

文章编号: 1006-7051(2025)02-0111-08

TA2/316L 复合棒爆炸焊接工艺参数设计及试验

韩 刚, 蒋晓博, 翟伟国

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 为了实现 TA2/316L 复合棒界面的牢固结合, 参照爆炸焊接基本理论对钛和不锈钢进行焊接窗口计算, 并结合实践经验进行爆炸焊接工艺参数的优化, 然后采用优化的工艺参数进行了复合棒的试制。试验结果表明: 采用优化工艺制备的 TA2/316L 复合棒结合率为 100%, 拉剪强度 ≥ 300 MPa, 气密性 $\leq 1.0 \times 10^{-12}$ Pa $\cdot$ m 3 $\cdot$ s $^{-1}$ (100% 氦气、压差 0.1 MPa)。金相观察结果显示, 复合棒结合界面呈现不连续非均匀的波状结合形貌, 基复材产生明显爆炸加工硬化现象; 爆炸焊接外爆法制备细径复合棒, 其中心易产生马赫裂纹。通过实验检测, 优选出更佳的爆炸焊接工艺, 满足了工程应用的需要。

关键词: 爆炸焊接; 焊接窗口; 工艺参数; 复合棒

中图分类号: TJ55; TD235 **文献标志码:** A **doi:** 10.19931/j. EB. 20230118

Technological parameter design and experimental study on explosive welding of TA2/316L clad bar

HAN Gang, JIANG Xiao-bo, ZHAI Wei-guo

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: In order to achieve the TA2/316L composite rod interface firmly combined, according to the basic theory of explosive welding, the explosive welding window of titanium and stainless steel is calculated, and the process parameters of explosive welding are optimized base on practical experience, and then the clad bar is trial produced with the optimized process parameters. The test results show that the clad bar prepared by the optimized process is 100%, the tensile shear strength is not less 300 MPa, and their tightness is not more than 1.0×10^{-12} Pa $\cdot$ m 3 $\cdot$ s $^{-1}$ (100% helium, differential pressure 0.1 MPa). The metallographic observation results show that the bonding interface of the clad bar presents discontinuous and uneven wavy bonding morphology, and the base material and the covering material have obvious explosive work hardening phenomenon. Mach crack is easy to occur in the center of the thin diameter clad bar prepared by explosive welding and external explosion. Through experimental testing, the better explosive welding process is optimized, which meets the needs of engineering applications.

Key words: explosive welding; welding window; technological parameter; clad bar

收稿日期: 2024-07-13

基金项目: 中国船舶集团有限公司第七二五研究所科技创新基金资助项目(LW211903)

作者简介: 韩 刚(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事爆炸焊接及金属层状复合材料成型与加工方面的研究。E-mail: hangang725@163.com

引用本文: 韩 刚, 蒋晓博, 翟伟国. TA2/316L 复合棒爆炸焊接工艺参数设计及试验[J]. 工程爆破, 2025, 31(2): 111-118.

HAN Gang, JIANG Xiao-bo, ZHAI Wei-guo. Technological parameter design and experimental study on explosive welding of TA2/316L clad bar[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2): 111-118.

爆炸焊接主要用于生产金属层状复合材料,如复合板、复合棒、复合管,包含了几十种金属组合,其以组合形式多、结合强度高等优势在化工、医药、航空、航天、国防、核工业等领域的应用越来越广泛^[1-9]。在理论计算的合理动态工艺参数窗口内,选择合适的静态工艺参数进行爆炸焊接,可实现钛管与不锈钢棒界面牢固的冶金结合。因此,通过制备新型钛/不锈钢复合棒样件拟应用于核电某传感器设备,作为钛与不锈钢异种金属连接关键部件,制备的新型钛/不锈钢复合棒与文献^[10]中钛/不锈钢复合棒,除所起的异种金属连接作用相同外,其在外层与内层材质组合、厚度组合、尺寸大小、检测方法、使用领域等均有所不同。该新型的钛/不锈钢复合棒,是以钛管为复层,不锈钢棒为基层,通过外爆法实现钛管-不锈钢棒的爆炸焊接。

由于目前的爆炸焊接理论主要是针对板的爆炸复合,针对管-棒复合参数的确定,首先根据爆炸焊接理论公式计算出相同条件下平板复合的爆炸焊接窗口,然后在焊接窗口内选定较为合理的动态工艺参数;其次通过经验公式计算并结合 TA2/316L 管棒爆炸焊接相关特性优选出爆炸焊接静态工艺参数,最后进行试制。通过“理论计算-参数确定-样件制备-性能评价”流程旨在探索爆炸焊接理论指导实践经验的工艺设计模式,为爆炸复合棒的产品开发和工艺试验提供参考指导。

1 TA2/316L 爆炸焊接参数理论计算

爆炸焊接专用炸药起爆后,爆轰波产生的高压驱使复板以 v_p 的速度弯折飞行碰撞至基板,在碰撞点 S 形成一定的碰撞角 β ,碰撞点 S 移动速度 v_c 称作爆炸焊接速度,爆速为 v_d ,在平行安装的条件下 $v_c = v_d$ 。对于任意的 2 种金属材料组合,产生爆炸焊接条件就是 β 、 v_p 和 v_c 达到固定的范围,这 3 个参数存在如式(1)所示的参数关系^[3],任意 2 个参数在平面坐标系中形成的几何窗口,称为“爆炸焊接窗口”。滑移爆轰驱动下飞板的运动姿态^[3]如图 1 所示,以 v_p 和 v_c 参数绘制的爆炸焊接窗口与理论边界限^[3]如图 2 所示。

$$v_p = 2v_c \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

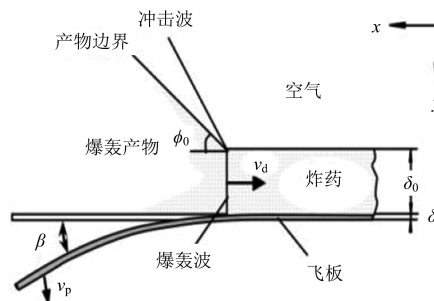


图 1 滑移爆轰驱动下飞板的运动姿态

Fig. 1 Motion appearance of flyer plate driven by sliding detonation

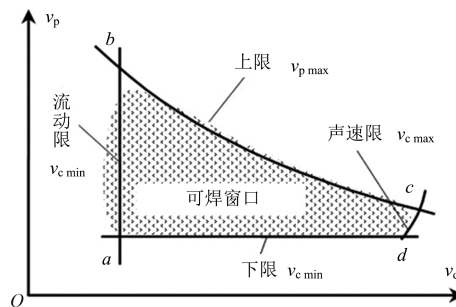


图 2 爆炸焊接窗口与理论边界限

Fig. 2 Explosive welding parameter window and theoretical boundary limits

1.1 TA2/316L 爆炸焊接动态工艺参数计算

爆炸焊接窗口在二维坐标系内由 4 条边界线组成,即:①ab 线(流动限), v_c 必须超过某一特定的临界值,从而保证基复板在焊接时能够产生射流;②cd 线(声速限), v_c 必须处于材料的亚声速状态;③ad 线(焊接下限),是基、复板在碰撞点形成所需碰撞速度的下限值,保证爆炸焊接过程微射流的形成;④bc 线(焊接上限),是限制基、复板碰撞时能量不至于过大造成的界面软化或熔化的临界条件。

1.1.1 流动限 v_{cmin}

$$v_{cmin} = \left(\frac{20R_{mmax}}{\rho_{min}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: v_{cmin} 为爆炸焊接流动限; R_{mmax} 为 2 种材料的强度较大值; ρ_{min} 为 2 种材料的密度较小值。

试验测试,TA2 和 316L 双金属 R_{mmax} 为 593 MPa, ρ_{min} 为 4 510 kg/m³,代入式(2)计算 v_{cmin} 为 1 622 m/s。

1.1.2 声速限 v_{cmax}

$$v_{cmax} = \min(v_{01}, v_{02}) \quad (3)$$

式中: v_{cmax} 为爆炸焊接声速限; v_{01} 、 v_{02} 为基复板材料体波声速。TA2 的体波声速为 4 695 m/s, 316L 的体波声速为 5 920 m/s,代入式(3)计算 v_{cmax} 为 4 695 m/s。

1.1.3 爆炸焊接下限 v_{pmin}

双金属异种材料的爆炸焊接下限计算相对复杂,最早期的 Deribas 提出的同种金属焊接下限计算方法如式(4),近年来李晓杰等^[3-6]总结了前人的经验并进行研究,首先通过式(4)计算出同种金属焊接下限 v_{pmin} ,再以 v_{pmin} 计算出金属界面最小碰撞正压力 P_{min} ,然后考虑异种金属同时产生射流的条件,总结出双金属爆炸焊接下限的计算公式(见式6和式7)。

$$v_{\text{pmin}} = K \left(\frac{HV}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$P_{\text{min}} = \rho \left(C_0 + \frac{\lambda v_{\text{pmin}}}{2} \right) \frac{1}{2} v_{\text{pmin}} \quad (5)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{Bi}} = \max(P_{\text{min1}}, P_{\text{min2}}) \quad (6)$$

$$v_{\text{pmin}}^{\text{Bi}} = \frac{c_{01}}{2\lambda_1} \left[\left(1 + \frac{4\lambda_1 P_{\text{min}}^{\text{Bi}}}{\rho v_{01}^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] + \frac{c_{02}}{2\lambda_2} \left[\left(1 + \frac{4\lambda_2 P_{\text{min}}^{\text{Bi}}}{\rho v_{02}^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (7)$$

式中: v_{pmin} 为同种金属材料爆炸焊接碰撞下限; K 为与基复材表面粗糙度有关的系数, HV 为材料的维氏硬度; P_{min} 为同种金属爆炸焊接产生的最小碰撞压力; ρ 为材料的密度; $P_{\text{min}}^{\text{Bi}}$ 为异种金属爆炸所需的最小碰撞压力值; v_0 为材料的体波声速; λ 为冲击波关系中的有关系数。对应的参数设置和计算结果如表1所示,316L和TA2的双金属爆炸焊接下限 $v_{\text{pmin}}^{\text{Bi}}$ 为 589 m/s。

表1 爆炸焊接下限计算

Table 1 Calculation of lower limit of explosive welding

材料	K	HV/(N·m ⁻²)	v_0 /(m·s ⁻¹)	λ	ρ /(kg·m ⁻³)	焊接下限 $v_{\text{pmin}}^{\text{Bi}}$ /(m·s ⁻¹)
316L	0.7	1 985	5 920	1.490	8 000	589
TA2	0.7	2 100	4 695	1.146	4 510	

1.1.4 爆炸焊接上限 v_{pmax}

爆炸焊接时,当复材飞行时携带的动能在碰撞时消耗在焊接界面上的能量过大,会引起界面的熔化,引发“过熔”失效现象,因此需确定碰撞速度的临界值,称为爆炸焊接上限,计算为^[7]

$$v_{\text{pmax}} = \frac{1}{N_w} \left(\frac{T_m C_0}{v_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda C_p}{\rho h C_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

式中: T_m 为复材金属的熔点,取 1 677 °C; λ 为复材热导率,取 19 W·(m·K)⁻¹; C_p 为热容量,0.126 kJ·(kg·K)⁻¹; h 为复材厚度,2.5 mm; ρ 为复材密度,4 510 kg/m³; N_w 为常数,取 0.1。

从爆炸焊接窗口与理论边界限可知,爆炸焊接上限 v_{pmax} 是与 v_c 相关的一条曲线。根据计算数据,1 622 m/s ≤ v_c ≤ 4 695 m/s,故在计算中采取差值法, v_c 取范围内的不同值,然后根据式(8)计算出不同的 v_{pmax} 值,得出 TA2 和 316L 爆炸焊接上限,计算结果如表2所示。

表2 爆炸焊接上限计算

Table 2 Calculation of upper limit of explosive welding

(m/s)		
序号	v_c	N_{pmax}
1	1 622	589
2	1 929	932
3	2 236	865
4	2 544	811
5	2 851	766
6	3 158	728
7	3 466	728
8	3 773	666
9	4 080	641
10	4 388	618
11	4 695	597

1.1.5 爆炸焊接窗口

根据计算结果,分别将 TA2 和 316L 的流动限、声速限、焊接下限以及焊接上限的数据在平面几何坐标系中进行绘制得出 2 种金属的爆炸焊接窗口与理论边界限(见图3)。

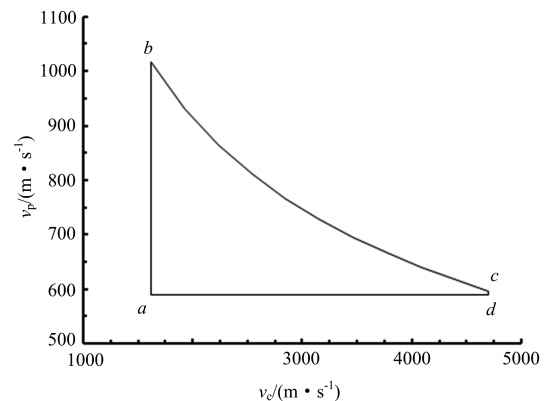


图3 爆炸焊接窗口与理论边界限

Fig. 3 Explosive welding parameter window and theoretical boundary limits

1.2 TA2/316L 双金属爆炸焊接静态工艺参数计算

在爆炸焊接过程中,可焊接窗口所限定的 v_c 和 v_p 称之为爆炸焊接过程中的动态参数。实际在爆炸焊接工艺试验中,操作者更多关注的是爆炸焊接静态工艺参数,主要包括:依据爆速 v_c 进行的炸药型号选择,单位面积的炸药装药量(装药厚度),以及基复材料之间的间隙高度。爆炸焊接静态工艺参数和动态工艺参数存在着必然联系,下文进行 2.5 mm 壁厚 TA2 管工业纯钛和 10 mm 直径 316L 不锈钢棒的爆炸焊接静态工艺参数的计算。

1.2.1 装药量

爆炸焊接的复材飞行碰撞速度 v_p ,爆轰速度 v_d (平行安装时等于爆炸焊接速度 v_c)以及装药量的经验计算公式在行业内已有较多的研究。故参照 deribas 经验式(9)进行装药量的计算,根据式(9)首先计算出参数 R (炸药与复板的质量比),然

后根据式(10)换算成炸药的装药厚度^[7]。

$$\frac{v_p}{v_d} = \frac{4}{[2(k^2 - 1)]^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{(1 + \frac{32R}{27})^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + \frac{32R}{27})^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (9)$$

$$R = \frac{\rho_1 t}{\rho_2 h} \quad (10)$$

式中: k 为炸药多方指数; ρ_1 为炸药密度; ρ_2 为复板密度; t 为炸药装药厚度; h 为复材厚度。

在质量比 R 的计算过程中,需要根据爆炸焊接窗口和实际工艺应用状况进行综合考虑。结合实践经验选择 F55 号粉乳混合炸药,并测试了炸药密度和爆速。基复板的碰撞速度 v_p 根据可焊窗口选择,计算中,考虑到 TA2 管和 316L 不锈钢棒材料差异性比较大,两者爆炸焊接时,应在保持焊接微射流的情况下尽可能使碰撞时具备的能量较小,故进行 4 组工艺参数计算分别取 $v_p = 1.1v_{pmin}$ 。相关参数设置和计算结果如表 3 所示。

表 3 装药厚度计算

Table 3 Charge thickness calculation

v_d /($m \cdot s^{-1}$)	v_{pmin} /($m \cdot s^{-1}$)	修正系数	v_p /($m \cdot s^{-1}$)	k	R	ρ_1 /($kg \cdot m^{-3}$)	ρ_2 /($kg \cdot m^{-3}$)	h /mm	t /mm
1 950	589	1.025	765.7	2.7	2.36	1 050	4 510	2.5	18.9
1 950	589	1.050	765.7	2.7	2.36	1 050	4 510	2.5	19.7
1 950	589	1.075	765.7	2.7	2.77	1 050	4 510	2.5	20.6
1 950	589	1.100	765.7	2.7	2.77	1 050	4 510	2.5	21.5

外爆法的装药量如果以复层外表面积来确定药量,那么在材料组合及复层厚度相同的条件下,外爆法的单位面积药量要比平板爆炸复合大。这是因为爆炸产物的飞散条件变了。在爆炸复合中,产物向空气中飞散时,空气与爆炸产物接触面积比平板爆炸复合时空气与爆炸产物接触的面积要大,即造成了炸药更多的能量飞散到空气中,而更少的能量用于驱动管的运动。这样,要驱动相同面积的复层达到复合的要求,外爆法用的炸药量比平板复合要大。其次,复层在加速运动过程中伴随着收缩变形,爆轰能量一部分消耗于金属管收缩变形的塑性功上。但是针对这些变化因素从理论上定量地修正单位面积药量是困难和麻烦的。通常按药厚相等的原则进行估算^[8],即取外爆法的药厚为相同条件下平板爆炸复合的药厚。

它显然与复层外半径有关,外径越大,单位面积药量越小,当外半径足够大时,单位面积药量与平板爆炸复合相同,其关系式为^[9]

$$t' = t(1 + \frac{t}{D}) \quad (11)$$

式中: t 为相同条件下平板爆炸复合药厚,mm,取 21.5; D 为复材管的外径,mm; t' 为管-棒的爆炸焊接装药厚度,结果如表 4 所示。

表 4 装药厚度

Table 4 Charge thickness

棒号	装药厚度/mm	单位面积装药质量/($kg \cdot m^{-2}$)
A1	33	36.3
A2	35	38.5
A3	37.5	41.25
A4	40	44

注:爆炸焊接炸药密度 1 050 kg/m^3 。

1.2.2 间隙高度

在爆炸焊接理论计算中,安装间隙主要依据经验^[9]进行计算,计算出管-棒的爆炸焊安装间隙高度如表 5 所示。由于外爆法制备复合棒的复层在加速运动中伴随着收缩变形,间隙大是导致失稳的重要原因,小直径外爆法的间隙通常比平板复合小得多,故在管棒复合的间隙高度统一选择 5 mm,将很好地兼顾材料尺寸的统一性并且有利于科研生产短流程化。为避免管-棒爆炸焊接因间隙高度过高而失稳造成爆炸焊接效果不理想,间隙高度要小于板-板爆炸焊接的间隙高度。若采用钢制的堵头和底座进行约束,间隙高度是可以提高的,将有利于环管空间内的排气,从而对管-棒爆炸焊接起到有利的效果。

$$H=0.2(h+t)$$

(12)

式中: H 为间隙高度; h 为复材厚度; t 为装药厚度。

表 5 间隙高度

Table 5 Clearance height

棒号	间隙计算高度/mm	间隙实际高度/mm
A1	7.1	5
A2	7.5	5
A3	8.0	5
A4	8.5	5

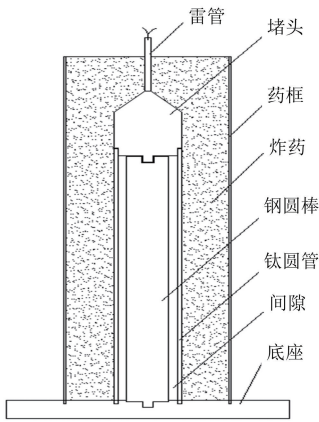
1.2.3 爆炸焊接静态工艺参数

综合上述计算分析,选择 F55 粉乳混合炸药,爆速为 1 950 m/s;然后按照装药厚度和基复材间隙高度设计 4 套爆炸焊接工艺参数(见表 6)并进行试验验证。管-棒爆炸焊接安装及 TA2/316L 爆炸复合棒实物如图 4 所示。

表 6 爆炸焊接工艺参数

Table 6 Explosive welding process paramters

棒号	材料组合	安装方式	炸药类型	起爆点	药厚/mm	间隙高度/mm
A1	TA2+316L	平行	F55	顶端	33	5
A2	TA2+316L	平行	F55	顶端	35	5
A3	TA2+316L	平行	F55	顶端	37.5	5
A4	TA2+316L	平行	F55	顶端	40	5



a) 管-棒爆炸焊接安装 Explosive welding device



b) 复合棒 Clad bar (TA2/316L)

图 4 管-棒爆炸焊接安装与复合棒

Fig. 4 Explosive welding device and cald bar

2 TA2/316L 爆炸复合棒检测

采用表 4 工艺参数进行 2.5 mm 壁厚 TA2 管和 10 mm 直径 316L 棒爆炸复合,编号分别为 A1~A4,其长度均为 400 mm。在起爆端和尾端各去除长度 25 mm 的边界效应区之后,复合棒的结合率达到 100%。

2.1 外径尺寸与气密性实验

沿复合棒轴向特定位置测得外径尺寸变化,结果如表 7 所示,从结果可以看出管-棒的爆炸焊接成复合棒表现出直径增大现象,与板-板的爆炸焊接成复合板总厚度减小不相同。复合棒复层厚度由钛管 2.5 mm 厚度增加到 4 mm,长度无明显变化,通过计算,爆炸复合棒复层钛的体积占钛管的 99.5%以上。末端出现微小的缩径现象,整棒的平均圆度 0.99 以上(见表 8)。板-板的爆炸焊接复材和基材会延长,复合板总厚度减小而变薄;而管-棒的爆炸焊接复材和基材延长不明显,复合

棒直径变大增粗。采用真空负压法对复合棒的钛-不锈钢复合界面进行气密性检测。气密性试样采用拉剪试样。通过工装卡具和真空封泥与氦质谱检漏仪连接测试爆炸复合接头棒焊缝的气密性, A1~A4 复合棒试样在 100% 氦气、压差 0.1 MPa 下的检测结果 $\leq 1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 均符合预设 $\leq 1.0 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的目标值。

表 7 复合棒外径

Table 7 Outre diameter of clad bar

到起爆端距离	(mm)			
	A1 外径	A2 外径	A3 外径	A4 外径
25	17.93	17.85	17.93	18.08
75	18.02	17.97	18.04	18.08
125	17.97	17.96	18.02	17.99
175	18.00	17.86	18.03	17.98
225	18.00	17.88	17.92	17.99
275	17.97	17.81	17.92	17.99
325	17.88	17.83	17.87	17.99
375	17.30	17.65	17.48	17.52

表 8 复合棒圆度

Table 8 Circularity of clad bar

棒号	圆度
A1	0.994
A2	0.992
A3	0.995
A4	0.997

2.2 拉剪实验

对 4 根复合棒分别取样测试了复合界面的抗剪强度, 测试后的试样如图 5 所示。钛-不锈钢复合棒拉剪试验按照 GB/T 228.1 中抗拉强度的测试方法进行, 试样破断时, 测得最大拉力数值后, 按式(13)^[10]计算拉剪强度。



图 5 复合棒拉剪试样

Fig. 5 Tensile strength of clad bar

$$\delta_{br} = \frac{G}{A\pi L} \quad (13)$$

式中: δ_{br} 为拉剪强度, MPa; G 为试样破断最大力,

N ; A 为结合界面长度, $A = 4 \text{ mm}$; π 为圆周率, 取 3.14; D 为测试直径, 取 9.65 mm。

试验结果(见表 9)显示, 复合棒的抗剪强度平均值从小到大的排列为 $A1 < A2 < A3 < A4$ 。

表 9 复合棒拉剪强度

Table 9 Tensile strength of clad bar

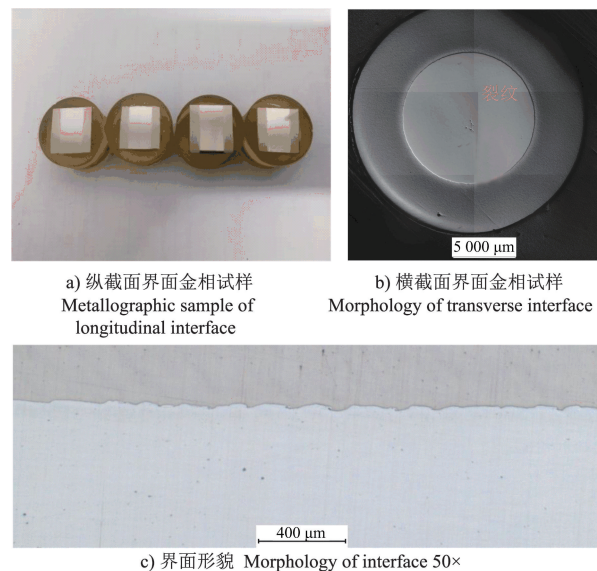
(MPa)

棒号	拉剪强度检测值			平均值
A1	286	307	293	295
A2	322	303	316	314
A3	315	337	321	324
A4	321	349	308	326

在进行基材不锈钢只有 $\varphi 10 \text{ mm}$ 的复合棒拉剪实验时, 试样的形式是经历反复多次计算与实验才定型的, 其中的难点是在试样夹持侧不锈钢棒的直径最大只能加工到 $\varphi 8 \text{ mm}$ 左右, 实验时单位面积拉剪破断力已经接近钢棒的屈服强度。在界面还没有拉剪开时, 试样夹持侧不锈钢棒已经发生屈服, 获得的数据不是复合棒拉剪强度的真值, 基材不锈钢棒小于 $\varphi 10 \text{ mm}$ 时, 使用压剪试样更为合适。

2.3 金相实验与显微硬度测试

通过气密性、超声波检测和拉剪强度实验, 优选出 A3、A4 复合棒进行金相实验。参照 GB/T 13298《金属显微组织检验方法》制备 TA2/316L 棒材复合棒的金相试样^[11], 依次进行粗磨-精磨-抛光后, 采用王水+硝酸水溶液进行腐蚀后在金相显微镜下观察接头各个区域金相组织(见图 6)。



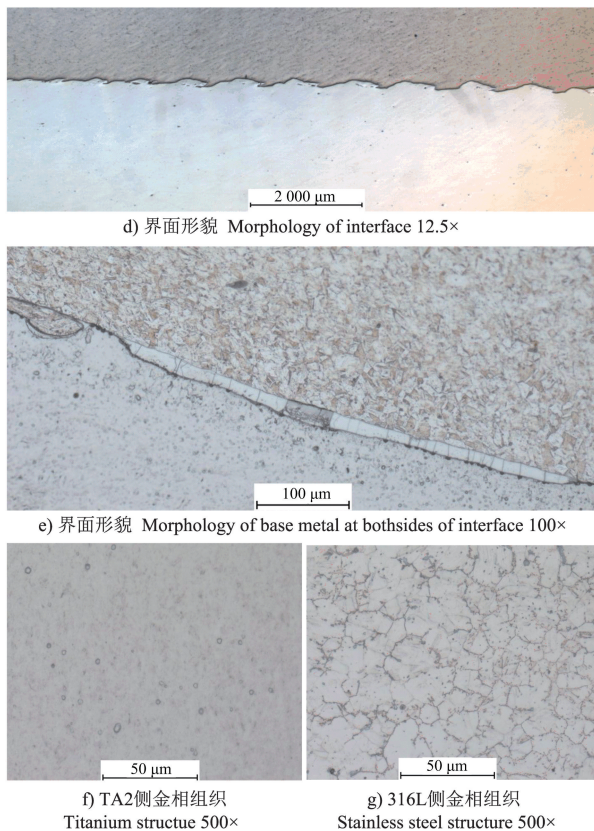


图6 复合棒微观组织

Fig. 6 Microstructure of clad bar

从图6中可以看出,A3、A4界面波形分布不均匀偏于扁平状,部分区域呈正弦波形,TA2侧金相组织为细小的 α 相,316L侧金相组织为孪晶 α +析出相。A3平均波长约为0.26 mm,平均波高约为0.03 mm,316L心部发现有尺寸约3.5 mm裂纹。A4平均波长约为0.85 mm,平均波高约为0.21 mm,316L心部未发现有裂纹。环管装药爆炸后的冲击波将在基棒中心叠加,尤其会在细径基棒中心轴线上形成马赫孔的裂纹源。参照标准GB/T 4340.1《金属材料 维氏硬度试验》在显微镜下垂直复合界面测试维氏硬度^[12],载荷为0.1 kg,分别测试了A3、A4的TA2(左侧)和316L(右侧)母材以及界面(“0”)处的维氏硬度,其中界面附近两点间隔距离100 μm ,测试结果如图7所示。

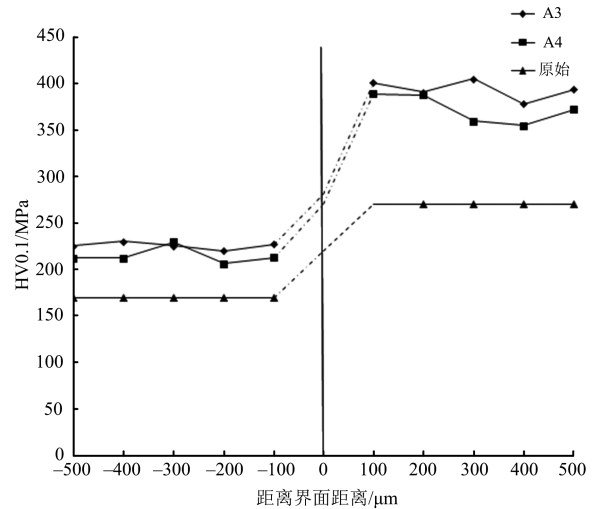


图7 复合棒显微硬度测试结果

Fig. 7 Microhardness of clad bar

从图7中可以看出,复合棒硬度分布总体呈现出复合棒界面的钛、不锈钢硬度均高于原始材料硬度;A3界面两侧的钛、不锈钢硬度值高于A4。界面处硬度明显高于母材,说明经过爆炸焊接,在界面结合区域呈现明显的硬化现象。

3 结论

1)在TA2/316L金属复合棒的开发过程中,通过爆炸焊接理论计算可获得动态参数绘制出合理爆炸焊接工艺“窗口”,并可直接根据 v_d 选取匹配炸药类型,通过工艺“窗口”内优先出 v_p ,结合经验公式进一步计算出较为合理的静态工艺参数并通过实验检测优选更佳的爆炸焊接工艺,满足工程应用需要。

2)采用优选的工艺参数进行TA2/316L金属复合棒试制,界面复合率100%,拉剪、气密性,各项性能指标均达到预设要求。

3)金相组织结果显示TA2/316L金属复合棒的界面波形分布不均匀偏于扁平状,部分区域呈正弦波形,TA2侧金相组织为细小的 α 相,316L侧金相组织为孪晶 α +析出相。界面处硬度明显高于母材,经过爆炸焊接,在界面结合区域呈现明显的爆炸硬化现象。

4)在钢制管-棒爆炸焊接装置约束下制备的复合棒直径会增大,与板-板爆炸焊接后总厚度减小

不同;投料生产时,复管厚度设计可不需要增加预量并且可以比复层设计厚度略小,以节约成本。

5)不锈钢基棒直径小于 10 mm 时,剪切试样选择压剪方式较为合适;爆炸焊接工艺参数的微小变化会引起细径基棒中心产生裂纹。

参考文献(References):

- [1] FINDIK F. Recent development in explosive welding [J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1 081-1 093.
- [2] 王宇新,李晓杰,王小红,等. 爆炸焊接技术及工程应用[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(12): 42-47.
WANG Y X, LI X J, WANG X H, et al. Explosive welding technology and engineering application [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(12): 42-47.
- [3] 李晓杰,王宇新,王小红,等. 双金属爆炸焊接参数设计理论[J]. *工程爆破*, 2020, 26(5): 1-13.
LI X J, WANG Y X, WANG X H, et al. Theory on design of bimetal explosive welding parameter [J]. *Engineering Blasting*, 2020, 26(5): 1-13.
- [4] 李晓杰. 厚板爆炸焊接窗口理论的应用[J]. *爆破器材*, 1996, 25(2): 27-30.
LI X J. Application of explosive window to thick metal plates[J]. *Explosive Materials*, 1996, 25(2): 27-30.
- [5] 邵丙璜,张凯. 爆炸焊接原理及其工业应用[M]. 大连:大连工学院出版社,1987.
SHAO B H, ZHANG K. Principle of explosive welding and its industrial application [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1987.
- [6] LYSAK V, KUZMIN S. Lower boundary in metal explosive welding evolution of ideas [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212: 150-156.
- [7] 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.
WANG Y H. Research and practice on explosive welding of sheet metal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [8] 陈忠平. Monel/Cu 爆炸复合棒的制备及复合过程数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学,2008.
CHEN Z P. Monel/Cu study on the preparation and numerical simulation of the explosive clad bar [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [9] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
ZHENG Y M. Explosive welding and explosive composite material [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [10] 中国人民解放军总装备部. 卫星用钛-不锈钢爆炸复合过渡接头棒规范:GJB3797A-2015[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2015.
General Armament Department. Specification for explosive clad titanium-stainless steel transition joint bars for satellites : GJB 3797A-2015 [S]. Beijing: General Armament Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2015.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属显微组织检验方法:GB/T 13298-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Inspection methods of microstructure for metals: GB/T 13298-2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [12] 国家市场监督管理总局. 金属材料维氏硬度试验第 1 部分:试验方法:GB/T 4340. 1-2009 [S]. 北京:中国标准出版社,2015
State Administration for Market Regulation. Metallic materials-Vickers hardness test-Part 1: Test method: GB/T 4340. 1-2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009.