

# TA1/Q235 循环累积变形复合界面研究

## Research on Compound Interface Layer of TA1/Q235 Clad Plate by Cyclic Accumulated Deformation

北京航空制造工程研究所 李红 侯红亮  
海军驻北京地区航空军事代表室 王晓亮  
北京科技大学料科学与工程学院 任学平

**[摘要]** 借助扫描电镜、X射线衍射仪等手段,对循环累积变形复合后的 Ti/Q235 复合试样的界面生成物和界面形貌进行分析。结果表明:两母材元素在界面反应生成 TiC 和 Fe<sub>2</sub>Ti 化合物;TA1/Q235 复合前去除氧化膜后在待结合面上制造一层脆性覆膜,有利于形成冶金结合。

**关键词:** Ti/Q235 累积叠轧焊 界面化合物 表面处理

**[ABSTRACT]** The intermetallic compound and morphology formed in accumulative roll bonding is analyzed by means of SEM, X ray device. The results show that intermetallic compound formed in the interface between two base materials consists of TiC and Fe<sub>2</sub>Ti. Removing oxide film and making brittle tectorial membrane are in favor of metallurgical bonding of Ti/carbon steel.

**Keywords:** TA1/Q235 clad plate ARB Intermetallic compound Surface treatment

钛及钛合金/碳钢复合板是集钢铁材料所具有的优异的强度、导热性和焊接性与钛合金的耐腐蚀性为一体的新材料<sup>[1]</sup>,此类性能特殊的复合板材应用日益广泛。钛/钢复合板常用的制造方法有轧制法、爆炸法和浇注法,采用以上方法在控制板厚、界面结合强度以及铸造覆材表面氧化等方面还存在一些问题。累积叠轧焊<sup>[2]</sup>(Accumulative Roll Bonding, ARB)是一种新的金属材料强加工方法,它是在金属材料的再结晶温度以下通过反复叠合轧制,获得大变形量,实现轧制焊接,可连续制备超细晶金属材料的方法。国内外一些学者对钛/钢爆炸及轧制复合界面经热处理后的组织结构和反应

相的形成、生长规律进行过探讨<sup>[3-5]</sup>;国内对采用累积叠轧焊方法制备钛/钢复合板的报道鲜见。本研究在热模拟试验机上采用累积叠轧焊工艺方法进行循环累积变形复合,模拟 Ti/Q235 复合板的累积叠轧生产过程,观察分析界面区域组织结构和形貌,为工业应用提供试验依据。

### 1 试验条件及方法

试验材料采用热轧空冷状态下的 Q235 钢和纯钛 TA1,化学成分分别见表 1 和表 2。Q235 试样尺寸为  $\phi 8 \times 8$  mm, TA1 试样尺寸为  $\phi 8 \times 3$  mm。累积叠轧复合试验在 Gleeble-1500 热模拟试验上进行,首道次压下量和累积压下量不变,分别在 700、750、800、850、900、950℃ 6 个不同的温度点压制 TA1/Q235 复合试样。复合前经表面处理,获得洁净、干燥,带有一定粗糙度的新鲜表面,利于二者复合<sup>[6]</sup>。复合工艺如图 1 所示。每次压制后在试样两端面叠加 Q235 钢,然后再次压制,以获得较大的压下量。界面分析采用 SEM、光学金相显微镜进行分析;应用 X 射线衍射进行界面反应相分析。

表1 Q235的化学成分

元素	C	Si	Mn	P	S	N	O
质量分数/%	0.16	0.20	0.61	0.019	0.023	0.045	0.019

表2 TA1的化学成分

元素	H	O	N	Fe	C	Si	Ti
质量分数/%	0.015	0.15	0.03	0.15	0.05	0.10	余量



图1 循环累积变形复合工艺

Fig.1 Compound process of cyclic accumulated deformation

## 2 试验结果及分析

### 2.1 复合界面化合物分析

图2为900℃下压制TA1/Q235复合试样界面组织的局部放大图,能看到晶界的部分是Q235钢,在钛和钢的结合界面上,沿界面的黑线是中间相和碳化物。从850℃开始,黑线变粗变浓,这是由于钛在高温下具有较高的化学活性,在与钢的结合界面上容易形成Ti-Fe金属间化合物和Ti-C化合物,使结合强度降低。

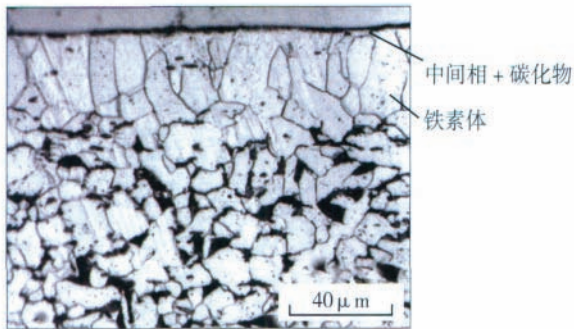


图2 界面金相组织

Fig.2 Metallurgical structure of interface

利用X射线衍射相分析仪对TA1/Q235复合界面化合物进行分析,图3是850℃时结合良好的界面剥离后的相分析,图4是900℃时压制试样的结合界面相分析,此试样界面结合不良,轻微碰撞就自动开裂。结果表明,850℃时,界面生成的化合物主要是TiC,还有少量Fe<sub>2</sub>Ti,但X射线衍射发现剥离的钢侧和钛侧结合表面除了母材元素之外,主要物质是TiC,可以推断此时的断裂发生在TiC层内;900℃时,界面生成的化合物主要是Fe<sub>2</sub>Ti,且生成量大,布满整个表面,钢基体仅有微弱显示,说明Fe<sub>2</sub>Ti层是造成试样开裂的主要原因,此时断裂发生在Fe<sub>2</sub>Ti层内及Fe<sub>2</sub>Ti与钛的表面之间。这些金属

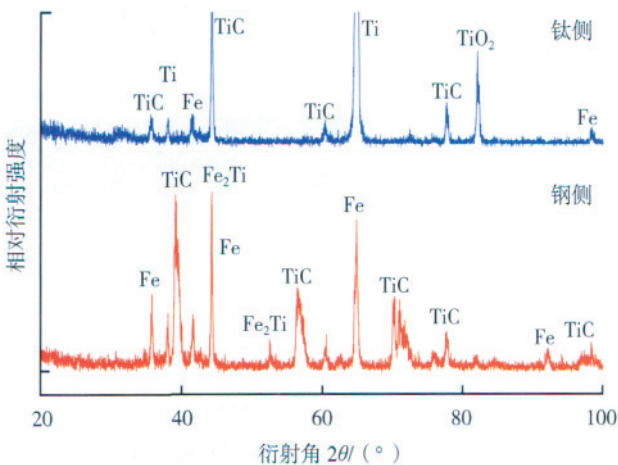


图3 变形温度850℃结合界面X射线相分析(剥离)

Fig.3 XRD patterns of interface after deforming at 850℃(stripping)

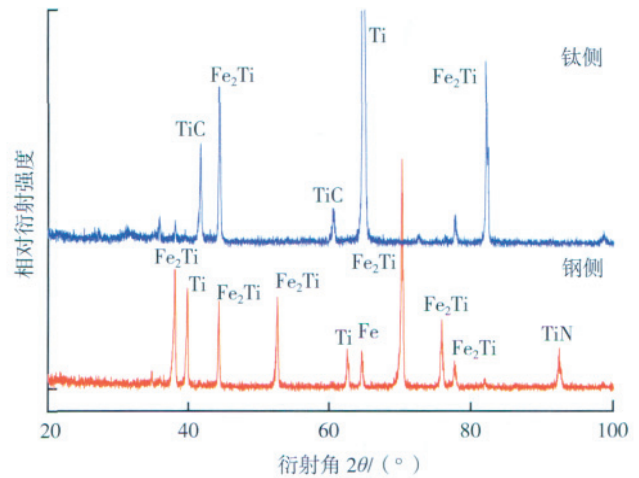


图4 变形温度900℃结合界面X射线相分析(开裂)

Fig.4 XRD patterns of interface after deforming at 900℃(cracking)

间化合物的排列顺序是:  $\alpha$ -Ti/TiC/FeTi/Fe<sub>2</sub>Ti/ $\alpha$ -Fe<sup>[7]</sup>。

### 2.2 复合界面形貌

图5为900℃时TA1/Q235经100%的累积变形量复合得到的结合界面。扫描电镜分析表明,钛/钢结合界面上存在一条光亮的线条,判断该线条为金属间化合物<sup>[8]</sup>,前文分析为Ti-Fe和Ti-C化合物。由图5可知在同一试样中,对称分布的2个结合界面生成化合物的厚度几乎相差1倍。影响材料界面轧制复合效果的因素很多,主要有材料本身的特性、复合组元的状态、基体的织构、结合表面的清洁与硬化状况、累积形变量、复合温度和扩散热处理制度等。分析图5中结合界面化合物量的差别,应该是热模拟压制前的表面处理造成的。复合前的表面清理除油后,用粗砂纸磨平待结合表面,除去氧化膜,粗砂纸打磨造成的加工硬化在待结合面上制造了一层脆性覆膜<sup>[9]</sup>;复合中,脆膜破裂,产生无污染的接近真空的间隙和新鲜表面,从而保证了接触面的活性,这样所获得的初生表面彼此接触,实现了2种金属的初始结合,保证了结合的牢固。但这种表面处理方式的缺点是:表面处理粗糙,结合强度不稳定<sup>[10]</sup>;表面处理到复合加工的时间越长,污染越严重,如果氧化膜重

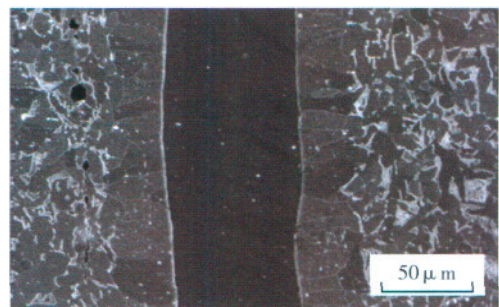


图5 变形温度900℃的界面SEM照片

Fig.5 SEM image of interface after deforming at 900℃

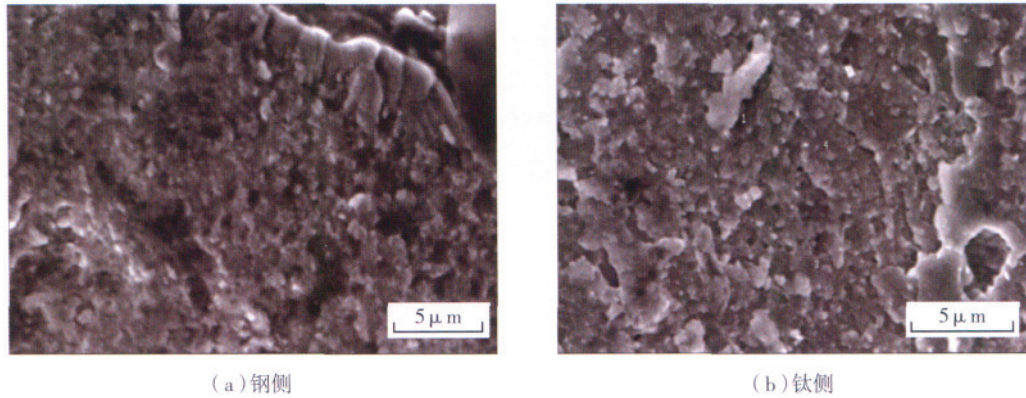


图6 850°C结合界面表面SEM照片(剥离)  
Fig.6 SEM image of compound interface after deforming at 850°C(stripping)

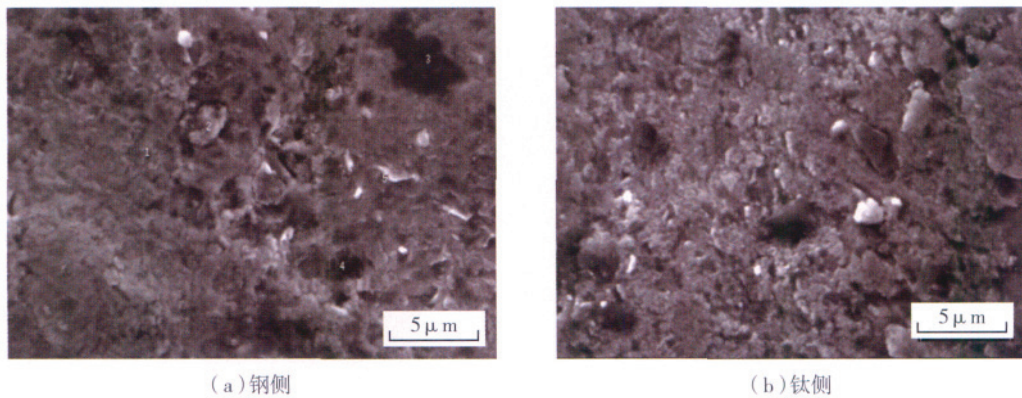


图7 900°C结合界面表面SEM照片(开裂)  
Fig.7 SEM image of compound interface after deforming at 900°C(cracking)

新产生,结合效果会更差。

图7和图8分别是850°C剥离试样和900°C开裂试样结合表面SEM照片。由图7(a)可观察到类似蜂窝状的孔洞和层片状组织,这是界面脆性化合物与结合界面剥离后的形貌。从图7中也可以看出,在850°C,累积变形量100%的工艺条件下,界面所生成的脆性化合物并不多,而且没有呈现连续分布,对界面的复合效果破坏不严重。在图8结合界面SEM照片中无韧窝,层

片状不明显,且存在杂质点。由前文分析900°C复合开裂试样界面处生成大量 $Fe_2Ti$ 分布在钢侧。因此对于钛和Q235钢的复合,2种母材之间发生化学反应,生成化合物,并且通过扩散发生元素交换,形成冶金结合;虽然生成脆硬化合物不可避免,但只要生成量不大,没有连续的层状分布时,不会明显降低结合强度。

图9为850°C结合良好的剥离界面和900°C结合不良开裂界面宏观形貌。图9(a)、图9(b)中表面布满

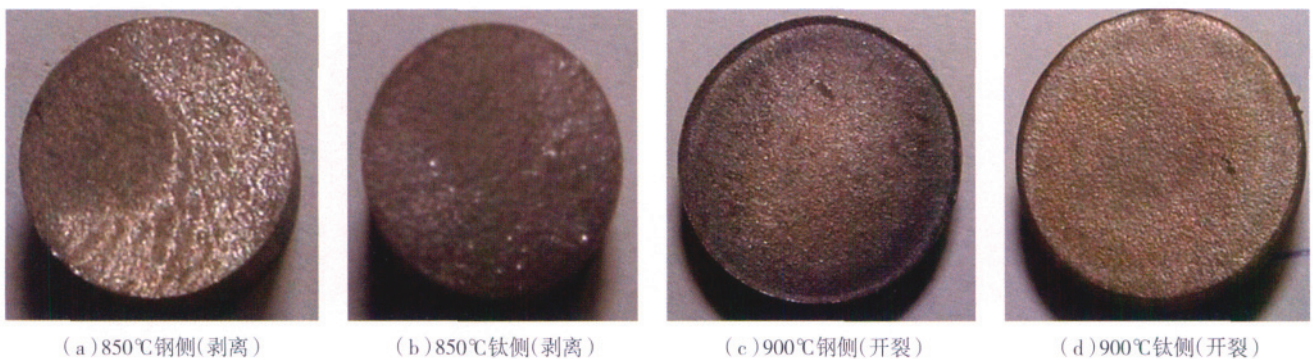


图8 结合界面宏观形貌  
Fig.8 Macrostructure of compound interface

(下转第125页)

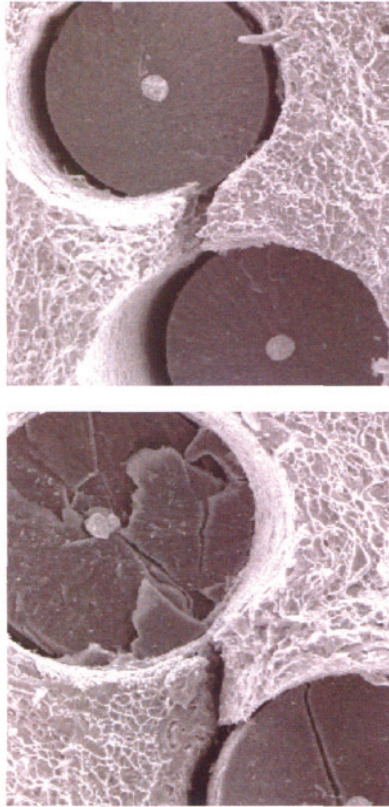


图7 带涂层试件拉伸断口形貌

Fig.7 Fracture microstructure of C coated sample

### 3 结论

纤维 C 涂层可有效抑制或减少 SiC 纤维元素的扩散,减少了纤维表面损伤而造成纤维性能的降低。

C 涂层的存在使界面结合强度较弱,在裂纹扩展中造成界面剥离,降低了纤维断裂的概率,形成纤维桥接裂纹机制,提高了材料的拉伸性能。

#### 参考文献

- [1] 克莱因,瑟斯. 金属基复合材料导论. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [2] Gundel D B, Miracle D B. The influence of interface structure and composite on the response of single-fiber SiC/Ti-6Al-4V composite to transverse tension. *Applied Composite Materials*, 1998, 5 (2): 95-108.
- [3] Bednarczyk B A, Arnold S M. Micromechanics-based deformation and failure prediction for longitudinally reinforced titanium composites. *Composites Science and Technology*, 2001, 61 (5): 705-729.
- [4] 杨延清,朱艳. SCS-6 SiC 纤维增强钛基复合材料的界面反应. *金属学报*, 2002 (9): 466-469.
- [5] 张国兴,康强. SiC 纤维增强钛基复合材料的界面反应长大动力学分析. *金属学报*, 2002 (增刊): 474-476.
- [6] 谭毅,李敬锋. 新材料概论. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [7] 郝元恺,肖加余. 高性能复合材料学. 北京: 化学工业出版社, 2004.

(责编 良辰)

(上接第 121 页)

微小的凸凹不平点,图 9 (c)、图 9 (d) 则比较光滑;2 个试样界面表面颜色有明显差别,开裂的试样钢侧呈现蓝黑色,钛侧呈现暗灰色,都是典型的氧化物颜色。但是在 850℃ (图 3) 和 900℃ (图 4) 结合界面 X 射线相分析中并未检测到氧化物,可能是氧化物衍射峰掩盖在临近或重叠的化合物衍射峰中而不容易识别。综合图 5~9 分析断定: 由于纯钛和 Q235 钢都是极易氧化的金属,复合时两金属表面韧而软的氧化膜严重阻碍了复合的进行,不能产生新鲜活化的金属,挤入咬合形成结合点,对初始结合非常不利,继而影响到原子的扩散,不易实现金属冶金结合,因此,复合前的表面处理是结合成败的一个关键因素。判断 900℃ 开裂试样结合不良的原因有: 两金属表面清理不够理想,初结合不良和复合温度较高,化合物连续层状分布,导致界面脆化。

### 3 结论

(1) TA1/Q235 累积叠轧复合过程中,两侧母材元素易在界面处发生界面反应,生成脆性金属间化合物 TiC 和 Fe<sub>2</sub>Ti,不利于金属的复合。

(2) TA1/Q235 复合前的表面处理是结合成败的一个关键因素,去除氧化膜,并在待结合面上制造一层脆性覆膜,有利于冶金结合。

#### 参考文献

- [1] Saito Y, Utsunomiya H. Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Mater*, 1999, 47 (2): 579-83.
- [2] Saito Y, Tsuji N, Utsunomiya H, et al. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*, 1998, 39 (9): 1221-1227.
- [3] 李炎,祝要民,吴逸贵,等. 爆炸复合板与轧制复合板界面结构的研究. *材料开发与应用*, 1996, 11 (1): 24-25.
- [4] 郝斌,张震. 轧制钛钢复合板的制造方法. *钛工业进展*, 1995, 6: 35.
- [5] 黄金昌. NKK 开发钛钢轧制复合板. *稀有金属快报*, 2002, 6 (3): 34-36.
- [6] Luo J, Acoff V L. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 379: 164-172.
- [7] Xia C, Jin Z. Proc. of the First Int. Conf. on the Metallurgy and Materials Science of Tungsten, Titanium, Rare Earths and Antimony. 1988: 1100-1105.
- [8] 欧国容,倪礼忠. 复合材料基体与界面. 上海: 华东化工学院出版社, 1991.
- [9] Bay N. Cold pressure welding—The mechanisms governing bonding (1). *Journal of Engineering for Industry*, 1979, 101: 121-127.
- [10] 吕庆功,陈光南,周家琮,等. 热轧钢板的组织. *钢铁钒钛*, 2001, 22 (2): 1-8.

(责编 三丰)