

能够达到母材技术条件。

(3) 对于其它高强钢采用不同强度级别的焊接材料组合实施不预热焊接技术,应通过焊接性试验和工艺评定加以验证。

参 考 文 献

- [1] 李亚江. 高强钢的焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [2] 张汉谦. 钢熔焊接头金属学[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [3] 方洪渊,张学秋,杨建国,等. 焊接应力场与应变场的计算与讨论[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 129 - 132.
- [4] 李亚江,沈孝芹,孟繁军,等. 高强度钢焊接区拘束应力的有限元分析[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 57 - 60.
- [5] 赵智力,杨建国,刘雪松,等. 强度失配对接头残余应力分布的有限元预测[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 97 - 100.
- [6] Seo J S, Kim H J, Ryoo H S. Effect of grain boundary ferrite on susceptibility to cold cracking in high - strength weld metal[J]. Metals and Materials International, 2008, 14(4): 515 - 522.
- [7] 杨 军,吴鲁海,茅及放. 低合金高强钢焊缝熔敷金属强韧化机理[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 86 - 90.
- [8] 魏 然,吴开明. 低合金高强度钢焊缝金属中针状铁素体的微观组织[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 47 - 50.
- [9] 上田修三. 荆洪阳,译. 结构钢的焊接—低合金钢的性能及冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004.
- [10] 王亚婷,徐越兰,曹兴华,等. 重要承载钢结构氢致裂纹影响因素分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 101 - 104.
- [11] Magudeeswaran G, Balasubramanian V, Madhusudhan R G. Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(7): 1897 - 1908.
- [12] Kim S J, Jung H G, Kim K Y. Effect of post - weld heat treatment on hydrogen - assisted cracking behavior of high - strength process pipe steel in a sour environment[J]. Scripta Materialia, 2012, 67: 895 - 898.

作者简介: 吴炳智, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事焊接性、焊接材料与工艺研究。

铜 - 钢爆炸复合板的力学性能及显微组织

南京航空航天大学 材料科学与技术学院(210016) 翟伟国 王少刚 罗传孝 丁 丰

摘要 采用合适的工艺参数对 B30 白铜和 Q345A 钢进行爆炸复合,并对复合板的力学性能和显微组织进行了系统的测试和分析。结果表明:在试验条件下,复合板的抗拉强度达 483 MPa,抗剪强度达 222.3 MPa,其力学性能可以满足实际使用要求;金相组织观察显示,复合板连接界面呈波状结合,从界面处向母材基体的晶粒逐渐由等轴细晶向粗晶转变,并且在碳钢一侧发生了原子扩散现象;进一步对结合界面进行 XRD 分析证实,复合板靠近白铜一侧界面并发现有金属间化合物生成,说明文中所采用的爆炸焊接工艺可行,所得复合板具有满意的组织和性能。

关键词: 铜 - 钢复合板 爆炸焊 微观组织 力学性能

中图分类号: TG456.6

0 前 言

爆炸焊是材料成型领域中的一种特殊加工工艺,其特点是在瞬间将不同金属材料组合牢固地焊接在一

起,在大面积板材的焊接、过渡接头的焊接、管与管的焊接、管与板的焊接以及水下焊接等方面具有传统焊接方法无法比拟的优点^[1-2]。爆炸焊作为一种特殊焊接工艺技术,采用这种方法可以制造各种形状尺寸、以及各种特殊用途的双金属及多金属复合材料,以充分发挥和利用这些复合材料的物理化学性能,在减轻结

构件质量以及其它特殊用途方面发挥优势,以满足在不同场合对材料的特殊性能需求^[3]。

B30 白铜因对大气、海水、非氧化性酸及钙盐等具有良好的耐腐蚀性,且易于成形加工,广泛应用于造船、石油、化工、建筑、电力、精密仪表、医疗器械等许多领域中。但在实际使用中,若单独用作结构材料,由于其强度低、密度大、且价格相对较高,在很大程度上限制了其应用范围。采用爆炸焊生产的铜-钢复合板既能保持白铜优异的耐蚀性,又具有普通钢板作为结构件的高强度和一定塑性,使产品的生产成本大幅度降低,应用领域进一步扩大。由于铜的热导率高,在爆炸焊中白铜易受热形成粗大组织,并且还容易与氧结合形成 Cu_2O 。此外,爆炸焊过程的冷却速度过快易造成复合板残余应力过大等问题,这些都将对复合板的性能造成大的不利影响^[4-5]。因此,文中对铜-钢复合板的力学性能进行测试和微观组织结构进行分析,以期在实际生产中铜-钢复合板爆炸焊工艺及其工业应用提供技术指导。

1 试验材料和方法

覆材采用 3 mm 厚 B30 白铜板材,基材选用 24 mm 厚的 Q345A 正火态低合金高强钢板材。B30 的化学成分为 Cu-31.85Ni(质量分数);Q345A 的化学成分见表 1。两种材料的主要力学性能见表 2。采用爆炸焊将两块板材进行爆炸复合,经过优化的爆炸焊工艺及参数如下:使用添加 25% NaCl 的乳化炸药,在炸药中添加 NaCl 的目的是为了降低爆炸速度,炸药爆炸速度 $v_d = 2\ 000\ \text{m/s}$,炸药密度为 $1.0\ \text{g/cm}^3$,装药量为 $2.4\ \text{g/cm}^2$,基覆板之间间距控制为 5 mm,采用边缘法引爆。

表 1 Q345A 钢的化学成分(质量分数,%)

C	Mn	Si	P	S	Fe
0.18	1.6	0.50	≤0.035	≤0.035	余量

表 2 Q345A 和 B30 母材的主要力学性能

材料	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
Q345	470 ~ 630	≥345	22
B30	310 ~ 380	220 ~ 255	20 ~ 28

爆炸焊完成后,采用线切割方法沿平行于爆轰波

方向截取分析测试试样。采用 CMT-5105 型万能电子试验机进行复合板拉伸和剪切试验;采用 HXS-1000A 型显微硬度计测定结合界面区域的显微硬度;在 MM6 型光学显微镜下观察结合界面的金相组织,分析不同区域的微观组织结构;采用 Quanta200 型扫描电镜观察拉伸和剪切断口形貌;采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪测定复合界面的相结构组成。

2 试验结果及分析

2.1 复合板力学性能

2.1.1 拉伸性能

根据 GB/T 228—2002《金属拉伸试验方法》,将复合板沿爆轰波方向取样,加工成拉伸试样尺寸为 $200\ \text{mm} \times 13\ \text{mm} \times 27\ \text{mm}$,测试条件为:加载速率 $5\ \text{mm/min}$,加载载荷 10 kN。为了保证测试数据的准确性,文中取 3 个复合板平行试样进行试验,然后求其平均值,拉伸试验结果见表 3。

表 3 复合板拉伸试验结果

试样	上屈服强度 R_{eH}/MPa	下屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
1	395	390	495	23
2	385	385	480	24
3	390	385	475	24

依据文献[6],复合板的抗拉强度理论下限标准值 R_m 可按式(1)进行计算。

$$R_m = (t_1 R_{m1} + t_2 R_{m2}) / (t_1 + t_2) \quad (1)$$

式中: R_{m1}, R_{m2} 分别为基材、覆材的抗拉强度下限值; t_1, t_2 为覆材的厚度。由表 2 中数据计算得到铜-钢复合板的抗拉强度理论值为 $R_m = 452\ \text{MPa}$,与表 3 中拉伸试验结果进行对比,可以发现铜-钢复合板的拉伸强度大于其理论计算抗拉强度下限值,完全可以满足实际工程结构对其力学性能的要求。

2.1.2 抗剪强度

根据 GB/T 6396—2008《复合板力学性能及工艺试验方法》,沿爆轰波方向将试样加工成标准剪切试样,试样的形状尺寸如图 1 所示,然后将试样在 CMT5105 型电子万能试验机上进行拉剪试验,复合板剪切试验结果见表 4。

剪切试验的结果使复合板的基层、覆层发生分离,从表 4 中的数据可以看出,其抗剪强度平均值大于 220 MPa。

表4 复合板剪切试验结果

复合板试样	基层厚度 δ_b/mm	覆层厚度 δ_c/mm	粘结面积 S/mm^2	最大拉力 F/kN	抗剪强度 τ/MPa
1	25	3	6.05×4.5	6.08	223.5
2	25	3	6.10×4.5	5.86	213.6
3	25	3	6.32×4.5	6.53	229.7

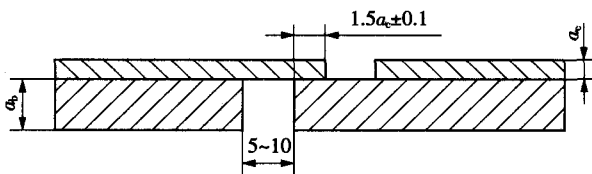


图1 复合板剪切试样示意图

2.1.3 显微硬度

采用 HXS-1000A 型显微硬度计测量 B30/Q345A 复合板界面附近区域的显微硬度分布,测试条件为:加载负荷 100 g,加载时间 30 s。硬度测试方法为:以结合面为基准线分别向基层、覆层母材两侧进行测量,测量点之间的间隔约为 0.5 mm,沿爆轰波方向在复合板不同位置截取两个试样,样品 1 为沿爆轰波方向前端位置,样品 2 为沿爆轰波方向后端位置。测得复合板试样的显微硬度分布曲线如图 2 所示。

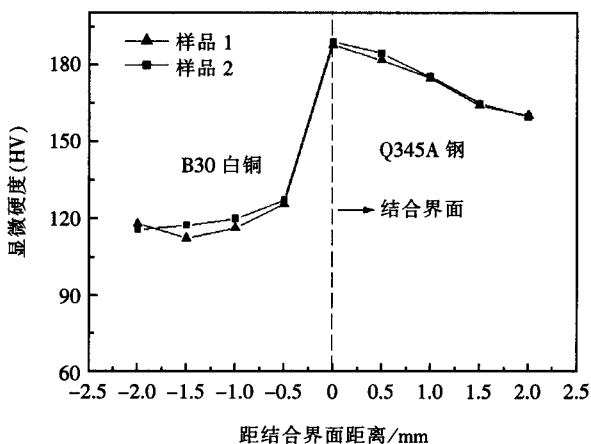


图2 复合板显微硬度分布曲线

由图中曲线可以看出,在结合界面处的硬度值最高,并明显高于组成复合板的基体金属。分析其原因,这是由于爆炸焊焊接过程中,基体金属板材之间发生高速碰撞,使金属受到强烈的压缩作用并产生剧烈的塑

性变形,导致在界面两侧产生不同程度的加工硬化,在界面处金属的塑性变形程度最强烈,使结合界面处的硬度值比两侧基体的硬度值高。随着与界面的距离逐渐增加,其两侧基体部位的硬度值逐渐降低,当距离增至变形层之外以后,硬度就趋近于基体金属的原始硬度,这是由于相应位置金属的塑性变形逐渐减弱所致。硬度值的变化可在一定程度上表明结合界面的变形梯度大小,白铜侧的金属塑性变形梯度较大。另外图中两条曲线的分布规律基本一致,说明在爆炸焊焊接过程中,爆轰波前端和后端的硬度分布基本相同,分析其原因,是由于爆炸焊属于瞬态焊接过程,复合板沿爆轰波方向在各个区域相应位置所受热和力的作用基本一致,因此其在界面附近的显微硬度分布也比较接近。

2.2 微观组织结构分析

2.2.1 金相组织观察

沿平行于爆轰波方向垂直于复合板表面截取金相观察试样,依次通过砂纸打磨,在抛光机上抛光,然后进行腐蚀。由于铜、钢的耐腐蚀性能差异较大,要获得清晰的异种金属结合界面处的金相组织照片难度很大,为此采用分步腐蚀的方法,采用 4% 硝酸酒精腐蚀碳钢侧,采用混合试剂(成分配比为:醋酸:丙酮:硝酸=3:2:3)对白铜侧进行腐蚀,然后在 MM6 光学显微镜下进行观察,拍摄的金相组织照片如图 3 所示。

图 3a、图 3c、图 3e 为 Q345A 侧金相组织,从图中可以看出,爆炸焊结合界面呈类似正弦波形结合特征。参考相关文献[7-8],可根据波形的波长和波幅将这些波状结合界面分为如下 3 类:大波状、小波状、微波状结合。文中爆炸焊结合界面应属于小波状结合,界面结合性能较好,从图中可看出基本无孔洞、杂质等缺陷。Q345A 侧呈现黑色流线(珠光体)有规律的分布在白色基体(铁素体)上,靠近结合界面处,晶粒细化,分析其原因有两点:①在爆炸焊焊接过程中,由于覆板高速撞击基板而产生的高温、高压,使基、覆板表面熔化,之后又迅速凝固形成细晶组织,这也是结合界面处硬度值较高的原因之一;②结合界面处产生的剧

烈塑性变形,破碎了粗大的原始组织,然后发生重结晶,使晶粒得到细化。此外,在图 3e 的波峰边界处,发现了一层黑色的组织,这是在爆炸焊中碳钢侧的碳原

子向白铜侧扩散在结合界面处形成的富集带,在爆炸焊焊接过程中,碳钢作基层材料将不可避免地出现这一现象^[9]。

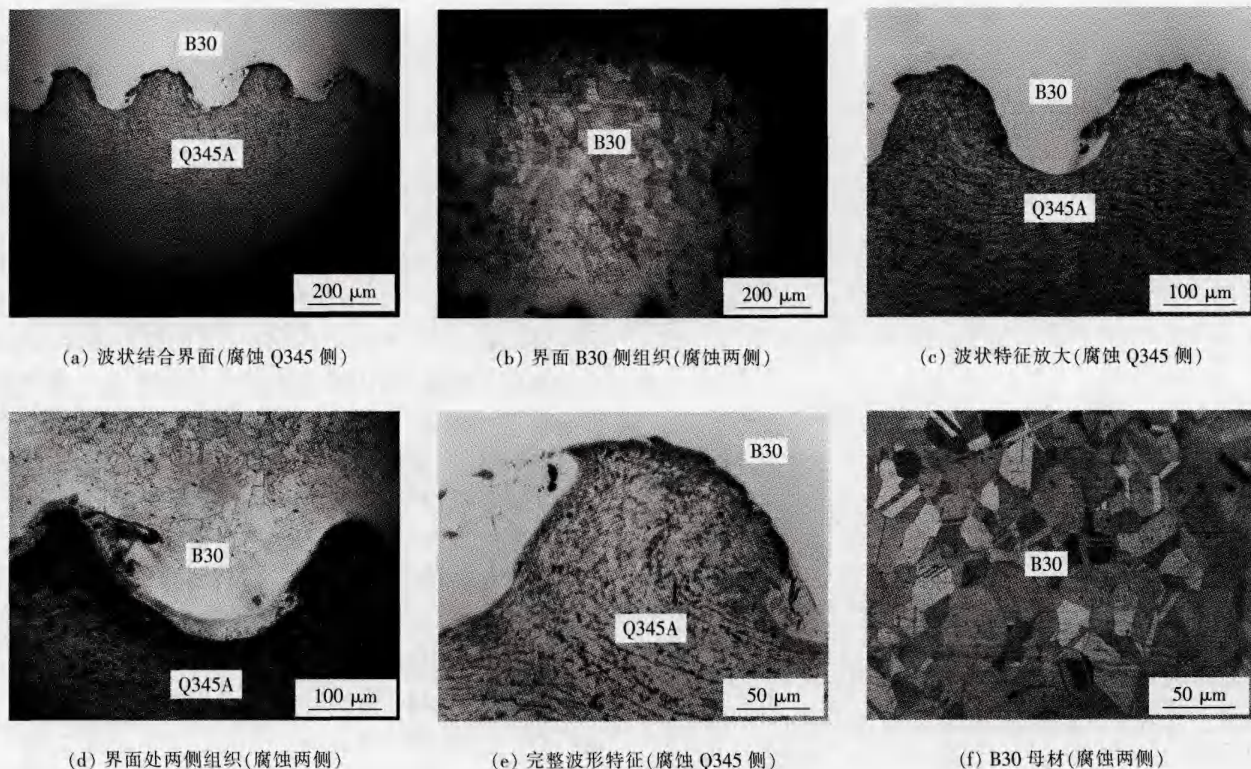


图 3 复合板金相组织

图 3b、图 3d 和图 3f 是 B30 侧的金相组织。B30 白铜为铜镍元素形成的无限固溶体合金,基体组织为单一的 CuNi 相,在结合界面处晶粒细化,沿结合界面处向复层边缘晶粒逐渐变大,相对于碳钢侧,白铜侧的晶粒大小变化梯度较大,这与爆炸焊焊接时不同区域的塑性变形和经受的热循环作用有关,且热循环过程与白铜的热导率较高有关。

2.2.2 XRD 物相分析

在爆炸焊焊接过程中,由于碳钢中的碳原子浓度高、较易扩散,以及不同金属熔化时容易在结合界面处形成金属间化合物或者脆硬的中间相,这些中间相的形成一方面可使结合界面的强度有所增强,但另一方面也对结合界面的性能造成大的不利影响^[10],文中对结合界面处靠近 B30 侧进行了 XRD 物相分析。

试验测得复合板界面区域的 XRD 分析曲线如图 4 所示。从图中可以看出,在结合界面区域主要由 α -Fe 和 Cu-Ni 两种相组成, α -Fe 为 Q345 钢中的基体

相,Cu-Ni 相为 B30 白铜单一的基体相,除此之外,未见有其它金属间化合物相形成。分析其原因,主要是采取文中的工艺参数进行铜-钢复合板爆炸焊,在结

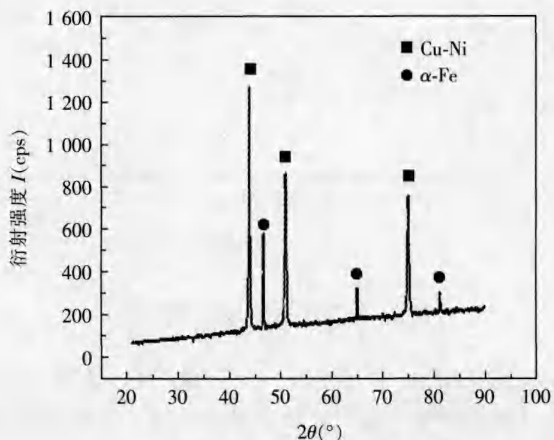
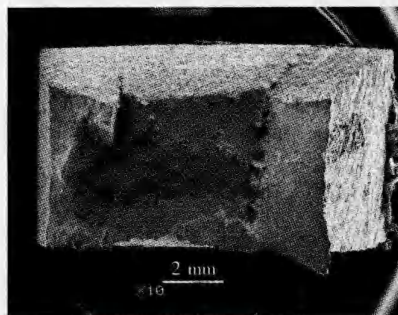


图 4 复合板界面区域 XRD 分析

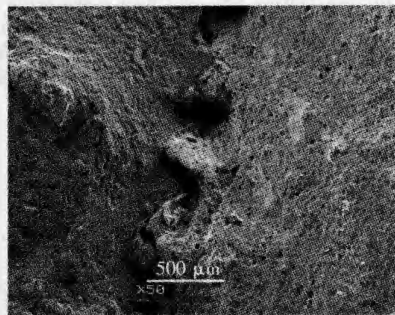
合界面处并没有造成金属熔化,基层、覆层之间的结合为直接固相结合,从而可避免熔化和中间相产生。这一现象也是在爆炸焊中期望出现的结果,说明采用爆炸焊工艺参数可较好地控制结合界面处的中间相生成。

2.2.3 断口扫描观察

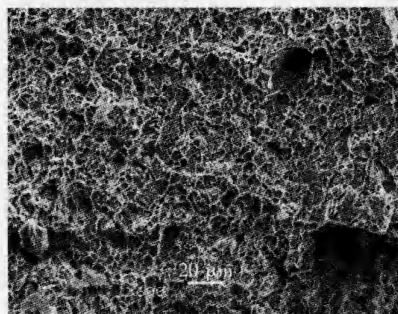
图5为复合板拉伸断口形貌照片,由图中可知,复合板拉伸时,基、覆板在外力作用下各自产生塑性变形、形成缩颈,直至最后拉伸断裂,其波状结合界面也未发生分离。



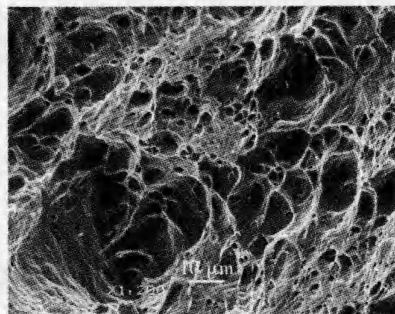
(a) 复合板整体拉伸断口



(b) 结合界面处断口



(c) B30 侧断口形貌



(d) Q345 侧断口形貌

图5 复合板拉伸断口扫描

图5a为试样拉伸断口的宏观扫描图片,从图中可以看出,铜-钢复合板拉伸断口试样由3个区域组成,分别为B30白铜母材断裂区、Q345A钢母材断裂区以及结合界面区。图5c为对应白铜侧母材区的SEM放大图像,断口表面主要由分布均匀的韧窝组成,呈典型的韧性断裂特征。图5d为对应Q345A钢侧的断口形貌,断口表面也主要是由韧窝组成,与白铜母材侧断口相比,韧窝的大小及深度有所不同,相对于白铜具有更好的塑韧性,这与基体材料本身的物理和力学性能相符。图5b为复合板结合界面处的断裂形貌,从图中可以看出,在结合界面处表现为由空隙、裂缝以及材料塑性变形区组成的复杂断口形貌,通常情况下,爆炸焊结合界面为复合板的薄弱区域,在拉伸过程中,这一区域会发生撕裂现象。依据图5b可知,文中所得复合板的结合界面不仅未发生撕裂,而且

结合相当牢固,说明焊接参数获得的复合板界面具有较高的结合强度。

图6为复合板剪切断口Q345A侧扫描图片,宏观断口呈周期性的凸棱和凹沟分布,这实际上是爆炸焊波状结合界面特征,波峰(凸棱)波谷(凹沟)明显可见。分别对其波峰波谷处进行SEM放大观察,图6c为剪切断口波谷形貌,在剪切应力的作用下有较多的滑移带产生,形貌显示较为单一,分布较为均匀,微观断口具有方向性的层片状形貌分布,呈现解理断口特征,也说明这一区域的结合力较弱。图6d为剪切断口波峰处形貌,这一区域形貌较为复杂,断口表面分布有大小深浅不一的韧窝和撕裂棱,说明这一区域已经出现韧性断裂趋势,整体断口显示其为包含脆性和韧性的混合型断裂特征,同时也说明文中铜-钢爆炸结合界面波峰处的结合力要高于波谷。

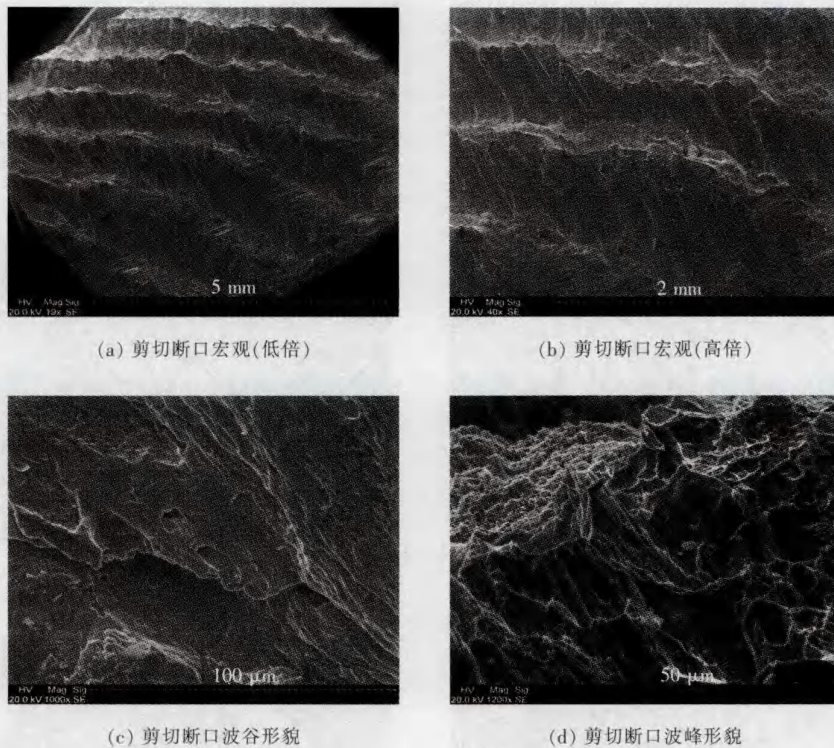


图6 复合板剪切断面Q345A侧形貌

3 结 论

(1) 采用合适工艺参数成功爆炸复合铜-钢复合板,对复合板的力学性能进行检测,其抗拉强度平均值达到483 MPa,抗剪强度平均值达到222.3 MPa,在结合界面处的显微硬度值最高,垂直于界面向母材两侧的硬度值逐渐降低。

(2) 金相组织观察发现,结合界面呈周期性波状结合界面,在界面处为等轴细晶组织,晶粒向界面两侧逐渐增大;拉伸断面扫描电镜观察显示,复合板基、覆层各自为韧性断裂,在结合界面处呈复杂断裂形貌;剪切断面显示,波谷处断面呈脆性断裂特征,波峰处显示为韧性结合的混合断裂特征。

(3) 对结合界面靠近B30侧的XRD分析结果显示,该区域只有基体相存在,在爆炸焊接过程中并未生成新的金属间化合物,保证了界面之间的结合强度。

参 考 文 献

[1] Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1081-1093.
 [2] 王健民,朱 锡,刘润泉. 爆炸焊接的应用与发展[J]. *材料导报*, 2006, 20(1): 42-45.

[3] 田雅琴,秦建平,李小红. 金属复合板的工艺研究现状与发展[J]. *材料开发与应用*, 2006, 21(1): 40-43.
 [4] Durgutlu A, Gulene B, Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. *Materials and Design*, 2005, 26(6): 497-507.
 [5] 杜永勤,魏 荣,苑晓刚. 铜/钢复合板焊接工艺[J]. *焊接*, 2003(12): 20-22.
 [6] 殷建军,赵海敏,张 勇. GB 6369—1995《复合钢板力学性能及工艺性能试验方法》简介[J]. *理化检验-物理分册*, 2000, 36(6): 276-281.
 [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: 23-25.
 [8] Akbari Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. Explosive welding of metal plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202(1-3): 224-239.
 [9] 丁成刚,于启湛. 爆炸焊接复合板交界区的冶金行为[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 85-88.
 [10] Akbari Mousavi S A A, Farhadi Sartangi P. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(3): 459-468.

作者简介: 翟伟国, 1986年出生, 硕士研究生, 主要从事金属复合板爆炸焊接及其组织与性能研究。