文章编号:1674-2974(2017)12-0034-06

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.12.006

硬质合金 YG8 与 D6A 异种金属 CO₂激光 焊接接头组织和性能的研究^{*}

陈刚1节,黄宇1,周明哲2,贾寓真2,郭喜如2

(1. 湖南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 湖南泰嘉新材料科技股份有限公司,湖南 长沙 410200)

摘 要:利用 CO₂激光器对双金属带锯条齿部用硬质合金 YG8 及背部用超高强度钢 D6A 进行焊接,通过金相显微镜,扫描电镜(SEM),显微硬度仪,电子显微探针(EPMA)等 手段研究了焊后硬质合金 YG8 与超高强度钢 D6A 焊接接头组织演变规律,焊接接头合金 元素分布,以及不同焊接工艺对异种金属焊接接头组织及力学性能的影响.研究表明,随着 焊接速度增大,焊缝中心区等轴晶增多,树枝晶减少,且靠近 YG8 侧熔合区的等轴晶更细小;各种工艺条件下焊接接头硬度均较母材高,且靠近 YG8 侧的熔合区的硬度要高于焊缝 区的硬度.当焊接功率为 3 960 W,焊接速度为 9 m/min 时,焊接接头的性能优良,抗弯强度 值达到 349 MPa,达到双金属带锯条的焊接性能要求.

关键词:硬质合金; 异种金属焊接; 显微组织; 力学性能 中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A

Study of the Microstructure and Properties of YG8/D6A Dissimilar Metal CO₂ Laser Welding Joints

CHEN Gang^{1†}, HUANG Yu¹, ZHOU Mingzhe², JIA Yuzhen², GUO Xiru²

(1.College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;2.Bichamp Cutting Technology(Hunan) Co Ltd, Changsha 410200, China)

Abstract: Cemented carbide wires YG8 and ultrahigh-strength steel strips D6A were welded on the band saw blade by using CO₂ laser. The typical microstructure of welding joints, the distribution of element, and influence of different bonding technologies on welding joints microstructure and mechanical properties were studied by using metalloscope, electron microscope(SEM), microhardness meter and electron(EPMA). The results showed that isometric increased, dendrite decreased in the weld center and isometric near the side of YG8 fusion boundary area became more fine with the increase of welding speed. The hardness of the welding joints every bonding technology was higher than parent metal. Moreover, the hardness of the bond area near the side of YG8 was higher than the welded zones. When the welding power was 3 960 W and the welding speed was 9 m/min, the property of the wedded joints was good, and the value of bending strength reached 349 MPa, which reached the requirements of double metal band saw blade welding.

Key words: cemented carbide; dissimilar metal welding; microstructure; mechanical properties

* **收稿日期:**2016-02-27

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ2025), Natrural Science Foundation of Hunan Province (2016JJ2025)

作者简介:陈刚(1965—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士

[†]通讯联系人,E-mail:chengang@hnu.edu.cn

硬质合金是由硬质相镶嵌在粘结相中构成的 一种多相材料,由于其具有高硬度、高耐磨性等优 异的性能被广泛应用于耐磨工具、切削工具、矿石 开采等领域[1-3].硬质合金与高强度钢的连接可以 解决其价格昂贵、脆性大等缺点,通过将硬质合金 和超高强度钢的焊接可以实现锯齿部高硬度、耐磨 及背部高强韧性的理想结合[4].由于硬质合金中含 大量的高熔点 W 元素,焊接性差,同时,与超高强度 高的理化性质(如线膨胀系数等)相差较大,因此, 采用传统的焊接工艺难以实现两者的理想焊 接[5-6].激光焊接具有功率密度高、光斑直径小、能 量集中、速度高、焊缝热影响区小和热变形小等优 点^[7-10].因此,对含有高熔点合金元素的异种金属焊 接具有优异性,是硬质合金和超高合金钢的理想焊 接方式.曹晓莲等^[11]研究了 YG20/45 钢激光焊焊 缝组织及界面元素扩散行为,结果表明焊接热输入 越高,焊缝界面的组织晶粒粗化,裂纹倾向明显增 加.同时,硬质合金中的W,Co与钢中Fe发生相互 扩散,接头冶金结合强度良好;Yu 等^[12]采用 Ni-Fe 因瓦合金作为过程层对 W-20Co 与碳钢的光纤激光 焊进行了研究,探索了激光焊接速度对焊接组织的 影响;赵秀娟等^[13]采用电子束对接焊探讨了 YG30 与 45 钢之间的焊接行为. 而关于低 Co 含量硬质合 金的激光焊接行为相关研究鲜有报道.本文采用 CO₂激光器焊接,研究了不同焊接工艺参数对硬质 合金 YG8 和超高强度钢 D6A 焊接接头组织及性能 的影响,为实际应用提供指导.

1 实验材料及方法

本实验原材料采用双金属带锯用硬质合金钢 丝(齿部)YG8及超高强度钢(背材)D6A,其成分见 表1和表 2.尺寸分别为 1.4 mm(宽)×1.1 mm (厚),宽 34.0 mm(宽)×1.1 mm(厚).

- 表1 硬质合金 YG8 化学成分(质量分数)
- Tab.1Chemical composition of YG8 cemented

	carbide (ma	ss fraction)	%
Elenment	W	С	Со
Component	86.36	5.64	8.00

表 2 超高强度钢 D6A 化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical composition of strength steel D6A

(mass fraction)				%					
Elenment	С	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Si	S	Р
Comment	0.45~	0.60~	0.90~	0.08~	0.90~	$0.50 \sim$	$0.1 \sim$	0.005	0.015
Component	0.50	0.90	1.10	0.15	1.10	0.70	0.25	Max	Max

焊前对上述母材表面进行丙酮超声波清洗,实验采用 TruLaser 1100型 CO2激光器,其最大输出功率为4000W,光束模式为 TEM00模,焦距250 mm,焊接时采用 Ar 气作为保护气体.实验参数如表3所示,其中焊接速度为被焊材料相对激光束移动的速度.

表 3 不同 CO₂激光焊接工艺参数 Tab.3 The parameters of different CO₂ laser welding

Sample Number	激光功率 P/W	焊接速度 v/(m・min ^{−1})
1#	3 960	8
2#	3 960	9
3#	3 960	10
4 #	3 870	10
5#	4 050	10

采用金相显微镜(OM, NEOPHOT32)和扫描 电镜(SEM, FEI QUANTA 200 型)对焊接接头组 织进行观察,利用显微硬度计(HV, MHV-2000)以 焊缝中心为对称轴,每隔 0.05 mm 进行检测(载荷 力为 9.8 N,保荷时间为 15 s),对焊缝进行硬度检 测.采用电子探针(EPMA)对焊缝附近区域进行元 素分布分析,焊缝强度采用泰嘉新材料科技股份有 限公司专用抗剪试验机测试,即将焊接好的试样加 工成 3.0 mm×1.1 mm×50 mm 的长条,长条背材 部分固定在夹具上,仅露出焊接的齿部,采用顶杆 将齿部沿焊缝横向顶断,测量出该顶断力除以试样 焊缝面面积转换成强度指标.

2 实验结果

2.1 焊接接头显微组织分析

2.1.1 焊接接头显微组织

图 1 是当功率为 3 960 W,焊接速度为 9 m/ min 时,YG8/D6A 异种金属焊接接头各部分金相 照片.由图 1 可知,焊接接头由焊缝中心区(FZ)、齿 材 YG8 侧热影响区(HAZ)、背材 D6A 侧热影响区 (HAZ)构成,在焊缝区与热影响区之间的过渡区为 YG8 侧熔合区(PMZ)和 D6A 侧熔合区(PMZ).

焊缝中心区组织.在焊缝中心区为等轴晶,晶粒 细小.从焊缝中心区(FZ)到 D6A 侧熔合区(PMA), 组织依次呈现为等轴晶、树枝晶和胞状晶,其生长 方向垂直于焊缝中心线方向,具有典型定向凝固组 织.从焊缝中心区(FZ)到 YG8 侧熔合区(PMA),组 织依次呈现为等轴晶、混合树枝晶和胞状晶.

焊缝熔合区显微组织.在熔池凝固过程中,界面 附近位置的结晶速度非常小,温度梯度较大;随着 凝固界面远离熔合区边界向焊缝中心推进时,结晶 速度增大,温度梯度减小,在某一时刻将发生成分 过冷,出现较为粗大的胞状树枝晶.硬质合金熔合区 侧也会有少量的胞状树枝晶出现,但大部分是以胞 状枝晶的形式存在.



图 1 YG8/D6A 焊接接头 800 倍金相照片 Fig.1 Weld joints metallograph of YG8/D6A

2.1.2 焊接接头处元素分布

采用能谱仪(EDAX)对2 # (焊接功率3960 W,速度9 m/min)试样线扫描进行成分分析,焊后 背材 D6A-焊缝处和焊后齿材 YG8-焊缝处线扫描 结果分别见图2 和图3.共检测了C,Mo,Cr,Mn, Fe,Co,W7种元素的变化,由图中曲线可以看出, 在焊缝界面附近 C, Mo, Cr, Mn 没有明显变化, 因此, 将重点分析 Fe, Co, W的变化规律. 由图可知, 一定量的 Fe 扩散到硬质合金侧并分布于 WC 周围充当粘结相的作用, 同时在靠近界面的焊缝位置有W, Co 出现.



图 2 D6A 与焊缝界面 EDS 线扫描结果 Fig.2 The EDS line-scanning result of the interface of D6A and weld seam





由图 2 可以看出, D6A-焊缝各处元素分布较为 均匀, 变化不明显. 由图 3 可见在焊缝处, Fe, Co, W 元素分布呈明显的分界现象. 从焊缝-YG8, Fe 元素 含量急剧下降, W, Co 元素含量明显升高. 硬质合金 YG8 中的 W, Co 在焊接热输入的条件下部分熔化 并进入焊缝位置, 且由于 Co 的熔点较 W 低, 所以 在焊缝处 Co 含量略高于 W, 且 Co 的含量和进入硬 质合金 YG8 处的铁含量相似, 因而流失的 Co 量可 以由扩散进入的 Fe 来充当以保证接头的性能.

2.2 激光功率和焊接速度对焊接接头组织的影响

图 4 为激光焊接功率 P=3 960 W 时,不同焊 接速度焊后接头的 SEM 图.由图 4 可知,随着焊接 速度的增大,D6A 侧的胞状树枝晶具有明显生长, 并且随着焊接速度的增加,柱状晶趋于垂直于焊缝 中心线.对于硬质合金侧,其热导率明显较钢的小, 熔池具有较钢侧大的温度梯度,进而出现较低的成 分过冷度,不利于树枝晶的生长,因为在相同条件 下,硬质合金侧的树枝晶较钢侧的细小,并且生长 方向性并不明显,甚至没有树枝晶出现.由图 4 可 知,树枝晶并不是随着焊接速度的增加而单调变 化,而是在多种因素影响下形成的.

图 5 为焊接速度 v=11 m/min 时不同焊接功率的焊接接头的 SEM 图.由图 5 可知,随着激光焊接功率的增加,焊缝中心区树枝晶数量减少,等轴晶增加,焊缝和母材熔合边界柱状晶范围变宽.



(a) 工艺1[#](a₁为焊接接头D6A一侧, a₂为焊缝中心(FZ), c₃为接头YG8一侧)



(b) 工艺2[#](b₁为焊接接头D6A一侧,b₂为焊缝中心(FZ),b₃为接头YG8一侧)



(c) 工艺3[#](c₁为焊接接头D6A一侧, c₂为焊缝中心(FZ), c₃为接头YG8一侧)

图 4 P=3 960 W 时不同焊接速度下焊接接头 SEM 照片 Fig.4 The SEM of welded joint with different welding speed/P=3 960 W

2.3 焊接接头显微组织形成机理

在激光焊接的过程中,激光束和焊接材料作用 时间非常短,焊接结束时,焊缝处金属迅速冷却,然 后快速凝固.在焊缝两侧,熔合区边缘金属温度梯度 较大,结晶速度较熔池中心低,随着凝固界面向焊 缝中心区域推进时,温度梯度逐渐减小,结晶速度



图 5 v=11 m/min 不同焊接功率时焊接接头 SEM 照片 Fig.5 The SEM of welded joint with different welding power/v=11 m/min

与熔池的成分讨冷度均增大,焊缝中心区域具有最 大的成分过冷度,熔池中未融化的悬浮质点为非自 发形核的现成凝固表面,可以自由生长,促进焊缝 形成等轴晶.整个焊缝区域由熔池边缘到焊缝中心 线,晶体的生长规律为:由无成分过冷时的平面晶 依次到胞状晶、树枝晶并最终在焊缝中心位置附近 形成等轴晶.钢侧组织具有明显的胞状树枝晶生长 行为,且随着焊接速度的增大,柱状晶越趋于与焊 缝中心线垂直.如图 4(c)所示,由于 YG8 硬质合金 的热导率明显小于钢材,与钢侧相比较硬质合金侧 的熔池附近拥有更大的温度梯度,从而出现较低的 成分过冷度,不利于树枝晶的生长,因而在同等条 件下,硬质合金侧的树枝晶比钢侧的更为细小,并 且不具备明显的生长方向性,树枝晶生长形态不明 显.由图 4(a) 到图 4(c) 所示可知, 靠近硬质合金侧 的焊缝组织由 a3 的少量树枝晶转变为 b3 的较多树 枝晶,最后树枝晶在 c3 中消失,树枝晶并不是随着 焊接速度的增加而单调的变化,而是在多种因素共 同影响下形成的[14].可能的解释是,基于硬质合金 与钢焊接的浸润机理[15],率先熔化的钢材会逐渐浸 润高熔点的硬质合金,硬质合金中 Co 的熔化将导 致 WC 粒子的分布变得稀疏,从而促进了热量的传 导.一般而言,热输入越大,硬质合金侧的温度梯度 越小,越利于树枝晶的生长[13].若不考虑硬质合金 中 WC 粒子稀疏的影响,则热输入越大,温度梯度 越大,越不利于形成树枝晶.这二者的相互影响最终 导致了此现象的产生.焊接温度场对焊缝区域的微 观组织形貌的影响至关重要.此外,热源、焊接工艺、 焊接间隙、被焊金属的物理性质以及焊接母材的装 夹状态等因素均对焊缝的微观组织结构具有一定 的影响^[16-19].

2.4 激光焊接接头力学性能

2.4.1 焊接接头的显微硬度分析

当焊接功率为 P=3 960 W时,随着焊接速度

的变化,接头显微硬度变化曲线如图 6 所示.当焊接 速度为 9 m/min 时,随着焊接功率的变化,焊接接 头显微硬度变化曲线如图 7 所示.

由图 6 和图 7 可知,靠近硬质合金 YG8 侧焊缝 硬度要高于靠近背材超高强度钢 D6A 侧,焊缝和热 影响区硬度均较母材高,且在靠近硬质合金 YG8 侧 的熔合区的硬度比焊缝中心区硬度要高.从齿材 YG8 焊缝到背材 D6A,硬度逐渐降低.对比图 6 和 图 7,本实验条件下,激光功率和焊接速度对接头各 区域的显微硬度的影响不大.



2.4.2 焊接接头的抗弯强度分析

表4为不同激光焊接工艺参数焊接接头抗弯强 度.所测试样抗弯断裂均发生在靠近硬质合金 D6A 侧的熔合线附近,当焊接功率为3960 W,焊接速度为 9 m/min 时,焊接接头强度最高,抗弯强度值为 349 MPa,达到了双金属带锯条的焊接性能要求^[20].

表 4 不同焊接工艺参数焊接接头抗弯强度

ngth	h
	ıgt

序号	抗弯强度/MPa
1#	113
2 #	349
3 #	145
4 #	135
5 #	146

3 结 论

1)硬质合金 YG8 中的 W, Co 与超高强度钢 D6A 中的 Fe 互相扩散, D6A 中的 Fe 通过扩散进入 硬质合金 YG8 充当粘结相, 弥补了 Co 元素的流 失, 从而使整个接头达到了很好的冶金结合.

2)从 D6A 侧到焊缝中心位置,晶体的生长变化 为胞状晶→树枝晶→等轴晶的变化过程,且生长方 向性较强,同时随着焊接速度的增加,树枝晶逐渐 以垂直于焊缝中心线的方式生长,且变得细小;由 YG8 侧到焊缝中心位置,生长变化为混合的树枝晶 与胞状晶甚至只有胞状晶→中心等轴晶,具有不明 显的生长方向.

3)当焊接功率为3960W,焊接速度为9m/min时,焊接接头性能优良,抗弯强度值为349MPa.

参考文献

- [1] YANG X F, WU S J, KANG Y, et al. Pitting mechanism of cemented carbide tool in the early stage of rock drilling[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014,42,103-107.
- [2] LIANG B L, AI Y L, LIU C H, et al. Mechanical properties of WC-Co cemented carbide prepared via vacuum sintering [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275:1917-1920.
- [3] CALISKAN H, KURBANOGLU C, PANJAN P, et al. Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling[J]. Tribology International, 2013, 62:215-222.
- [4] 马绍宏, 贺军, 薛春阳, 等. 硬质合金与钢的高性能钎焊接头制 备技术[J]. 硬质合金, 2016, 33(3): 205-210.
 MA Shaohong, HE Jun, XUE Chunyang, *et al.* Preparation technology of high performance brazing joint of cemented carbide and steel[J]. Cemented Carbide, 2016, 33(3): 205-210. (In Chinese)
- [5] ZHAO X J, LIU P T, CHEN C H, et al. η phase formation mechanism at cemented carbide YG30/steel 1045 joints during tungsten-inert-gas arc welding [J]. Materials Science Forum, 2011,675:901-904.
- [6] GUO Y J, WANG Y Q, GAO B X, et al. Rapid diffusion bonding of WC-Co cemented carbide to 40Cr steel with Ni in-

terlayer: Effect of surface roughness and interlayer thickness [J].Ceramics International, 2016, 42(15):16729-16737.

- [7] SIBILLANO T, RIZZI D, ANCONA A, et al. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO₂ Nd: YAG and fiber laser welding processes [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2012, 212(4):910-916.
- [8] ZOU J L, WU S K, XIAO R S, et al. Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO₂ laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8):1-5.
- [9] 裴莹蕾,单国际,任家烈.焊接速度对高速激光焊熔池流动行为 的影响[J].中国激光,2013,40(5):56-61. PEI Yinglei,SHAN Guoji,REN Jialie.Effect of welding speed on melt flow behavior in high speed laser welding process[J]. Chinese Journal of Lasers,2013,40(5):56-61.(In Chinese)
- [10] 刘必利,谢颂京,姚建华.激光焊接技术应用及其发展趋势[J].
 激光与光电子学进展,2005,42(9):43-47.
 LIU Bili,XIE Songjing,YAO Jianhua. Application and development trend of laser welding[J]. Laser & Optronics Process, 2005,42(9):43-47. (In Chinese)
- [11] 曹晓莲,许培全,曹卓玥,等.YG20/45 ♯钢激光焊焊缝组织和 界面元素扩散研究[J].中国激光,2015,42(3):1-6. CAO Xiaolian,XU Peiquan,CAO Zhuoyue, et al. Research on microstructure and element diffusion in YG20/45 ♯ steel laser welds[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3):1-6. (In Chinese)
- [12] YU X Y, ZHOU D R, YAN D J, et al. Fiber laser welding of WC-Co to carbon steel using Fe-Ni Invar as interlayer[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 56, 76-86.
- [13] 赵秀娟,杨德新,王浩,等.硬质合金与碳钢电子束对接焊接接 头的显微组织[J].机械工程材料,2005,29(5):21-26.
 ZHAO Xiujuan,YANG Dexin,WANG Hao, et al. Microstructure of electron beam weld joints between cemented carbide yg30 and carbon steel [J]. Materials for Mechanical Engineering,2005,29(5):21-26.(In Chinese)
- [14] 陈洁,占小红,陈纪城,等.Invar 合金激光-MIG 复合多层焊接 焊缝形貌及显微组织[J].中国有色金属学报,2016,26(5): 1010-1018.
 CHEN Jie, ZHAN Xiaohong, CHEN Jicheng, *et al.* Weld appearance and microstructure of Invar alloys hybrid multi-layer welded joints using laser-MIG[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2016,26(5):1010-1018. (In Chinese)
- [15] 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,1996,23(4):381-384.
 TIAN Nailiang, ZHENG Qiguang. On mechanism of laser welding of cemented carbide and steel[J]. Chinese Journal of Lasers,1996,23(4):381-384. (In Chinese)
- [16] 陈鼎,胡山,陈振华,等.低周冲击加载评价硬质合金韧性的研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(2):102-107. CHEN Din, HU Shan, CHEN Zhenhua, et al. Study of cemented carbides toughness evaluation by low cycle impact loading[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014,41(2):102-107. (In Chinese)
- [17] WANG X N, SUN Q, ZHENG Z, et al. Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017,699(24):18-25.
- [18] KANO S, OBA A, YANG H L, et al. Microstructure and mechanical property in heat affected zone (HAZ) in F82H jointed with SUS316L by fiber laser welding[J].Nuclear Materials and Energy, 2016(9):300-305.
- [19] GUO W, LI L, DONG S Y, et al. Comparison of microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser and gasmetal-arc welded S960 high strength steel [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 91:1–15.
- [20] 陈刚,杨全毅,周明哲,等.M42/X32 异种金属 CO₂激光焊接接 头组织和性能的研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2013,40 (11):89-95. CHEN Gang, YANG Quanyi, ZHOU Mingzhe, *et al.* Study of

CHEN Gang, YANG Quanyi, ZHOU Mingzhe, *et al.* Study of the microstructure and properties of M42/X32 dissimilar metal CO₂ laser welding joints[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(11):89–95. (In Chinese)