

# 爆炸焊接可焊性窗口下限药量试验研究

陆 明, 王耀华, 尤 峻, 刘 鹏

(南京解放军理工大学, 南京 210007)

**摘要:** 在 T10/Q235 复合板的爆炸焊接试验中发现, 成功爆炸焊接所需的实际最少药量比传统可焊性窗口下限动态参数确定的药量还减少了 15%~20% 左右, 由此给出爆炸焊接药量系数修正式。依据修正式对 3Cr13/Q235、1Cr18Ni9Ti 铸钢和 62 硬质黄铜/Q235 复合板进行实际爆炸焊接生产检验, 不仅大大减少了焊接药量和减轻了爆炸效应对环境的危害, 而且复合板的焊接质量也完全满足工程的使用要求。因此, 将修正式定义为对复合板爆炸焊接生产具有重要实际指导意义的“最佳焊接药量窗口”。

**关键词:** 爆炸焊接; 复合板; 焊接药量

中图分类号: TG456.5 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)06-44-03

陆 明



## 0 序 言

众所周知, 要获得成功的金属材料爆炸焊接复合板, 首先必须合理选取初始焊接工艺参数, 以确保焊接动态参数落于“可焊性窗口”内<sup>[1,2]</sup>。从技术角度分析, 对于平行放置的基、复板, 当间距一定时, 焊接药量是最重要的初始焊接工艺参数, 因它直接决定了爆炸焊接中的荷载大小, 因而也就决定了基、复板之间的碰撞速度  $v_p$  大小。

目前, 爆炸焊接的药量确定主要还是依据由大量试验得到的经验公式, 究其原因主要有三点<sup>[3]</sup>: (1)不同金属材料具有不同的力学性能, 因此可焊性窗口动态参数的变化范围也不相同; (2)爆炸焊接系统初始安装基本上还是人工操作, 因此, 既使单位面积焊接药量不变, 但炸药密度和厚度因受到刮药轻重、空气湿度或炸药本身受潮度等因素的影响而使得实际炸药爆速发生变化, 由此导致复合板的焊接质量也存在一定差异; (3)爆炸焊接中的某些力学问题在理论上还没有真正弄清, 如复板与基板高速碰撞、且碰撞点快速移动时待焊区板的振动能大小、爆炸荷载与振动能之间的迭加关系及其对焊接质量的影响等。而这些原因的存在, 使得经验公式计算的焊接药量与实际所需的合理药量相差较大, 如根据 T10/Q235 爆炸焊接复合板的界面结合形貌测试结果发现, 尽管按可焊性窗口下限计算药量也获得了成功的爆炸焊接, 但若要获得理想的细波状结合界面, 则经验公式计算出的下限药量仍然

偏大<sup>[4]</sup>。

因此, 在成功爆炸焊接的前提下, 如何依据理论分析和试验结果对传统焊接药量经验公式进行修正, 以尽可能减少实际装药量, 是复合板爆炸焊接工艺参数优化亟待解决的问题。

## 1 计算及试验药量

### 1.1 可焊性窗口意义

图 1 所示为可焊性窗口示意图。图中:  $v_{pmin}$  线称为碰撞速度下限,  $v_{pmax}$  线称为碰撞速度上限, 而上、下限之间区域为成功爆炸焊接所需的碰撞速度。显然, 可焊性窗口意义在于: 在保证复合板爆炸焊接质量前提下, 确定了三个动态参数的可调节范围。另外, 在实际爆炸焊接中, 由于  $v_{pmin}$  线反映了成功焊接的最小爆炸荷载, 合理确定  $v_{pmin}$  不仅可减少爆炸能耗, 而且还能减小复合板变形以及爆炸效应对环境的危害, 因此又最为人们所关注。

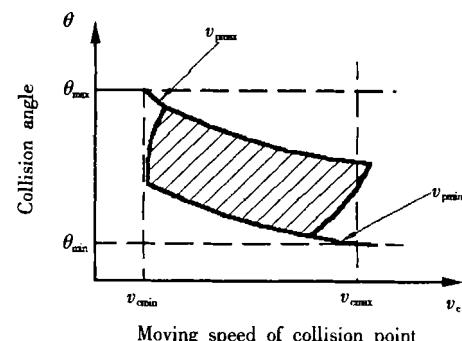


图 1 可焊性窗口

Fig. 1 Weldability window

## 1.2 传统焊接下限药量<sup>[5]</sup>

理论上爆炸焊接所需的单位面积装药量为

$$C = R \cdot m_f, \quad (1)$$

式中:  $m_f$  为复板单位面积质量;  $R$  为单位面积装药质量与  $m_f$  的比值, 若  $v_p$  取  $v_{p\min}$ , 则最小质量比  $R_{\min}$  与  $v_{p\min}$  之间关系可根据一维平板运动近似解析方程经变形后由下式表示为

$$R_{\min} \approx 4.1 \frac{v_d v_{p\min}}{(1.2 V_d - v_{p\min})^2}, \quad (2)$$

式中:  $v_d$  为炸药爆速。根据 Deribas 等人提出的再入射流下临界角经验公式得到

$$v_{p\min} = K \left( \frac{H_V}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中:  $K$  为经验常数, 取值在 0.6~1.2 之间, 当金属材料结合表面处理很好时可取下限 0.6;  $H_V$  为材料维氏硬度值;  $\rho$  为材料密度。

由于式(2)、(3)均为经验公式, 因此, 由式(1)计算的下限药量  $C_{\min}$  也是一个经验值。

## 1.3 试验药量与计算下限药量的对比

### 1.3.1 试验材料及最小计算药量

试验材料为 16 组 T10/Q235 爆炸焊接复合板, T10 厚 7mm。表 1 所示为二种材料的力学性能。

试验采用自配低爆速硝胺炸药 ( $v_d = 2100 \text{ m/s}$ )<sup>[4]</sup>, 板表面经砂轮打磨(常数  $k$  取 0.6), 由此根据式(1)、(2)、(3)计算出:  $C_{\min} \approx 3.0 (\text{g/cm}^2)$ 。

表 1 T10、Q235 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of T10 and Q235

Material	$\sigma_b$ /MPa	$\alpha$ (%)	Hardness(MPa)		$\rho$ / (Tm <sup>-3</sup> )
			HB	HV	
T10	583	22.1	1930	2087	7.85
Q235	<460	21~27	1100	1166	

### 1.3.2 实际试验药量

首先依据传统经验公式计算的下限药量对 3 组 T10/Q235 复合板进行爆炸焊接, 经超声波探伤检验, 焊合率均达到 98% 以上。在此基础上, 为寻求成功爆炸焊接的最少装药量, 在随后的 13 组复合板爆炸焊接中, 实际装药量由 3.0 逐渐减少至 2.4, 其结果不仅复合板的界面结合力学性能满足工程使用要求, 而且复合板的整体变形也大大减小。图 2 为第 16 组复合板爆炸焊接后所截取试块的界面抗剪切强度测试外貌(抗剪强度为 405 MPa), 表 2 所示为 16 组复合板的实际爆炸焊接药量情况。

试验结果表明, 在满足成功爆炸焊接的前提下, 实际最小装药量比经验公式计算的下限药量最大减少了 20%。

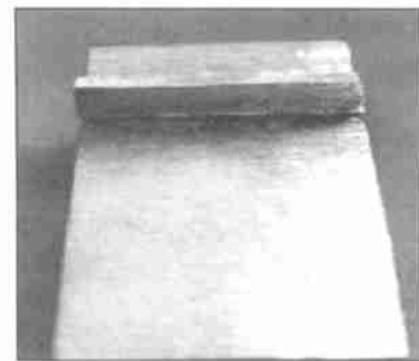


图 2 复合板抗剪切试样外貌

Fig. 2 Configuration of sample of composite sheet after shearing test

表 2 T10/Q235 复合板爆炸焊接药量

Table 2 Dynamite quantity on explosive welding of T10/Q235 composite sheet

Sequence number	Size of composite sheet z/mm <sup>3</sup>	Dynamite c/(g·cm <sup>-2</sup> ) Calculating value	Testing value	Testing result
1	1000×650×25	3.0	3.0	
2	823×650×25	3.0	3.0	
3	1250×823×25	3.0	3.0	
4	1000×650×25	3.0	2.9	
5	820×650×25	3.0	2.9	
6	1250×820×25	3.0	2.8	
7	1250×820×25	3.0	2.8	Welding rate
8	1250×820×25	3.0	2.7	are exceeding
9	1700×700×25	3.0	2.7	98% and no
10	1700×850×25	3.0	2.6	any crack
11	1250×1000×25	3.0	2.6	
12	1250×1000×25	3.0	2.5	
13	1503×802×25	3.0	2.5	
14	1500×800×25	3.0	2.5	
15	1700×850×25	3.0	2.4	
16	1700×700×25	3.0	2.4	

## 2 最佳焊接药量窗口

### 2.1 经验药量计算公式的系数修正

根据试验得到的良好焊接质量效果, 为降低生产成本、提高复合板的焊接质量和减小爆炸效应对环境的不利影响, 依据爆炸焊接实际最少装药量比经验公式计算的下限药量还减少了 20% 左右这一试验结果, 对焊接药量经验计算公式进行系数修正, 其修正式为

$$C' = (0.8 \sim 0.85) C. \quad (4)$$

式中系数可根据复合板的面积大小来选取, 当复合

板尺寸较小时, 系数取 0.85, 复合板尺寸较大时, 系数取 0.8。

## 2.2 修正式的实际生产检验

利用修正式(4)对 7 块 3Cr13/Q235、2 块 1Cr18Ni9Ti/铸钢、75 块硬质 62 黄铜/Q235 复合板的爆炸焊接药量(2#岩石硝胺炸药)进行实际生产检验。检验中:除 1Cr18Ni9Ti 复板厚为 12 mm 外,其它均为 6 mm;复合板的面积小于 0.5 m<sup>2</sup> 时,系数取 0.85, 大于 0.5 m<sup>2</sup> 时系数取 0.8。其结果,三类爆炸焊接复合板的焊合率均稳定在 98% 以上,表 3 为三类覆板的力学性能,表 4、表 5、表 6 为复合板尺

表 3 复板材料的力学性能<sup>[6]</sup>

Table 3 Mechanical properties of cladding plate

Material	Density $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	hardness HV (MPa)
3Cr13	7.80	2126
1Cr18Ni9Ti	7.90	1548
Hardness 62 brass	8.8	1760

表 4 1Cr18Ni9Ti/铸钢爆炸焊接药量

Table 4 Dynamite quantity on explosive welding of 1Cr18Ni9Ti/ cast steel

Sequence number	Size of composite sheet Z/mm	Number (piece)	C / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	C' / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
1	1410×990×122	1	4.7	3.85
2	1233×880×122	1		

表 5 3Cr13/Q235 爆炸焊接药量

Table 5 Dynamite quantity on explosive welding of 3Cr13/Q235

Sequence number	Size of composite sheet Z/mm	Number (piece)	C / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	C' / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
1	1572×752×46	3	2.6	2.1
2	1410×750×46	4		

表 6 硬质 62 黄铜/Q235 爆炸焊接药量

Table 6 Dynamite quantity on explosive welding of hardness 62 brass/ Q235

Sequence number	Size of composite sheet Z/mm	Number (piece)	C / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	C' / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
1	1160×690×31	18	2.6	2.1
2	1160×690×26	18	2.6	2.1
3	835×690×31	6	2.6	2.1
4	835×690×26	6	2.6	2.1
5	760×600×31	12	2.6	2.2
6	760×600×26	12	2.6	2.2
7	1045×890×26	3	2.6	2.1

寸及焊接药量。由此表明,修正式(4)对不同金属材料复合板的爆炸焊接具有普遍适用性。

另外,由于药量  $C'$  是根据传统可焊性窗口下限计算药量  $C$  基础上得到的,且经试验验证不仅取得了良好的爆炸焊接质量效果,而且还可大大减小爆炸效应对环境的危害,因此,当使用硝胺类炸药时,将式(4)定义为“最佳焊接药量窗口”。

## 3 结 论

试验结果表明,由传统经验公式计算出的下限药量并不是成功爆炸焊接所需的最小药量。

在实际的爆炸焊接中,尽管要获得真正意义上的下限焊接药量很难实现,但根据自配低爆速硝胺炸药和 2#岩石硝胺炸药对 T10/Q235、3Cr13/Q235、1Cr18Ni9Ti/铸钢、62 硬质黄铜/Q235 复合板的爆炸焊接生产检验结果,实际焊接药量不仅比传统可焊性窗口下限经验公式计算的药量还减少了 20% 左右,而且复合板的焊接质量也完全满足工程使用的要求,由此得出硝胺类炸药的焊接药量修正式  $C' = (0.8 \sim 0.85)C$ 。由于修正式确定的焊接药量变化范围很小,且更接近于实际爆炸焊接的下限药量,因此又将修正式定义为“最佳焊接药量窗口”。

## 参考文献:

- [1] Robert Hay D, Gerald Gagnon. Weldability windows and selection of explosive welding process parameters[ A]. The 8th International Conference on High Energy Rate Fabrication SAN ANTONIO[ C], Texas, 1984.
- [2] Wang Yao-hua. Foundation for science and technology of engineering material [ M]. Published by Engineering Institute of Engineer CORIS PIA First published set. 2001.
- [3] 陆 明. 工具钢与普碳钢复合板爆炸焊接新工艺及机理研究 [ D]. 南京:南京解放军理工大学, 2001.
- [4] 陆 明, 王耀华, 尤 峻. 工具钢/Q235 复合板爆炸焊接试验及性能研究[ J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 47~50.
- [5] 邵丙璜, 张 凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[ M]. 大连:大连工学院出版, 1987.
- [6] 陈明全. 金属材料及强化技术[ M]. 上海:同济大学出版社, 1992.

**作者简介:** 陆 明, 男, 1958 年 6 月出生, 副教授, 博士。主要研究方向为爆炸焊接加工技术及内燃机理论与技术。发表论文 26 篇。

**Email:**