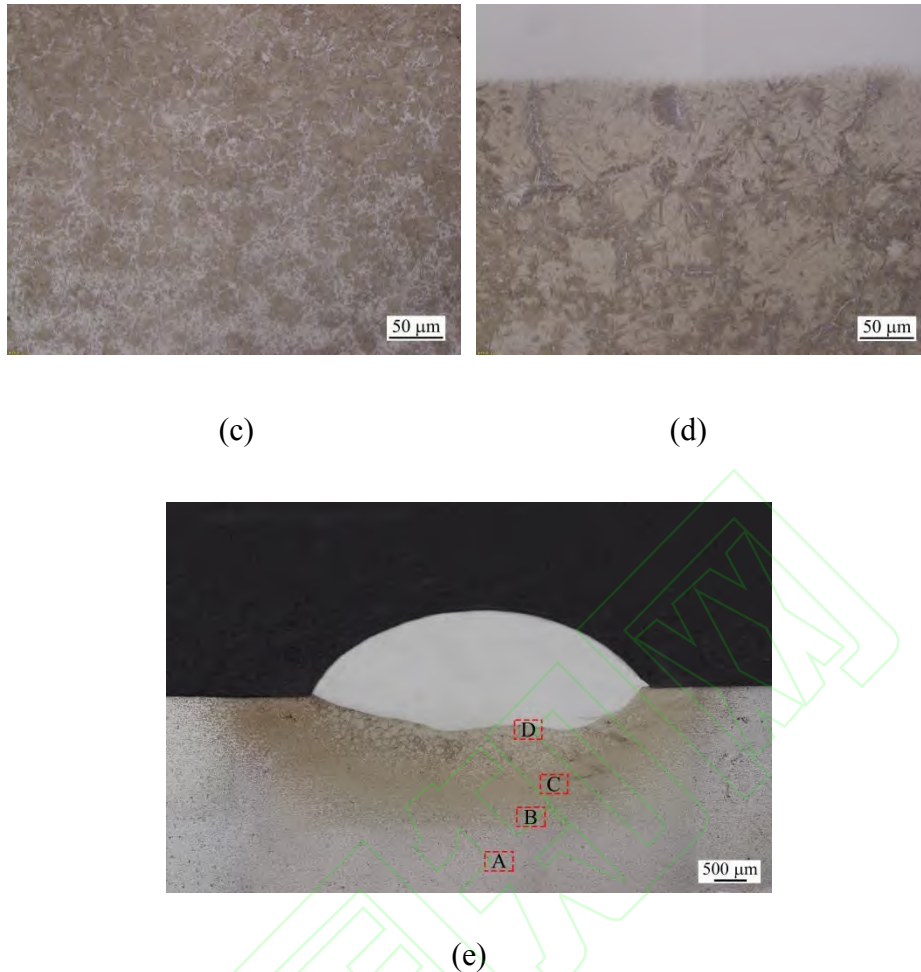


图 1 堆焊热影响区的组织形貌：(a) 图 e 中的 A 区域（母材区）；(b) 图 e 中的 B 区域（细晶区）；(c) 图 e 中的 C 区域（粗晶区）；(d) 图 e 中的 D 区域（熔合区）；(e) 接头整体形貌

Fig. 1 Morphologies of HAZ: (a) base metal, an enlarged view of region A in Fig. (e); (b) fine-grain HAZ, an enlarged view of region B in Fig. (e); (c) coarse-grain HAZ, an enlarged view of region C in Fig. (e); (d) fusion zone, an enlarged view of region D in Fig. (e); (e) overall morphology of welded joint

堆焊热影响区（HAZ）各区域的组织形貌如图 1 所示，图 1a 为远离焊缝的母材组织，堆焊过程中该区域温度低于相变温度，组织未发生变化，为铁素体和珠光体；图 1b 下侧为部分相变区，只有部分铁素体和珠光体变得均匀细小，图 1b 上侧为正火区，组织为细小等轴的铁素体和珠光体；图 1c 为过热区，由于此区域温度过高，晶粒发生严重长大，组织为粗大的铁素体和珠光体；图 1d 上侧为非晶涂层，熔合线下方是过热区，形成了贝氏体和魏氏体；图 1e 为接头的整体形貌。

2.2 堆焊层的物相组成

为了研究涂层的相组成，对涂层进行 X 射线衍射分析。图 2 为不同焊接电流下堆焊层的 X 射线衍射图，可以观察到涂层发生了明显的晶化，其晶化相为 $\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{36}\text{Mo}_{10}$ 、 $\alpha\text{-Fe}$ 和

CrFe₄ 相。在堆焊过程中，随着电流的增大，热输入增大，涂层的晶化峰增加。同时先前在基板上的熔滴尚未冷却又被后续的熔滴加热，产生了热处理作用，从而导致堆焊层的非晶相转变为细小的晶粒或纳米晶^[16]。采用谢乐公式^[17]计算涂层的纳米晶晶粒尺寸，其计算公式为：

$$D = \frac{K\gamma}{B \cos \theta} \quad (1)$$

式中： D 为晶粒尺寸(nm)， K 为谢乐常数， γ 为 X 射线波长(nm)， B 是实测样品衍射峰半宽高度(rad)， θ 为衍射角(rad)。

通过计算得到，当电流为 120 A 时，堆焊层的晶粒尺寸为 22~38 nm；当电流为 130 A 时，堆焊层的晶粒尺寸为 26~45 nm，当电流为 140 A 时，堆焊层的晶粒尺寸为 21~47 nm。

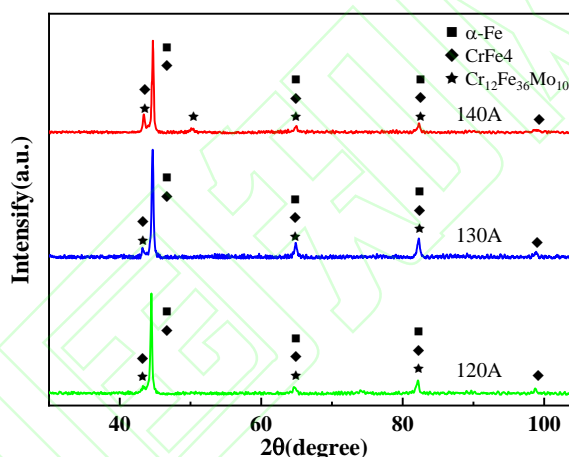


图 2 不同参数下堆焊层的 XRD 谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of coating with different parameters

2.3 堆焊层的组织形貌

图 3a—c 分别为 120~140 A 电流堆焊接头的组织形貌，可以看出，界面主要由堆焊层、过渡层和基体组成。堆焊层组织均匀致密，无明显的孔隙和裂纹，堆焊层与基体结合良好，呈冶金结合状态。这是因为在堆焊过程中，基体熔化形成熔池且基体的合金元素与非晶焊丝的合金元素存在浓度梯度，导致原子扩散和迁移，从而形成了过渡层。

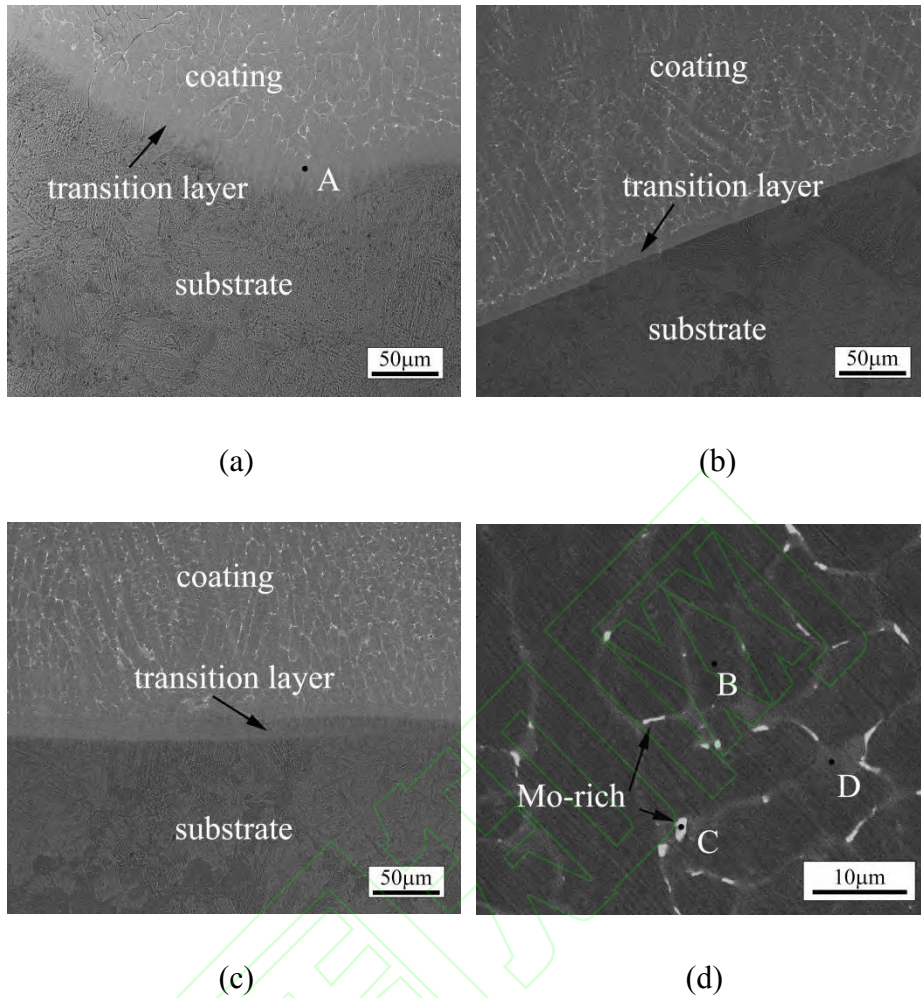


图 3 不同堆焊电流下的堆焊层横截面形貌：(a) 120 A，(b) 130 A，(c) 140 A，(d) 涂层局部放大图

Fig.3 Microstructure of the coating in cross-section with different parameters: (a) 120 A, (b) 130 A, (c) 140 A, (d) high magnification image of the coating

不同电流下的堆焊层均主要由柱状晶和等轴晶组成，并且堆焊层中弥散分布着细小的白色相。图 3d 为涂层区域的放大图，为了确定堆焊层各相的化学成分，对涂层的不同位置进行 EDS 能谱点扫描，分析结果见表 2。根据 EDS 结果和图 2 的 XRD 结果可知，白色弥散分散的 Mo 元素富集相为 $\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{36}\text{Mo}_{10}$ 。涂层中的深色相为 CrFe_4 ，过渡层的相为 $\alpha\text{-Fe}$ 。

表 2 图 3 中标定位置的化学成分（原子分数，%）

Table 2 Chemical composition (at%) at different regions of Fig. 3

Sites					Possible phase
	Fe	Cr	Mo	C	
A	90.43	7.17	1.04	1.37	$\alpha\text{-Fe}$

B	74.20	19.68	4.33	1.79	CrFe ₄
C	58.08	17.16	21.06	3.70	Cr ₁₂ Fe ₃₆ M ₁₀
D	55.83	32.72	8.41	3.04	—

2.4 堆焊层的力学性能

由于堆焊层的组织大小为 10 μm 左右(见图 3)，普通显微硬度测试很难表征其微小组织的性质差异，因此采用纳米压痕测定涂层的力学性能。测试过程中载荷力为 50 mN，测试横向间距和纵向间距均为 15 μm 的 3×3 阵列的硬度，其压痕位置结果如图 5a 所示，图 5b 为压痕在高放大倍数下的 SEM 照片。图 5b 中位于晶界处的点 2、点 7 和点 8 压痕大小相对于其他点明显较小，由于纳米压痕测试采用的模式为固定力模式，压痕越小说明该点的硬度越大。这三点的平均硬度约为 9 GPa，其他六点的平均硬度为 7 GPa 左右。根据图 3 的 EDS 能谱点扫描结果可知，晶界处硬度明显升高是由于 Cr 元素偏析，固溶作用加强，点阵畸变程度加剧。图 4 为不同堆焊电流下堆焊层截面的硬度分布情况，堆焊层的硬度最高，从堆焊层到基体硬度逐渐降低，热影响区因发生了相变，硬度比基体高。

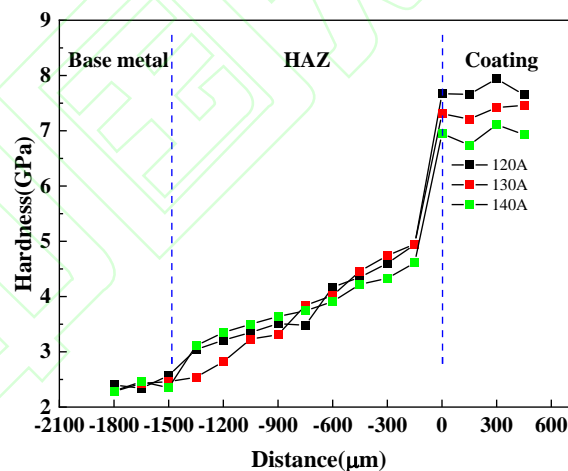


图 4 不同堆焊电流条件下焊接接头的硬度分布曲线

Fig. 4 Weld joint hardness distribution curves with different parameters

涂层及基体的硬度和模量测试结果如表 3 所示。120—140 A 堆焊层的平均硬度分别为 7.55 GPa、7.46 GPa、6.75 GPa。堆焊层含有非晶相和纳米晶相，能起到一定的强化作用，这使得堆焊层的硬度较高；随着电流的增大，热输入增大导致堆焊层的非晶含量下降以及晶粒长大，强化作用减弱，因而硬度降低。120—140 A 涂层的杨氏模量分为 231.94 GPa、234.34 GPa、241.39 GPa，随着焊接热输入的增大，涂层的杨氏模量增大^[18-19]。

表 3 各堆焊层的硬度及弹性模量

Table 3 Hardness and Modulus of coating with different parameters

Samples	Hardness/GPa	Young's Modulus/GPa	Wear property parameter, H/E_r
120A	7.55	231.94	0.0325
130A	7.46	234.34	0.0318
140A	6.75	241.39	0.0280
substrate	2.57	232.49	0.0110

除了硬度和杨氏模量，纳米压痕还可以根据涂层的硬度 H 与杨氏模量 E_r 的比值预测其耐磨性^[20-22]。许多研究者提出，一般 H/E_r 比值越高，表明材料的耐磨性越好^[23-24]。由纳米压痕测定的涂层的 H/E_r 结果如表 3 所示。结果表明，涂层具有比基体更高的 H/E_r 比值，反应了涂层的耐磨性比基体好。同时随着焊接热输入的增大，涂层的晶化现象加剧，涂层的耐磨性下降。

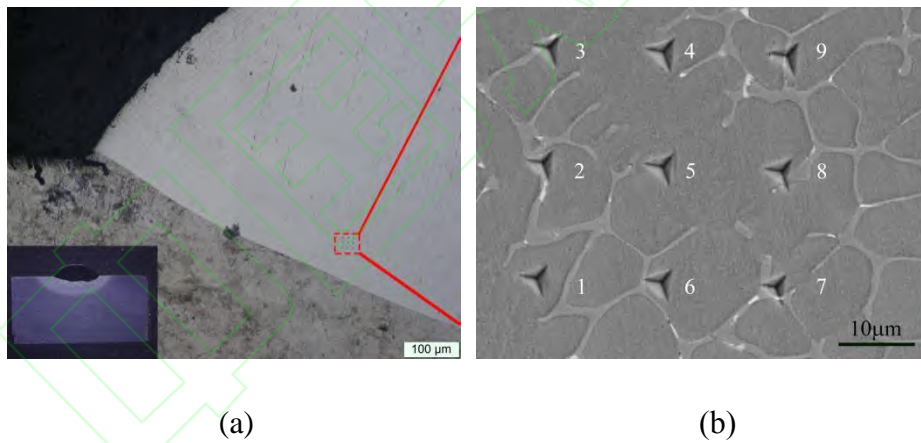


图 5 涂层的压痕分布：(a) 压痕位置；(b) 压痕形貌

Fig. 5 Distribution of indentation in coating: (a) location of nanoindentation; (b) morphologies of nanoindentation

2.5 堆焊层的热稳定性

热稳定性是非晶材料的重要性能之一。为了研究堆焊层的热稳定性，将堆焊层切成 $3\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的薄条，采用差热分析仪对三种不同电流下制得的堆焊层进行热分析，升温速率为 25 K/min ，加热温度区间为 $20\sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 6 分别为不同电流所得堆焊层的 DSC 曲线，可以看出 120 A 时所得的堆焊层的起始晶化温度 T_x 为 $506.8\text{ }^\circ\text{C}$ ，130 A 时所得的堆焊层的起始晶化温度 T_x 为 $493.7\text{ }^\circ\text{C}$ ，140 A 时所得的堆焊层的起始晶化温度 T_x 为 $481.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，在

低于起始晶化温度的环境，堆焊层不会发生晶化。这表明三组焊接电流参数下制得的堆焊层均具有良好的热稳定性。堆焊层的晶化是一个典型的动力学现象，随着堆焊电流的增大，堆焊层的起始晶化温度降低，表明堆焊层的热稳定性随着热输入的增大而减弱。

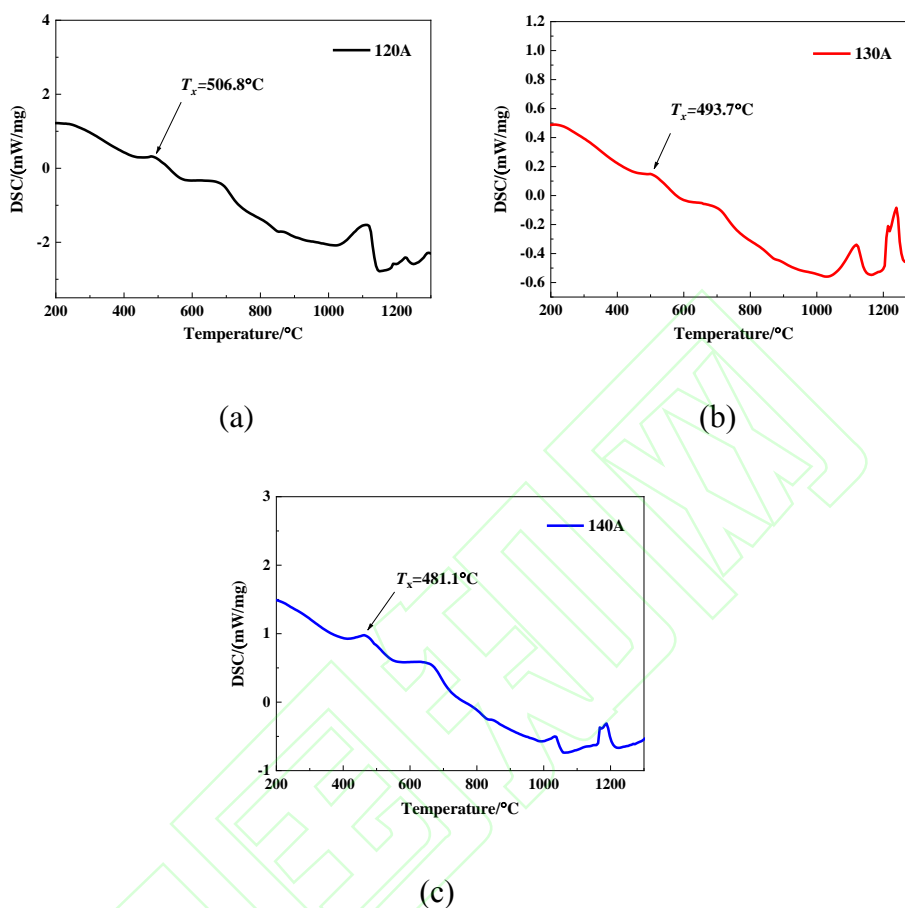


图 6 不同焊接电流下涂层的 DSC 曲线：(a) 120 A、(b) 130 A、(c) 140 A

Fig. 6 DSC curves of coating with different parameters: (a) 120 A, (b) 130 A, (c) 140 A

3 结论

(1) 通过 TIG 堆焊法成功地在 Q235 钢基板上制备了铁基非晶纳米晶复合涂层；堆焊层均匀致密、无裂纹、与基体呈冶金结合。

(2) 随着焊接热输入的增大，堆焊层的晶化现象加剧，堆焊层的纳米晶长大，晶化相为 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{36}\text{Mo}_{10}$ 和 CrFe_4 。

(3) 堆焊层具有较高的硬度和耐磨性，随着焊接热输入的增大，堆焊层的硬度由 7.55 GPa 降至 6.75 GPa。

(4) 堆焊层具有良好的热稳定性，随着焊接热输入的增大，堆焊层的热稳定性下降，起始晶化温度由 506.8°C 降至 481.1°C 。

参考文献

- [1] Lashgari H R, Chen Z, Liao X Z, et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, 626, 480.
- [2] Wang F, Inoue A, Kong F L, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 732, 637.
- [3] Guo Y, Koga G Y, Jorge Jr A M, et al. *Materials & Design*, 2016, 111, 608.
- [4] Shu F Y, Liu S, Zhao H Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731, 662.
- [5] Cao J W, Han J G, Guo Z H, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673, 141.
- [6] Zhou Z, Wang L, Wang F C, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 204(5), 563.
- [7] Deng Dewei, Chen Rui, Zhang Hongchao. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7), 106 (in Chinese).
邓德伟, 陈蕊, 张洪潮. *机械工程学报*. 2013, 49(7), 106.
- [8] Deus R L, Yellup J M, Subramanian C. *Composites science and technology*. 1998, 58(2), 299.
- [9] Zou Yinsu, Liu Junyou, Liu Jie, et al. *Hot Working Technology*, 2013, 2013(1), 160 (in Chinese).
邹因素, 刘俊友, 刘杰, 等. *热加工工艺*, 2013(1), 160.
- [10] Li Fengwei, Du Ping, Wei Gang, et al. *Well Testing*, 2016(5), 1 (in Chinese).
李峰伟, 杜平, 魏刚, 等. *油气井测试*, 2016(5), 1.
- [11] Chen Shanshana, Fan Zishuana, Sun Dongbai, et al. *China Surface Engineering*. 2011(3), 78 (in Chinese).
陈珊珊, 樊自拴, 孙冬柏, 等. *中国表面工程*, 2011(3), 78.

- [12] Wang Bin, Zhou Cui, Zhu Jiayang, et al. *Journal of Functional Materials*, 2014(19), 19070 (in Chinese).
王斌, 周翠, 朱加祥, 等. *功能材料*, 2014(19), 19070.
- [13] Yan Tao, Fan Zishuan, Zhang Zhengdong. *Surface Technology*, 2013(4), 87 (in Chinese).
晏涛, 樊自拴, 张正东. *表面技术*, 2013(4), 87.
- [14] Li Yulong, Yu Yexiao. *Electric Welding Machine*, 2012(12), 70 (in Chinese).
李玉龙, 禹业晓. *电焊机*, 2012(12), 70.
- [15] Gong Miao, Dai Shijie, Wang Liwen, et al. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2019, 33(12), 101(in Chinese).
龚淼, 戴士杰, 王立文, 王涛. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(12), 101.
- [16] An Yulong, Zhao Xiaoqin, Zhou Huidi. *China Surface Engineering*, 2013, 26(5), 64 (in Chinese).
安宇龙, 赵晓琴, 周惠娣, 等. *中国表面工程*, 2013, 26(5), 64.
- [17] Bykkam S, Ahmadipour M, Narisngam S, et al. *Advances in nanoparticles*, 2015, 4(1), 1.
- [18] Lashgari H R, Cadogan J M, Chu D, et al. *Materials & Design*, 2016, 92, 919.
- [19] Sun Y Y, Song M, Liao X Z, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 543, 145.
- [20] Fornell J, González S, Rossinyol E, et al. *Acta Materialia*, 2010, 58(19), 6256.
- [21] Kumar A, Kumar R, Bijalwan P, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 771, 827.
- [22] Leyland A, Matthews A. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 177, 317.
- [23] Schuh C A, Hufnagel T C, Ramamurty U. *Acta Materialia*, 2007, 55(12), 4067.
- [24] Zhang H, Xie Y, Huang L, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258, 495.



Yue Li is a postgraduate student of material processing engineering of Nanchang University. His main research direction is the preparation of amorphous coatings.

李越，南昌大学机电工程学院,材料加工工程专业硕士研究生，主要研究方向为非晶涂层的制备。



Xuewen Li is a master of engineering and an engineer of the Nanchang University Engineering Training Center. He is engaged in scientific research and teaching in brazing and precision processing.

李学文，工学硕士，南昌大学工程训练中心工程师，从事钎焊、精密加工等方向的科研与教学工作。

[补充信息]

Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层的组织与性能

李越¹, 李玉龙¹, 李学文^{1,2,✉}

1 南昌大学机电工程学院机器人及焊接自动化重点实验室, 南昌 330031;

2 南昌大学机电工程学院工程训练中心, 南昌 330031

[Supplementary Information]

Microstructure and properties of Fe-based amorphous coating on Q235 steel substrate by TIG welding

LI Yue¹, LI Yulong¹, LI Xuewen^{1,2,✉}

1 Key Laboratory for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2 Nanchang University Engineering Training Center, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031

实验材料

本实验用到的基板材料为 Q235 钢, 焊丝材料为自主制备的铁基非晶合金焊丝, 基体与焊丝的化学成分如表 S1。

表 S1 Q235 钢和焊丝的化学成分

Table S1. The chemical composition of Q235 steel and Welding wire (wt%)

Materials	Fe	Co	Cr	Mo	C	B	Y	Mn	Si	S	P
Q235	Bal	-	-	-	0.14	-	-	0.41	0.1	0.017	0.038
Welding wire	41	7	15	14	15	6	2	-	-	-	-

实验试剂与设备

本实验用到的硝酸、丙酮为分析纯, 从成都化夏化学试剂有限公司公司购买。盐酸、

✉ lixuewen@ncu.edu.cn

无水乙醇为分析纯，从南昌浩祥仪器有限公司购买。堆焊实验所用的氩弧焊机为福尼斯 TT2200。

表征焊接接头的组织形貌采用 OLYMPUS GX71 型光学显微镜和 FEI Quanta 200F 扫描电子显微镜。表征堆焊层的物相采用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪。表征堆焊层的力学性能采用采用 Nanomechanics iMicro 纳米压痕仪。表征堆焊层的热稳定性采用 NETZSCH STA449F5 差热分析仪。

Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层实验

Q235 钢表面 TIG 焊堆焊铁基非晶涂层实验的详细步骤为：

- (1) 分别用 400#、600#和 1000#型号的 SiC 砂纸打磨 Q235 钢基板，去除基板表面的铁锈和氧化皮，然后用丙酮对打磨后的表面擦拭清理，让基板自然晾干；用丙酮处理焊丝表面的灰尘和油污；
- (2) 连接焊接的电缆插座、焊枪、气瓶等附件，检查各附件是否连接正确；
- (3) 采用氩弧焊机（福尼斯 TT2200）进行单层单道堆焊实验。焊接工艺参数为：焊前不预热，保护气为 99.99%工业纯氩，气体流量为 12 L/min，焊接电流为 120、130、140 A，焊接速度约 130 毫米/分，送丝速度约 400 毫米/分，焊后空冷至室温；
- (4) 焊后观察焊缝表面是否有缺陷，将焊缝从基板上切下来镶嵌制样，做后续的表征实验。