

引用格式:吴书菲,魏炜,马贺祥,等.TiC 钢结硬质合金与堆焊过渡层的界面组织及性能研究[J].热加工工艺,2024,53(11):37-41+48.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222137
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

TiC 钢结硬质合金与堆焊过渡层的界面组织及性能研究

吴书菲¹, 魏炜², 马贺祥¹, 陈永¹, 刘胜新¹, 黄智泉²

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:采用 ERNiCrMo-3 焊丝在 TiC 钢结硬质合金上堆焊过渡层,使用扫描电子显微镜、能谱仪、显微硬度计、万能试验机对不同热输入下 TiC 钢结硬质合金/ERNiCrMo-3 熔敷金属界面的组织性能进行研究。结果表明:TiC 钢结硬质合金和 ERNiCrMo-3 熔敷金属之间存在厚度为 60~150 μm 的熔合区。随着焊接热输入的增加,熔合区的厚度逐渐增加;当热输入为 3.5 kJ/cm 时,界面处组织分布均匀,无气孔、裂纹以及晶粒异常长大现象。母材和堆焊金属之间存在元素扩散现象,二者实现了冶金结合;母材和堆焊焊缝之间存在一个硬度逐渐变化的缓冲区域;TiC 钢结硬质合金/ERNiCrMo-3 堆焊金属界面剪切强度最高可达到 443 MPa,满足恶劣工况下对耐磨件与基体结合性能的要求。

关键词:TiC 钢结硬质合金;堆焊过渡层;界面

中图分类号:TG444*.77;TG455

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2024)11-0037-05

Study on Microstructure and Performance of Interface between TiC Steel Bonded Carbide and Surfacing Transition Layer

WU Shufei¹, WEI Wei², MA Hexiang¹, CHEN Yong¹, LIU Shengxin¹, HUANG Zhiquan²

(1. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The transition layer was deposited on TiC steel-bonded cemented carbide by using ERNiCrMo-3 welding wire. The microstructures and properties of interface between TiC steel bonded cemented carbide and ERNiCrMo-3 surfacing layer under different heat inputs were studied by using scanning electron microscopy, EDS spectrometer, microhardness tester and universal testing machine. The results show that there is a fusion zone with a thickness of 60-150 μm between TiC steel-bonded cemented carbide and ERNiCrMo-3 surfacing metal. With the increase of welding heat input, the thickness of the fusion zone gradually increases. When the heat input is 3.5 kJ/cm, the microstructure of the interface is uniform, without pores, cracks and abnormal grain growth phenomenon. There is element diffusion between the base metal and the surfacing weld, and the metallurgical bonding is realized. There is a buffer zone with gradually varying hardness change between the base metal and the surfacing weld. The highest shear strength of TiC steel bonded cemented carbide / ERNiCrMo-3 interface can reach 443 MPa, which meets the bonding performance requirement between wear-resistant parts and matrix under harsh conditions.

Key words: TiC steel bonded carbide; surfacing transition layer; interface

随着工业水平的快速发展,装备对耐磨零部件在极端服役条件下的性能要求日渐提高,单一的金属材料已经不能满足复杂工况下的耐磨需求,复合材料应运而生^[1]。硬质合金是将难熔金属的硬质化

合物和粘结金属通过粉末冶金的方法烧结制成的一种复合材料,由于其高硬度、高耐磨性被应用于耐磨零件的制造和生产中。但由于硬质合金差的加工性和可焊性,其与钢基体连接时大多采用镶铸、胶粘和钎焊等方法进行,界面未能完全实现冶金结合,导致在后续生产使用过程中极易脱落,极大地限制了硬质合金的应用。钢结硬质合金是在硬质合金的基础上发展起来的新型硬质合金,兼具硬质合金和钢的优点,具有优良的可加工性和可焊性,引起了国内外研究者的广泛关注^[2]。

收稿日期:2022-08-01

基金项目:河南省科技攻关专项项目(222102230038)

作者简介:吴书菲(1998-),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为先进金属材料及加工新技术;E-mail:wusf98823@163.com

通讯作者:陈永(1967-),男,河北辛集人,高级实验师,硕士,主要研究方向为焊接工艺;E-mail:13523499166@163.com

ZDZC60TiC 钢结硬质合金是一种以高锰钢为粘结相,以 TiC 为硬质相的复合材料。它具有高硬度、高耐磨性、高红硬性,同时还具备可加工、可热处理性能等,被广泛应用于矿山、冶金、能源等领域的耐磨部件上。但 TiC 钢结硬质合金往往制品较小、成本较高,在实际的生产应用中需要将其与钢基体连接起来使用。常用的连接方法有镶嵌法、铸造法、焊接法等,其中焊接法由于其界面结合强度较高而受到了广泛的关注。由于 TiC 钢结硬质合金韧性较差,直接与钢基体进行焊接时,由于二者物理、化学性能相差较大,焊接过程中会在焊缝中形成较大的应力,在残余应力作用下形成裂纹,使焊接接头的性能下降。因此,需要在 TiC 钢结硬质合金上堆焊过渡层,以降低焊接热输入对钢结硬质合金的影响^[3]。

目前针对 TiC 钢结硬质合金电弧熔焊的研究较少,对 TiC 钢结硬质合金熔焊界面组织和性能少有报道。因此本文选择 ERNiCrMo-3 焊丝作为堆焊材料,着重研究了堆焊界面的显微组织及力学性能,旨在为 TiC 钢结硬质合金与钢的焊接提供一定的

理论指导。

1 试验材料与方法

试验母材选用郑州机械研究所有限公司自主研发的牌号为 ZDZC60 的 TiC 钢结硬质合金,尺寸为 50mm×25mm×10mm。硬质合金组织主要由高锰钢基体和 TiC 硬质相组成,如图 1 所示。焊丝为直径 1.6mm 的国产 ERNiCrMo-3 焊丝。母材及焊丝的化学成分见表 1。

试验设备为奥太焊机。对 TiC 钢结硬质合金进

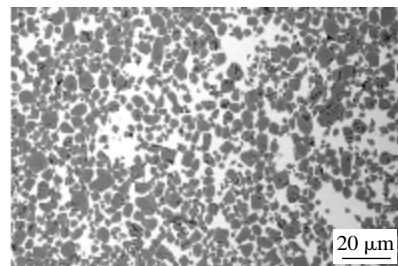


图 1 ZDZC60 钢结硬质合金显微组织
Fig.1 Microstructure of ZDZC60 steel bonded cemented carbide

表 1 母材和 ERNiCrMo-3 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of the base metal and ERNiCrMo-3 welding wire (wt%)

材料	C	Si	Mn	Ni	Mo	Al	Ti	Cu	Fe	Co	Nb	Cr
ZDZC60	0.7~1.2	-	5.5~9.8	1.6~2.8	1.2~1.9	-	35~48	-	余量	-	-	-
焊丝	0.018	0.14	0.02	64.2	8.84	0.13	0.17	0.013	0.27	0.02	3.88	22.53

行三层两道堆焊,焊接保护气体选用 80%Ar+20%CO₂,保护气体流量为 18L/min。焊接工艺参数为焊接电流 270A,焊接电压 27V,焊接速度分别取 0.44、0.63、0.80、1.44 cm/s。焊接热输入 Q 根据 $Q=\eta UI/\lambda$ 计算,其中 η 为电弧的功率系数,取 0.70; U 为电弧电压; I 为焊接电流; λ 为焊接速度,经计算焊接速度 0.44、0.63、0.80、1.44 cm/s 对应的热输入分别为 11.6、8.1、6.4、3.5kJ/cm。

焊前用手持砂轮机对母材 TiC 钢结硬质合金待焊面锈层及氧化皮进行去除和抛光,然后用酒精和丙酮的混合溶液清洗待焊面并烘干,最后在不同的热输入下进行堆焊。焊后试块在空气中冷却至室温。在试块的母材与堆焊层结合部位截取尺寸为 10mm×10mm×15mm 的金相试样,经磨抛后利用王水溶液(硝酸:盐酸=1:3)腐蚀 15~20s,在 Phenom XL G2 型台式扫描电子显微镜上进行组织观察。使用 HXD-1000TMC100D 显微硬度计对 TiC 钢结硬质合金/堆焊层界面区域进行显微硬度测试。利用万

能试验机对界面区进行剪切强度测试,剪切试样尺寸为 $\phi 10\text{mm}\times 20\text{mm}$,剪切试验如图 2 所示,并使用体视显微镜、Phenom XL G2 型台式扫描电子显微镜观察断口形貌。

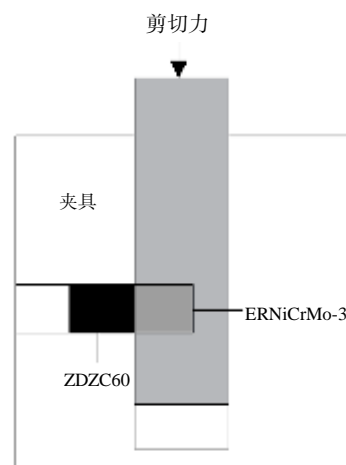


图 2 剪切试验示意图
Fig.2 Schematic of shear test

2 试验结果与讨论

2.1 界面显微组织分析

图3为不同热输入下ERNiCrMo-3/TiC钢结硬质合金界面区域显微组织的SEM照片。由图3可知,TiC钢结硬质合金和ERNiCrMo-3堆焊层之间出现了明显的熔合区,宽度为60~150 μm 。在界面熔合区内以及堆焊层侧未发现气孔、显微裂纹等缺陷。从显微组织来看,TiC钢结硬质合金和ERNiCrMo-3之间形成了冶金结合。熔合区的TiC颗粒分布比较弥散,无明显的聚集现象,主要是因为焊接过程中,钢结硬质合金和ERNiCrMo-3在高温热源的作用下发生了剧烈的扩散。同时在熔合区内可以看到有部分TiC晶粒发生溶解,四棱柱状的TiC晶粒尖角被熔化,呈椭圆状。

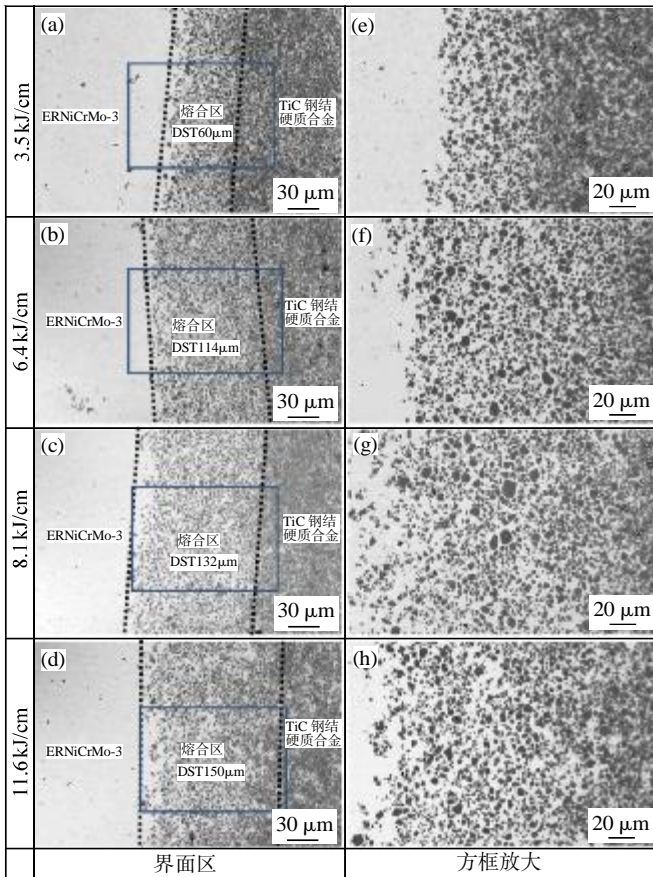


图3 不同热输入下TiC钢结硬质合金/ERNiCrMo-3界面区域的显微组织

Fig.3 Microstructure of interface region between TiC steel bonded cemented carbide and ERNiCrMo-3 under different heat inputs

由图3(a)和(e)可以看出,当热输入为3.5 kJ/cm时,界面处TiC颗粒大小均匀,分布均匀,无聚集、长大现象。随着焊接热输入的增加,界面处均

出现了TiC颗粒异常长大,如图3(f)、(g)、(h)所示。在焊接热循环过程中,随着热作用时间的延长,TiC晶粒发生ostwald熟化,即较小的粒子会逐渐变小直至萎缩,而较大的粒子则会越来越大^[4];其次,焊接过程中TiC晶粒发生溶解,使得熔融粘结相微区中的Ti、C原子固溶量增大,焊接热输入越大,原子扩散溶解能力越强,进入基体中的Ti、C原子的数量越多,Ti、C原子的过饱和度越高,在焊后冷却过程中过饱和的Ti、C原子就会在TiC晶粒表面外延生长而析出,形成细小的TiC颗粒。在上述综合作用下,出现了显微组织的分布不均匀现象。而且随焊接热输入的增加,原子扩散加剧,熔合区的宽度逐渐增加,显微组织分布不均匀性更加显著。当熔合区过厚时,会出现明显的分层现象^[5]。

综上所述,当热输入为3.5 kJ/cm时,母材和堆焊金属之间结合紧密,界面处TiC颗粒向堆焊焊缝中均匀扩散,无异常长大现象。随着焊接热输入的增加,熔合区内部分TiC晶粒发生异常长大,且熔合区内组织分布不均匀。

2.2 元素扩散分析

焊接过程中,在焊接热循环的作用下界面形成了一个Ti、C、Fe、Ni及其他元素相互扩散、固溶以及相互反应的复杂体系。根据热力学第一、第二定律,在母材与堆焊层结合过程中,母材中的元素向堆焊层扩散,而堆焊层中的合金元素也通过熔合区向母材中扩散,元素扩散的范围和多少在一定程度上决定了界面结合的好坏。图4为3.5 kJ/cm热输入下ERNiCrMo-3/TiC钢结硬质合金界面元素线扫描结果。由图4可知,从ERNiCrMo-3到钢结硬质合金,各元素呈现较为明显的逐渐过渡趋势,在熔合区内Ni、Cr等元素含量逐渐降低,C、Ti、Fe、Mn等元素含量逐渐升高,说明ERNiCrMo-3和TiC钢结硬质合金之间发生了元素扩散。随着焊接热输入的增加,熔合区的宽度逐渐增加,四种热输入下各元素的变化趋势基本一致。

由图4界面处元素变化曲线可知,Ti、C元素在ERNiCrMo-3中含量较少,在熔合区升高,随后出现反复上升-下降的趋势。Ni、Cr、Nb元素主要分布在ERNiCrMo-3中,但在界面区域可明显看到一定量的Ni、Cr、Nb元素,随后逐渐降低并趋于稳定。Fe元素主要存在于TiC钢结硬质合金中,而从元素变化曲线可以看出,在ERNiCrMo-3堆焊金属起始位置

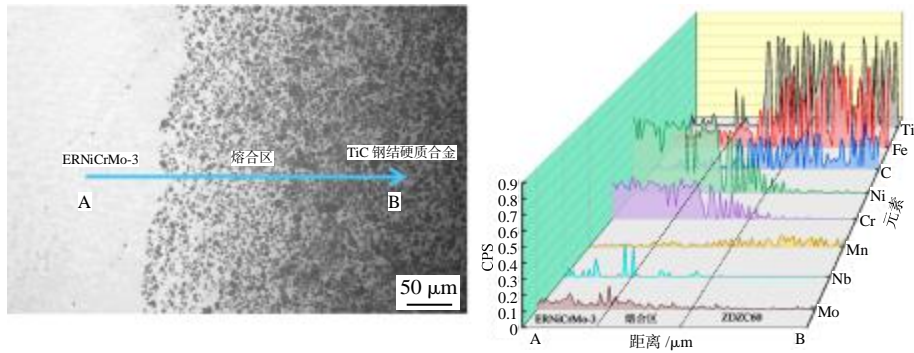


图4 3.5 kJ/cm 热输入下 ERNiCrMo-3/TiC 钢结硬质合金界面区域的元素分布
Fig.4 Element distribution of interface region between ERNiCrMo-3 and TiC steel bonded cemented carbide under heat input of 3.5 kJ/cm

也含有一定量的 Fe 元素,说明 Fe 元素通过熔合区向 ERNiCrMo-3 中扩散。在焊接过程中,母材中的 TiC 硬质相和钢粘结相的热膨胀系数相差大,在二者界面处容易形成较大的空隙。此时,被熔化的 ERNiCrMo-3 及时填补了留下的空隙,避免了界面中裂纹以及剥裂现象的产生^[6-7]。

上述现象表明,TiC 钢结硬质合金和 ERNiCrMo-3 之间发生了原子间的扩散。一般情况下界面结合分为突变型、扩散型和化合物型,从结合强度来看,突变型最差,化合物型界面最好。结合上述界面显微组织和元素扩散情况,推断在 TiC 钢结硬质合金和 ERNiCrMo-3 之间形成了扩散型界面。

2.3 显微硬度分析

图 5 为不同热输入下 ERNiCrMo-3/TiC 钢结硬质合金界面显微硬度分布曲线。从硬度测试结果来看,在不同热输入下界面区域的硬度分布规律基本相同,都是在低硬度的堆焊金属到高硬度的基体之间存在一个缓冲区域,该区域的宽度即熔合区的宽度,反映了母材对焊缝的稀释程度^[8]。因此,随着焊接热输入的增大,母材对堆焊金属的稀释程度增加。通过分析可知熔敷金属和基体之间的显微硬度存在较大差距,通过起缓冲作用的熔合区,显微硬度逐渐过渡到高硬度的基体。这说明,熔敷金属和基体之间实现了良好的冶金结合,不仅保持了基体原有的强度、硬度和耐磨性,同时韧性、冲击性能也会有所增强^[9]。

2.4 剪切强度分析

图 6 为 ERNiCrMo-3/TiC 钢结硬质合金界面的剪切强度。由图 6 可见,随着焊接热输入的增大,剪切强度整体呈现下降的趋势。当热输入为 3.5 kJ/cm 时,剪切强度可达到 466 MPa,而钎焊硬质合金的结

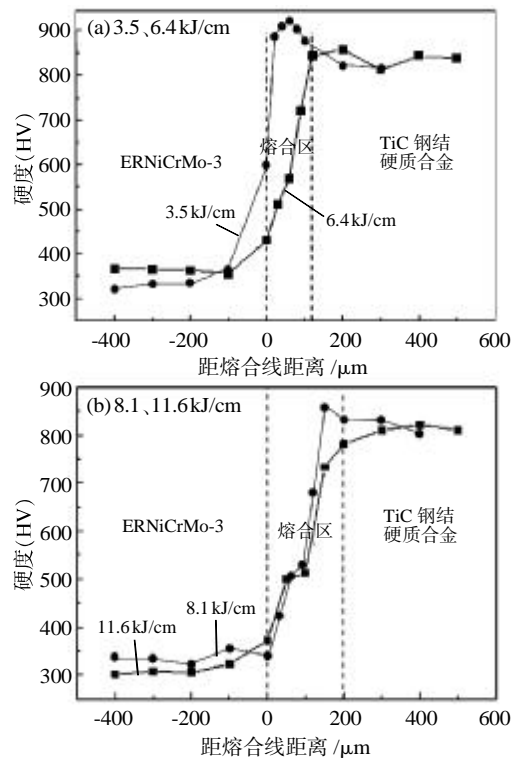


图 5 ERNiCrMo-3/TiC 钢结硬质合金界面的显微硬度分布
Fig.5 Microhardness distribution of ERNiCrMo-3/TiC steel bonded cemented carbide interface

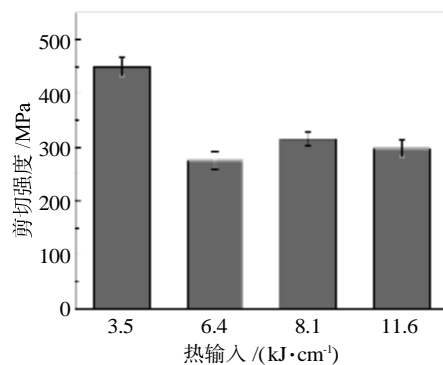


图 6 ERNiCrMo-3/TiC 钢结硬质合金界面的剪切强度
Fig.6 Shear strength of interface between ERNiCrMo-3 and TiC steel bonded cemented carbide

合强度一般在 150~200MPa 之间, 相对钎焊来说, 其强度提高了一倍左右, 满足恶劣工况下对钢结硬质合金与基体结合性能的要求。

图 7 为不同热输入下剪切试样的断口形貌。当热输入为 3.5kJ/cm 时, 从图 7(a)断口宏观形貌可明显看到纤维区和剪切唇, 断口较为平整, 断裂发生在与 TiC 钢结硬质合金相邻的熔合区处; 其微观形貌为典型的河流状花样, 上面存在大量 TiC 颗粒剥落留下的凹坑和少量韧窝; 同时还观察到一些孔隙的存在(图 7(b)), 其断裂方式属于解理断裂。韧窝主要分布于粘结相处, 少量孔隙的出现主要是由于 TiC 钢结硬质合金与 ERNiCrMo-3 线收缩率相差较大, 焊后冷却过程中收缩不均匀引起的^[10]。

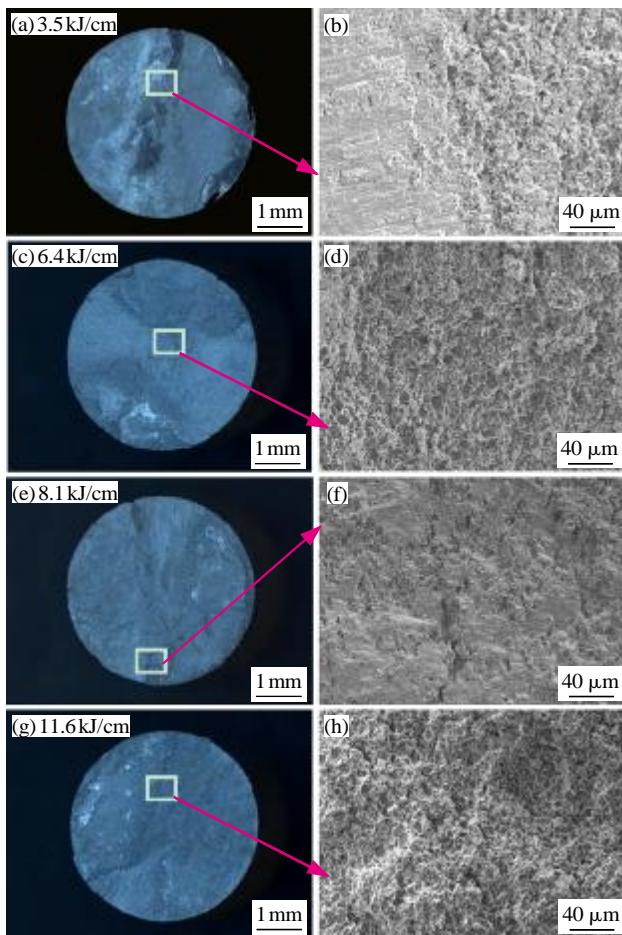


图 7 不同热输入下剪切试样的断口形貌
Fig.7 Fracture morphologies of shear specimens under different heat inputs

图 7(c)、(d)是热输入为 6.4kJ/cm 下剪切断口的宏观以及微观形貌。图 7(c)断口中剪切唇较为明显, 与剪切方向呈现 45°角。在高倍数下可观察到其断口较为平整, 伴随有少量韧窝的存在, 断裂发生在

TiC 钢结硬质合金侧, 其断裂形式为沿晶断裂。因此在该热输入下界面的剪切强度较低。

从图 7(e)可以看到, 当热输入为 8.1kJ/cm 时, 宏观断口表面较为平整, 未观察到明显的剪切唇以及纤维区等, 并且在断口下方可观察到裂纹的存在。对该区域在扫描电镜下进行观察, 如图 7(f)所示, 裂纹沿晶界进行扩展, 主要是由于晶界处原子结合较为薄弱^[11]。韧窝数量较图 7(d)的明显增多且在高倍数下可以观察到有一些孔隙的存在, 其原因与图 7(b)中存在孔隙的原因一致, 该断裂为沿晶和韧性复合形式断裂。

图 7(g)为热输入 11.6kJ/cm 时试样断口的宏观形貌, 断口表面较为平整、色泽光亮, 在断口上可以观察到人字形花纹。在扫描电镜下可以看到韧窝数量增多但大小、分布等不均匀, 并出现了较大的凹坑(图 7(h)), 其断裂形式为沿晶断裂并伴随有少量的穿晶断裂。

3 结论

(1) TiC 钢结硬质合金与 ERNiCrMo-3 堆焊金属之间存在明显的熔合区, 厚度在 60~150 μm 之间。当热输入为 3.5 kJ/cm 时, 界面结合良好, 组织分布均匀, 无气孔、裂纹等缺陷产生。TiC 钢结硬质合金与 ERNiCrMo-3 堆焊金属之间存在元素扩散现象, 二者形成扩散型界面, 实现了冶金结合。


(2) 不同的焊接热输入下, 界面的显微硬度变化趋势基本一致。从堆焊焊缝到母材存在一个硬度逐渐变化的缓冲区域, 该区域的宽度也反映了母材对焊缝的稀释程度。随着焊接热输入的增加, 焊缝对母材的稀释程度增加。

(3) 随着焊接热输入的增加, 界面剪切强度总体呈现下降的趋势。当热输入为 3.5kJ/cm 时, 剪切强度可达到 466MPa。剪切断裂发生在靠近母材侧的熔合区内, 属于脆性断裂, 说明 TiC 钢结硬质合金与 ERNiCrMo-3 界面结合性较好。

参考文献:

- [1] 段嘉旭. Fe-C-Mo-V 堆焊合金磨粒磨损行为研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2021.
- [2] 王志. TiC-CrMo 钢钢结硬质合金的制备与性能研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [3] 邹玉清. 14Cr1MoR 焊接中过渡层堆焊工艺的研究[J]. 焊接, 2013(6): 64-65.

(下转第 48 页)

- [6] 卢翔, 王志勇, 邵良臣, 等. 钢铝异种金属回填式搅拌摩擦点焊的数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 137-141.
- [7] Kubit A, Trzepiecinski T. A fully coupled thermo-mechanical numerical modelling of the refill friction stir spot welding process in Alclad 7075-T6 aluminum alloy sheets [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20: 117.
- [8] Xiong J, Peng X, Shi J, et al. Numerical simulation of thermal cycle and void closing during friction stir spot welding of AA-2524 at different rotational speeds [J]. Materials Characterization, 2021, 174(7): 110984.
- [9] Janga V S R, Awang M, Yamin M F, et al. Experimental and numerical analysis of refill friction stir spot welding of thin AA7075-T6 sheets [J]. Materials, 2021, 14(23): 7485.
- [10] 崔超, 吴志生, 柴斐, 等. 5A06 铝合金搅拌摩擦焊温度场数值模拟 [J]. 焊接技术, 2017, 46(3): 12-15.
- [11] 周栎昕. TC4 钛合金扩散连接接头塑性变形行为及应力模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [12] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.
- [13] Cao J Y, Wang M, Kong L, et al. Numerical modeling and experimental investigation of material flow in friction spot welding of Al 6061-T6 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 81: 2129-2139.
- [14] 唐亦帑. AZ91D 镁合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [15] Plaine A H, Suhuddin U F H, Afonso C R M, et al. Interface formation and properties of friction spot welded joints of AA5754 and Ti6Al4V alloys [J]. Materials & Design, 2016, 93: 224-231. 

(上接第 41 页)

- [4] Li Y X, Zhang X S, Zhu Z T, et al. Effect of element Ni diffusion on microstructure and mechanical properties of brazed joints of cemented carbide and steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4): 1120-1125.
- [5] 彭瞳. 热输入对低碳 Mo-V-N-Ti-B 钢焊接热影响区组织和性能的影响 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [6] 曹晓莲, 徐培全, 马丁, 等. WC-TiC-Ni/304 不锈钢 MIG 焊缝界面碳化钨溶解特征研究 [J]. 稀有金属, 2015, 39(10): 870-876.
- [7] 邹增大, 王新洪. WC 硬质合金堆焊材料界面组织结构和力学性能 [J]. 金属学报, 2000, 36(12): 1279-1283.
- [8] Swla B, Jmsa B, Jtx B, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of WC-Co/steel joints diffusion bonded utilizing Ni interlayer [J]. Ceramics International, 2021, 47(4): 4446-4454.
- [9] 马丁. 硬质合金与钢 MIG 焊组织及性能研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2014.
- [10] Yu X Y, Zhou D R, Yao 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 & Hard Materials, 2016, 56: 76-86.
- [11] Wang F Z, Wang Q Z, Yu B H, et al. Interface structure and mechanical properties of Ti (C,N)-based cermet and 17-4PH stainless steel joint brazed with nickel-base filler metal BNi₂ [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2011, 211 (11): 1804-1809. 