

热处理对爆炸焊接 316L/Q235B 复合板组织和性能的影响

沈春豫^{1,2}, 樊科社^{1,2}, 王 俊¹, 孔宪平¹, 董运涛¹, 钱 岸¹

(1. 西安天力金属复合材料股份有限公司, 陕西 西安 710201;

2. 陕西省层状金属复合材料工程研究中心, 陕西 西安 710201)

摘要: 本文研究了不同热处理制度对 316L/Q235B 复合板组织和性能影响, 结果表明: 随着热处理温度提高, 316L/Q235B 复合板拉伸强度、剪切强度、界面硬度降低, 而伸长率提高了。640 °C 以下热处理, 基层 Q235B 钢组织只发生回复, 未有明显再结晶, 复合板界面硬度值降低较少。920 °C 正火后复合板界面硬度降低至 280 HV 以下, 加工性能明显改善。

关键词: 316L/Q235B 复合板; 热处理; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TB331 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2019)09-0204-05

Effect of heat treatment on the microstructure and property of 316L/Q235B explosive welding clad plate

Shen Chunyu^{1,2}, Fan Keshe^{1,2}, Wang Jun¹, Kong Xianping¹, Dong Yuntao¹, Qian An¹

(1. Xi'an Tianli Clad Metal Material Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710201, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Metal Clad Plate, Xi'an Shaanxi 710201, China)

Abstract: Effect of different heat treatment on the microstructure and properties of the 316L/Q235B explosive welding clad plate was studied in this paper. The results show that with the increase of temperature, the tensile strength, shear strength and interface hardness of 316L/Q235B steel clad plate are decreased, but the elongation of that is increased. The recrystallization is not found and just recovery is occurred in the microstructure of base plate (Q235B), and the decrease of hardness in 316L/Q235B composite plate interface is not obvious when the heat treatment temperature is below 640 °C. The interface hardness of 316L/Q235B composite plate is below 280 HV, and processability of that can be improved after normalizing at 920 °C.

Keywords: 316L/Q235B clad plate; heat treatment; mechanical properties; microstructure

316L/Q235B 复合板具有 316L 不锈钢良好耐腐蚀性^[1-2]和 Q235B 结构强度, 同时也可以有效降低材料成本, 被广泛应用于石油、化工等各个工业领域。爆炸焊接是制备 316L/Q235B 复合板最常见的方法。爆炸焊接制备 316L/Q235B 复合板是在炸药作用下 316L 不锈钢加速并与 Q235B 低碳钢倾斜碰撞, 实现不锈钢与低碳钢的复合^[3-5]。爆炸焊接 316L/Q235B 复合板在爆炸焊接制备过程中复层 316L、基层 Q235B 剧烈碰撞造成加工硬化现象, 特别是界面处形成硬化程度较大的区域, 这些区域存在给后续加工(如钻孔)造成很大影响。

本文主要研究了不同热处理制度下 316L/Q235B 复合板组织和性能的变化, 为 316L/Q235B 复合板热处理工艺改进提供一定的借鉴。

1 试验材料及方法

采用爆炸焊接工艺制备 4 块试样, 其尺寸为: 复层 316L 厚度 3 mm, 基层 Q235B 钢厚度 40 mm, 宽度 300 mm, 厚度 400 mm。316L 不锈钢和 Q235B 低碳钢的主要化学成分如表 1 和 2 所示。

表 1 316L 钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the 316L steel (mass fraction, %)

化学元素	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Fe
标准要求	≤ 0.03	≤ 2.0	≤ 0.045	≤ 0.03	≤ 0.75	16.0 ~ 18.0	10.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0	~ 0.1	余量
实际含量	0.01	1.6	0.04	0.02	0.4	16.9	12	2.2	0.06	66.77

表 2 Q235B 钢的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of the Q235B steel (mass fraction, %)

化学元素	C	Si	Mn	P	S
标准要求	≤ 0.2	≤ 0.35	≤ 1.4	≤ 0.045	≤ 0.045
实际含量	0.16	0.29	0.8	0.03	≤ 0.034

收稿日期: 2019-07-06

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划(2018TD-035)

作者简介: 沈春豫(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事金属复合材料研究, E-mail: shenchunyuyouxiang@163.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2019.09.041

爆炸焊接制备 316L/Q235B 试板过程中控制药高、间隙等工艺参数相同以保证不同爆炸焊接 316L/Q235B 复合试板拉伸强度、剪切强度、界面硬度、晶间腐蚀等性能一致。选取其中 3 块复合板分别随炉升温至 560、640 和 920 ℃,升温速度约 100 ℃/h,保温 2 h 后空冷至室温,冷却曲线如图 1 所示。

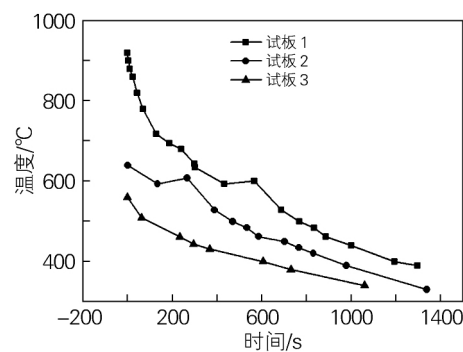


图 1 试板冷却曲线
Fig. 1 Cooling curves of the tested plate

对爆炸态和热处理态复合板试块按照 NB/T 47002.1—2009《压力容器用爆炸焊接复合板 第 1 部分: 不锈钢—钢复合板》进行晶间腐蚀、拉伸、剪切性能测试和组织观察,并对试板基复层界面处及距界面 100、200、300、400 和 500 μm 及 2 mm 处复层进行维氏硬度测量(测试载荷为 9.8 N,载荷施加时间为 10 s),维氏硬度测量的金相照片如图 2 所示。

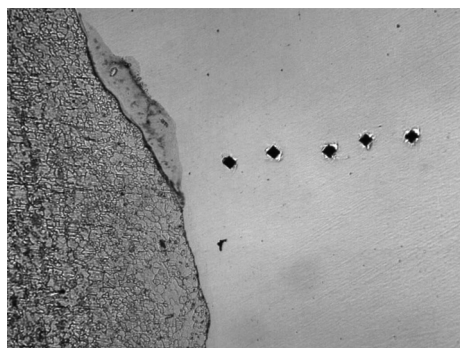


图 2 试板维氏硬度(×100)
Fig. 2 Vickers hardness test of the tested plate (×100)

2 试验结果与分析

2.1 力学性能、晶间腐蚀及显微组织分析

不同状态下 316L/Q235B 复合板的力学性能及晶间腐蚀情况如表 3 所示。从表 3 中可知,经过 560 ℃和 640 ℃温度退火后 316L/Q235B 复合板屈服强度从爆炸态 370 MPa 分别降低至 359 MPa 和 340 MPa,抗拉强度从爆炸态 496 MPa 分别降低至 490 MPa 和 479 MPa,相

比较爆炸态 316L/Q235B 复合板屈服强度、抗拉强度有所降低,但是降低并不十分明显,经过 920 ℃正火后,316L/Q235B 复合板屈服强度降低至 264 MPa,抗拉强度降低至 445 MPa,屈服强度和抗拉强度降低比较明显。316L/Q235B 复合板复层厚度约 3 mm,基层厚度约 40 mm,基层厚度占复合板整个厚度比例为 93%。因此,复合板拉伸强度主要由基层决定。316L/Q235B 复合板基层 Q235B 钢显微组织如图 3 所示。从图 3 中可知,相比较爆炸态 316L/Q235B 复合板基层 Q235B 钢组织,经过 560 ℃和 640 ℃温度退火后 316L/Q235B 复合板基层 Q235B 中组织变化不大,无明显再结晶组织出现,无明显析出物产生。因此,560 ℃和 640 ℃温度退火后的 316L/Q235B 复合板基层 Q235B 钢屈服强度、抗拉强度不明显降低主要是由热处理过程中回复作用产生;但是在 560 ℃和 640 ℃保温 2 h 情况下基层 Q235B 钢回复作用对材料软化作用有限。经过 920 ℃正火工艺处理后,316L/Q235B 复合板基层 Q235B 钢组织原始铁素体和珠光体的混合组织在高温阶段奥氏体化后又经过冷却形成新组织,从组织形貌可以看出,新组织以细小状等轴铁素体构成。从表 3 可知,316L/Q235B 复合板经过正火后其屈服强度明显降低,这是因为爆炸焊接过程 316L/Q235B 复合板在外界冲击下材料内部形成的位错缠结现象在正火奥氏体化过程中消失,材料强度主要由正火后所形成的组织决定。

表 3 试板在不同条件下的力学性能和晶间腐蚀
Table 3 Mechanical properties and intergranular corrosion of the tested plate at different conditions

性能	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	剪切强度 / MPa	冲击吸收能量 / kJ	伸长率 / %	晶间腐蚀
爆炸态	496	370	389	299	27	无晶间腐蚀裂纹
560 ℃ × 2 h	490	359	370	299	29	无晶间腐蚀裂纹
640 ℃ × 2 h	479	340	349	293	29	微小晶间腐蚀裂纹
920 ℃ × 2 h	445	264	330	299	34	无晶间腐蚀裂纹
GB/T 47002.1	≥379, <500	≥222	≥210	≥27	≥26	262e 法无晶间腐蚀裂纹

从表 3 中可知,316L/Q235B 复合板伸长率在经过退火和正火后都有所提高,这主要是因为热处理对存

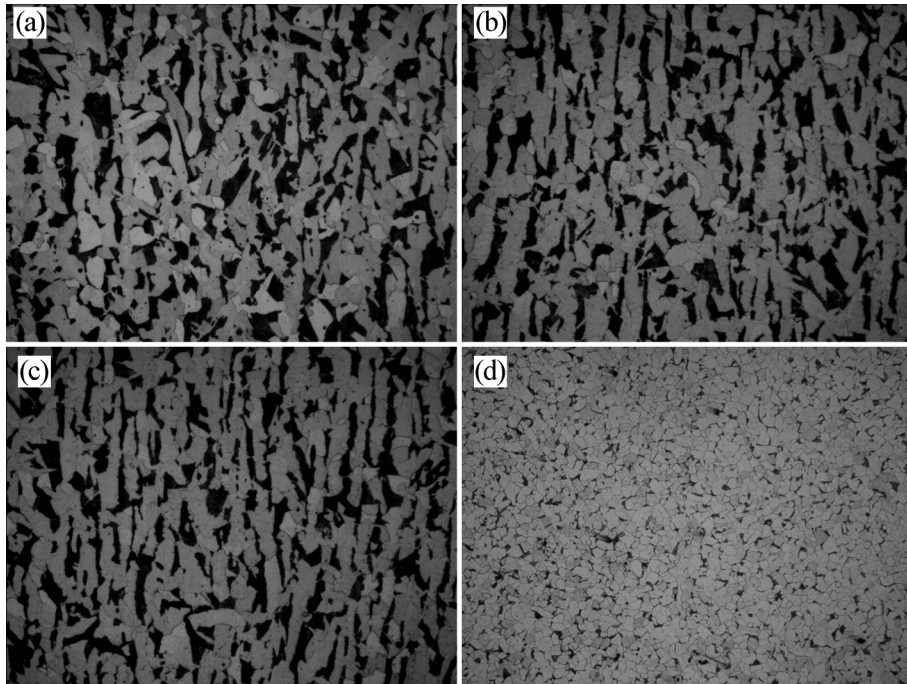


图 3 Q235B 钢板在不同条件下的显微组织

(a) 爆炸态, $\times 200$; (b) $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$; (c) $640\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$; (d) $920\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$

Fig. 3 Microstructure of the Q235B steel plate under different conditions

(a) explosion state, $\times 200$; (b) $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$; (c) $640\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$; (d) $920\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 200$

在于爆炸态 316L/Q235B 复合板的位错缠结等影响材料塑性的影响减弱或消失。同时从表 3 中也可以看出,材料冲击韧性均满足要求。复合板冲击韧性主要是由 Q235B 钢决定。从图 3 中 Q235B 钢的组织可以看出,经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度退火后 Q235B 钢的组织只是发生了回复,不再结晶和明显析出现象产生。因此,经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度退火后 Q235B 钢的冲击韧性相比原始组织并无大变化,能够满足要求。从图 3 中也可以看出,经过 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正火工艺处理后, Q235B 钢的等轴状铁素体组织细小,细小的铁素体组织界面占整个面积比例较大,裂纹不易拓展,因此正火后 Q235B 钢冲击韧性也能够满足要求且伸长率最高,达到 34%。316L/Q235B 复合板界面经过热处理前后显微组织如图 4 所示。

316L/Q235B 复合板在爆炸焊接过程中复层 316L 钢在炸药冲击作用下与基层 Q235B 钢发生剧烈碰撞,剧烈碰撞造成界面处复层 316L 钢与基层 Q235B 钢熔化并形成漩涡状结构,并且漩涡结构由复层 316L 钢和基层 Q235B 钢的成分构成,漩涡结构易在热处理过程中形成不同于复层 316L 钢和基层 Q235B 钢的新相。

从图 4 中可以看出,316L/Q235B 复合板经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度退火后界面处有新相产生,316L/Q235B

复合板经过热处理后界面处脆化相产生是 316L/Q235B 复合板热处理后剪切强度降低的一个重要原因^[6-9],但是由于复层 316L 钢与基层 Q235B 钢均为铁基金属,复层 316L 钢与基层 Q235B 钢所含元素相容性较好,因此,316L/Q235B 复合板经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度退火后形成的脆化相对 316L/Q235B 复合板剪切强度降低作用有限。在复合板基、复层结合非常好情况下,复合板剪切强度很大程度上是由界面形成新成分材料、复层材料、基层材料力学性能决定(特别是屈服强度和抗拉强度,因为剪切强度的测试过程实际是材料发生塑性变形过程)。316L/Q235B 复合板因复层 316L 钢与基层 Q235B 钢同为铁基金属,其爆炸焊接后界面结合十分牢固,剪切强度很大程度上是由复层 316L 钢、基层 Q235B 钢、界面形成新相的力学性能决定,由于热处理会减弱爆炸焊接冲击的硬化作用,因此,316L/Q235B 复合板剪切强度降低另一个因素是热处理对材料整体软化作用。由于经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理后 316L/Q235B 复合板脆化相形成以及热处理后材料的软化作用对 316L/Q235B 复合板剪切强度降低作用均不明显,因此经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理后 316L/Q235B 复合板剪切强度相对于标准要求值仍较高。

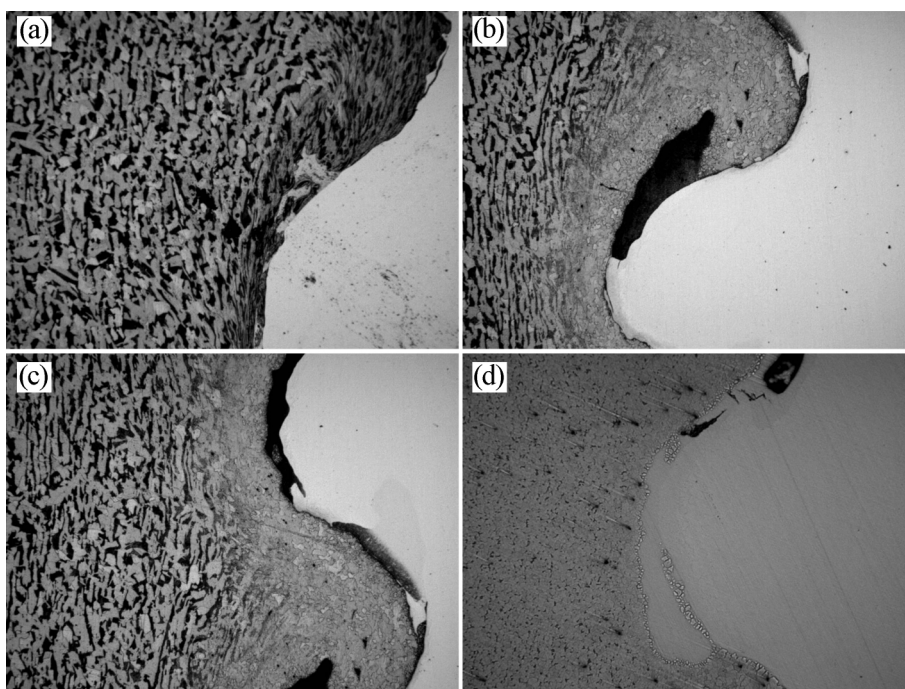


图4 316L/Q235B 复合板界面在不同条件下的显微组织

(a) 爆炸态, $\times 100$; (b) $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$; (c) $640\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$; (d) $920\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$

Fig. 4 Interface microstructure of the 316L/Q235B composite plate under different conditions

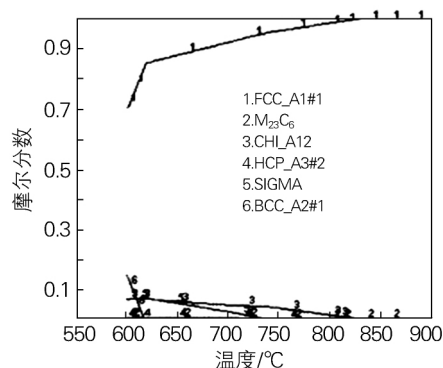
(a) explosion state, $\times 100$; (b) $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$; (c) $640\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$; (d) $920\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$, $\times 100$

316L/Q235B 复合板 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正火后界面形貌变化较大,界面处脆化相较经过 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理后 316L/Q235B 复合板界面脆化相少,且大部分界面处 Q235B 钢的显微组织为等轴状铁素体,这可能为正火工艺下界面脆化相发生相变且导致元素扩散,界面周边 Q235B 钢在正火热处理后形成等轴铁素体组织。经过正火热处理后的 316L/Q235B 复合板剪切强度低于 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理后 316L/Q235B 复合板,这主要是由于正火热处理对 316L/Q235B 复合板整体软化作用大于 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理对 316L/Q235B 复合板整体软化作用。同时从复层 316L 的晶间腐蚀结果可知,316L/Q235B 复合板经过低温 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理和 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正火处理,316L 复层耐腐蚀性能均能满足要求。

316L 的热力学相图如图 5 所示^[10],316L/Q235B 复合板在 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行正火处理时,复层 316L 钢并未有析出相,因此其耐腐蚀性能够满足要求。316L/Q235B 复合板在 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理温度低,316L 复层析出新相现象不明显,因此其耐腐蚀性也能够满足要求。316L/Q235B 复合板进行 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理时有损害耐腐蚀性析出物产生,因此其耐腐蚀性有所降低。

2.2 复合界面处的硬度及实际应用分析

不同状态下界面到 Q235B 钢基板不同位置处硬

图5 316L 不锈钢热力学计算相图^[10]Fig. 5 The phase diagram of 316L stainless steel^[10]

度如图 6 所示。从图 6 中可知,316L/Q235B 复合板基层界面处硬度随着距离界面距离的增加而逐渐降低,这是爆炸焊接过程炸药冲击下基板与复板强烈碰撞加工硬化所起作用逐渐降低所致。随着热处理温度提高,复合板界面逐渐降低,但是由于在 $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下退火,复合板再结晶很少,仅仅通过回复作用软化,因此对于加工硬化所起软化作用不明显,硬度降低不明显^[9-10]。但是经过 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正火工艺后形成了等轴状的铁素体组织,材料软化作用明显,大部分硬度值在 230 HV 以下。

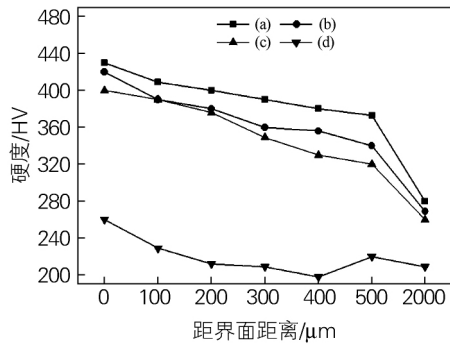


图6 316L/Q235B复合板界面在不同位置处的硬度
(a) 爆炸态; (b) 560 °C × 2 h; (c) 640 °C × 2 h; (d) 920 °C × 2 h

Fig. 6 Hardness of the 316L/Q235B composite plate at different positions
(a) explosion state; (b) 560 °C × 2 h;
(c) 640 °C × 2 h; (d) 920 °C × 2 h

316L/Q235B复合板在使用过程中往往需要钻孔加工,其使用状态如图7所示。316L/Q235B复合板管板加工孔过程中,基层、复层、界面硬度大造成钻头磨损严重,增加生产成本。316L/Q235B复合板管板界面处有大的硬度变化时会造成钻孔过程中钻头受力变化剧烈而引起钻头损害。因此316L/Q235B复合板进行材料设计过程中应充分考虑后续加工过程对材料使用性能要求。316L/Q235B复合板屈服强度、抗拉强度、剪切强度、耐腐蚀性等性能都满足标准要求情况下,应考虑尽量降低316L/Q235B复合板硬度,降低界面硬度与复合板基体之间的硬度差值。从复合板后续加工考虑应当采用很大程度降低316L/Q235B复合板界面硬度的920 °C × 2 h的正火热处理工艺。

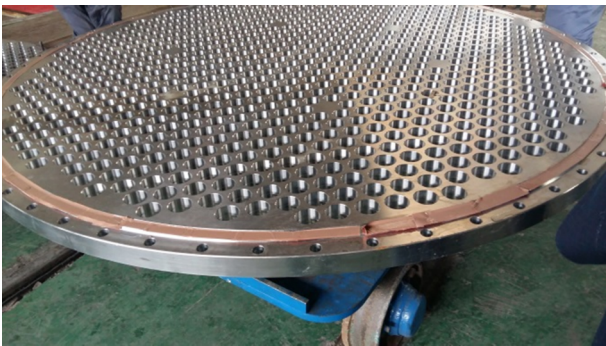


图7 316L/Q235B复合板钻孔后实图

Fig. 7 Picture of the 316L/Q235B composite plate after drilling

3 结论

1) 随着热处理温度提高,爆炸焊接316L/Q235B复合板软化作用加强,强度逐渐降低,塑性逐渐提高。

2) 920 °C正火后,爆炸焊接316L/Q235B复合板屈服强度、抗拉强度满足材料标准要求,剪切强度为330 MPa,316L复层262e法测试无晶间腐蚀裂纹,界面硬度明显降低,加工性能明显改善。

参考文献:

- [1] 陆世英,张廷凯,杨长强,等. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [2] 李 筱,卫英慧,王 伟. 成品退火工艺对罐箱用316L奥氏体不锈钢组织及性能影响研究[J]. 山西冶金, 2013, 36(1): 10-12.
Li Xiao, Wei Yinghui, Wang Wei. The research on the effects of end product annealing process on the structure and properties of 316L austenite stainless steel used for tank container[J]. Shanxi Metallurgy, 2013, 36(1): 10-12.
- [3] 王铁福. 大型不锈钢/普碳钢厚板坯的爆炸焊接[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 87-90.
Wang Tiefu. Explosive bonding for large thick stainless steel and billet [J]. Transactions of China Welding Institution, 2004, 25(2): 87-90.
- [4] 王铁福. 不锈钢/普碳钢爆炸焊接与轧制[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 163-169.
Wang Tiefu. Explosive welding and rolling of stainless steel and regular steel billets[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 163-169.
- [5] 黄 伟. 不锈钢/碳钢层状结构复合板生产工艺[J]. 科技与企业, 2014(5): 274-275.
Huang Wei. Manufacturing technique of stainless steel/carbon steel laminated composite plates[J]. Keji Yu Qiye, 2014(5): 274-275.
- [6] 范祎欣,吴志生,李 岩,等. 退火温度对爆炸焊316L/Q370复合板性能与微观结构的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(10): 12-15.
Fan Yixin, Wu Zhisheng, Li Yan, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of 316L/Q370 clad plate by explosive welding [J]. Welding Technology, 2017, 46(10): 12-15.
- [7] 王 斌,徐 明,胡 静,等. 热处理制度对316L/Q345R爆炸焊复合板组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 109-114.
Wang Bin, Xu Ming, Hu Jing, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 316L/Q345R explosive welding clad steel plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(1): 109-114.
- [8] 范祎欣. 316L/Q370爆炸焊复合板界面微观组织与性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2017.
- [9] 徐 明. 热处理对316L/Q345R爆炸焊复合板组织及性能的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [10] 丁秀平,刘 雄,何燕霖,等. 316L奥氏体不锈钢中时效条件下析出相演变行为的研究[J]. 材料研究学报, 2009, 23(3): 269-274.
Ding Xiuping, Liu Xiong, He Yanlin, et al. Evolution of precipitated phase during aging treatment in 316L austenitic stainless steel [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(3): 269-274.
- [11] 任 勇,程晓茹,兰 昆,等. 热处理对316L/Q235复合板组织与力学性能的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(5): 66-71.
Ren Yong, Cheng Xiaoru, Lan Kun, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L/Q235 stainless steel composite panel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(5): 66-71.