

321-15CrMoR 爆炸焊接复合板结合界面区的显微组织分析

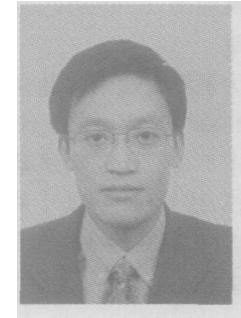
张保奇¹, 王德和¹, 李晓杰², 杨文彬²

(1. 大连理工大学 材料工程系, 辽宁 大连 116023; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用金相显微镜、扫描电镜、电子探针和显微硬度计, 对爆炸焊接 321-15CrMoR 复合板结合界面进行了研究, 探讨爆炸焊接过程的金属物理学机理。结果表明, 界面呈波形; 界面附近基体组织产生了剧烈的塑性变形; 321 一侧存在绝热剪切带 (ASB), ASB 在局部发展成为微裂纹, 波峰存在一薄层“白亮带”, ASB 和“白亮带”均由细小等轴晶粒组成; 界面附近原子存在短程扩散和熔化长程扩散现象; 界面区显微硬度显著提高。这些特征保证了复板和基板之间的快速优质冶金结合。

关键词: 爆炸焊接; 界面; 显微组织; 显微硬度; 绝热剪切带

中图分类号: TG 456.6 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)02-108-05



张保奇

0 序 言

金属爆炸焊接^[1]是以炸药为能源的压力焊、熔化焊和扩散焊“三位一体”的金属焊接新工艺及新技术。其主要优点^[2]是能把不同的金属焊接在一起以及进行大面积的焊接。使用不锈钢—钢爆炸复合板代替纯粹的不锈钢板材既可以提高综合力学性能, 又可以降低成本。文献[3]对不锈钢—普碳钢的爆炸焊接+轧制联合技术进行了研究。文献[4]研究了爆炸焊接双相不锈钢—钢的界面组织与性能的关系。文献[5]使用电子探针方法对不锈钢—钢爆炸和爆炸+轧制复合板结合区组织和成分进行了研究。然而到目前为止, 关于大面积不锈钢薄板和厚钢板的爆炸焊接尚无文献报道。

采用爆炸焊接方法将大面积不锈钢 321 薄板直接爆炸包覆在低合金钢 15CrMoR 厚板上的工艺, 并对 321-15CrMoR 爆炸复合板结合界面区进行了研究, 从而为这种复合材料的生产和应用提供指导, 以及由此探讨一些爆炸焊接的金属物理学机理。

1 试验材料和方法

爆炸焊接工艺采用平行安装法, 复板为固溶态奥氏体不锈钢 321, 基板为正火态低合金结构钢

15CrMoR, 复板和基板尺寸分别为 11 000 mm × 2 200 mm × 3 mm 和 11 000 mm × 2 200 mm × 42 mm, 使用粉状铵油炸药 (84% 硝酸铵 + 6% 柴油 + 10% 泰安), 炸药爆速 $v_d = 3250 \text{ m/s}$, 炸药密度为 0.7 × 10³ kg/m³, 炸药厚度为 30 mm。复板和基板之间的预置间隙为 6 mm。采用中心起爆法引爆。

从成品板上切取试样, 然后沿爆轰方向并垂直于复合板表面磨制金相试样。经过粗磨、细磨、抛光 (用 1 μm 的金相抛光剂) 得到光亮的金相磨面。对复板和基板分别浸蚀, 即使用 4% 硝酸酒精浸蚀基板 15CrMoR, 用氯化铜盐酸水溶液 (5 g CuCl₂ + 100 mL HCl + 100 mL H₂O) 浸蚀复板。然后使用光学金相显微镜 (OM, MEF-3), 扫描电镜 (SEM, JSM-5600LV), 电子探针 (EPMA, EPMA-1600) 和显微硬度计 (MHT, microhardness tester HV-1000) 对爆炸复合板结合界面进行分析研究。

2 试验结果分析

2.1 界面附近 15CrMoR 一侧组织特征

复合板结合界面呈波形, 如图 1a 所示, 在界面处沿着爆轰方向此波形呈明显的周期重复特征。由图 1b 可知, 界面各区域的晶粒变形程度不同, 总的特征是晶粒沿着爆轰方向 (焊接方向) 被拉长成流线形, 距界面越近, 变形程度越剧烈。按界面至基体

顺序, 组织变化为: 界面处一薄层 (厚度约 $20 \sim 50 \mu\text{m}$) 细小的等轴晶 \rightarrow 晶粒的严重畸变区 (厚度约 $150 \sim 250 \mu\text{m}$) \rightarrow 晶粒歪斜区 (厚度约 $300 \sim 500 \mu\text{m}$) \rightarrow 基体等轴晶粒。晶粒变形量按照波前、波峰、波尾顺序依次增大。

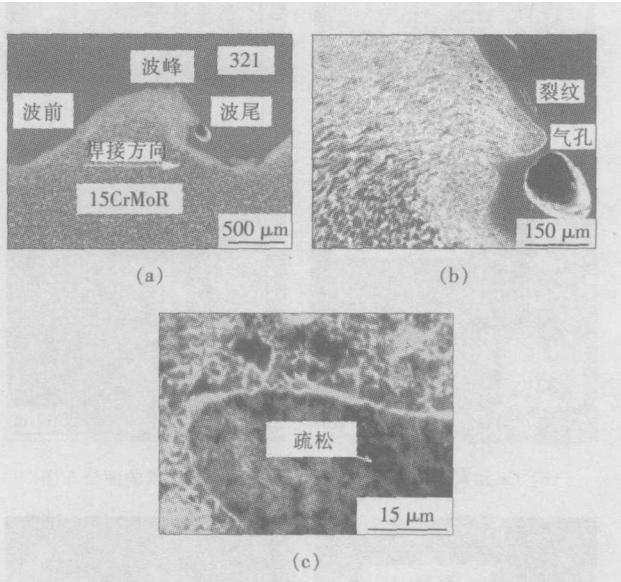


图 1 结合区的 SEM 像

Fig 1 SEM micrograph of bond zone

爆炸焊接结合界面明显不同于用常规焊接 (如电弧焊) 得到的焊接界面。后者结合方式单一, 而前者界面结合特征较为复杂。如图 1a 和图 2b 所示, 在一个波形周期内, 存在两种结合方式, 直接结合和过渡层结合。直接结合主要发生在基体突出处, 而过渡层结合主要发生在基体突出的两侧, 常常表现为熔化层或者熔化块。

如图 1a b 所示, 波峰附近至波尾沿着界面存在熔化层, 其长宽尺寸约为 $344 \mu\text{m} \times (43 \sim 65) \mu\text{m}$ 。在熔化层中距界面约 $27 \mu\text{m}$ 处存在一条长宽尺寸约为 $96 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 的裂纹。在波尾, 紧接熔化层为熔化块, 其长宽尺寸为 $516 \mu\text{m} \times (120 \sim 284) \mu\text{m}$ 。熔化块中有一椭圆状气孔 (见图 1b), 气孔内壁光滑, 呈熔化快淬状态, 气孔的形成与焊接过程中排气不畅、待焊表面平整度以及安装工艺等因素有关。熔化块中还存在疏松等铸造组织特征 (见图 1c 和图 2b)。熔化层 (块) 是焊接过程中高速喷射的流体被基复板捕捉并快速冷却得到的。

2.2 界面附近 321 一侧组织特征

爆炸焊接后, 复板 321 中的流线带 (系爆炸焊接前冷轧所得) 在其整个厚度范围内呈明显的波形特征, 如图 2a b 所示。在界面处波长 λ 约为 2.50 mm , 波高 A 约为 0.92 mm , 距界面约 1.17 mm

处, 波高 A 迅速减小到 0.082 mm , 约为界面处波高的 9.1% , 这说明随着距界面距离增大, 波高迅速减小, 这与两层流体相对流动时在界面形成的波动现象 (例如海风引起的波浪) 十分相似。同理, 在基板中也会发生这种波动现象。

复板 321 一侧组织除了具有基板 15CrMoR 的变形特征外, 还存在绝热剪切现象。如图 2c d 所示。绝热剪切带 (ASB) 与界面呈近似 45° 并稍有弯曲, 从界面起至末端的走向与爆轰波传播的方向相反。ASB 主要分布在波峰附近约 0.30 mm 的区域内, 长度、带间距均不等, 总的规律是 ASB 越长, 带间距越大, 距界面越近 ASB 越密集, ASB 最长约为 0.45 mm , 最宽的带间距约为 0.10 mm 。

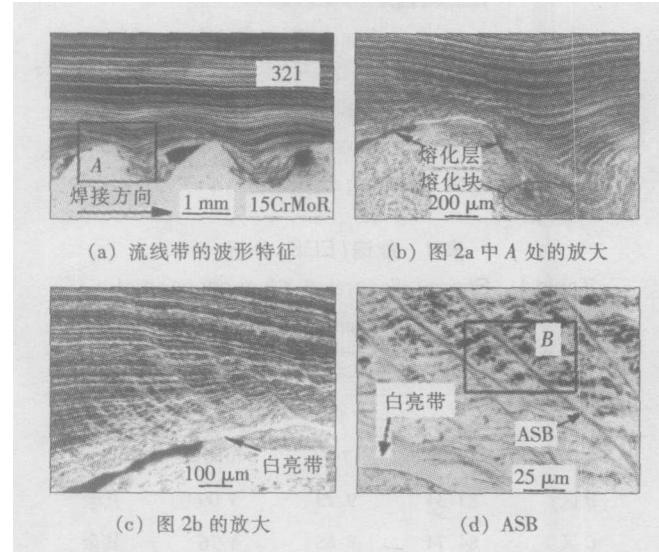


图 2 浸蚀复板后结合区的光学金相

Fig 2 Optical micrograph of bond zone after fly-plate being eroded

在图 2b c d 中, 在波峰处存在一薄层 “白亮带”, 其长宽尺寸约为 $0.50 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$ 。在波峰位置, ASB 末端中止于 “白亮带”。为进一步了解 “白亮带” 和 ASB, 用扫描电镜进行高倍观察, 如图 3 所示。

在图 3a 中, B 区域即为 “白亮带” (注: 这里表现为 “黑带”, 因为 OM 和 SEM 的成像机理不同), 其高倍放大像见图 3b。它表明 “白亮带” 是由细小的等轴晶粒 ($<1 \mu\text{m}$) 组成, 能谱 (EDS) 分析 (见表 1) 表明 “白亮带” 化学成分与 321 基本相同。

图 3a 的 A 区为 ASB, 其末端中止于 “白亮带”, 图 3c 为 ASB 的高倍放大像, 它是由数条更细的滑移带组成, 组织更加细小, 并在局部形成微裂纹。

图 3a 的 C 区为熔化层, EDS 分析 (见表 1) 表明, 该熔化层化学成分接近 321 和 15CrMoR 的平均

成分。图 3a 的 D 区的 EDS 分析 (见表 1) 表明, 此区成分已接近基板 15CrMoR。

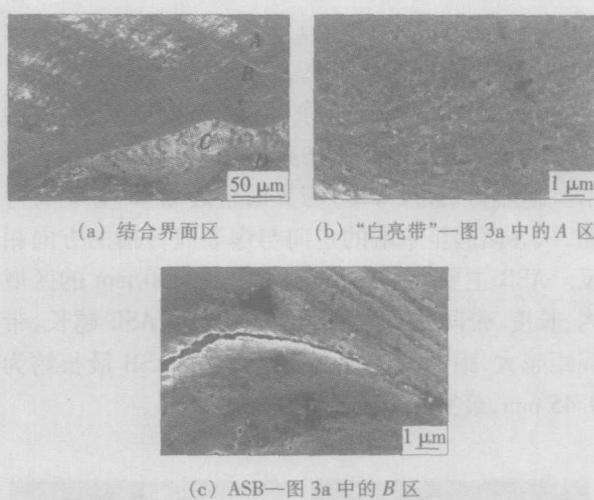


图 3 “白亮带”和 ASB 的 SEM 像

Fig 3 SEM micrograph of white lum inant strip and adiabatic shearing bands

表 1 能谱 (EDS) 分析

Table 1 Energy dispersive X ray spectrometry (EDS) analysis

测量位置	化学成分 (质量分数, %)			
	Fe	Cr	Ni	其它
A 区	69.24	17.66	10.03	其余
B 区	83.34	9.23	5.09	其余
C 区	84.74	8.65	4.76	其余
D 区	95.64	0.90	0.65	其余

2.3 界面扩散

图 3a 各微区的 EDS 分析 (见表 1) 表明: 在界面熔化层中存在 Cr Ni Fe 的扩散, 熔化层和基体的结合界面处仅发生了局部短程扩散。

EPMA 分析表明, Cr 和 Fe 元素的线分析曲线 (见图 4a) 在熔化层里存在一定的倾斜度, 这说明在熔化层中 Cr 和 Fe 元素发生了熔化长程扩散。图 4c, e 分别为 Cr 和 Fe 元素的面分布图, 在波峰处 (直接结合处) 没有 Cr 和 Fe 元素的扩散或扩散深度极浅。

同样, Ni 和 C 元素的 EPMA 分析如图 4b, d, f 所示, 也存在上述类似的短程扩散和熔化长程扩散现象。

2.4 显微硬度

在 Microhardness Tester HV - 1000 上进行显微硬度测试, 负荷为 1.96N, 显微硬度变化曲线如图 5

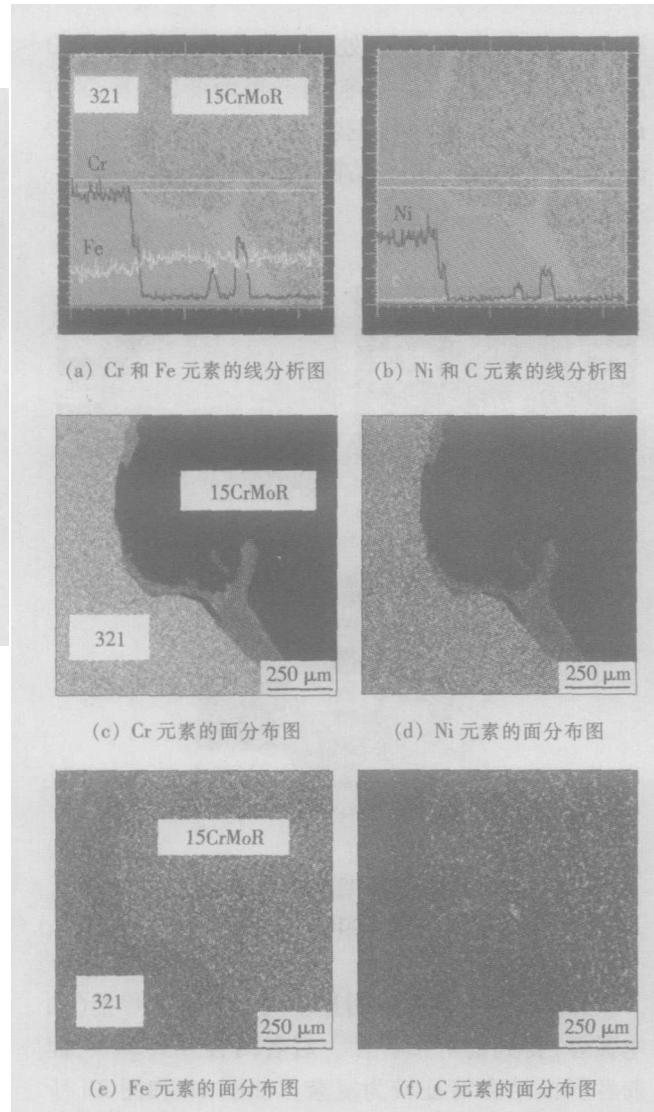


图 4 结合界面的电子探针分析 (EPMA)

Fig 4 Electron probe microscope analysis (EPMA) of bond interface

所示。在波峰处 (见图 5a), 界面硬度值为 420HV, 复板 321 一侧的最高硬度值 (在 0~1mm 处) 为 433HV, 比基体 (326HV) 高 107HV, 急剧硬化层厚度约为 0.3mm, 而基板 15CrMoR 一侧的最高硬度值 (在 0~10mm 处) 为 294HV, 比基体 (210HV) 高 84HV, 其急剧硬化层厚度约为 0.6mm。

在波谷 (见图 5b) 处, 界面硬度值为 430HV, 复板 321 一侧的最高硬度值 (在 -0~15mm 处) 为 490HV, 比基体 (346HV) 约高 144HV, 急剧硬化层厚度约为 0.6mm, 而基板 15CrMoR 一侧的最高硬度值 (在 0~15mm 处) 约为 286HV, 比基体 221HV 约高 65HV, 其急剧硬化层厚度约为 0.3mm。

综上分析可知, 不论复板还是基板, 其基体材料突出部分的急剧硬化层厚度约为 0.6mm, 这说明变形主要集中于基体突出部分; 反之, 凹陷部分的急剧

硬化层厚度约为 0.3 mm, 最高硬度值不在界面上, 而是位于距界面约 0.1~0.15 mm 处。

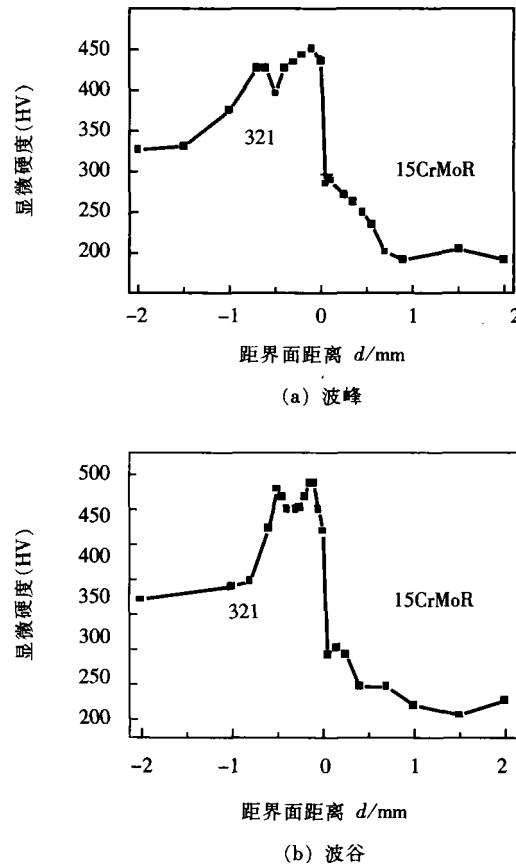


图 5 结合界面附近显微硬度变化曲线

Fig 5 Variation of microhardness near bond interface

3 讨 论

3.1 绝热剪切带

ASB 是金属在爆炸焊接高压、高温和瞬时的特定条件下的一种变形形式^[1]。它与常温下的滑移、孪生共同构成了材料在不同特性的载荷下进行塑性变形的三种机制。材料在高速冲击条件下, 塑性变形总是从局部开始, 局部塑性变形热来不及传播, 热量的聚集使得材料在局部发生屈服强度降低, 当动态屈服强度低于冲击载荷产生的剪切应力时, 该部位就先产生瞬间剪切变形, 从而产生 ASB。

研究表明 ASB 是由数条更细的滑移带组成, 其组织十分细小, 并且在局部发展成为微裂纹。

从图 2d 可以看出, 在剪切应力作用下, 复板中的原始流线带沿 ASB 发生了相对滑移。对于图 2d 的 B 处, 剪切应变(即滑移量与 ASB 宽度的比值)约为 24, 同时, 爆炸焊接是在瞬间内(微秒量级)发生的, ASB 也必然是在瞬间内产生, 这说明 ASB 处的

应变速率是相当大的。

综上可知, 材料在爆炸冲击载荷作用下, 总是先在局部发生剧烈的剪切应变, 说明 ASB 是材料在高速冲击载荷作用下的一种超塑性变形方式^[6]。

试验中发现不锈钢复板 321 一侧存在 ASB, 而在基板未发现有 ASB, 这与基板 15CrMoR 钢强度较低, 加工硬化趋向小有关, 也和爆炸焊接参数有关。同理, 若在更高爆速炸药的爆轰冲击下基板 15CrMoR 上也会出现 ASB。

由于 ASB 在局部已发展成为微裂纹, 因此在保证爆炸焊接的基础上应尽量避免产生严重的 ASB。对于试验中较薄的复板来说, 如果工艺控制不当, ASB 就可能贯穿整个板厚以致复板断裂。因此, 选用正确的焊接工艺参数(如使用低爆速炸药)来进行爆炸焊接或者在焊后进行热处理(如进行再结晶退火)以消除 ASB 的不利影响。

3.2 白亮带

在界面波峰处存在一层“白亮带”, SEM 和 EDS 分析表明, “白亮带”是由细小等轴晶粒 $< 1 \mu\text{m}$ 组成, 其化学成分与不锈钢复板 321 基本相同。

为什么会出现这种“白亮带”呢? 进一步分析可知, 结合界面附近一薄层发生了剧烈的塑性变形流动, 必然会产生大量的塑性变形热; 同时, 奥氏体的热导率低于铁素体以及在波峰处的散热特点。这些因素的综合作用势必会使波峰处不锈钢复板 321 一侧一薄层产生晶粒细化以及固溶处理作用, 可能得到极细小的晶粒和单相固溶组织, 其耐蚀性将显著提高, 从而在光镜下呈现出所谓的“白亮带”。

另外, ASB 中止于“白亮带”, 两者均系局部剧烈的塑性剪切作用所致, 由此可认为“白亮带”也是一种 ASB(即界面 ASB)。

试验的一个突出之处在于, 利用冷轧不锈钢的流线带在爆炸焊接后的变化特征, 使人更直观地了解爆炸焊接过程的特点, 并可估算出界面不同区域的应变和应变速率。

3.3 显微硬度

随着与界面距离的增加, 其两侧基体内的硬度逐渐降低; 硬化程度与基体材料的原始性能有关, 321 属于奥氏体钢, 有冷加工硬化趋向, 故其界面硬度较高。而基板 15CrMoR 的加工硬化趋向较小, 故其界面硬化程度较低。

在波峰处, 不锈钢 321 急剧硬化层厚度为 0.30 mm, 正好等于 ASB 区的厚度。这说明剪切变形主要集中于 ASB 内。焊接结合界面显微硬度高于基体, 间接知道焊接界面强度要高于基体。同时基体性能因爆炸强化得到了改善。

3.4 爆炸焊接机理

爆炸焊接过程中^[2-7], 碰撞点附近具有高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ 的应变速率和高达 $10^1 \sim 10^2 \text{ GPa}$ 的高压。该处金属受到很大的绝热剪切作用, 塑性剪切功的绝大部分转化为热量, 瞬时升温速率达 $10^8 \sim 10^9 \text{ K/s}$ 温度高达 $10^4 \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。虽然高压下基体材料的熔点会升高, 相应的热软化温度也会提高, 但相对于爆炸焊接条件下的绝热剪切温升可以认为是低阶小量, 因此可以认为在爆炸焊接过程中界面一薄层金属必然会产生熔化和扩散现象。同时界面附近基体可以看作是理想的冷却体, 界面一薄层熔体在微秒量级时间内由高温冷却至基体的温度 (冷却速率高达 $10^6 \sim 10^{11} \text{ K/s}$), 从而实现基复板之间快速的优质冶金结合。

碰撞点压力公式^[2]为

$$p = \frac{1}{2\rho v_{\infty}^2} \quad (1)$$

式中: p 为驻点 (即碰撞点) 压力 (Pa); ρ 为复板的密度 (kg m^{-3}), v_{∞} 为碰撞点来流速度 (m/s), 对于平行安装, $v_{\infty} = v_d$ 。将 $\rho = 7.85 \text{ kg m}^{-3}$, $v_d = 3250 \text{ m/s}$ 代入式 (1) 得到驻点压力为 41.5 GPa 。驻点压力相对于材料的动态屈服强度 (约为 10^3 MPa) 约高出 10^4 倍, 此时材料的动态屈服强度为高阶小量, 可将其看作为一种流体, 所以复板和基板碰撞点的行为和变形过程可作为流体模型来处理。

材料局部剧烈的剪切塑性变形产生的大量塑性变形热将导致界面一薄层熔化, 钢基体是热的良导体, 会使熔体快速冷却, 从而实现基复板之间的快速焊合。文献 [8] 利用这一特征进行了非晶薄带的焊接, 同时这也说明爆炸焊接的瞬时、高温和快速冷却特性。

4 结 论

(1) 爆炸焊接界面呈波形、晶粒沿爆轰方向被拉长成流线形以及产生局部熔化层 (块) 等, 表明在界面处产生了剧烈的塑性变形。

(2) 界面不锈钢复板 321 一侧存在与界面呈约 45° , 宽约 0.30 mm 的 ASB 和波峰处的一薄层“白亮

带”。ASB 和“白亮带”的组织结构相似, 即均由细小等轴晶粒组成。由于 ASB 常在局部发展为微细裂纹, 因此, 正确选用焊接工艺参数 (如使用低爆速炸药) 来进行爆炸焊接或者焊后热处理 (如进行再结晶退火) 以消除 ASB 的不利影响。

(3) 爆炸焊接界面存在原子的短程扩散和熔化长程扩散现象。

(4) 在界面上存在熔化层 (块), 其内存在裂纹、气孔、疏松等微观缺陷, 铸造组织特征明显, 这将对爆炸焊接材料的界面结合强度产生影响。因此, 应从安装工艺、焊前表面处理等方面进行改进以减轻其不利的影响。

(5) 爆炸焊接界面处产生的剧烈塑性变形将导致其显微硬度显著升高, 同时基体性能因爆炸强化得到了改善。

(6) 碰撞点压力远远大于材料的动态屈服强度, 因此可以用流体模型来近似处理碰撞点的行为和变形过程。

参考文献:

- [1] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2002. 4-16 626-632
- [2] 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. 1-5 306-345 188-189
- [3] 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
- [4] Kaçar R, A carer M. Microstructure property relationship in explosively welded duplex stainless steel steel [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A363: 290-296.
- [5] 郑远谋, 张胜军. 不锈钢 - 钢爆炸复合板结合区的电子探针研究 [J]. 电子显微学报, 1999, 18(4): 468-473.
- [6] 杨 扬, 张新明, 李正华, 等. 高应变速率下 α - Ti 的一种特殊超塑性变形行为 [J]. 材料研究学报, 1995, 9(4): 317-320.
- [7] Blažynski T Z. Explosive welding forming and compaction [M]. Applied Science Publishers Ltd, 1983. 190-195
- [8] 闫鸿浩, 李晓杰. 爆炸焊接界面产生非晶相的理论解释 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(3): 176-178

作者简介: 张保奇, 男, 1975 年 6 月出生, 硕士研究生。主要从事复合材料的研究, 发表论文 2 篇。

E-mail: dzbq_001@163.com

plied to test an electron beam circumferential weld with complex construction. The relationship between axial liquid path and second focus depth in the workpiece, identification of defect wave by using longitudinal and shear wave, the effects of refraction angle and focus flare angle on detection sensitivity were investigated. The results show that the measured values of second focus depth are higher than the calculated ones and the error increases with the increment of axial liquid path. Without disturbance of surface echowave, defect wave is easily identified by using shear wave to detect lack of penetration in the root segment. It is also found that for small entrance area, the smaller focus flare angle, the higher detection sensitivity.

Keywords ultrasonic test, electron beam weld, water immersion focus

Transient liquid phase bonding of TP304H /12CrMoV dissimilar steel tube JING Xiao tian¹, CHEN Si jie^{1,2}, LU Jun feng¹, LI Xiang geng³(1. School of Materials Science & Engineering, Xian University of Technology Xian 710048 China 2 School of Materials Science & Engineering Henan Polytechnic University Jiaozuo Henan 454000 China 3 Shandong Electric Power Institute Jinan 250002 China). p97 - 101

Abstract Heat resistant steel pipes 12CrMoV and austenitic TP304H stainless steel pipes were joined by transient liquid phase bonding process by using FeNiCSB (A) alloy as filler in argon atmosphere. The influences of the bonding parameters on the microstructures and mechanical properties of bonded joint were studied by using the orthogonal experiment and the optimal bonding parameters were also obtained from orthogonal experiment. The microstructures, fracture appearance and the element distribution of the joints were examined. The result shows the strength of the joint bonded at 1240°C for 3 min under 4MPa with FeNiCSB (A) composite interlayer can reach 590 MPa.

Keywords TP304H /12CrMoV; dissimilar steel tube; TLP bonding microstructure

Sub pixels corner detection for camera calibration LIAO Zhi min, GAO Hong ming, WANG Zhi jiang, WU Lin(National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China). p102 - 104

Abstract Two simple and efficient algorithms of sub pixel corner detection for camera calibration by using plane pattern were presented. The pixel level corners were detected by classical Harris corner detector and then some methods were used to get sub pixel accuracy. In one algorithm, the sub pixel location was achieved through a quadratic approximation of the 3×3 neighborhood of the local maxima of the corner response

function and a closed form solution developed to the problem. In the other algorithm, the sub pixel accurate corner locator was obtained from the observation that any vector from true corner location to its neighborhood is orthogonal to the image gradient. So the sub pixel location was calculated iteratively by minimizing an error function. The result of the camera calibration shows that high precision can be acquired by using the sub pixel algorithms and the mean reprojection error is below 0.15 pixels.

Key words sub pixel corner detector, harris detector, camera calibration

20 kHz high frequency inverter power supply for resistance welding

LIXI gong, YANG Lu dong, ZHANG Liang(Welding Research and Development Center of Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p105 - 107

Abstract A new 20 kHz frequency resistance welding inverter was designed. In this unit IGBT was adopted as switching element. A single line and double inductance rectified commutate circuit was used. In addition, the electron elements were made full use. The inverter power source has many advantages such as saving energy, smaller, lighter and responding rapidly. Furthermore the efficiency of the inverter was improved.

Key words inverter, resistance welding, rectified circuit

Analysis of microstructure in bond interfacial zone of 321-15CrMoR composite plate by explosive welding ZHANG Bao qiang, WANG De he¹, LI Xiao jie², YANG Wen bin²(1 Department of Materials Engineering Dalian University of Technology Liaoning Dalian 116023 China 2 Department of Engineering Mechanics Dalian University of Technology Liaoning Dalian 116023 China). p108 - 112

Abstract In order to investigate metal physics mechanism of explosive welding, the bond interface of 321-15CrMoR composite plate by explosive welding was researched by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), electron probe microscope analysis (EPMA) and microhardness tester (MHD). The results show that waveform appears in the interface and violent plastic deformation occurs. There are adiabatic shearing bands (ASBs) on the side of 321 which has been developed to microcrack. And white lamina strip is found in the wave crest. Both ASB and white lamina strip is composed of ultrafine isometric grains. The atoms near the interface diffuse at short range or do far when melting. Besides, there are microstructure such as crack, gas porosity, looseness and so on in the interface. The microhardness increases remarkably near the interface. All the above ensure quick and high quality metallurgical bonding between flyer plate and base plate.

Key words explosive welding, interface, microhardness, adiabatic shearing bands