

爆炸-轧制 TA1/Q345R 复合板的组织与性能

董运涛¹, 吴江涛¹, 樊科社¹, 邹军涛²

(1. 西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:采用爆炸-轧制法制备了 TA1/Q345R 复合板, 并通过拉剪试验对其结合性能进行了测试。借助光学显微镜观察了结合界面附近的显微组织, 并利用扫描电镜(配 X 射线能谱仪)分析了拉剪试样钢侧的断口形貌。结果表明, 与爆炸复合板相比, 爆炸-轧制复合板的界面结合强度大幅降低, 主要原因是结合界面形成了大量脆性中间相, 为复合板的断裂失效提供了裂纹源。爆炸-轧制复合板结合界面为平直型界面, 界面附近钢侧的微观组织特征有轻微的带状组织、铁素体粗晶区以及多种脆性中间相。剪切应力作用下, 爆炸-轧制复合板主要沿轧制形成的原始表面分离, 同时含有解理断裂和硬脆相破碎等特征。

关键词: TA1/Q345R 复合板; 爆炸-轧制; 组织; 性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192820

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)17-0146-04

Research on Microstructure and Properties of TA1/Q345R Clad Plates

Prepared by Explosive Welding-Rolling Process

DONG Yuntao¹, WU Jiangtao¹, FAN Keshe¹, ZOU Juntao²

(1. Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: TA1/Q345R clad plates were prepared by explosive welding-rolling process and their bonding properties were tested by tension-shear test. The microstructures of interface between TA1 and Q345R were observed by optical microscopy. Fracture morphology of tensile-shear samples at the steel side was analyzed by scanning electron microscope equipped with an energy-dispersive spectrometer (EDS). The results show that bonding strength of clad plates prepared by explosive welding-rolling process substantially reduce compared with that of clad plate prepared by explosive welding process. The main reason is that a large number of new brittle-phases form at the bonding interface between TA1 and Q345R and become the crack source of the fracture failure. The interface of between TA1 and Q345R prepared by explosive welding-rolling process is flat and the main microstructural characteristics near it at the steel side are as follows: slight banded structure, coarse grain region of ferrite and diversified brittle-phases. Under the action of shearing stress, the plates fracture along the original surfaces formed during the rolling process and cleavage fracture and breaking of brittle phases occur at the same time.

Key words: TA1/Q345R clad plates; explosive welding-rolling process; microstructure; properties

结构钢具有强度高、韧性好、成形性及焊接性等优点, 同时成本低廉, 是目前用量最大的金属材料。另一方面, 由于结构钢成分和组织的不均匀性, 在潮湿环境中容易产生电化学腐蚀。钛的化学性质活泼, 常温下即可与大气中的氧化合在其表面形成一层致密的氧化膜(TiO_2), 阻止腐蚀进一步发展, 因而耐蚀性优良。采用某种工艺, 在结构钢表面复合

一层钛, 可显著提高构件的使用寿命, 进一步拓宽结构钢的应用范围。钛/钢双金属复合板已广泛应用于航空航天、石油化工、交通运输、海洋建筑等领域^[1-3]。

目前, 大规格钛/钢复合板的生产方法主要有两种: 爆炸焊接^[4-6]和真空轧制^[7]。爆炸焊接是指利用炸药爆炸产生的能量使被焊金属之间形成牢固冶金结合的一种焊接方法。对于相容性较差的金属组合, 大规格、超大规格异质金属复合板生产, 爆炸焊接具有很大优势。但当复层厚度较薄($\delta_c \leq 1.0 \text{ mm}$)时, 爆炸焊接在炸药起爆、稳定传爆、装配精度等方面控制难度较大。为此, 生产中通常先借助爆炸焊接方法制

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2018TD-035)

作者简介: 董运涛(1977-), 男, 陕西蒲城人, 工程师, 硕士, 主要从事异质金属连接、金属结构功能一体化研究; 电话: 17791959361; E-mail: dongyt109@163.com

得复合板坯料,再通过轧制减薄的方式加工到所需规格,即所谓爆炸-轧制法^[8-9]。然而,采用爆炸-轧制法生产的复合板结合强度通常较低。

本文采用爆炸-轧制法制备钛/钢复合板,通过性能测试、微观组织分析、断口分析等技术手段探索复合板断裂机理,为后续提高复合板结合性能提供技术依据。

表1 Q345R 和 TA1 的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of Q345R steel and TA1 titanium (wt%)

材料	C	N	H	O	Mn	S	P	Nb	Si	Cr/Ni/Cu	Ti	Fe
TA1	0.05	0.015	0.01	0.09	-	-	-	-	-	-	余量	0.010
Q345R	0.16	-	-	-	1.46	0.004	0.012	0.030	0.34	<0.30	0.15	余量

对钢板、钛板进行必要的表面处理,然后按图1所示方式装配,板间距为12mm。选用2[#]氨油炸药,炸药密度为0.75g/cm³,装药厚度为28mm,边部安装8[#]电雷管,引爆完成爆炸焊接,制得爆炸态复合板。将上述复合板置于电炉中加热,850℃保温1.5h,然后,沿爆轰传播方向送入轧机进行轧制,道次变形率依次为2%~15%,分10道次完成,终轧温度不低于780℃,制得爆炸-轧制态复合板。

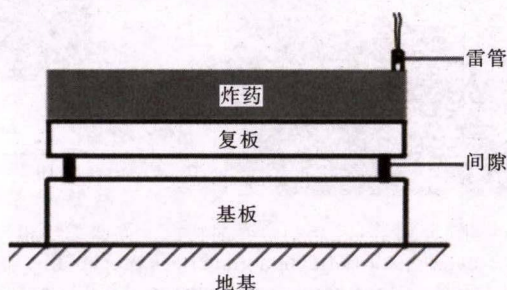


图1 爆炸焊接装配示意图

Fig.1 Sketch of explosive welding installation

1.3 分析测试

复合板的界面结合性能以拉剪试验评价。试样的长度方向与爆轰传播方向或轧制方向平行,规格为:全厚×250mm×25mm,搭接面宽度为1.5mm。试验在CMT5105微机控制电子万能试验机上进行,如图2所示。

复合板的工艺性能以弯曲试验评价。试样的长度方向与爆轰传播方向或轧制方向平行,规格为:全厚×150mm×20mm,弯曲试验在LWS-160双工位钢筋冷弯试验机上进行,弯曲角度 $\alpha=105^\circ$ 。

线切割取样,磨制并抛光,用4%硝酸酒精浸蚀,在GX51倒置式金相显微镜下观察结合界面附近的显微组织。对拉剪试样断口进行超声波清洗并

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

基材选用Q345R钢板,厚度为22.0mm,正火态;复材选用TA1钛板,厚度为6.0mm,正火态。化学成分见表1。

1.2 样品制备

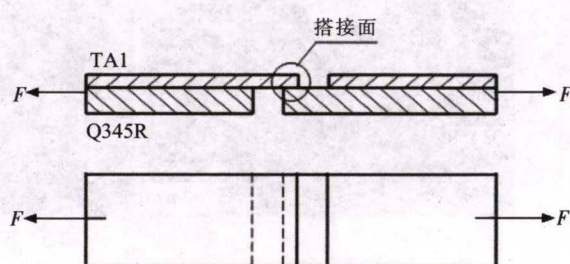


图2 拉剪试验示意图

Fig.2 Sketch of the tensile-shear test

烘干,利用JSM-6700F场发射扫描电镜(配EDS)分析剪切应力作用下复合板的断裂机制。

2 试验结果及分析

2.1 性能测试

经测量,最终获得的爆炸-轧制TA1/Q345R复合板总厚度约为4.1mm,其中钛层厚度约为1.1mm,实际轧制总变形量为81.4%。爆炸态、爆炸-轧制态复合板的拉剪强度依次为280、146MPa,可见轧制后复合板的结合性能大幅降低。拉剪试样在结合界面处断裂,钛侧端部稍有弯曲,见图3(a)。弯曲试样外侧表面光滑,变形均匀,无可见裂纹,钛/钢界面结合良好,见图3(b),表明复合板具有较好的弯曲成形能力。

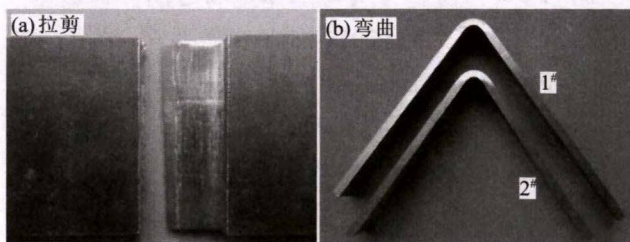


图3 拉剪和弯曲试样

Fig.3 Tensile-shear and bend test samples

2.2 显微组织分析

爆炸态复合板结合界面附近的显微组织如图4所示。纯钛的耐蚀性强,4%硝酸酒精不能使其组织显现,呈均匀的浅灰色。结构钢的显微组织特征为宽度均匀的带状组织,其中铁素体与珠光体呈条带状交替分布。钛/钢界面为典型的爆炸焊接波状界面,波高约450 μm ,相邻“波峰”之间的距离约为1100 μm ,属大波状结合界面^[10],见图4(a)。高放大倍数下可以看到,“波谷”处结合界面较为平直,“波峰”处呈漩涡状。在距离界面2.0~5.0 μm 范围内形

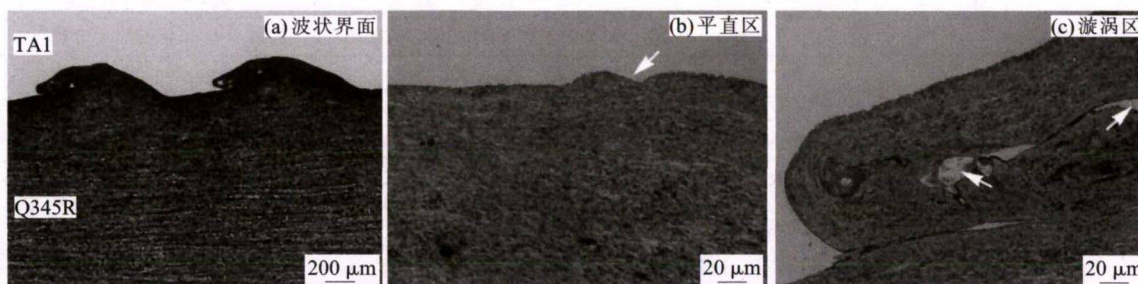


图4 波状界面及其特征

Fig.4 Wavy weld-interface and its characteristics

所示。由图5(a)可知,爆炸-轧制态复合板连接界面为平直型界面。轧制过程中,爆炸焊接形成的波状界面发生塑性变形,经过总变形量为81%的轧制已完全扁平化。与轧制前相比,钢侧的显微组织呈现出3个明显的变化:①基体内部的带状组织有所减轻,长条状珠光体变为短条状、块状或点状断续分布于铁素体之间。这是因为带状组织的形成主要与杂质元素的偏聚有关,高温扩散及随后的塑性变形有利于化学成分的均匀化。②靠近连接界面,形成宽度约80 μm 的铁素体粗晶区。在此区域内,显微组织基本上全部为铁素体,并且铁素体晶粒尺寸粗大,平均晶粒尺寸约为90 μm 。钛属强碳化物形成元素,轧制前的保温过程中钢中的碳向钛侧扩散形成TiC,致使靠近界面的钢侧产生贫碳区,铁素体含量相应地增加。③结合界面附近分布有大量脆性中间相。这些新相质地均匀、颜色一致,与基体金属之间界面清晰、平直,并且在多数新相的内部存在微裂纹,属硬脆中间相。EDS分析表明,新相主要由钛、铁两种元素组成,并且二者的原子比为33.5:66.5,如图5(b)所示。结合Fe-Ti二元系相图^[11],钛和铁之间可能形成TiFe₂、TiFe两种中间相,因此新相应为TiFe₂金属间化合物。

成了一层细晶区,平均晶粒尺寸为2.0 μm 。细晶区由平直区向两侧延伸,终止于漩涡入口附近,见图4(b)、(c),漩涡入口处不存在细晶区。平直区内,钛/钢界面局部有少量点状新相形成,如图4(b)中箭头所指部位。在漩涡区内部,这种新相以块状形态大量存在于钛/钢界面,并且在其内部多含贯穿性裂纹,如图4(c)中箭头所指部位,初步判断该新相为硬脆性相。与基体金属相比,界面附近铁素体的晶粒尺寸明显细小。

轧制态复合板结合界面附近的显微组织如图5

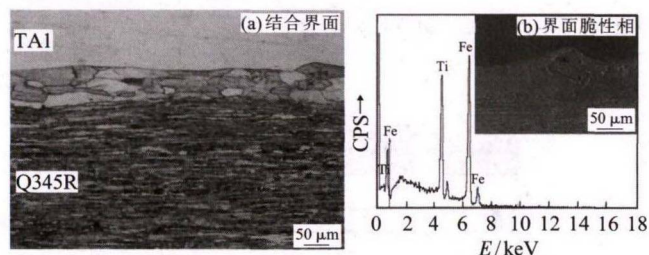


图5 爆炸-轧制结合界面特征及界面脆性相

Fig.5 Characteristics of bonding interface prepared by explosive welding-rolling process and interfacial brittle phases

2.3 断口分析

爆炸-轧制态复合板拉剪试样钢侧的断口形貌如图6所示。断面呈现两种断裂特征:①大部分断面平坦、光滑,约占断口总面积的85%,该断口特征对应较低的断裂应力。②边缘部分形成了一定宽度的剪切唇,约占断口总面积的15%。较高倍数下可以看到,剪切唇部分存在大量切窝,对拉剪结果有一定贡献,图6(a)、(b)所示。

在断口平坦区,存在大量因解理断裂而形成的河流花样,呈团簇状分布,如图6(c)中箭头a所指。解理断裂的形成主要与两方面因素有关:①晶粒粗化靠近界面的钢侧存在厚度约80 μm 的铁素体粗晶区,粗大晶粒有利于解理断裂的发生;②应力状态

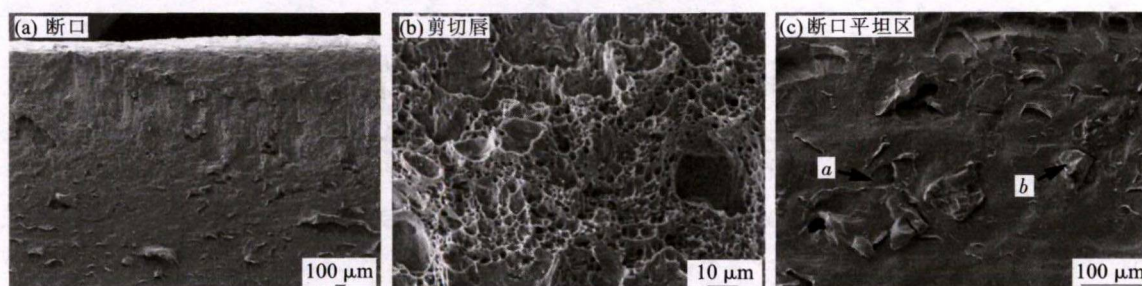


图6 拉剪试样钢侧的断口形貌
Fig.6 Fracture morphology of tensile-shear samples at the steel side

拉剪试验中,加载力的方向与钛/钢结合界面平行,粗大的铁素体晶粒受到高速剪切促进了解理断裂的发生。河流花样之间的断面平坦、光滑,这是结构钢轧制后形成的原始表面,也是爆炸-轧制态复合板最主要的断面特征。在断口平坦区,还存在很多破碎状断口,如图6(c)中箭头**b**所指,断面呈碎块状,裂纹平直、贯通。结合微观组织分析结果,破碎状断口为TiFe、TiFe₂及TiC等脆性中间相的断裂形貌。

综上所述,爆炸态复合板在轧制前的保温过程中界面形成大量脆性中间相。后续轧制过程中,在轧制力作用下脆性相发生变形、破碎,形成微裂纹。复合板服役过程中,微裂纹起到了预制裂纹的作用,加速了复合板失效,严重降低其结合性能。

3 结论

(1) 与爆炸复合板相比,爆炸-轧制复合板的界面结合强度大幅降低,主要原因是结合界面形成了大量脆性中间相,为复合板的断裂失效提供了裂纹源。

(2) 爆炸-轧制复合板结合界面为平直型界面,界面附近钢侧的微观组织特征有轻微的带状组织,铁素体粗晶区以及多种脆性中间相。

(3) 在剪切应力作用下,爆炸-轧制复合板主要沿轧制形成的原始表面分离,同时含有解理断裂和硬脆相破碎等特征。

参考文献:

- [1] Bhanumurthy K, Kale G B. Reactive diffusion between titanium and stainless steel [J]. Journal of Materials Science Letters, 1993, 12(23):1879-1881.
- [2] Shun-ichi N, Koji H. Durability of titanium-clad steel plates used as an anti-corrosion system [J]. Structural Engineering International, 2000, 10(4):262-265.
- [3] 吴全兴. 钛钢复合板用于海洋建筑物防蚀技术的开发[J]. 钛工业进展, 2000(1):27-28.
- [4] 高文柱, 顾亮, 隋永忠, 等. 钛/钢爆炸复合板的结合界面[J]. 稀有金属材料与工程, 1993(2):38-44.
- [5] Peng L, Ming L U, Tao T, et al. Experimental and interfacial research on titanium/steel explosive welding composite plates [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7):30-33.
- [6] Kahraman N, Gulen B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2):127-133.
- [7] 王敬忠, 颜学柏, 王韦琪, 等. 轧制钛-钢复合板工艺综述[J]. 材料导报, 2005, 19(4):61-63.
- [8] 李正华, 裴大荣, 罗石林. 生产钛-钢复合板的新方法-爆炸轧制工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 1982(1):28-31.
- [9] 刘润生, 任连宝, 汪汉臣, 等. 大面积、薄覆层钛/钢复合板爆炸-轧制工艺研究[J]. 中国材料进展, 2005, 24(1):18-20.
- [10] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [11] 梁基谢夫 H II. 金属二元系相图手册[M]. 郭青蔚, 译. 北京:化学工业出版社, 2008. H

欢迎订阅 欢迎赐稿 欢迎刊登广告