

● 焊接技术 ●

硬质合金激光-TIG 复合焊焊缝成形及缺陷分析

马 丁, 于治水, 曹晓莲, 徐培全

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对硬质合金焊接过程中容易出现的未熔透、气孔以及裂纹等缺陷,以硬质合金与因瓦合金的焊接为研究对象,分析了在其激光-TIG 复合焊过程中焊缝成形、气孔和裂纹的形成原因及其影响因素,初步讨论了硬质合金激光-TIG 焊接过程的缺陷及其分布位置特征。

关键词:硬质合金;激光-TIG 复合焊;气孔;裂纹

中图分类号:TG456.7

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2013)19-0144-04

Analysis on Welding Defects and Weld Formation of Cemented Carbide Laser-TIG Welds

MA Ding, YU Zhishui, CAO Xiaolian, XU Peiquan

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

Abstract: With the development of powder metallurgy and welding technique, cemented carbide was widely used in different applications. Moreover, the ratio increases sharply. According to such welding defects as non-penetration, gas porosity and cracks, the welded joints between cemented carbide and invar alloy were investigated using laser-TIG (tungsten inert gas) hybrid welding. The reasons and influencing factors on the weld formation, gas porosity and cracks were analyzed followed by discussion on the characterization of welding defects and distribution.

Key words: cemented carbide; laser-TIG hybrid welding; gas porosity; crack

WC-Co 系硬质合金具有的独特性能,特别是高温强度及其在液态介质中的耐蚀性能和化学惰性^[1-2],使其在工具量具、油气运输装备、航空航天、微电子、石油化工等重要工装设备核心构件的制造中广泛应用。目前,硬质合金的连接技术既包括钎焊、扩散焊、真空烧结等方法^[3-6],也有摩擦焊、电容储能焊、爆炸焊、TIG 焊、激光焊等^[7-14],而采用激光复合焊接的方法可以克服激光焊的能量利用率低、容易产生气孔、裂纹等缺点,兼顾其焊道窄、热影响区小、焊接速度快等优点,对比其他焊接方法有其独特的优势。本文采用激光-TIG 复合焊接方法对硬质合金和因瓦合金进行焊接,对其焊接成形工艺进行研究,揭示硬质合金与异质金属激光复合焊焊接中存在的常见问题,分析缺陷形成的原因。

1 试验材料与方法

被焊材料为高粘结相硬质合金 YG30 和因瓦合

金,其中,硬质合金的成分(质量分数,%)是:65.71W、4.29C 和 30Co,WC 和粘结相 Co 的粒度分别为 7、2 μm ; 因瓦合金的主要成分(质量分数,%)是:42Ni、0.6C、3.4Mn、4Nb 和余量 Fe。被焊材料分别制成半圆盘状(直径 48mm,厚度分别为 4、6mm)。试样在使用之前要用丙酮或酒精仔细清洗,去除油污。

选用 CO₂ 激光-TIG 复合焊方法进行焊接,不开坡口、不加填充材料,焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数
Tab.1 Welding process parameters

试样 编号	工件厚 度/mm	激光焊			TIG 焊			焊接速度 (m·min ⁻¹)
		功率 /kW	离焦量 /mm	He 气流量 (L·min ⁻¹)	电流 /A	电压 /V	Ar 气流量 (L·min ⁻¹)	
1 [#]	4	9	8~9	32	58	8	10	2
2 [#]	4	9	8~9	32	58	8	10	1
3 [#]	6	10	8~9	32	140	13.8	10	1
4 [#]	6	10	8~9	32	157	15.6	10	1

焊好的试样沿垂直于焊缝方向切开,制备金相试样后 YG30 侧组织采用村上试剂(10vol% KOH+10vol% K₃Fe(CN)₆+80vol% H₂O)浸蚀,焊缝和因瓦合金侧组织采用氢氟酸溶液浸蚀。用 OLYMPUS-BX51M 型光学显微镜分析焊接接头的组织及界面结合,采用 VHX-600K 型超景深光学立

收稿日期:2013-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51105240);上海工程技术大学研究生科研创新课题项目(13KY0503)

作者简介:马丁(1990-),男,江苏沐阳人,硕士,主要研究方向:激光焊接;

电话:18817846510;E-mail:martin199028@126.com

通讯作者:徐培全,电话:13661448502;E-mail:pqxu@sues.edu.cn

体显微镜分析气孔、裂纹等缺陷分布及特征。

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝成形分析

图 1 是硬质合金与因瓦合金激光-TIG 复合焊的焊缝成形情况,其中,上图是试样正面焊缝,下图是试样背面焊缝。可看出,1[#] 试样焊接接头正面焊缝收弧位置有明显下塌,是由于焊接热源热输入较大引起;稳定焊接时,焊缝宽度达 3.79 mm,热影响区宽度为 340 μm ;焊缝背面出现未焊透缺陷。2[#] 试样

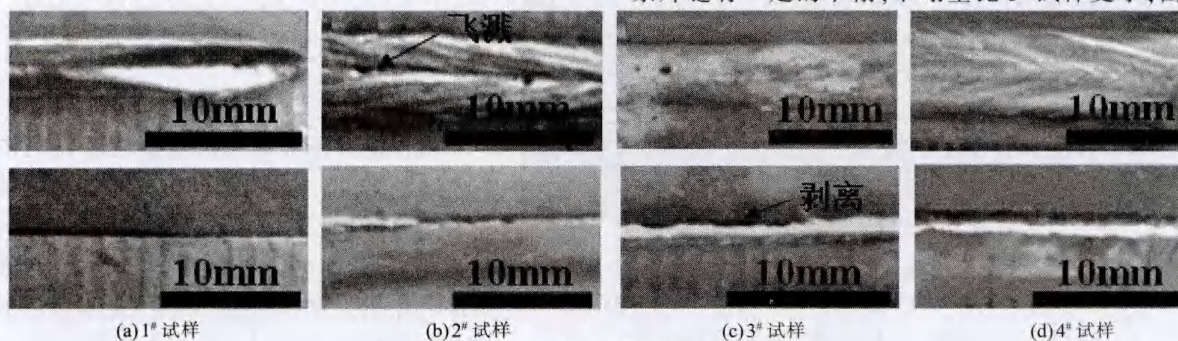


图 1 硬质合金无填充激光复合焊缝成形

Fig.1 Weld formation of cemented carbide during laser hybrid welding without filler metal

电压和电流继续变大,影响了温度,继而影响了等离子体的产生,导致在焊缝内部产生了密度差,致使焊缝受力发生变化,引发焊缝局部隆起;同时,硬质合金/因瓦合金界面完全熔透,无裂纹、气孔等缺陷。

热源功率(q)、焊接速度(v)和热导率(λ)对焊缝的成形非常重要。一种情况,当 q 、 v 较小时,可形成典型的圆弧形波纹焊缝,美观整齐,如图 2(a)所示。另一种情况,当 q 、 v 较大、 λ 较小时,焊缝熔融金属凝固缓慢,形成尖角形的 V 形焊缝波纹,存在较多的缺陷,如图 2(b)所示。有研究表明,圆弧形的焊缝波纹焊接接头的性能良好,而 V 形的焊缝波纹更容易产生裂纹、气孔、凹坑等缺陷,且缺陷产生的位置通常为 V 形波纹的中心线 L 附近。图 1(b),在中心线处有气孔缺陷产生,验证了这个推断。对于图 1(d)中的焊缝,由于母材厚度的增加,使得在 q 增加的情况下仍能获得较好的焊缝。

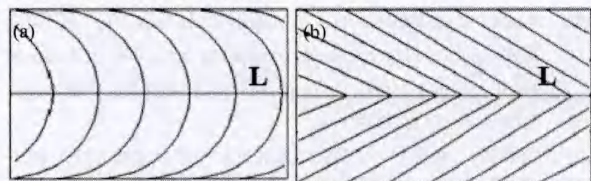


图 2 焊缝上表面成形模式

Fig.2 Model for weld formation of top surface

焊接接头正面形成表面下塌;背面在初始焊接位置由于激光的不稳定,出现未熔透现象;焊缝宽度达 6.21 mm,热影响区宽度为 560 μm 。3[#] 试样焊接接头正面成形较好,但整条焊缝有明显的下塌,但下塌量不大,下塌量产生的原因可能是斑点力、气体流力、电磁搅拌力以及电磁力共同作用下造成;背面由于板厚提高和热输入不足等原因,在靠近硬质合金一侧有未熔透现象,可能与该区域熔化后焊缝金属流动性不足所引起。4[#] 试样焊接接头正面成形良好,整条焊缝有一定的下塌,下塌量比 3[#] 试样更小;由于

对于同质母材焊接而言,中心线 L 应该处于焊缝的中心位置,但是,对于异质材料焊接来说,由于导热系数 λ 的不同,在凝固的过程中需要的时间有差异,将造成凝固线的不对称,中心线 L 将向凝固快的一侧偏移,也就是导热系数大的一方。从图 1 中可以看到这样的趋势,这方面的问题还有待进一步的研究。

2.2 裂纹、气孔分析

在焊接过程中,焊缝区域易于形成气孔,形成位置包括焊缝中心区域、焊缝靠近硬质合金侧、焊缝靠近因瓦合金侧等。在未熔透条件下,2[#] 试样断口如图 3 所示,图 3(a)是在焊缝中心位置形成的气孔;图 3(b)是该气孔内部组织的分布;图 3(c)是焊缝处气孔的整体分布图,可以看到除了中心气孔外,在熔合线附近区域内有很多的小气孔分布;图 3(d)是中心气孔底部组织图,可以看到有很多裂纹产生。

在硬质合金与因瓦合金焊接过程中,除了焊趾裂纹外,还有液化裂纹、延迟裂纹。研究发现,该裂纹形成于焊后 18h 后的硬质合金热影响区界面侧,如图 4 所示。其中,图 4(a)是该裂纹的中止位置和扩展情况。研究中发现,该裂纹起始于 WC-Co/ 焊缝界面熔合线,向硬质合金母材扩展,止于 WC-Co/ 焊缝界

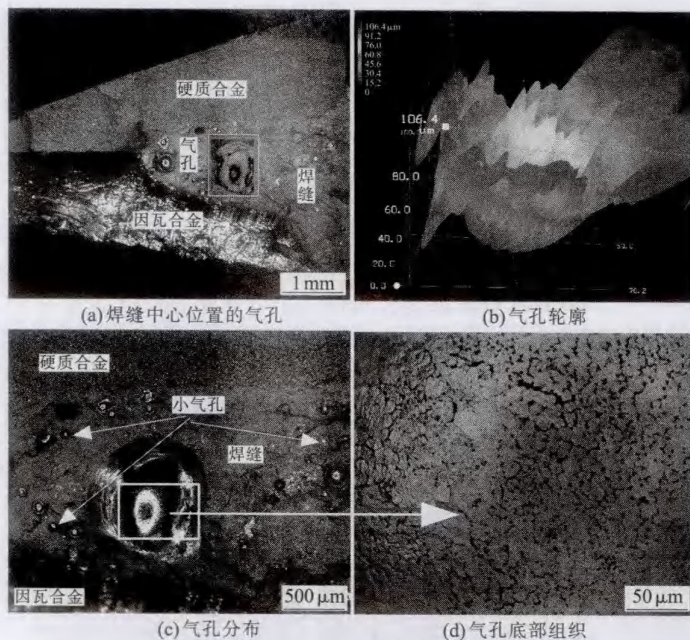


图3 激光复合焊接焊缝气孔
Fig.3 Morphology of porosity during laser hybrid welding

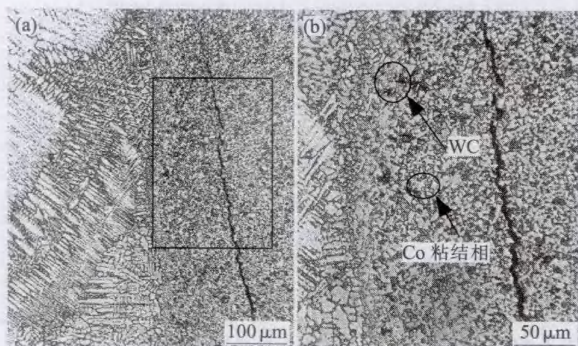


图4 焊缝热影响区裂纹及裂纹扩展
Fig.4 Morphology of crack and its propagation in HAZ

面热影响区。从图中可以看出,裂纹扩展距 WC-Co/焊缝界面熔合线 $71.4\mu\text{m}$ 。图 4(b) 是该裂纹的放大情况及其显微组织。在没有缺陷的条件下, W-M-C 体系的裂纹敏感性大于 Ni-Fe 体系裂纹敏感性。

在激光 -TIG 复合焊接中,由于热输入大、冷却速度快,气体不能很好的溢出,在焊缝中形成气孔。快的冷却速度使应力集中,容易产生裂纹,尤其是在熔合线附近,在靠近硬质合金一侧的熔合线处甚至产生剥离的现象(图 1(c))。对于硬质合金-因瓦合金的复合焊接,由于硬质合金的低塑性,使得在靠近硬质合金的热影响区容易产生冷裂纹,而因瓦合金 Ni-Fe 材料体系,低熔点共晶物发生偏析重熔,形成晶间液膜,在收缩应力作用下产生热裂纹-液化裂

纹。图 5 是根据试验分析得到的缺陷常见产生位置。

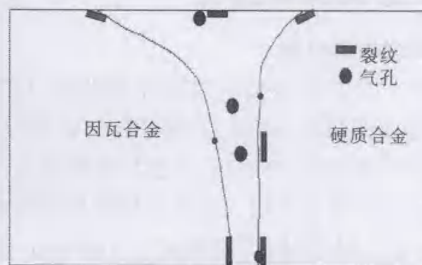


图5 硬质合金焊接缺陷及产生位置的特征
Fig.5 Weld defects characteristic and its occurring position during cemented carbide welding

3 结论

(1) 硬质合金与因瓦合金在激光 -TIG 焊接条件下,仍然会有焊缝背面未熔透的情况发生,并且由于是异质金属焊接,材料的热导率、热膨胀系数等参数不同,正面焊缝的形貌存在差异,焊缝表面熔池凝固线的形貌存在差异,圆弧形为性能优异的凝固线,V 型凝固线焊接接头性能较差,容易产生飞溅、凹坑、开裂等缺陷。

(2) 硬质合金与因瓦合金在激光 -TIG 焊接条件下,主要的缺陷形式是裂纹和气孔,在因瓦合金侧热影响区和焊缝形成的裂纹多为热裂纹;在硬质合金侧热影响区形成的裂纹主要为冷裂纹;气孔主要分布在焊缝中心和熔合线,焊缝中心气孔较大,熔合线气孔多为小气孔。

参考文献:

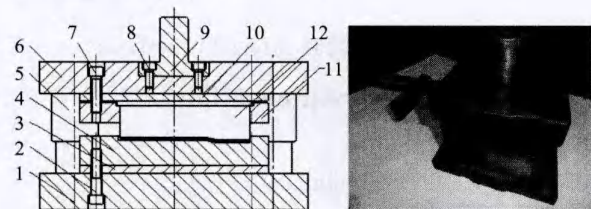
- [1] 王国栋. 硬质合金生产原理[M]. 北京:冶金出版社,1988.
- [2] Barrena M I, Gó mezde Salazar J M, Matesanz L. Interfacial microstructure and mechanical strength of WC-Co/90MnCrV8 cold work tool steel diffusion bonded joint with Cu/Ni electroplated interlayer [J]. Materials and Design, 2010, 31 (7): 3389-3394.
- [3] 李卓然,刘兵,樊建新,等. YG8 硬质合金和低碳钢的高频感应钎焊[J]. 焊接学报,2010,31 (10):97-100.
- [4] Pascal C, Thomazic A, Antoni Zdziobek A, et al. Investigation on pressureless cosintering behaviour of Hadfield steel/cemented carbide biomaterials [J]. Powder Metallurgy, 2012, 55(2): 110-117.
- [5] 吴相省. 硬质合金 / 钢活性液相扩散焊接技术研究[J]. 硬质合金,2011,28(2):103-110.
- [6] 陈洪生,冯可芹,魏仕烽,等. 钎料对 YG8 合金与低碳钢焊接

性能的影响[J]. 硬质合金, 2011, 28(5): 305-311.

- [7] 田乃良, 郑启光. 硬质合金与钢的激光焊接机理研究[J]. 中国激光, 1996, 32(4): 381-384.
- [8] 葛廷刚, 刘文今, 张旭东, 等. YG18 硬质合金激光焊接性研究[J]. 应用激光, 2000, 20(4): 152-154.
- [9] 王立跃, 徐道荣. 硬质合金的焊接特点、焊接方法与研发进展[J]. 现代焊接, 2010, 96(12): 17-20.
- [10] Barbatti C, Garcia J, Liedl G. Joining of cemented carbides to steel by laser beam welding [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2007, 38(11): 907-914.

- [11] 赵秀娟, 杨德新, 田头孝介, 等. YG30 硬质合金与 45 钢 TIG 焊接接头组织中 η 相[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 35-38.
- [12] 李炎, 高建平, 魏世忠, 等. TiC 硬质合金 / 碳钢爆炸焊接复合板界面微观组织[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 85-88.
- [13] 翟秋亚, 徐锦锋, 蔡再生. 细直径 YG5FA 硬质合金 / 45Cr 钢储能焊工艺分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 13-16.
- [14] Okita K, Aritoshi M, Kuwabara K, et al. Friction welding of cemented carbide alloy to tool steel[J]. Welding International, 1997, 11 (4): 257-263. 

(上接第 141 页)



(a) 模具图 (b) 模具

1- 下模座; 2- 螺钉; 3- 凹模垫板; 4- 凹模; 5- 导柱、导套; 6- 上模座; 7- 螺钉; 8- 螺钉; 9- 模柄; 10- 凸模垫板; 11- 凸模固定板; 12- 凸模

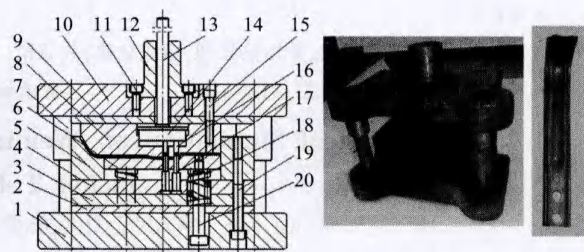
图 8 弯曲压筋复合模

Fig.8 Bending and swaging compound dies

凸凹模模孔内不积存废料, 胀力小, 不易破裂。可以看出, 正装式复合模工作时, 板料是在压紧的状态下分离, 因此冲出的零件平直度较高。压弯、冲孔复合模模具结构及制件如图 9 所示。

4 结论

本文对自力型触指进行工艺分析及有限元数值模拟, 重点模拟分析了零件在弯曲压筋成形工序中坯料的应力应变特点, 上下模与坯料的接触情况, 为改进模具结构, 提高制件精度和提高模具寿命提供依据; 设计了两套成形模具, 最终成形出合格制件。



(a) 模具图 (b) 模具 (c) 制件

1- 下模座; 2- 下垫板; 3- 凹模垫板; 4- 冲孔凸模固定板; 5- 弯曲凹模; 6- 凹模板; 7- 导柱、导套; 8- 凸模; 9- 上垫板; 10- 上模座; 11- 螺钉; 12- 模柄; 13- 打料杆; 14- 顶件块; 15- 螺钉; 16- 卸料杆; 17- 冲孔凸模; 18- 弹簧; 19- 螺钉; 20- 螺钉

图 9 弯曲冲孔复合模及制件

Fig.9 Bending and punching compound dies and the part

参考文献:

- [1] 中国电器工业协会高压开关分会. 我国高压开关行业发展综述[J]. 电器工业, 2009, (2): 6-11.
- [2] 苑舜, 崔文军. 高压隔离开关设计与制造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 1-14.
- [3] 林莘, 何柏娜, 徐建源. 自力型触头的设计与计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 828-830.
- [4] 张莉, 宋克兴, 张彦敏, 等. 热变形时效工艺对 Cu-0.92Cr 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(11): 1074-1076.
- [5] 刘卫锋. 高压隔离开关自力型触指结构优化设计及其成形技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011: 52-53. 

(上接第 143 页)要求, 且试样孔锥度均 ≤ 0.12 , 试样孔圆度也均 $\leq 1.2\text{mm}$, 符合 GB/T2694-2010 标准的要求。

(2) 在试样孔内表面质量检测方面, 对孔的光亮带、撕裂带的微观形貌进行了 SEM 观察, 结果显示, 在光亮带显示的是剪切、挤压塑性变形痕迹; 在撕裂带显示的是拉伸断裂的痕迹, 均不同程度出现了浅而小的韧窝, 尺寸几微米。

(3) 磁粉探伤结果显示, 被测试样孔内壁未发现缺陷痕迹。

参考文献:

- [1] 秦永坚, 王登科, 唐其练, 等. 500 kV 双回路输电线路铁塔采用 Q420 高强钢的研究[J]. 电力勘测设计, 2007, (7): 60-65.
- [2] 韩钰, 徐德录, 杨建平, 等. Q420 高强钢在特高压输电工程中的应用研究[J]. 电力建设, 2009, 30(4): 33-35.
- [3] 常建伟, 徐德录, 张磊, 等. 输电铁塔用钢及焊接技术[J]. 热加工工艺, 2011, 40(15): 148-151.
- [4] 姜国权. 红冲工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 李西成. 中厚板冲裁问题研究[J]. 陕西工学院学报, 2001, 17 (2): 73-74. 