

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.02.006

YG20/45 钢激光熔钎焊焊缝界面显微组织 与元素扩散研究

马一帆, 徐培全*, 林俊宇

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对 YG20/45 钢异种金属焊接时,存在焊缝接头脆性高及焊缝连接性能差等缺点,课题组提出以 Cu/Invar/Ni 复合层为中间层进行激光熔钎焊焊接,研究焊缝区域微观组织、化学成分及元素扩散规律。试验结果表明:母材硬质合金中的 WC 晶粒棱角在焊接试验中会溶解,部分晶粒聚集但不长大,从而降低了焊接接头的脆性;在焊缝过渡区 Invar 合金和硬质合金中的元素发生扩散反应,其中 Invar 合金中的 Fe 和 Ni 元素补充硬质合金流失的 Co 元素,形成粘结相,提高了焊接母材的连接性;硬质合金和 45 钢之间加 Cu/ Invar/Ni 复合层,激光钎焊接头宏观形貌都较好,在母材厚为 4 mm 时,试验采用激光功率为 1 700 W,激光扫描速度为 0.1 m/s,离焦量 -3 mm 时可以获得冶金性良好的焊接接头。

关 键 词:硬质合金;激光熔钎焊;显微组织;元素扩散;晶粒聚集

中图分类号: TG441.7; TH140.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2022)02-0034-06

Study on Microstructure and Element Diffusion in Laser Weld of YG20/45 Steel

MA Yifan, XU Peiquan*, LIN Junyu

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of high brittleness of welded joint and poor weld connection performance in the dissimilar metal welding of YG20/45 steel, the laser fusion brazing welding with Cu/Invar/Ni composite layer as the intermediate layer was proposed to study the microstructure, chemical composition and element diffusion law in the weld area. The test results show that the WC grain edges and corners in the base metal cemented carbide will dissolve in the welding test, and some grains gather but do not grow up, which reduces the brittleness of the welded joint. In the weld transition zone, the elements in Invar alloy and cemented carbide have diffusion reaction. The Fe and Ni elements in Invar alloy supplement the co elements lost in cemented carbide to form a bonding phase, which improves the connectivity of welding base metal. When Cu/Invar/Ni composite layer is added between cemented carbide and 45 steel, the macro morphology of laser brazed joint is better. When the base metal is 4 mm thick, the laser power is 1 700 W, the laser scanning speed is 0.1 m/s, and the defocus amount is -3 mm, the welded joint with good metallurgical properties can be obtained.

Keywords: cemented carbide; laser brazing; microstructure; element diffusion; grain gathering

硬质合金以化合物为基体,金属为结合剂,通过粉末冶炼制造而成的一种耐磨性较强、硬度较高的材料。因为硬质合金刀具成本高,制造加工难度大,所以常以

焊接的方式将硬质合金焊接在钢基体上,从而可以得到耐磨性强、硬度较高以及背部高韧性的理想结合构件^[1]。由于硬质合金与异种金属尤其是钢的连接一

收稿日期:2021-09-28;修回日期:2021-12-24

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(20ZR1422700)。

第一作者简介:马一帆(1996),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为激光焊接。通信作者:徐培全(1978),男,山东乐陵人,博士,教授,主要从事界面科学的研究。E-mail: pqux@sues.edu.cn

直是一个较为复杂的过程,主要的难点是在于不同基体热膨胀系数相差较大,在进行焊接试验中会产生较大残余应力,从而使焊件发生开裂以及焊接过程中会发生冶金反应形成有害相。近几年随着电子、汽车、航天等行业的快速发展,激光焊接被广泛使用,许多学者尝试使用激光焊来实现硬质合金与钢的异种金属连接。由于激光焊比电弧焊对接头的热输入少,通过激光钎焊直接使钢和硬质合金形成有效连接可以缓解上述2个问题。为进一步改善钢和硬质合金焊接接头存在的问题,课题组以 Cu/Invar/Ni 复合层为中间层进行激光熔钎焊焊接试验研究。

1 试样制备与试验方法

试验材料为 WC-20Co 硬质合金和 45 钢,材料为 $\varnothing 60\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的圆盘,利用 DK7750E 型数控电火花线切割机床将母材沿直径方向加工成半径为 30 mm 的半圆盘。硬质合金晶粒尺寸较大,一般晶粒尺寸平均在 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 左右,其化学成分如表 1 所示。

表 1 YG20 化学元素质量分数

Table 1 Chemical element mass fraction of YG20

%		
W	C	Co
75.10	4.90	20.00

填充层材料为 Ni/invar/Cu 复合层,Ni 靠近 45 钢侧,Cu 靠近硬质合金侧。其中 Cu,Ni 填充层的厚度均为 0.1 mm,Invar 合金厚度为 1.5 mm,中间层高度高出母材 1.0 mm,避免出现焊接过程中钎料高温流失导致不能填满焊缝的情况。其中 Invar 合金元素成分如表 2 所示。焊接接头采用对接形式,激光扫描速度为 0.1 m/s。

表 2 Invar 合金化学元素质量分数

Table 2 Invar alloy chemical element mass fraction

%				
Ni	C	Mn	Nb	Fe
42.00	0.60	3.50	3.00	50.90

焊接设备使用 IPG-YLS-5000W 掺镱多模光纤激光器作为热源,激光波长为 $1\ 075 \pm 5\text{ nm}$,光斑直径为 0.2 mm,最大功率 5 000 W。使用 HIGHYAG 激光加工头 BIMO 和 KUKAKR60HA 型智能化系统。焊接过

程中使用 Ar 气提供焊接环境保护,气体流速保持在 23 L/min。试样抛光后采用村上试剂 (10% KOH + 10% K₃[Fe(CN)₆] + 80% H₂O) 对硬质合金侧进行腐蚀,焊缝用 100 mL HCL,2 g CuCl₂,7 g FeFeCl₃,5 mL HNO₃,200 mL 甲醇和 100 mL H₂O 配制的试剂进行腐蚀,对钢侧使用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀。使用 VHX-600 型超景深数码显微镜和 S-3400hS-3400、S-4800 扫描电镜对焊缝界面组织及元素成分进一步研究分析,利用 S-4800 型扫描电镜对焊缝区域进行 EDS 分析^[2]。

2 试验结果与讨论

2.1 YG20/45 钢宏观焊缝成形性

图 1 所示为试样焊接后焊件形貌,试样 A₁,A₂,A₃ 的焊接功率分别为 1 500,1 700 和 1 900 W。图 1 中焊件上侧为 45 钢,下侧为 YG20,其中激光扫描路径为焊缝正面的右侧至左侧。由图 1(d)中 A1 焊缝背面右侧部分可以观察出焊缝中钎料没有完全熔化,说明激光功率偏小,焊接热输入不足以满足钎料完全熔化使母材充分连接,造成元素在焊缝界面处扩散反应不明显,焊缝金属均匀性较低,硬质合金侧和 Ni/invar/Cu 复合层未完全融合;从 A3 焊缝正面可以观察到焊缝上部分形成凹坑且底部低于母材上表面,而 A3 焊件试样底部母材与中间层润湿比较充分,这些凹坑可能是由于焊缝热输入较高反应剧烈,导致焊缝中钎料过多挥发形成的。

2.2 焊缝界面显微组织及形态

在焊接过程中,熔池的状态对焊缝附近区域晶体组织结构的生长有重要影响。焊缝的冶金反应、组织结晶的方向、晶体结构的影响因素主要有熔池的存在时间、体积、形状和热传导方向。图 2 所示为焊接界面显微组织图。

图 2 中(a),(c)和(e)分别为试样 A1,A2 和 A3 钢侧及焊缝组织图。由图 2(a)可以观察到,靠近焊缝处主要由胞状晶组成,其次是柱状枝晶,晶体组织的生长具有方向性,柱状晶体积偏小,没有明显的侧枝生长,具有少量偏析,结构较致密^[3]。图 2(c)中可以看出钢侧主要由珠光体和铁素体组成,其中珠光体呈片状,焊缝中间方框部分晶粒较不规则,可能是由于焊接

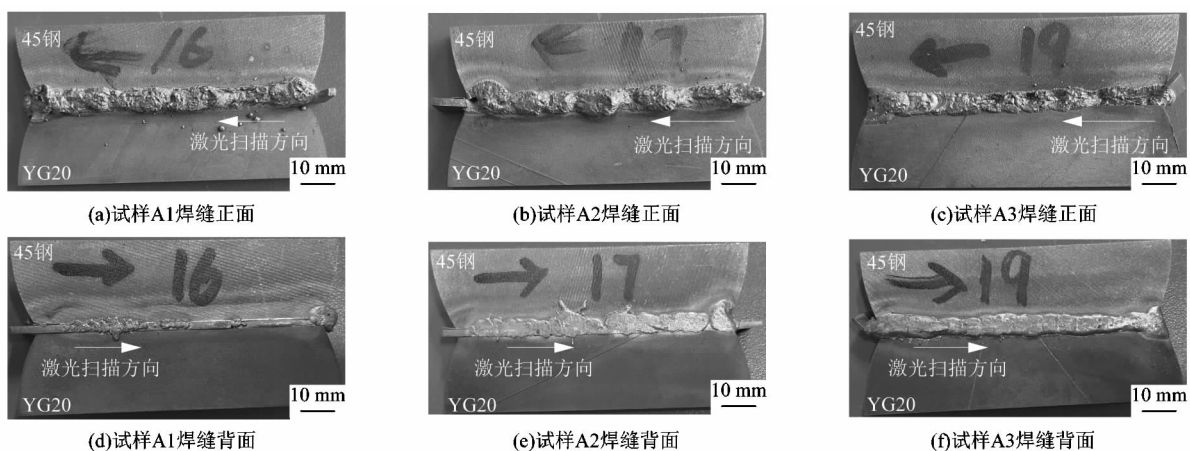


图1 不同功率下焊缝宏观成形

Figure 1 Weld macro forming under different power

过程中少量 Ni 没有充分发生扩散反应导致晶粒出现少量聚集,界面处晶体组织主要由胞状晶组成。图 2(e)焊缝中间部分出现和图 2(c)焊缝类似的不规则晶体聚集,焊缝处出现纤维形状的枝晶^[4]。

图 2(b), 2(d) 和 2(f) 分别为试样 A1, A2 和 A3 硬质合金侧焊缝组织图,组织形貌与钢侧焊缝界面处有较大差异,晶体生长也较明显。图 2(b)在硬质合金侧焊缝界面组织出现等轴树枝晶,在硬质合金与中间层之间有一条宽度约 8 μm 的黑色组织疏松层。图 2(d)焊缝界面组织生长方向不明显,硬质合金和中间层之间也出现黑色组织疏松层,但是疏松层并不连续。图 2(f)中焊缝界面处主要由胞状晶和胞状枝晶组成,其中胞状晶体积较大,因为在同一焊接速度下焊缝获得较高的热输入,在焊接过程中界面位置结晶速度较小,形成较大的温度梯度,随着凝固界面在焊接过程中由融合区边界向焊缝中心移动时,结晶速度加快,而界面的温度梯度降低,导致成分过冷,形成较为粗大的胞状树枝晶^[5];在离开焊接界面约 20 μm 处有较多板条束晶体形成,而且许多的板条束晶体形成了板条群。

图 2(a), 2(c) 和 2(e) 中可以观察到钢侧焊缝附近生成了马氏体,靠近焊缝界面处马氏体比较粗大,其余部分比较细小。粗大的马氏体组织可以提高钢侧热影响区的硬度,降低塑形和韧性,所以这个区域是焊接接头比较脆弱的位置^[6]。马氏体的形貌对焊接接头的力学性能有一定的影响,马氏体板条群或马氏体片尺寸越小则马氏体的强度越高,因此可以提高焊接接

头的综合力学性能^[7]。

图 2(b) 中形成较少树枝晶, 2(d) 中无明显树枝晶, 2(f) 中组织树枝晶最多, 由此可知随着焊接功率的增加树枝晶变化并不是线性变化的, 而是由焊接过程中的多种因素造成的。原因如下: 在实际焊接过程中, 焊缝界面处存在较大的温度梯度, 结晶速度在熔池凝固过程中较小, 成分组织发生过冷, 出现树枝晶, 随着焊接热输入的增加, 线能量增加导致温度梯度增加, 从而不易形成树枝晶。又由于硬质合金中元素 Co 在一定热输入下的熔化导致 WC 分布比较稀疏, 使热传导较易发生, 温度梯度变低, 可以促进树枝晶的形成^[8]。

为进一步研究硬质合金侧焊缝晶粒, 利用扫描电镜对 A2 试样焊缝界面组织形貌进行观察。图 3 所示为 A2 试样 WC-20Co 侧焊缝的界面上侧同一部位不同放大倍数的形貌图。WC-20Co 硬质合金母材是由硬质合金相 WC 和粘接相 Co 构成, Co 和因瓦合金的熔点比 WC 的熔点要低, 当 Co 熔化时 WC 颗粒就摆脱了束缚处于自由状态, 在内力的作用下扩散到液态熔池中^[9], 当温度继续上升达到 WC 熔点时, WC 颗粒开始熔化成小颗粒, 随后温度开始慢慢降低, 小颗粒的 WC 又重新聚集^[10]。图 3(c) 中可以看到有部分 WC 颗粒已经扩散到中间过渡层中, 大颗粒边缘有溶解迹象, 由原来清晰可见的尖角变成有点模糊的圆角。

图 4 所示为试样 A2 硬质合金侧焊缝接头中部和下部典型显微组织。图中虚线标出的为接头界面处的过渡层即硬质合金 Co 漂移区, 在此区域内, 元素 Co、

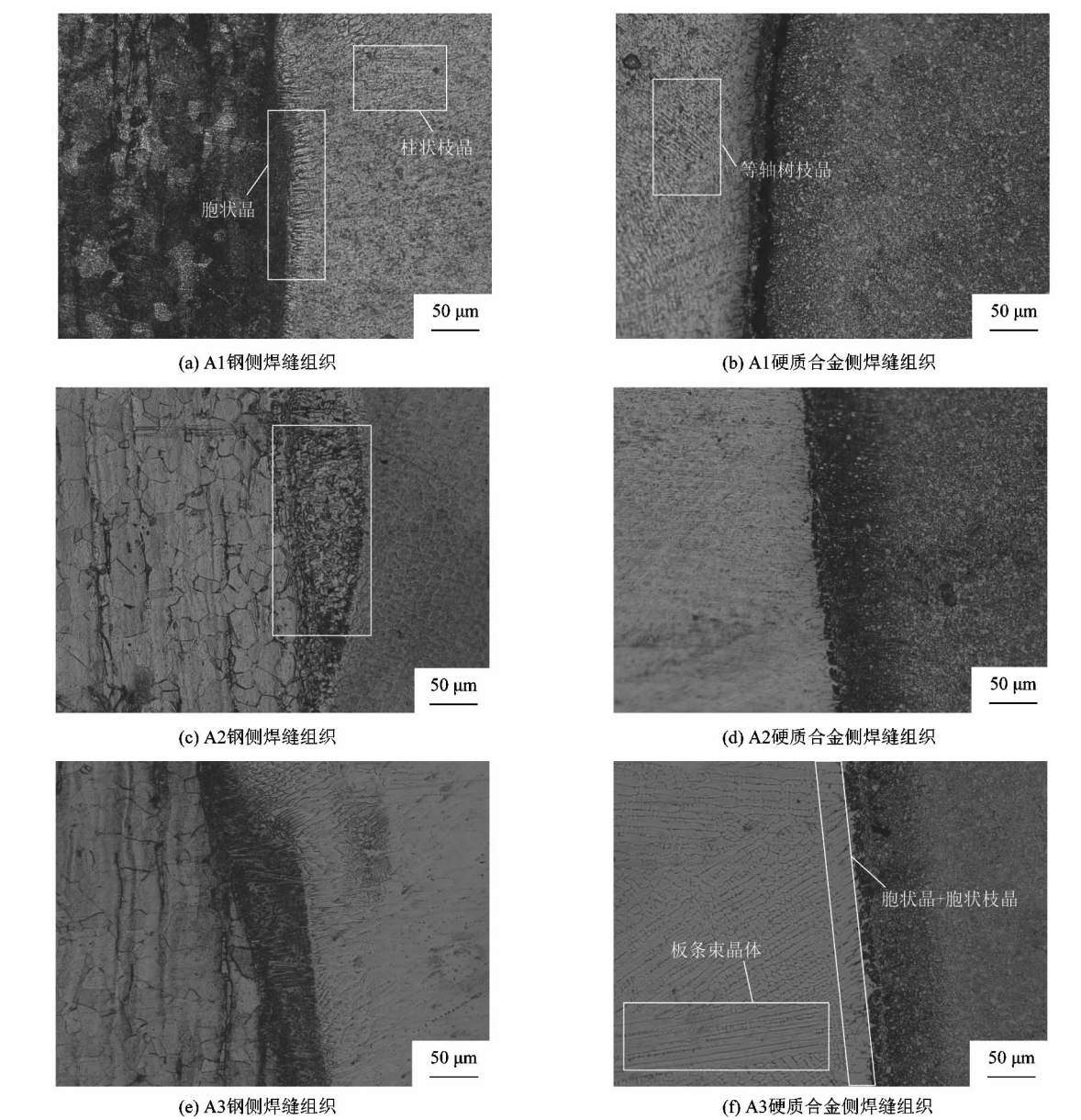


图2 焊缝界面组织

Figure 2 Weld interface texture

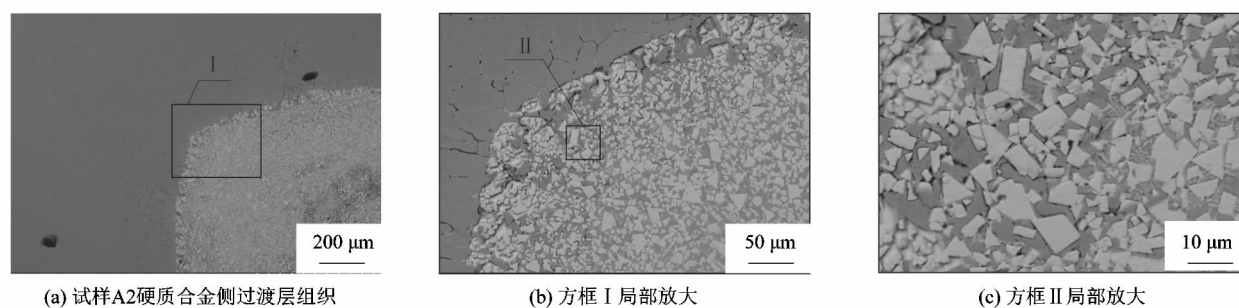
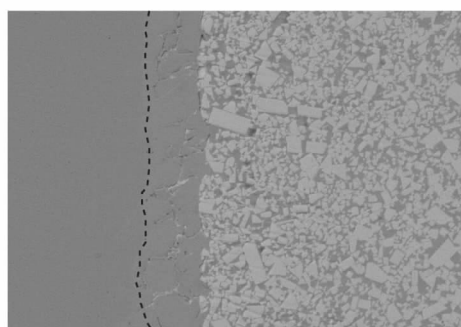


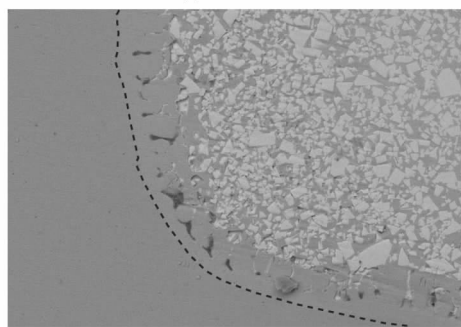
图3 过渡层显微组织

Figure 3 Transition layer microstructure

Ni 和 Fe 组成粘结相。Co 漂移区具有较为疏松的微观组织接头,与母材硬质合金相比,此处具有更高的韧性,但是强度和硬度较低。作为过渡层,Co 漂移区通过 Invar 合金中间层增强了硬质合金和 45 钢的连接,提高焊接接头的韧性^[11-12]。碳化钨颗粒一般是不规则棱角状,而焊缝界面处碳化钨熔化较多,有较多熔化后的碳化钨细小颗粒出现在焊缝界面处,并且这些颗粒没有发生异常长大,则可以缓解焊缝过渡区的应力集中。在焊缝接头下部出现少量疏松孔洞,可能是由于母材形状突变使热输入分布不均造成的^[13]。



(a) 中部过渡区



(b) 下部过渡区

图 4 试样 A2 硬质合金侧焊缝过渡区

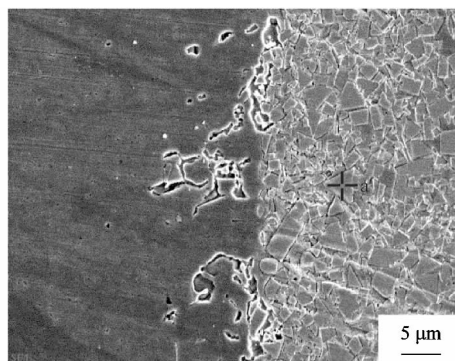
Figure 4 Weld transition zone of sample A2
cemented carbide side

从焊缝过渡层能明显观察到焊缝界面有 WC 颗粒伸入焊缝中,并且部分 WC 颗粒棱角产生溶解,出现少量聚集态晶粒,但这些晶粒暂时未异常长大。为了更清楚地研究 WC 颗粒伸入到焊缝中的情况,采用配备 S-4800 型号扫描电镜的 EDS 能谱仪对试样 A2 焊缝界面的几个具有代表性的位置点进行观察并进行元素含量的测定。

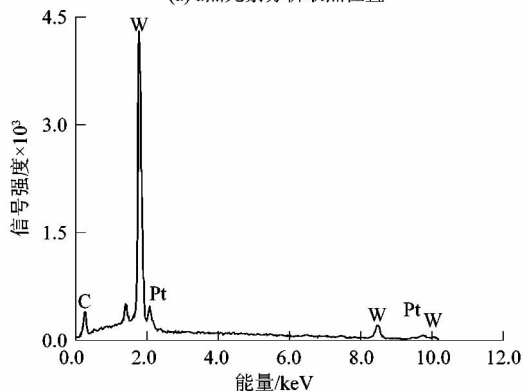
2.3 硬质合金侧焊缝元素扩散分析

图 5 所示为试样 A2 硬质合金侧焊缝取点成分分

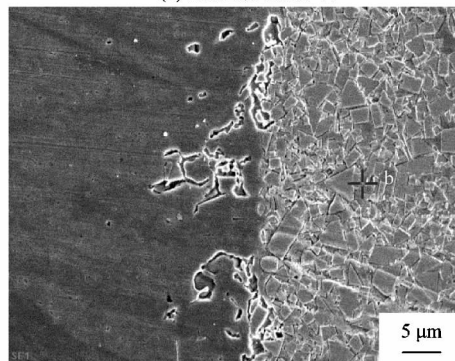
析图,第 1 个点 a 选取的是较大的白色颗粒即 WC 晶粒,第 2 点 b 选取的是在 WC 晶粒周围。由图 5(a)可以得到 a 点其主要成分是 W,其他元素含量并不明显,可以推测此处相组成主要碳化钨。



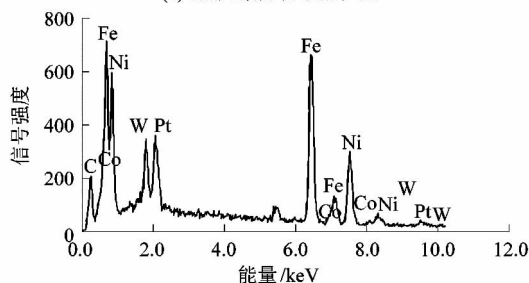
(a) a点元素分析取点位置



(b) a点元素成分分析



(c) b点元素分析取点位置



(d) b点元素成分分析

图 5 YG20 侧焊缝元素成分

Figure 5 YG20 side weld element composition

同样的方法得到 b 点的元素成分分析结果。b 点出现了 Fe、Ni 和 Co 元素,可以推测出此处主要由铁碳化合物组成,也说明硬质合金中一部分 Co 元素在焊接过程中发生了流失。Invar 合金元素成分主要含有 Fe 和 Ni,其中 Fe 和 Ni 元素含量在 b 处明显增加,由此可知,硬质合金侧流失的 Co 元素被通过扩散反应进入的 Fe 和 Ni 元素补充,说明 Invar 合金和硬质合金中各元素发生了充分的扩散反应,从而可以保证焊接接头的整体性能^[14]。

3 结论

针对 YG20 和 45 钢异种金属焊接焊缝接头脆性高及焊缝连接性能差等缺点,课题组以 Cu/Invar/Ni 作为填充材料,采用不同功率进行激光熔钎焊接试验,对焊缝区域微观组织及元素扩散进行研究,得到以下结论:

1) 在激光焊接过程中,YG20 中 WC 晶粒的不规则棱角会逐渐发生溶解消失,可以防止应力在过渡区集中,增加接头韧性;

2) 因瓦合金中的 Fe、Ni 元素弥补硬质合金流失的 Co 元素,发生了扩散反应,元素 Fe、Ni 在硬质合金中可以起到粘结相的作用,增强焊接接头连接性;

3) 在焊接过程中加 Cu/Invar/Ni 复合层,激光钎焊接头宏观形貌都较好,钢侧焊缝大部分为胞状晶和柱状晶,晶粒生长不具有明显方向性;硬质合金焊缝侧出现的树枝晶的生成受多种因素影响,焊接功率的增加并不会使树枝晶的形成发生线性变化。

本研究为硬质合金与钢基金属的连接提供了新思路,在拓宽光纤激光焊接在难熔焊材料领域的应用具有一定意义。后续工作可进一步研究工艺参数对组织及性能的影响,或是填充不同材料的中间层对焊接质量的影响。

参考文献:

- [1] 张一鸣,陈春焕,赵秀娟. 熔敷金属膨胀系数对 YG20 硬质合金与 45 钢激光焊的影响[J]. 稀有金属,2014,38(6):1-8.
- [2] 陈国财,胡德安,程东海,等. 添加 Ni 中间层的镁/钛激光熔钎焊工艺及接头性能研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2021,35(1):63-67.
- [3] LUO M, CAI W, HUANG J, et al. Simulation of laser brazing of sheet panels and parametric studies of thermally-induced distortion reduction [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60:6.
- [4] DA CRUZ JUNIOR E J, FRANZINI O D, CALLIARI I, et al. Effects of nickel addition on the microstructure of laser-welded UNS S32750 duplex stainless steel [J]. Metallurgical Materials Transactions A, 2019, 50(4):1616-1618.
- [5] 李远星,张晓山,朱宗涛,等. Ni 元素扩散行为对硬质合金/钢钎焊接头微观组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(4):1120-1125.
- [6] LONG W M, LIU D S, WU A P, et al. Influence of laser scanning speed on the formation property of laser brazing diamond coating[J]. Diamond and Related Materials, 2020, 110:108085.
- [7] ZHANG P L, SHI H C, TIAN Y T, et al. Effect of zinc on the fracture behavior of galvanized steel/6061 aluminum alloy by laser brazing [J]. Welding in the World, 2021, 65:13-22.
- [8] SUN J H, HUANG J, LU F G, et al. Mechanism of Zn coating on the wettability, spreadability, and microstructure of Al/Steel with the laser welding-brazing method[J]. Metallurgical Materials Transactions A, 2020, 51:1677-1688.
- [9] 卢贵鹏,尹洪泽,刘威. T2 紫铜/304 不锈钢激光钎焊接头组织及性能[J]. 焊接, 2020(12):16-19.
- [10] 许欣,靳广胜,刘颖. 激光功率对镁合金与镀锌钢激光熔钎焊组织和力学性能影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3):76-79.
- [11] 张一鸣,潘金芝,夏爽,等. 梯度硬质合金与 45 钢的 TIG 焊研究[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2018(5):17-21.
- [12] 冯燕柱,高向东,彭聪,等. 304 不锈钢激光焊接匙孔瞬态行为分析[J]. 机电工程, 2020, 37(5):577.
- [13] BRIDGES D, ZHANG S H, LANG S, et al. Laser brazing of a nickel-based superalloy using a Ni-Mn-Fe-Co-Cu high entropy alloy filler metal[J]. Materials Letters, 2018, 215:12.
- [14] CHEN Z J, CHANG J Y, XIAO L G, et al. Effect of brazing temperature and clearance on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel brazed joints [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1242(45):418-420.