

铜和铝作为钛-钢爆炸焊接夹层时的复合工艺及焊接界面的实验研究

段卫东 吕早生 钟冬望 马建军
武汉科技大学(武汉,430081)

[摘 要] 文章介绍了铜、铝作为钛-钢爆炸焊接夹层时的复合工艺,并对实验中的各种界面进行了超声探伤、扫描电镜及能谱分析。认为与铝相比铜更适合于作钛-钢爆炸焊接的中间夹层。

[关键词] 爆炸焊接 界面 超声探伤 扫描电镜 能谱分析

[分类号] O389 TG456.6

1 引言

钛具有重量轻、强度高、高低温性能好、耐腐蚀等许多优点,但是,由于矿石中钛与氧结合紧密,使得钛冶炼非常困难,因而价格昂贵,这在很大程度上限制了钛的推广和应用^[1]。

采用爆炸焊接的方法将钛与普通钢复合起来,制成钛复合材料,既满足了设备的抗腐蚀要求,又可以大大降低制造成本。几十年来,钛-钢复合材料的生产一直在爆炸焊接中占很大的比例。但由于钛高温化学性质活泼,在钛-钢的爆炸焊接交界面上钛容易与钢结合生成FeTi、Fe₂Ti等脆性金属化合物,大大降低了界面的结合强度,影响了钛复合板的复合率,有时还会使钛复合板在生产及使用过程中发生大面积的脱焊开裂,造成质量事故^[2]。

因此,钛-钢的爆炸焊接工艺一直是爆炸焊接领域研究的一个重要课题。我们尝试用铝、铜作中间夹层以改善钛-钢爆炸焊接复合板的焊接质量,并对各种类型的钛复合板的爆炸焊接界面情况进行分析,使之更清楚地了解钛复合板的界面结合性能。

2 钛复合板实验试件的制备

2.1 原材料的准备

本研究中所用复板为工业纯钛(TA2)(由宝鸡有色金属研究院提供),中间过渡层为工业纯铝(L5)板和黄铜(H65)板,基板为普通A3钢。共制成钛-钢、钛-铝-钢、钛-铜-钢三种类型爆炸焊接试件作对比分析研究。

受实验室条件限制,钛复板面积不能太大,以免一次爆炸焊接用药量超出爆炸洞允许用药量;同时,钛复板尺寸又不能太小,否则装药爆轰的稳定性及边界效应都会对爆炸焊接复合板的质量产生较大的影响。实际实验中选取的原材料尺寸如表1。

爆炸焊接前用砂纸将钛和A3钢的焊接表面,铝和铜的上、下两表面都打磨干净。初始表面越新鲜,光洁度越高,焊接质量越好。

2.2 钛复合板爆炸焊接工艺参数的确定

为了与实际工业生产中钛复合板的爆炸焊接工艺相似,实验中复、基板采用平行放置法安置,炸药选用工业上最常用的2[#]岩石铵梯炸药。

爆炸焊接的装药量计算如下:

为了射流的生成,复、基板碰撞时必须满

表1 原材料的尺寸

材 料	钛 板	铝 板	铜 板	A3 钢板
尺寸/mm	200×130×2	220×150×0.8	220×150×0.7	180×100×3

足^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_t V_{\perp}^2 &\geq \sigma_{\text{dyn}} \\ V_{\perp} &= V_p \cos(\alpha + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 ρ_t —— 复板密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

σ_{dyn} —— 钛的动态屈服强度, Pa;

$V_{\perp}$ —— 复板相对于基板的垂直运动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

V_p —— 复板的法向运动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

α —— 复板预置角, 度;

δ —— 复板压合角, 度。

采用平行放置法 $\alpha = 0$, 由大量的实验知 $\delta \leq 10^{\circ[3]}$, 可令:

$$V_{\perp} \approx V_p \quad (2)$$

钛的动态屈服强度 σ_{dyn} 随着其应变率的增加而增加, 其值大约在静态屈服强度的 1 ~ 3 倍的范围内变化^[4], 考虑到其它材料钢、铜、铝的屈服强度都较钛低, 故计算中取 σ_{dyn} 为钛静态屈服强度 σ_b 的 2.5 倍, 即

$$\sigma_{\text{dyn}} = 2.5 \sigma_b \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{dyn}} = 2.5 \times 450 \times 10^6 (\text{Pa})$$

将 σ_{dyn} 值和钛的密度 $\rho_t = 4500 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$, 代入式(1)得:

$$\begin{aligned} V_p &= \sqrt{\frac{2 \times 2.5 \times 450 \times 10^6}{4500}} \\ &= 707 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \end{aligned}$$

由特里巴斯(Лермондас)一维复板运动公式^[5]:

$$V = 1.2D \frac{(1 + 32R/27)^{1/2} - 1}{(1 + 32R/27)^{1/2} + 1} \quad (4)$$

式中 V —— 爆炸驱动下复板的运动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

D —— 炸药爆速, 实验中对 2[#] 岩石铵梯炸药取 $D = 2800 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

R —— 装药质量比。

在复、基板平行放置的情况下, $V_p \approx V$; 将 $V_p = 707 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 代入式(4), 可求得质量比: $R \approx 1.1$, 由

$$R = \frac{\rho_w h_w}{\rho_t h_t} \quad (5)$$

式中 ρ_w —— 炸药密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

h_w —— 装药厚度, mm;

h_t —— 复板厚度, mm。

将 $\rho_w = 0.6 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\rho_t = 4.5 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $h_t = 2 \text{mm}$, 代入式(5)可求得: $h_w = 16.5 \text{mm}$ 基、复板间隙 z 按经验公式^[6]:

$$z = 0.2(h_w + h_t) \quad (6)$$

根据公式(6)计算后, 经过调整, 实际实验中 4 种钛复板的爆炸焊接所选用的工艺参数见表 2。

3 钛复合板焊接界面的质量分析

3.1 钛复合板焊接质量的检查

爆炸焊接后首先是对复合材料的外观, 如表面质量、材料变形等进行检查和记录, 然后, 检查复合板的焊接面积。检查复板复合率的方法有锤击法、剥离法和超声波检验法。超声波探伤结果见表 3。目前爆炸焊接工程中,

表 2 爆 炸 焊 接 参 数

复合板种类	钛-钢	钛-铜-钢	钛-铝-钢-1	钛-铝-钢-2*
装药厚度/mm	16.5	16.5	16.5	12.0
间隙/mm	钛-铜:4	钛-铜:3 铜-钢:2	钛-铝:3 铝-钢:2	钛-铝:2 铝-钢:2

注: * 因为钛与铝的动态屈服强度相差悬殊, 当选 σ_{dyn} 为 2.5 倍钛板屈服强度计算药量时, 相对铝板来说碰撞压力可能过大, 因此增加一个减小药量的实验以作对比。

表 3 超 声 波 探 伤 检 查

复合板	钛-钢	钛-铜-钢	钛-铝-钢-1	钛-铝-钢-2
焊接面积/ cm^2	164	167	103	144
复合率 %	91	93	57	87

一般采用全面积超声波探伤来确定复合板的复合率。图1是实验中的钛复合板爆炸焊接界面超声波检查的几个典型的波形图。

从超声波探伤波形图看,在焊接质量良好的情况下,各种界面的回波差别不大,铜、铝都可作为钛、钢爆炸焊接的过渡层。但从各种类型钛复合板的焊接面积率来看,用铜、铝作中间夹层后复合率并没有明显的改善。特别是铝,因其硬度和熔点与钛、钢差异较大,爆炸焊接参数还需进一步探索。

对超声波检查过的部分复合板进行切割,然后用剥离法进行验证,发现超声波探伤标明未焊好的地方,用扁铲很容易就能将复

板与基板分开;而超声波探伤标明焊接好的界面,则很难用扁铲将复合板与基板分开,有时分开后还会有部分复材粘结在基板上,这充分说明了超声探伤结果的准确可靠。

剥离时还发现铜-钢界面最难分离,其次是钛-铜、钛-钢、钛-铝界面,而钢-铝界面较易剥离。钛-铝-钢-1试件中的铝,从剥离的界面看,铝复层在整个基板上厚度的分布很不均匀,有的位置铝层较厚,有的位置铝层很薄。从剪切下来的钛-铝边界看,铝层完全发生了熔化。

3.2 钛复合板界面的扫描电镜分析和能谱分析

将质量好的各种类型钛爆炸焊接复合板沿平行和垂直于爆轰波阵面的方向切割成 $15\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的小样品块,在水砂纸上研磨,经抛光、磨蚀后在扫描电镜上对焊接界面进行观察、分析。

几种类型钛复合板的扫描电镜显微照片如图2~图5所示。

从显微镜照片上可看到,钛-钢、钛-铜、铜-钢皆为细小波状结合界面,钛-铝、铝-钢-2界面为近似的平直界面,而铝-钢-1为过度熔化的结合面。大量的研究证明,细小的波状界面和平直界面都有较高的结合强度,过度熔化的界面结合强度最差。

从显微镜照片上还可以发现,铜-钢界面波的波峰与波谷的形状相似,波形较对称;而钛-钢、钛-铜界面波峰尖、波谷缓,形状不对

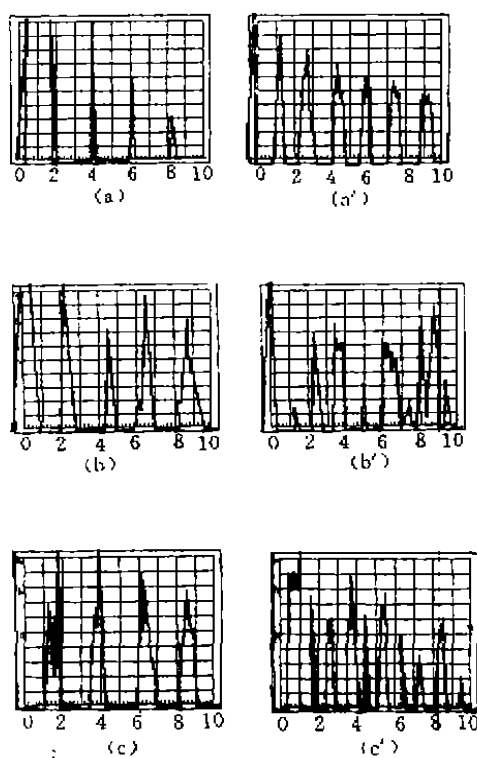


图1 钛复合板超声波探伤波形图

- (a) 焊接好的钛-钢波形;
- (a') 未焊接好的钛-钢波形;
- (b) 焊接好的钛-铜-钢波形;
- (b') 未焊接好的钛-铜-钢波形;
- (c) 焊接好的钛-铝-钢波形;
- (c') 未焊接好的钛-铝-钢波形



图2 钛-钢爆炸焊接界面的扫描电镜显微照片



图 3 钛-钢-钢爆炸焊接界面的扫描
电镜显微照片

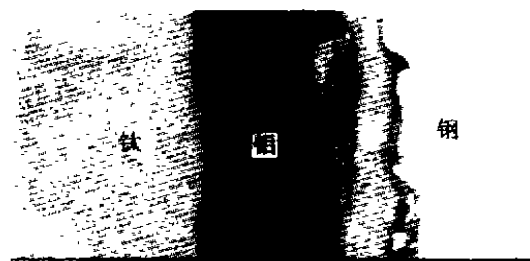


图 4 钛-铝-钢-1 爆炸焊接界面的扫描
电镜显微照片

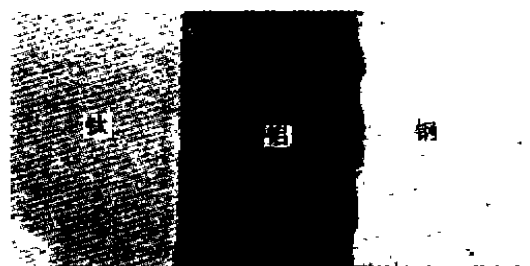


图 5 钛-铝-钢-2 爆炸焊接界面的扫描
电镜显微照片

称。出现哪种爆炸焊接界面结合形式,主要由爆炸焊接用药量和被焊接材料的性质决定。出现铝-钢-1 过度熔化界面的原因,主要是铝、钢强度和熔点差异过大和装药量较多造成的。

在对各种类型的钛复合板爆炸焊接界面作扫描电镜分析的同时,还对焊接界面层进行了能谱分析,图 6 和图 7 是两个典型的焊

接界面层的能谱曲线。

能谱分析结果表明,在钛-铜、钛-钢、钛-铝、铝-钢等多种焊接界面中都有一个两种金属共存的过渡层。界面的种类不同过渡层厚度不同,即使是同一个界面,不同位置处,过渡层厚度也不完全一样。表 4 列出了用能谱分析测得的各种类型的界面过渡层厚度的范围。

形成界面过渡层的原因有:

(1)基、复板碰撞产生的离散射流云有一部分没有逃逸出基、复板空间而被捕获,形成了过渡层;

(2)基、复板材料因碰撞产生的高温、高压而发生熔化,在界面发生机械混合而形成过渡层;

(3)高温、高压下基、复板材料相互扩散而形成过渡层。

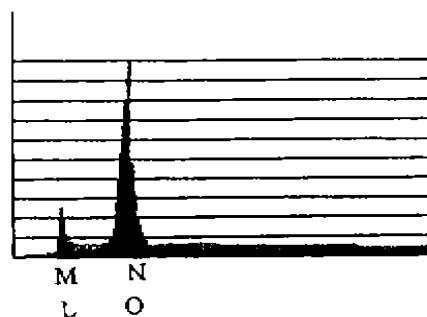


图 6 钛-铜焊接界面过渡层能谱曲线图

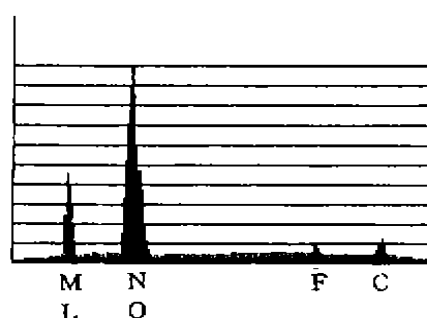


图 7 钛-铝焊接界面过渡层能谱曲线图

表4 钛复合板中各类界面的过渡层厚度

界面类型	钛-钢	钛-铜	钛-铝-1	钛-铝-2	铜-钢	铝-钢-1	铝-钢-2
过渡层厚度/ μm	2~15	2~4	2~5	2~7	1~2	20~100	10~25

界面过渡层的存在一般对界面结合强度是不利的,因为过渡层中不同材料的金属原子之间能形成脆硬的金属间化合物,如 FeTi 、 Fe_2Ti 、 FeAl 、 FeAl_2 等,当界面中存在连续的脆性金属间化合物时,剪切强度和抗拉强度都会降低,焊缝就容易开裂。

从界面过渡层的厚度看,钛-铜、钛-铝界面的过渡层厚度小于钛-钢界面。说明铜、铝作为钛铁的过渡夹层是合适的,只是对它们焊接界面的其它力学性能还需做进一步的分析研究。

4 结论

(1)铜、铝作为钛-钢爆炸焊接复合板的中间夹层,对复板的复合率没有明显的影响;

(2)在实验条件下,钛-铜-钢界面之间的结合强度明显高于钛-铝-钢界面之间的结合强度;

(3)从显微镜照片上可看到,强度相差相对较小的钛-钢、钛-铜、铜-钢皆为细小波状结合界面;强度相差相对较大的钛-铝、铝-钢

界面为近似的平直界面;装药量过大时,出现过度熔化界面。

(4)能谱分析结果表明,钛-铜、钛-铝界面之间的过渡层厚度明显小于钛-钢之间的过渡层厚度。

参 考 文 献

- 1 丹尼尔·艾伦主编,张祖光等译.钛在能源与工业中的应用.北京:机械工业出版社,1989.3~7
- 2 杨扬.钛-钢爆炸焊接复合界面层微观组织结构和力学行为.中南工业大学[学位论文].1994.2~4
- 3 段卫东.爆炸焊接的实验研究及理论分析.北京理工大学[学位论文].1999.72.97~110
- 4 马晓清,韩峰.高速碰撞动力学.北京:国防工业出版社,1998.67~73
- 5 邵丙璜,张凯.爆炸焊接原理及其工程应用.大连:大连工学院出版社,1987.16
- 6 郑哲敏,杨振声等.爆炸加工.北京:国防工业出版社,1981.403

Experimental Investigation into the Interface and Cladding Technology while Aluminum or Brass as a Sandwich of Ti/steel Compound Plate in the Explosive Welding

Duan Weidong, Lu Zaosheng, Zhong Dongwang, Ma Jianjun
Wuhan University of Science and Technology (Wuhan, 430081)

[ABSTRACT] The explosive cladding with aluminum or brass as a sandwich of the Ti/steel compound plate was introduced. Various interfaces appeared in the experiment were examined by the technique of ultrasonic inspection, SEM and energy spectrum analysis. It is recognized that as compared with aluminum the brass is more suitable to be a sandwich of Ti/steel compound plate in explosive welding.

[KEY WORDS] explosive welding, interface, ultrasonic inspection, SEM, energy spectrum analysis