

SUS304 不锈钢/Q345R 碳钢爆炸焊接 工艺参数研究*

唐文龙^① 饶国宁^① 周景蓉^② 陈寿军^② 彭金华^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②南京三邦金属复合材料有限公司(江苏南京,211155)

[摘 要] 针对实际生产中在爆炸焊接窗口内取值时因为所取参数不同而导致生产的复合板结合强度差异较大这一现状,通过对 SUS304 不锈钢/Q345R 碳钢爆炸焊接窗口内不同工艺条件得到的复合板进行剪切强度测试及金相分析,得到界面结合强度与界面波形的关系以及两者随工艺参数的变化规律,找到窗口内最佳的工艺参数,以提高爆炸焊接复合板质量以及生产效益。研究表明:界面波形的波长和振幅随着装药量的增加而增大,随基复板间距的增加先增大后减小。爆炸焊接窗口内最佳工艺参数取值范围与复板厚度有关。复板为薄板(3 mm)时,取得最佳结合强度时界面波形波长为 1250 μm 左右,振幅为 200 μm 左右,对应的最佳装药质量比为 1.02,基复板间距为 8 mm,取值比理论最佳值偏高;复板为厚板(6 mm)时,取得最佳结合强度时界面波形波长为 900 μm 左右,振幅为 100 μm 左右,对应的最佳装药质量比为 0.45,基复板间距为 14 mm,取值靠近下限。当界面波长与振幅相同时,复板为薄板的结合强度要高于厚板。

[关键词] 爆炸焊接 金相分析 界面波形

[分类号] TG456.6

引言

爆炸焊接利用炸药的爆轰使得复板和基板之间产生高速倾斜碰撞,在此过程中,碰撞界面上产生剧烈的塑性变形,从而达到焊接的效果。这种方法的主要工业应用潜力在于它能够将异种金属焊在一起,而其中有许多异种金属是无法用其他焊接方法焊接的。同时,爆炸复合后可以进行退火处理,从而可进一步提高焊接质量^[1]。

虽然目前爆炸焊接已大量运用到实际生产中,但厂家只是在爆炸焊接窗口内取值以满足生产要求,对窗口内的众多合理参数的取舍缺乏系统的研究,这就使得不同厂家生产出的复合板虽然都符合要求,但是结合强度却有着较大的差异。本文以 SUS304 不锈钢/Q345R 碳钢爆炸复合板为例,对爆炸焊接窗口内的不同取值所得到的复合板进行系统的研究,找到结合界面随着工艺取值的变化规律,据此为参考,可以帮助对爆炸焊接参数进行取舍,获得

最佳的工艺。

爆炸焊接的结合区一般分为 3 类:直接结合、均匀连续的熔化层结合、波状结合。其中波状结合的结合强度最高。爆炸焊接时爆炸复合界面波形参数受焊接材料与爆炸焊接工艺等因素的影响^[2]。利用金相分析可以清晰地观察到结合界面的波形分布,将不同工艺所得到的波形与相对应的力学性能测试结果对比,可以得到结合强度与界面波形的关系,从而提高爆炸焊接质量。

1 实验材料与方法

实验采用的复板 SUS304 不锈钢尺寸:400mm × 300mm × 3mm,400mm × 300mm × 6mm,密度为 7930 kg/m³;基板低碳合金钢 Q345R 尺寸:360mm × 260mm × 26mm,密度为 7850 kg/m³。表 1 是复板和基板的化学组成。

根据相关文献[3-8]的计算公式得到 SUS304 不锈钢与 Q345R 碳钢的爆炸焊接窗口参数,见表 2。

表 1 两种材料的化学组成

元素								ω/%
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Alt
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.05	≤0.03	18.00 ~ 20.00	8.00 ~ 10.50	—
Q345R	≤0.20	≤0.55	1.20 ~ 1.60	≤0.025	≤0.015	—	—	≤0.020

* 收稿日期:2011-05-26
作者简介:唐文龙(1988 ~),男,硕士,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:tang_wl@163.com
通讯作者:饶国宁(1978 ~),男,博士,讲师,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:njraoguoning@163.com

表 2 SUS304/Q345R 理论爆炸焊接窗口参数

参数	计 算 公 式	复板为 3mm 时计算值	复板为 6mm 时计算值
炸药爆速上限 ^[3] / (m · s ⁻¹)	$V_c < \min(C_f, C_b)$	4580	4580
炸药爆速下限 ^[3] / (m · s ⁻¹)	$V_c = \sqrt{\frac{2Re(H_{vf} + H_{vb})}{\rho_f + \rho_b}}$	2234	2234
最佳炸药爆速 ^[3] / (m · s ⁻¹)	$V_c = V_{cmin} + 100(2000 < V_c < 2500)$	2334	2334
复板碰撞 速度上限 ^[4,6] / (m · s ⁻¹)	$V_{pmax} = 2 \times \sqrt[4]{\pi} \sqrt{(\rho_f C_{pf} \sqrt{\alpha_f} + \rho_b C_{pb} \sqrt{\alpha_b})} \times$ $\sqrt{T_{mpmin} \frac{C_f^2 C_b^2}{N(C_f^2 + C_b^2)} \sqrt[4]{t_{min}}} \sqrt{\frac{1}{\rho_f h_f} + \frac{1}{\rho_b h_b}}$	779	690
复板碰撞 速度下限 ^[5,6] / (m · s ⁻¹)	$P_{min} = \max\left(\frac{\rho_f(C_f + 0.3\lambda_f \sqrt{\frac{H_{vf}}{\rho_f}})0.6 \sqrt{\frac{H_{vf}}{\rho_f}}}{2}, \frac{\rho_b(C_b + 0.3\lambda_b \sqrt{\frac{H_{vb}}{\rho_b}})0.6 \sqrt{\frac{H_{vb}}{\rho_b}}}{2}\right)$ $V_{pmin} = \frac{\frac{\sqrt{1 + 4\lambda_f P_{min}/(\rho_f C_{of}^2)} - 1}{\lambda_f} C_{of} + \frac{\sqrt{1 + 4\lambda_b P_{min}/(\rho_b C_{ob}^2)} - 1}{\lambda_b} C_{ob}}{2}$	304	304
最佳复板碰撞速 度 ^[3] /(m · s ⁻¹)	$V_p = V_{pmin} + 0.1(V_{pmax} - V_{pmin})$	352	343
最大装药质量比	$R = \frac{27}{32} \left[\left(\frac{1.2V_d + V_{pmax}}{1.2V_d - V_{pmax}} \right)^2 - 1 \right]$	1.76	1.43
最小装药质量比	$R = \frac{27}{32} \left[\left(\frac{1.2V_d + V_{pmin}}{1.2V_d - V_{pmin}} \right)^2 - 1 \right]$	0.47	0.47
最佳装药质量比 ^[7]	$R = \frac{27}{32} \left[\left(\frac{1.2V_d + V_p}{1.2V_d - V_p} \right)^2 - 1 \right]$	0.56	0.54
最佳间距范围 ^[8] /mm	$3k\delta R < S < 0.2(\delta + h)$	4 ~ 11	7 ~ 20

注: C_f 、 C_b 分别为复板和基板的体积声速,依次为 4580、4595m/s; R_e 为雷诺数,取 10.6; h_f 、 h_b 分别为复板和基板厚度,依次为 3mm(6mm)、26mm; ρ_f 、 ρ_b 分别为复板和基板的密度,依次为 7930、7850 kg/m³; H_{vf} 、 H_{vb} 分别为复板和基板的维氏硬度,依次为 1960、1754Pa; N 为理论上限指数,取 0.039; C_{pf} 、 C_{pb} 分别为复板和基板的比热,依次为 502、480 J/(kg · K); T_{mpmin} 分别为两种材料熔点的较低值,取 1440K; α_f 、 α_b 分别为复板和基板的热扩散率,依次为 3.05×10^{-6} 、 1.27×10^{-5} m²/s; t_{min} 为反射拉伸波到达焊接界面的最短时间, $t_{min} = \min(2 h_f/C_f, 2 h_b/C_b)$; λ_f 、 λ_b 分别为复板和基板中爆轰波传播线性系数,依次为 1.49、0.454; V_d 为炸药爆速,本实验为 2300m/s。

低爆速工业炸药设计的基本原理是在爆炸组分中加入与其相容的稀释剂^[9]。根据计算得到工艺参数。采用的炸药为膨化硝铵炸药和食盐混合制成,爆速约为 2300m/s,密度约为 0.85g/cm³,设计实验参数如表 3。

2 实验结果与分析

采用短边中心点起爆的方式,由表 3 中的 10 组工艺得到的复合板经超声波探伤仪检测,都 100% 贴合,说明实验采用的参数是合理可行的。复板比基板多出的余边在爆炸焊接过程中被干净利落地切除,没有产生边界效应。经过热处理后在每块复合板的中心位置取样,测定结合界面剪切强度,并对复合板结合界面进行金相分析,剪切强度测试结果如

表 3 SUS304/Q345R 爆炸复合实验工艺参数

工艺编号	复板厚度/mm	药高/mm	基复板间距/mm
1	3	28	6
2	3	28	8
3	3	28	10
4	3	20	6
5	3	20	8
6	3	20	10
7	3	15	8
8	6	25	14
9	6	35	14
10	6	55	14

注:当复板为 6mm 时,为防止多出的余边无法被切割掉,在余边处切开“V”型槽口。

表 4 所示。

表 4 不同工艺下 SUS304/Q345R 爆炸复合板
结合面剪切强度测试

工艺编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
剪切强度 /MPa	429	434	422	383	392	383	377	446	422	404

1)图中标尺的精度为 10μm(下同)。2 号、5 号
和 7 号所采用的基复板间距相同,而装药高度呈递
减趋势。由图 1 可以看出,随着装药高度的递减,界
面的结合波形的振幅和波长都发生递减,2 号的波
长约为 1250μm,振幅约为 200μm,5 号波长约为
700μm,振幅约为 100μm,7 号波长约为 450μm,振
幅约为 55μm。很明显,装药高度的变化对于界面
波长的影响比较大,对于振幅的影响则相对较小。
从界面波形的变化规律中可以推断:当间距一定时,
随着装药高度的减小,爆轰产物对复板的做功能力
也减小,复板的飞行速度减小。当复板与基板产生
碰撞时,由于动能的减小,导致界面变形程度的减
弱。结合剪切强度数值可以看出,随着波长和振幅
的减小,剪切强度值也相应地减小,说明在一定变化范

围内,界面的结合强度会随着波长和振幅的递增而
增强。当波长为 1250μm,振幅为 200μm 时,结合强
度很高,即对于厚度为 3mm 的 SUS304 复层,装药高
度的取值比理论最佳取值偏高时,取得的界面结合
强度较高,而小波及微波状结合所获得基复板的结
合强度并不好。

2)1 号、2 号、3 号的装药高度是一定的,基复板
间距呈递增趋势。如图 2 所示,1 号的波长约为
900μm,振幅约为 125μm,2 号的波长约为 1250μm,
振幅约为 200μm,3 号波长约为 900μm,振幅约为
150μm;4 号、5 号和 6 号工艺的变化规律和 1 号、2
号、3 号相同,即装药高度一定,间距呈递增趋势。
如图 3 所示,4 号波长约为 550μm,振幅约为
100μm,5 号波长约为 700μm,振幅约为 100μm,6 号
波长约为 600μm,振幅约为 100μm;1 号的剪切强度
为 429MPa,2 号的剪切强度为 434MPa,3 号的剪切
强度为 422MPa,4 号与 6 号的剪切强度都为
383MPa,5 号的剪切强度为 392MPa。当装药高度减
小时,在相同装药量下间距对于波长影响会变小,而
对于振幅的影响则更小,甚至几乎不产生影响。结

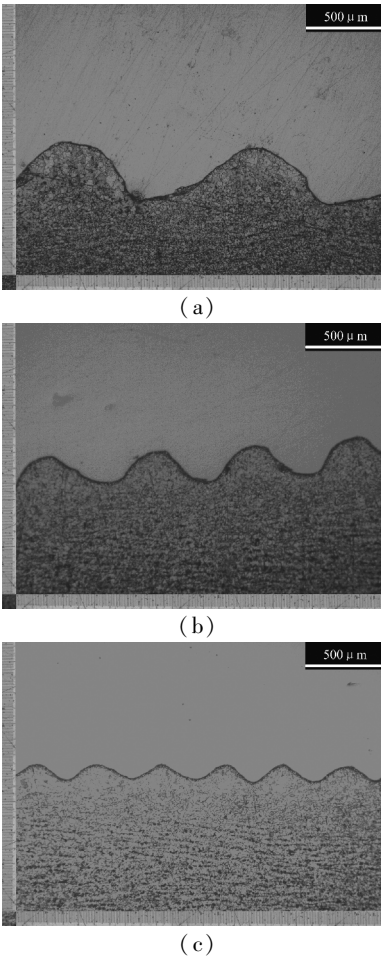


图 1 依次为 2 号、5 号、7 号工艺所得
复合板结合界面波形

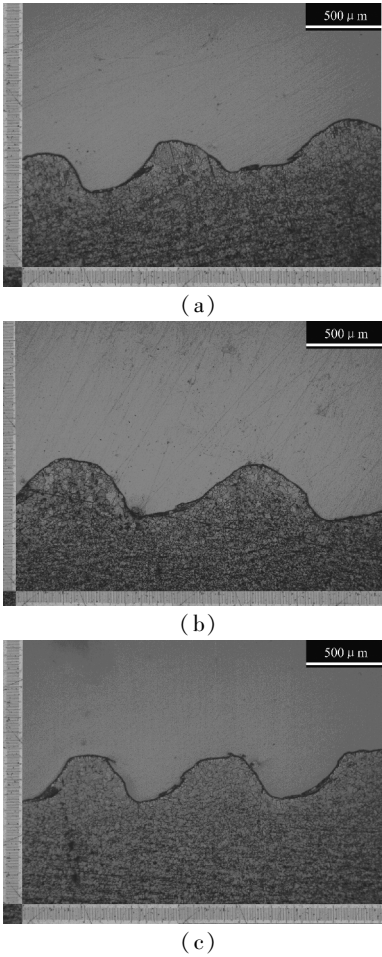


图 2 依次为 1 号、2 号、3 号工艺所得
复合板结合界面波形

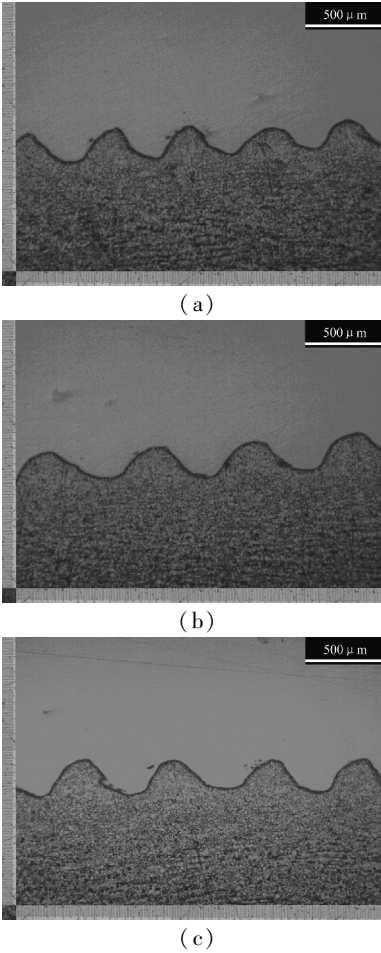


图 3 依次为 4 号、5 号、6 号工艺所得复合板结合界面波形

合界面波形与剪切强度可知,当基板和复板间距为 10mm 时所得到的界面波长反而比间距为 8mm 时得到的界面波长小,结合强度也较低,这说明复板在飞行过程中会先经历一个加速过程,当到达一定速度时则会减速。当间距为 8mm 时获得良好的结合强度,而装药量的改变对于这一合理间距的取值影响很小。

3) 8 号、9 号和 10 号所采用的复板厚度为 6mm,基复板间距为 14mm,所采用的药高分别为 25mm、35mm 和 55mm 递增。如图 4 所示,界面波形参数为:8 号波长约为 900 μm ,振幅约为 100 μm ;9 号波长约为 1300 μm ,振幅约为 200 μm ;10 号波长约为 1900 μm ,振幅约为 300 μm 。随着结合界面波长和振幅的增加,界面的结合强度呈现递减趋势,说明结合强度并不是一味地随波长和振幅的递增而递增的,当增加到一定程度时反而会降低。这主要是由于当装药量过大时,复板动能过大,当复板与基板高速碰撞之后界面会处于过度熔化的状态,当从自由界面反射回的拉伸波到达界面时,如果界面仍然处于熔化状态,则拉伸波就会一定程度上造成结合界

面的开裂从而影响其结合强度。因此,药高的选择尤为重要,太大或太小都会使结合强度降低。对于厚度为 6mm 的 SUS304 复层来说,靠近装药量下限的取值比较合理,而实际工业生产中针对较厚的板材采用较高装药质量比,这一做法显然是有问题的。

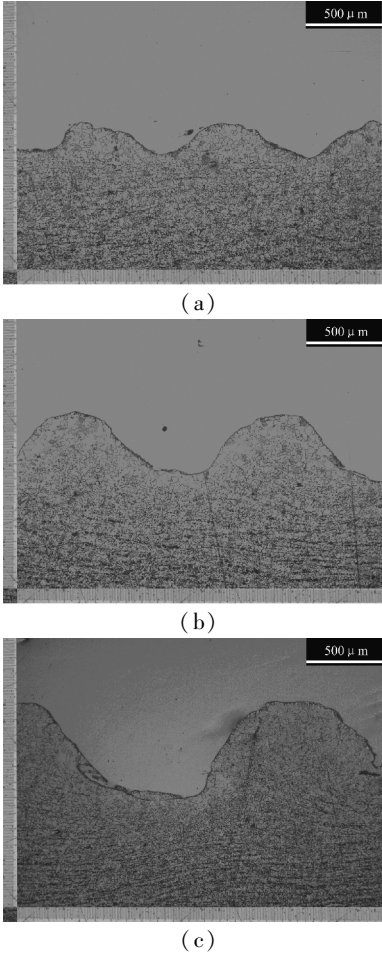


图 4 依次为 8 号、9 号、10 号工艺所得复合板结合界面波形

4) 结合 1 号、3 号和 8 号的金相图片可以看出,三者界面波波长相同,而振幅不同。1 号的剪切强度为 429MPa,3 号的剪切强度为 422MPa,8 号的剪切强度为 446MPa;1 号的振幅为 125 μm ,3 号的振幅为 150 μm ,8 号振幅为 100 μm 。由此可见,在一定范围内,当波长相同时,界面波的振幅越小,则结合强度越高。这可能是因为当振幅较大时,复板和基板受到的扰动也较大,使结合界面产生较多的缝隙和裂痕,从而使得结合强度降低;另一方面,较大的振幅说明碰撞时产生的能量也较大,会使得界面过度熔化,影响结合强度。

5) 结合 2 号和 9 号的波形参数和结合强度可知,当复板厚度不同时,即使波长和振幅相同,得到的界面结合强度也是不同的,复板为薄板时所对应的结合强度要高于厚板。

3 结 论

1) 在间距一定的情况下,界面波形的波长和振幅会随着装药量的增加而增加,波长的增加幅度比振幅的增加幅度要大。在一定范围内,界面的结合强度会随着波长和振幅的增加而增加,到达一定值后会随着波长和振幅的增加而减小。当复板(SUS304)的厚度为 3mm 时装药量取值应比理论计算最佳值偏高;当复板(SUS304)的厚度为 6mm 时装药量取值应靠近理论计算下限值。

2) 在装药量一定的情况下,间距增加时,界面波形的波长和振幅都会经历先增大再减小的过程,波长的变化幅度要比振幅的变化幅度大。当药量减小到一定程度时,相同的装药量时,界面波形的振幅不再受间距的影响。对于复板(SUS304)厚度为 3mm 的情况,8mm 是较好的取值,装药量对于间距取值影响不大。

3) 相同的界面波长和振幅所对应的结合强度因复板厚度而异,复板为薄板(3mm)时所对应的结合强度要高于厚板(6mm)。

4) 在一定范围内,当界面波的波长相同时,振幅越小,界面的结合强度越高。

参 考 文 献

[1] Trykov Yu. P., Trudov A. F., Stepanishchev I. B. Structure and Properties of Explosion-welded Joints of Carbon Steels[J]. Met. Sci. Heat Treat., 2002, 44(11-12): 524-528.

[2] 王建民,朱锡,刘润泉. 爆炸焊接界面波形参数的影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(6): 636-639.

[3] 郑哲敏,杨振声. 爆炸加工[M]. 北京:国防工业出版社, 1981: 400-403.

[4] 李晓杰. 双金属爆炸焊接上限[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(2): 134-138.

[5] 李晓杰,杨文彬,奚进一,等. 双金属爆炸焊接下限[J]. 爆破器材, 1999, 28(3): 22-26.

[6] 赵铮. 双金属复合板爆炸焊接窗口研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(5): 1126-1129.

[7] 邵丙璜,张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连:大连工学院出版社, 1987: 16.

[8] 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: 174-175.

[9] 陆明. 低爆速膨化硝酸铵炸药及其安全性研究[J]. 爆破器材, 2002, 31(2): 1-3.

Study on the Parameters in SUS304 Stainless Steel/Q345R Carbon Steel Explosive Welding Process

TANG Wenlong^①, RAO Guoning^①, ZHOU Jingrong^②, CHEN Shoujun^②, PENG Jinhua^①

① School of Chemical Engineering; Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Nanjing Sanbom Metal Compound Materials Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 211155)

[ABSTRACT] In practice the situation of different parameters in the explosive welding window gives rise to a significant difference of bonding strength. The shear strength test and the metallographic analysis of clad plate were obtained by different processes of SUS304 stainless steel/Q345R carbon steel explosive welding window. As results, the relationship between interfacial strength and waveform, and the mechanism of the above two changing with the process parameters can be deduced as well as the best process of stainless steel/carbon steel explosive welding. It shows that wavelength and amplitude increase with the increase of charge quantity, and increase at first and then decrease with the increase of the distance between flyer plate and base plate. The best process parameters in the explosive welding window are dependent on the thickness of flyer plate. The wavelength is about 1250μm and amplitude is about 200μm, resulting in the best bonding strength when the flyer plate is thin (3mm). The corresponding mass ratio is 1.02, and the distance between flyer plate and base plate is 8mm, which is higher than the theoretical best parameters. The wavelength is about 900μm and amplitude is about 100μm, which results in the best bonding strength when the flyer plate is thick (6mm). The corresponding mass ratio is 0.45, and distance between flyer plate and base plate is 14mm, which is close to lower limit. The bonding strength of thin flyer plate is higher than that of thick flyer plate, when their wavelength and amplitude are same.

[KEY WORDS] explosive welding, metallographic analysis, interfacial waveform

声 明: 1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。