

中间层对 304 不锈钢/铌激光焊接头组织及性能的影响

石铭霄¹, 陈书锦^{2*}, 胡庆贤¹, 刘大双¹, 周方明¹, 李瑞峰¹, 赵 健²

¹江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003;

²上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620

摘要 利用纯铜、纯银、纯钨、纯钒、纯钽和纯铼等不同金属材料作为填充金属, 采用预置中间层的方法, 进行了 304 不锈钢(304 SS)与铌的激光焊接试验。结果表明, 在被选择的填充金属中, 铜和银作为中间层可以实现 304 SS 与铌的焊接, 前者接头强度最高, 强度峰值达到 250 MPa, 是最优填充金属; 随着铜层厚度的增加, 铜层对于 Fe₂Nb 的阻碍作用增强, 接头强度提高, 但是铜层厚度不能过大。

关键词 激光技术; 激光焊; 铌; 304 不锈钢; 中间层; 接头强度

中图分类号 TG455

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102005

Effect of Interlayer on Microstructures and Properties of 304 Stainless Steel/Nb Joints by Laser Welding

Shi Mingxiao¹, Chen Shujin¹, Hu Qingxian¹, Liu Dashuang¹, Zhou Fangming¹,
Li Ruifeng¹, Zhao Jian²

¹School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang, Jiangsu 212003, China;

²School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract With different pure metal materials such as copper, silver, tungsten, vanadium, tantalum and molybdenum as filler metals, the experiments of laser welding of 304 stainless steel (304 SS) and niobium are carried out by using the preset interlayer method. The results show that, among all the filler metals to be selected, Cu and Ag as interlayer can be used to realize the connection between 304 SS and niobium. The joint strength with the former as interlayer is the highest which reaches up to 250 MPa, thus the optimum filler metal is Cu. The hindering effect of Cu interlayer on the formation of Fe₂Nb increases with the increase of Cu interlayer thickness, and so does the strength of joints, but the Cu interlayer cannot be too thick.

Key words laser technique; laser welding; niobium; 304 stainless steel; interlayer; joint strength

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

现代飞机的各项性能, 如飞行速度、升限、航程、装载能力等, 主要依赖于先进航空发动机的高推重比。因此, 提高航空发动机推重比对改善飞机性能具有重要意义^[1]。不锈钢具有强度高、塑形和耐蚀性好等优点, 广泛应用于航空发动机^[2]。铌合金具有比强度高、高温耐蚀性好等优点, 是优异的航空发动机用轻质耐高温结构材料^[3]。采用钢/铌复合焊接, 用铌合金局部代替不锈钢, 可以提高航空发动机的工作温度、减轻其

收稿日期: 2017-06-16; **收到修改稿日期:** 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51605205)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB460009)

作者简介: 石铭霄(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新材料及异种材料的高能束焊接方面的研究。

E-mail: smx_just@163.com

重量,使航空发动机具有更高的推重比,满足新一代飞机对高推重比航空发动机的需求。

国内外的研究人员开展了大量钢/铌异种金属的焊接研究,其中爆炸焊是最常用的方法之一。已有研究表明,利用爆炸焊焊接钢与铌,可以得到高强度的焊接接头,甚至可实现等强结合^[4-5]。然而,爆炸焊存在接头形式单一的问题。熔钎焊、钎焊也是研究较多的钢/铌焊接方法。李鑫等^[6-7]对钢/铌电子束熔钎焊的结合层进行了研究,分析了互扩散层组织、成分和性能的变化。Budkin 等^[8]利用物理-数学模型,分析了钢/铌电子束钎焊的焊接热过程和扩散互作用过程。齐立君等^[9]选用镍基钎料进行了钢与铌的高温真空钎焊研究。然而,熔钎焊和钎焊的接头强度普遍偏低。

激光焊具有热输入小、焊接能量和加热位置精确可控等优点,适用于钢与铌等活泼金属的焊接连接^[10-12]。文献[13]通过钢/铌激光偏束焊接获得了成形良好的焊接接头,但接头强度偏低。文献[14]采用正交试验法,研究了焊接工艺参数对钢/铌激光焊接头抗拉强度的影响规律。上述研究结果表明,激光焊可以实现钢与铌的焊接,但是层状铁-铌金属间化合物,特别是 Fe₂Nb 的生成会降低接头强度。采用激光束作为热源,通过预置中间层对焊缝组织进行冶金调控,可以消除层状铁-铌金属间化合物,有望解决钢与铌的焊接难题。本文以钢/铌激光焊为研究对象,探讨了不同中间层对接头组织及性能的影响规律,为钢/铌异种金属的焊接提供了一定的参考。

2 试验方法

选用纯铜、纯银、纯钨、纯钼、纯钽和纯铌作为中间层材料进行了钢/铌激光焊试验,试验所用母材为纯铌(Nb)和 304 不锈钢(304 SS),其化学成分和室温下的物理性能参数见表 1,2。

表 1 Nb 和 304 不锈钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of Nb and 304 SS (mass fraction, %)

Material	C	Mn	Nb	Fe	Ti	Zr	W	Ni	Mo
Nb	≤0.01	—	Bal.	≤0.005	≤0.002	≤0.02	≤0.03	≤0.005	≤0.01
304 SS	≤0.08	≤2.0	—	Bal.	—	—	—	8-11	—
Material	Cr	Si	Ta	N	O	H	P	S	Cr
Nb	≤0.002	≤0.005	≤0.1	≤0.015	≤0.015	≤0.001	—	—	≤0.002
304 SS	18-20	≤1.0	—	—	—	—	≤0.045	≤0.03	18-20

表 2 Nb 和 304 不锈钢室温下的物理参数
Table 2 Physical parameters of Nb and 304 SS at room temperature

Material	Melting point / °C	Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Linear expansion coefficient / (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)
Nb	2469	27	53.7	7.1
304 SS	1450	461	14.6	16.0

母材被线切割成 50 mm×25 mm×2 mm 的平板,中间层材料被线切割成 50 mm×2 mm 的薄片,厚度分别为 1,0.8,0.6,0.4,0.2 mm。焊接前,先用砂纸打磨试样表面以去除氧化膜和油污,再用丙酮和酒精清洗试件表面。共进行了两组试验,一组是直接焊接,即将激光束作用于 304 SS/Nb 对接面处进行焊接,如图 1(a)所示。另一组是预置中间层焊接,即先将中间层预置于 304 SS/Nb 对接面处,再将激光束作用于中间层中心线上进行焊接,如图 1(b)所示。两组试验的焊接参数为:激光功率 2 kW,焊接速度 1.2 m·min⁻¹,离焦量 0。焊接过程中使用氩气作为保护气体,前保护气和背保护气流量均为 15 L·min⁻¹。

焊后用线切割方式沿垂直于焊缝方向截取金相试样,利用耐水砂纸打磨金相试样后,进行机械抛光处

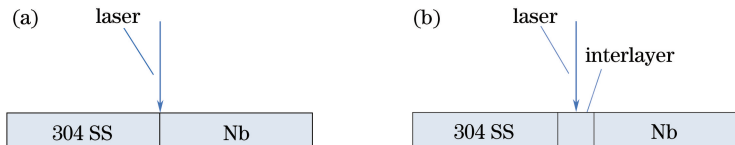


图 1 焊接示意图。(a)直接焊;(b)预置中间层焊

Fig. 1 Schematics of welding. (a) Direct welding; (b) welding with interlayer

理,抛光完成后采用铌合金腐蚀液进行金相腐蚀。采用扫描电镜观察腐蚀好的试样焊缝;采用能谱仪对焊缝局部区域进行能谱分析(EDS);采用电子万能试验机进行室温拉伸试验,室温抗拉强度测试的加载速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 304 SS/Nb 激光焊接性能分析

304 SS/Nb 直接焊接头的表面形貌如图 2 所示。可以看出,接头开裂,断口表面形貌如图 3 所示。对断口表面上位置 1'、位置 2' 进行 EDS,结果见表 3,可知断裂发生在 Fe_2Nb 上。连续分布的 Fe_2Nb 是引起直接焊接头脆化的主要原因,在焊接热应力作用下,裂纹容易在 Fe_2Nb 上萌生和扩展。因此,试验采用预置中间层的方法焊接 304 SS/Nb,通过中间层对焊缝组织进行冶金调控,以消除接头中的 Fe_2Nb 或者改变 Fe_2Nb 在接头中的数量、大小、形态和分布,从而实现钢与铌的可靠连接。

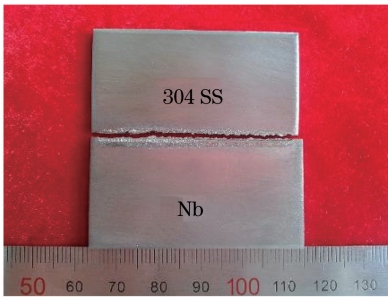


图 2 直接焊接头表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of joint by direct welding

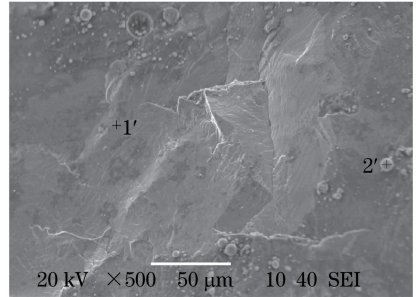


图 3 直接焊接头断口表面形貌

Fig. 3 Fracture surface morphology of joint by direct welding

表 3 直接焊接头断口 EDS(原子分数,%)

Table 3 Fracture EDS of joint by direct welding (atomic fraction, %)

Position	Fe	Nb	Cr	Ni
1'	38.78	46.46	10.85	3.91
2'	75.09	13.54	11.37	0

3.2 不同中间层对接头强度的影响

采用 1 mm 厚度的不同中间层材料进行了 304 SS/Nb 的激光焊接试验,焊后接头表面形貌如图 4 所示。可以看出,采用银、铜作为中间层的焊缝成形良好,表面未产生缺陷;采用钨、钒、钼和钽作为中间层,焊接后接头立即开裂,无法实现连接。因此,铜和银可以作为连接 304 SS 与 Nb 的中间层材料。使用铜和银作为

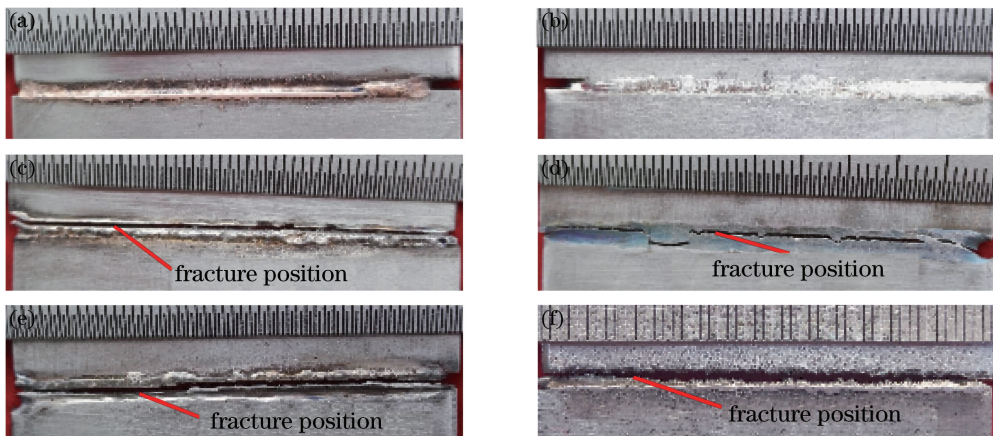


图 4 采用不同中间层材料的接头表面形貌。(a)铜;(b)银;(c)钼;(d)钒;(e)钨;(f)钽

Fig. 4 Surface morphologies of joints with different interlayer materials.

(a) Cu; (b) Ag; (c) Mo; (d) V; (e) W; (f) Ta

中间层材料的接头抗拉强度如图 5 所示,可以看出,铜作为中间层获得的接头强度要高于银的,强度值达到 250 MPa。因此铜是所有候选填充金属中的最优选择。

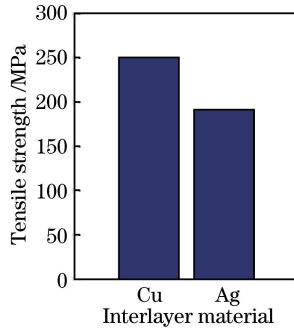


图 5 采用不同中间层材料的接头抗拉强度

Fig. 5 Tensile strength of joints with different interlayer materials

使用 1 mm 厚度的铜和银作为中间层的焊缝显微组织如图 6 所示,其中 a、b、c、d 各个相的 EDS 结果见表 4。从图 6 可以看出,采用铜作为中间层的焊缝显微组织是由基体相 a 和弥散分布在其上的相 b 组成,而采用银作为中间层的焊缝显微组织是由基体相 c 和弥散分布在其上的相 d 组成。由 EDS 结果可知,相 a 为铜基固溶体,相 b 为铁基固溶体,相 c 和相 d 均为银晶体。这表明焊缝主要由铜和银组成,铜层和银层有效阻隔了铁、铌原子之间的互扩散,阻止了铁-铌金属间化合物的生成,实现了钢和铌的连接。此外,铜、银的塑性和韧性很好,可以通过塑性变形使接头的应力得到松弛,有利于接头强度的提高。由于铜的强度要高于银的,因此采用铜作为中间层的焊缝强度要高于采用银的。

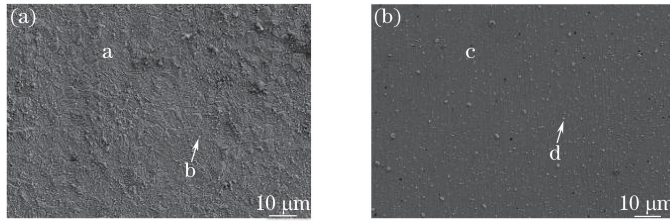


图 6 采用(a)铜和(b)银作为中间层的焊缝显微组织

Fig. 6 Microstructures of welds with (a) Cu and (b) Ag as interlayers

表 4 图 6 中各个相的化学成分(原子分数,%)

Table 4 Chemical compositions of various phases marked in Fig. 6 (atomic fraction, %)

Phase	Fe	Ag	Cr	Ni	Cu
a	4.11	0	1.16	1.57	93.15
b	72.20	0	15.56	1.79	10.45
c	0	100	0	0	0
d	0	100	0	0	0

添加钨、钼、钒、钽作为中间层的断口形貌照片如图 7 所示,各个接头表面的 EDS 结果见表 5。从图 7 可以看出,采用钼作为中间层的断口表面平坦光滑,表明断裂属于脆性断裂;采用钒作为中间层的断口表面有解理平面和河流状花样,表明断裂是解理断裂;采用钨作为中间层的断口具有典型的“冰糖状”断口形貌特征,每个晶粒都棱角分明,表明断裂属于沿晶脆性断裂;采用钽作为中间层的断口是典型的准解理断裂。

由表 5 结果可知,采用钼和钒作为中间层的接头分别断裂于 FeMo 和 FeV 上,钢/钨/铌接头和钢/钽/铌接头分别断裂于钨基固溶体和 Ta+FeTa 上。试验结果说明,虽然钨、钼、钒、钽和铌都属于难熔金属,物理化学性能接近,冶金相容性很好,但是它们与铁的物理化学性能相差较大,特别是熔点、热导率和线膨胀系数相差极大,导致接头中产生了很大的残余内应力,冶金学上的不匹配使得接头中极易生成 FeMo、FeV、W 和 FeTa 等硬脆相,在焊接残余应力的作用下,接头易发生脆性断裂。

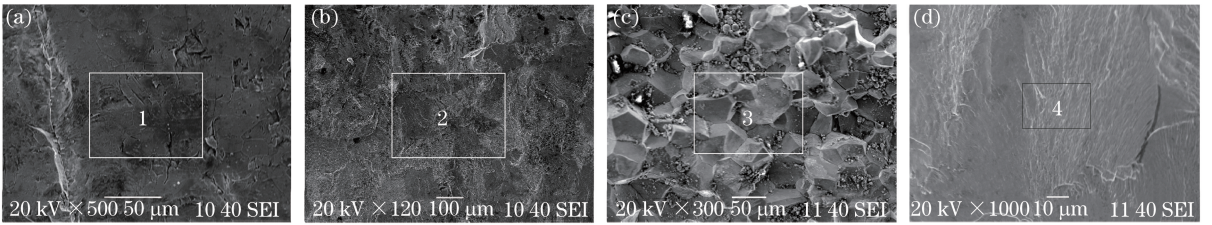


图 7 采用不同中间层材料的接头断口形貌。(a) 钼;(b)钒;(c)钨;(d)钽

Fig. 7 Fracture appearances of joints with different interlayer materials. (a) Mo; (b) V; (c) W; (d) Ta

表 5 图 7 中各个区的化学成分(原子分数,%)

Table 5 Chemical compositions of various zones marked in Fig. 7 (atomic fraction, %)

Area	Fe	Mo	Cr	Ni	V	W	Ta	Nb
1	44.18	38.13	14.03	3.65	0	0	0	0
2	36.22	0	10.28	4.00	40.48	0	0	9.03
3	6.43	0	0	0	0	93.57	0	0
4	33.55	0	9.87	3.46	0	0	53.11	0

3.3 铜层厚度对接头显微组织和力学性能的影响

不同厚度铜层对接头强度的影响如图 8 所示,可以看出,接头强度随着铜层厚度的增加先增大后减小,表明铜层厚度对接头强度有重要影响。

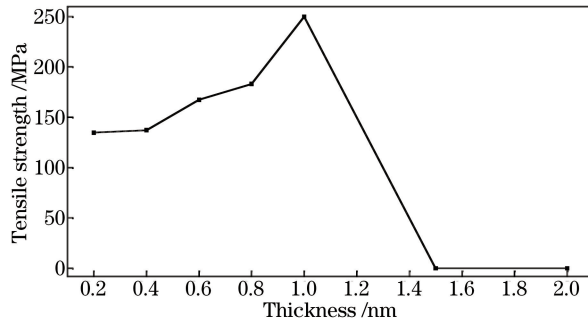


图 8 铜层厚度对接头强度的影响

Fig. 8 Influence of Cu interlayer thickness on joint strength

当铜层厚度在 0.2~1 mm 范围时,焊缝显微组织如图 9 所示,图 9 中各个相的 EDS 结果见表 6。由图 9 可知,使用 0.2 mm 厚度铜层的焊缝显微组织是由基体相 A 和弥散分布在其上的相 B 组成。结合 EDS 可知,相 A 为 Fe_2Nb ,相 B 为奥氏体。因为铜层厚度仅有 0.2 mm,所以其对铁、铌原子互扩散的阻碍作用十分微弱,铁、铌原子可以通过互扩散充分混合。随着温度的降低, Fe_2Nb 将从液相中析出并长大,在 Fe_2Nb 附近的液相中形成贫铌区,奥氏体将在 Fe_2Nb 之间析出并长大。因为 Fe_2Nb 是硬脆相,所以当焊缝组织以 Fe_2Nb 为基体相时,接头强度很低。当铜层厚度由 0.2 mm 增加到 0.4 mm 时,焊缝显微组织由基体相 C 和弥散分布在其上的粗粒状相 D 组成。结合 EDS 可知,相 C 为铜基固溶体,相 D 为奥氏体。当铜层厚度为 0.4 mm 时,焊缝金属主要是由铜组成;因为铁的熔点远低于铌的,所以焊缝中也含有少量的铁,而由于铌熔点很高,因此在焊缝中没有发现铌。由铁-铜相图^[15]可知,尽管铁和铜之间不形成金属间化合物,但是二者之间互溶度较低,因此在液相中将首先析出铜基固溶体,当铁在铜中的溶解度超过其固溶度极限时,就会从铜基固溶体中析出奥氏体。因为基体相是软韧的铜基固溶体,所以接头强度较高。

随着铜层厚度进一步增加,可以获得与图 9(b)相似的焊缝显微组织,如图 9(c)~(e)所示,主要差异是随着铜层厚度的增加,显微组织中奥氏体数量减少。因为随着铜层厚度的增加,焊缝中的铁含量减少;随着奥氏体数量减少,相界面也会减少。因为裂纹容易在相界面处萌生和扩展,所以相界面的减少抑制了接头开裂倾向,进而提高了接头强度。

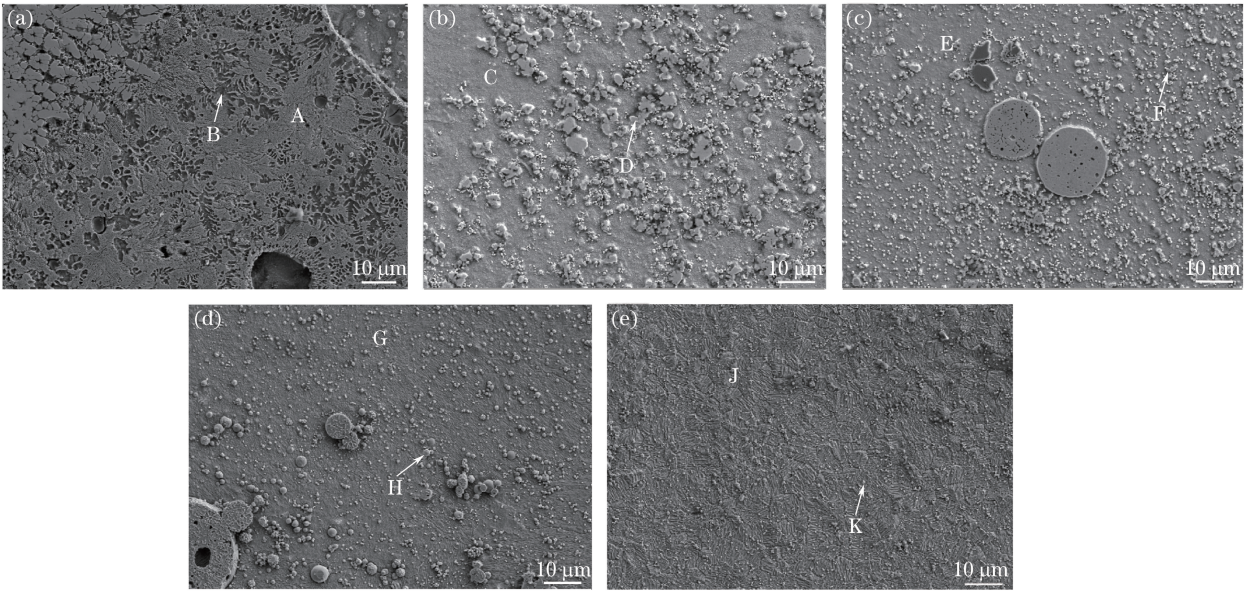


图 9 采用不同厚度铜层焊缝的显微组织。(a) 0.2 mm;(b) 0.4 mm;(c) 0.6 mm;(d) 0.8 mm;(e) 1 mm

Fig. 9 Microstructures of welds with different Cu interlayer thickness.

(a) 0.2 mm; (b) 0.4 mm; (c) 0.6 mm; (d) 0.8 mm; (e) 1 mm

表 6 图 9 中各个相的化学成分(原子分数,%)

Table 6 Chemical compositions of various phases marked in Fig. 9 (atomic fraction, %)

Phase	Fe	Nb	Cr	Ni	Cu
A	51.09	27.41	14.21	4.30	3.00
B	61.01	11.29	16.00	5.58	6.12
C	6.24	—	2.22	—	91.54
D	65.80	—	13.40	1.96	18.84
E	7.36	—	2.01	1.34	89.29
F	60.90	7.97	17.79	3.69	9.66
G	3.90	—	0.82	—	95.28
H	66.44	—	18.84	3.61	11.11
J	4.11	—	1.16	1.57	93.15
K	72.20	—	15.56	1.79	10.45

当铜层厚度为 1.5 mm 和 2 mm 时,焊后形貌如图 10 所示,可以看出,焊后铜层仅仅是激光扫过的中心区域发生了局部熔化,故无法实现 304 SS/Nb 连接。造成这种现象的原因主要是因为所用激光的光斑直径约为 0.35 mm,加热区域很小,无法将过厚铜层全部熔化,且铜层厚度增大会导致散热加快,进而使得熔化区域减小。

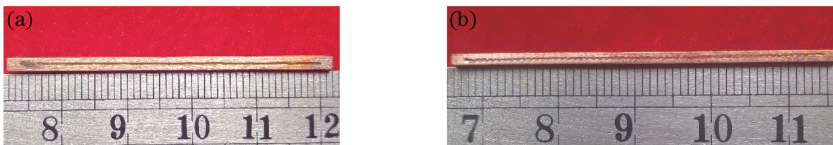


图 10 不同厚度铜层焊后形貌。(a) 2 mm;(b) 1.5 mm

Fig. 10 Morphologies after welding with different Cu interlayer thicknesses. (a) 2 mm; (b) 1.5 mm

4 结 论

以钢/铌激光焊为研究对象,探讨了不同中间层对接头组织及性能的影响规律,得到如下结论。

1) 当激光束直接作用于 304 SS/Nb 对接面处时,接头中极易生成脆性金属间化合物 Fe_2Nb ,使接头显著脆化,焊后即发生开裂。

2) 不同金属材料纯铜、纯银、纯钨、纯钒、纯钽和纯铈被选择作为中间层进行 304 SS 与 Nb 的焊接试验, 铜的焊接效果最好。

3) 随着铜层厚度的增加, 铜层对于 Fe_2Nb 形成的阻碍作用增强, 接头强度提高。然而, 铜层厚度过大会使激光无法将铜层全部熔化, 从而无法实现 304 SS 与 Nb 的连接。

参 考 文 献

- [1] Lu Z L, Lu F, Cao J W, *et al.* Fabricating hollow turbine blades using short carbon fiber-reinforced SiC composite[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1/2/3/4): 417-425.
- [2] Arivazhagan N, Singh S, Prakash S, *et al.* Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding[J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 3036-3050.
- [3] Gupta R K, Kumar V A, Karthikeyan M K, *et al.* Investigation of cracks generated in columbium alloy (C-103) sheets during deep drawing operation[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2010, 10(3): 228-232.
- [4] Jiao Yonggang, Ma Dongkang, Guo Yuexia, *et al.* Producing Nb-stainless steel clad rods by outer-clad explosive welding method[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 189-192.
焦永刚, 马东康, 郭悦霞, 等. 爆炸焊接外复法制取铌-不锈钢复合棒[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 189-192.
- [5] Wu Jinping, Yang Yingli, Zhao Hengzhang, *et al.* Microstructure analysis of the explosive cladding interface of Nb/304L[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S4): 634-637.
吴金平, 杨英丽, 赵恒章, 等. Nb/304L 爆炸复合板界面组织分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S4): 634-637.
- [6] Li Xin, Zheng Jianping, Zhao Jun. Characteristics of welding-brazed joint between Nb-1Zr alloy and 304 stainless steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 105-108.
李鑫, 郑剑平, 赵俊. Nb-1Zr 合金与 304 不锈钢熔钎焊的接头特性[J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 105-108.
- [7] Ma Yan. Study of welded joint layer of Nb-1Zr alloy and stainless steel[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003: 21-30.
马雁. Nb-1Zr 合金与不锈钢焊接结合层的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003: 21-30.
- [8] Budkin Y V, Sokolov Y A. A target-oriented method of producing the required temperature field in the weld zone of dissimilar materials[J]. Welding International, 2012, 26(4): 297-302.
- [9] Qi Lijun, Cai Hongtao. Study on technology of high temperature vacuum brazing of Nb-1Zr alloy and 1Cr18Ni9Ti in vacuum[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(S1): 365-369.
齐立君, 蔡洪涛. Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 高温真空钎焊工艺研究[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(S1): 365-369.
- [10] Tan Caiwang, Gong Xiangtao, Li Liqun, *et al.* Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103002.
檀财旺, 巩向涛, 李俐群, 等. 镁/钛异种金属预置 Al 夹层光纤激光熔钎焊接特性[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103002.
- [11] Liu Lala, Hu Shengsun, Shen Junqi, *et al.* Effect of laser welding heat input on microstructure and properties of 26Cr-3.5Mo ferritic stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203005.
刘腊腊, 胡绳荪, 申俊琦, 等. 激光焊接热输入对 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢组织性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203005.
- [12] Jing Cainian, Fan Jichao, Wang Conglei, *et al.* Characterization and formation mechanism of the weld interface of TRIP590 steel laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403004.
景财年, 范吉超, 王丛雷, 等. 激光焊接 TRIP590 钢焊缝微观结构及形成机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403004.
- [13] Shi Mingxiao, Zhao Jian, Chen Shujin, *et al.* Effects of beam-offset on microstructure and properties of laser welded Nb/304 SS joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(3): 41-44.
石铭霄, 赵健, 陈书锦, 等. 激光偏束焊对铌/钢接头组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(3): 41-44.
- [14] Shi Mingxiao, Zhao Jian, Hu Qingxian, *et al.* Influence of the parameters of welding procedure on the mechanical properties of laser welded 304 SS/Nb joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 72-76.
石铭霄, 赵健, 胡庆贤, 等. 焊接工艺参数对钢/铌激光焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 72-76.
- [15] Tang Renzheng, Tian Rongzhang. Binary alloy phase diagrams and crystal structure of intermediate phase [M]. Changsha: Press of Central South University, 2009: 433.
唐仁政, 田荣璋. 二元合金相图及中间相晶体结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 433.