

(26-29)

钛/钢爆炸焊接界面区形变特征研究

马东康 周金波

(西北有色金属研究院 西安 710016)

摘 要 详细观察了钛/钢爆炸焊接界面区内的变形组织特征,研究了复合板的钢侧塑性变形层和钛侧绝热剪切线与焊接工艺参数的关系。结果表明,过大或过小的变形层都将导致界面区内产生有害缺陷。合理的变形层宽度应控制在 $50\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 之间,绝热剪切线长度不宜超过 $1000\mu\text{m}$ 。

关键词 界面区 变形层 绝热剪切线 组织结构

1 引言

爆炸焊接界面是金属在高速倾斜碰撞过程中瞬时高温、高压和高应变率作用的产物。对焊接界面的认识,目前已形成了“界面区”的概念^[1]。无论从界面的形成过程,还是性能分布特征,以及在外应力作用下的行为诸方面考察,不能把界面局限在二维平面,应看成有一定厚度的三维空间,从界面区整体去观察和处理界面问题。但对界面区的定义一般都比较模糊。较为深入的 TEM 研究^[2,3]只对层次分明的组织结构有初步划分,从界面开始依次是中心区,变形层,孪晶或相变区直到基体。其中心区即为狭义的结合界面,对铝/铝、铜/铜的组配,其宽度最大不过 μm 量级,对钛、铜、不锈钢、钢等异种金属组配,其宽度通常在更小的 $10^{-1}\mu\text{m}$ 量级^[4-8]。如此窄小的中心区显然不能完整地体现界面的结合特性,有必要从广义的界面区作深入研究。本实验着重研究钢侧变形层和钛侧绝热剪切线在波状界面上的分布以及它们与焊接工艺参数的关系,从而更全面和更深入地展示结合界面区的变形特征。

2 试验

爆炸焊接工艺采用平行装配法,复板为工业纯钛 TA2,厚度 2 mm。基板为低碳钢 Q235、厚度 10 mm,均为退火态。待焊表面经打磨处理呈粗糙表面。炸药用自行研制的硝铵基混合炸药,其爆速为 $1600\text{ m/s} \sim 3200\text{ m/s}$ 。为充分考察高应变率碰撞的变形特征,

改变爆炸焊接工艺参数中的单位面积装药量 (W_s) 和间隙值 (h) 进行试验, $W_s = 10\text{ kg/m}^2 \sim 30\text{ kg/m}^2$, $h = 2\text{ mm} \sim 19\text{ mm}$ 。试样沿爆轰方向切取,爆炸焊接后不再进行任何热处理。借助光学显微镜、扫描电镜和透射电镜进行组织和结构的分析。

3 结果

3.1 钢侧变形特征

爆炸焊接界面呈周期性的波状形貌,一个完整的波形包含波谷、波腰、波峰和波头 4 个区域,图 1 显示了一个典型波形的全貌,明显可见晶粒在各区域的

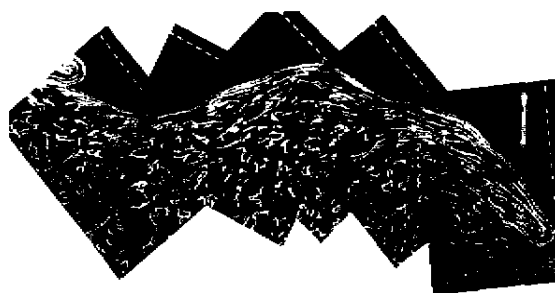


图1 变形层全貌照片 $\times 10$

Fig. 1 Overview of deformation layer

变形程度完全不同,即使在同一区域,距界面不同位置的变形情况也不相同。紧靠界面的铁素体和珠光体晶粒被成倍地拉长,沿界面平行排列成流线形,称为流动变形层。次靠界面的晶粒也发生明显变形,并按一定取向排列,称为扭曲变形层或晶粒畸变区。最后

是远离界面、几乎无晶粒变形的基体金属，在与畸变晶粒相连处，可在一个晶粒内观察到晶粒的一部分未变形，另一部分按一定取向变形。上述流动层和畸变层共同构成爆炸焊接界面的变形层。

图 2 示出了一个完整波形不同区域相应的变形宽度，可见该宽度在波谷区最小，沿波腰区不断增加，在波峰区取得最大值，最后进入波头。波头区包含了复杂的形变，如旋涡、卷入、镶嵌等变形形貌。

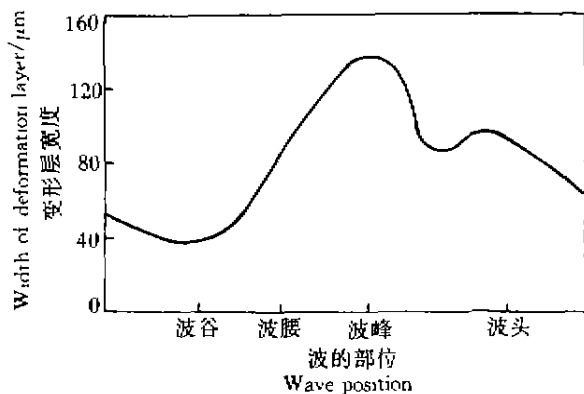


图 2 变形层宽度分布曲线

Fig. 2 Width of deformation layer VS. wave position

波峰处的变形层宽度即为界面区所产生的最大变形层宽度，图 3 和图 4 给出了该处的变形层宽度与装药量和间隙值的关系。为更多地反映变形情况，将流动变形层宽度单独列出（在图 4 中以虚线表示）。对波谷区研究结果的相关数据列于表 1。由表 1 可见，该区变形层宽度随工艺参数变化的规律与波峰区相似，其界面波长随工艺参数的增大而增大。对应于小的变形层，没有获得稳定的波状界面。

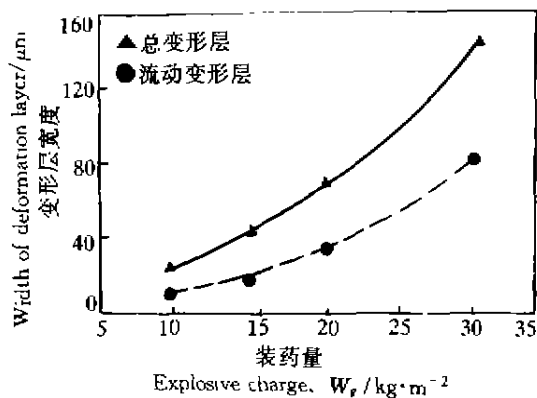


图 3 装药量对变形层宽度的影响

Fig. 3 Influence of explosive charge on the width of deformation layer

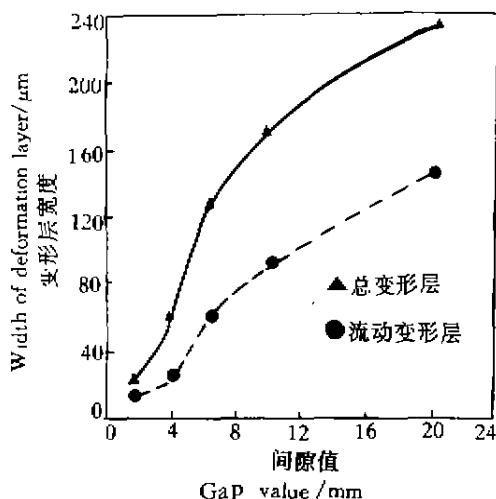


图 4 间隙值对变形层宽度的影响

Fig. 4 Influence of the gap on the width of deformation layer

表 1 波谷区变形层宽度与工艺参数的关系

Table 1 Relation of the width of deformation layer in wave trough with process parameters

工艺参数 Process parameter	$W_g / \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$				h / mm		
	30	20	10	2	4	6	10
λ / mm	0.61	0.35	不稳定界面		0.37	0.77	1.08
$W / \mu\text{m}$	20	14	5~10		16	25	46

3.2 钛侧变形特征

钛侧变形的最大特点是形成大量绝热剪切线，其基本特征是以界面为包络线，与界面成约 45 度角，向钛基体内部传播，绝大部分为单一的飞线，也发现少量分叉传播现象（图 5）。由图 5 还可见，绝热剪切线在波峰区最长，在波谷区最短。



图 5 绝热剪切线的金相照片 · ×320

Fig. 5 Metallograph of adiabatic shear band

3.3 对变形层的观察

当最大变形层宽度不足 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时, 没有获得稳定的周期波状界面, 只形成不稳定波状和平直相间的界面形貌。SEM 观察发现孔洞和微裂纹残留在界面上 (见图 6), 变形层越小, 界面形貌越不稳定、残留缺陷越多。当变形层过大, 其宽度大于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时, 钢侧产生沿流动变形线分布的微裂纹 (见图 7), 这种微裂纹伴随在珠光体旁, 且长度未超过一个流动拉长的珠光体晶粒。与此同时, 相应的钛复合板中, 绝热剪切线长度约为 $1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 。沿绝热剪切线产生微裂纹, 该微裂纹出现在图 8 所示的波峰区。TEM 分析表明, 变形层中的 $\alpha\text{-Fe}$ 组织仍具有 bcc 结构, 原始铁素体和珠光体经拉长变细, 呈平行排列的板条状亚结构 (见图 9), 愈靠近界面其平行取向愈强烈, 愈远离界面板条状亚结构趋向于产生胞状亚结构。这种交替出现的铁素体和珠光体板条群组成了变形层。

就爆炸焊接过程终了的流动层及畸变层而言, 材料显示出流体弹塑性性质, 这对提出什么样的爆炸焊接力学模型非常重要。或许粘性流适合于碰撞引起的射流层 (形成中心区), 弹塑性流更适用于变形层。然而迄今未见报道有这样的“组合梯度模型”。本研究认



图 6 残留于界面的缺陷的 SEM 照片 $\times 640$

Fig. 6 SEM micrograph of the residual defect at interface



图 7 流动层中的微裂纹的 SEM 照片 $\times 640$

Fig. 7 SEM micrograph of the microcrack in flow layer

为确有必要建立从粘性流过渡到弹性流这样的梯度模型才能够深入地解释爆炸变形的过程和其结果, 但此仍是爆炸焊接材料动力学有待解决的棘手问题。

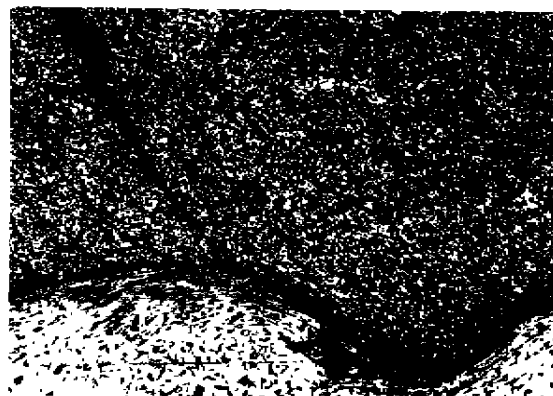


图 8 绝热剪切线中的微裂纹的金相照片 $\times 50$

Fig. 8 Metallograph of the microcrack in adiabatic shear band



图 9 变形层中的亚结构的 TEM 照片 $\times 1\,500$

Fig. 9 TEM image of the substructure in deformation layer

4 结 论

1) 界面区的变形程度和分布, 不仅与界面波状形貌密切相关, 而且与界面结合质量密切相关。变形层是界面区的重要组成部分。

2) 在一个周期波状界面内, 变形分布在不同区域显著不同, 钢侧塑性变形层宽度及钛侧绝热剪切线大小, 在波峰区最大, 在波谷区最小, 波腰区处于中间过渡状态, 而波头区包含了复杂的变形形貌。

3) 变形层宽度及绝热剪切线长度, 随焊接工艺参数的增大而增加, 与装药量呈指数规律上升。

4) 对厚度比 2/10 的钛/钢复合板, 钢侧最大变形层宽度不足 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时, 没有获得连续均匀的波状界

面, 其宽度越小, 残留在界面上的微观孔洞和裂纹越多。而当变形层宽度超过 200 μm 时, 将产生沿变形流线分布的微裂纹, 该裂纹伴随在珠光体旁, 在本试验条件下, 其长度未超过一个流动变形拉长的珠光体晶粒, 与此相应的钛复板中, 沿绝热剪切线产生微裂纹。

参考文献 References

- 1 Wu Jingzi (吴敬梓), Li Zhenghua (李正华). *J Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 1989; 23: 317
- 2 Hammerschmidt M, Kreye H. Microstructural Features Determining the Properties of Explosive Welds. *Proc 7th Inter Conf on HERF*, 1981; 60
- 3 Dorram Y, Weiss B Z, Komen Y. *Acta Metall.*, 1979; 27: 1 417
- 4 Tadayoshi Yamashita *et al.*, *Trans Jpn Weld Soc.*, 1973; 4 (2): 183
- 5 Oberg A, Persson Z, Vingsbo O. *Scandinavian J Metall.*, 1981; 10: 243
- 6 Yang Yang (杨 扬). Microstructure and Mechanical Properties of Explosive Clad Titanium/Mild Steel Interface. [Doc, Thesis]. Changsha: Central South University of Technology, 1994
- 7 Crossland B. *Explosive Welding of Metals and Its Application*. Oxford: Clarendon Press, 1982
- 8 Gao Wenzhu (高文柱), Gu Liang (顾 亮). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 1993; 2: 39~44

(收修改稿日期 1998-07-22)

(编 辑 易毅刚)

Deformability of the Interface of Explosive Welded Titanium Clad Steel Plate

Ma Dongkong, Zhou Jinbo

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016)

Abstract The deformability of the interface in titanium clad steel plate produced by explosive welding process has been investigated. The relationship between plastic deformation on the steel side and adiabatic shear banding on the titanium side with variation of process parameters are studied quantitatively. The results show that the defects within interface result from underestimation or overestimation of the deformation. The proper deformation should be controlled within the range of 50 μm ~200 μm in width, and the adiabatic shear band should be less than 1 000 μm in length.

Keywords interface, deformation layer, adiabatic shear band, microstructure

Correspondent: Ma Dongkong, Senior Engineer, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-6231075