

爆炸焊制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板工艺及性能

张亚^{1a,1b}, 宋克兴^{1a,1b}, 王青^{1b,2}, 张彦敏^{1a,1b}

(1. 河南科技大学 a. 材料科学与工程学院; b. 河南省有色金属材料科学与工程重点实验室, 河南 洛阳 471023; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 用内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉, 将 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉进行真空热压烧结, 得到 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板, 然后采用爆炸焊法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板, 并对复合板界面性能进行了研究。研究表明: 在 1 000 °C, 压力为 4 MPa 的条件下, 经 3 h 真空热压烧结制备 Al_2O_3 质量分数分别为 1.0% 和 0.5% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板, 采用爆炸焊方法能够与 QCr0.5 结合制备出质量良好的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板, 且 Al_2O_3 质量分数为 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板结合质量较好; 结合界面硬度介于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 基体和 QCr0.5 基体之间; 爆炸参数不同会引起漩涡、周边打伤、打裂等问题; 受爆炸冲击作用, 在结合面处晶粒变形最大, 较远位置处变形微小。

关键词: 爆炸焊; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板; 结合界面; 组织

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

0 引言

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料作为最为广泛的弥散强化铜基复合材料之一, 不仅强度高, 导电性及导热性与纯铜接近, 而且还有良好的抗电弧侵蚀和抗磨损能力及较高的强度, 具有广泛的应用前景^[1-2]。通过众多学者对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料制备技术的研究^[3-6], 发现内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的综合性能最好^[7]。但由于制备大块 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 工艺复杂、成本高, 且 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 塑性差、成品率低, 目前大块 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 制备的公开报道较少。铬青铜以其较高的强度、硬度、耐磨性和耐蚀性, 以及良好的导电导热性能, 在电工、电子、电机行业中备受关注^[8]。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板兼具 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 和 QCr0.5 的优点, 但至今对于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu-QCr0.5}$ 复合板结合的研究未见报道。爆炸焊接是利用炸药爆炸产生的可控巨大能量和冲击波, 使不同金属高速碰撞, 在碰撞点产生高温、高压, 使碰撞点附近金属产生强烈塑性变形, 而实现不同金属材料组合的高质量的冶金结合技术^[9]。爆炸焊接双层材料加工技术具有适合大面积复合、结合区界面强度高、工艺简单等显著的优点。

本试验拟采用内氧化法 + 真空烧结制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板, 尝试用爆炸焊接技术对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 和 QCr0.5 进行焊接, 用表面处理代替整体处理以获得一种高导电率且表面硬度、耐磨性较高的复合材料, 并研究其组织与性能, 以期拓展铜基复合材料的应用提供依据。

1 试验方法

1.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板的制备

本文以无氧铜 ($\text{Cu} \geq 99.95\%$) 和电解铝 ($\text{Al} \geq 99.90\%$) 为原材料, 通过内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉末。制备工艺如下: 首先熔炼 Cu-Al 固溶合金, 然后采用氮气雾化法雾化熔体成 Cu-Al 合金粉末。将制成的粉末与氧源混合, 氧源为 Cu_2O 粉。把混合粉末加热到高温, Cu_2O 分解, 生成的氧扩散到 Cu-Al 合金粉末中, 由于 Al 比 Cu 更易形成氧化物, 因此合金中的 Al 优先氧化成 Al_2O_3 , 最后生成 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉及少量的 Cu_2O 粉。合金中的 Al 全部被氧化后, 在氢气气氛中将粉末进行加热, 还原粉末中过量的氧, 最后生成 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51075122); 河南省杰出人才基金项目 (134200510011)

作者简介: 张亚 (1988-), 女, 河南商丘人, 硕士生; 宋克兴 (1967-), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为材料加工。

收稿日期: 2013-05-13

采用石墨模具烧结,热压烧结温度为 1 000 ℃,压强为 4 MPa。分别将 Al_2O_3 质量分数为 0.5% 和 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 粉倒入模具中,并在 VDBF-250 型真空扩散钎焊炉里进行真空热压烧结,具体参数如图 1 所示。烧结完成后对材料进行导电率和硬度测试,结果见表 1。

1.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板的制备

选用 2#岩石硝铵炸药^[10],炸药密度为 0.80 ~ 1.00 g/cm^3 ,爆速 $\geq 3.2 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。爆炸焊参数^[11]的计算:对于一般的平板焊接布置,可调节的工艺参数为炸药的种类、密度、爆速、炸药厚度、质量比、基复板间隙等。本试验主要采用单位面积的装药量、炸药的爆速及基复板的最小碰撞速度参量。具体工艺参数如表 2 所示。

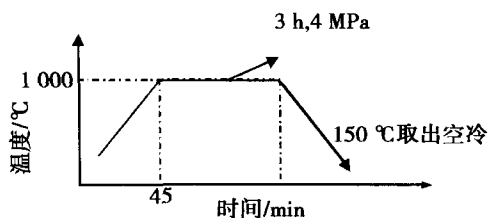


图 1 试样真空热压烧结的工艺曲线

表 1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 性能测试结果

材料	维氏硬度 HV	布氏硬度 HBS	导电率/ % IACS	密度/ (g/cm^3)	相对密度/ (g/cm^3)	直径/ mm	厚度/ mm
$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.5\% / \text{Cu}$	134.3	70.6	85.9	8.485	0.957	168	3.0
$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.0\% / \text{Cu}$	165.8	84.5	70.8	8.217	0.933	168	3.0

注:IACS 国际退火铜标准。用来表征金属或合金的导电率(参比于标准退火纯铜)。一般定义标准退火纯铜的导电率为 100% IACS。

表 2 爆炸焊试验参数

编号	基板材料	复板材料	复板直径/ mm	复板厚度/ mm	复板质量/ g	间距/ mm	药厚/ mm	炸药类型
1#	QCr0.5	$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.5\% / \text{Cu}$	168	3.0	700	10	22	WJ/T9026
2#	QCr0.5	$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.0\% / \text{Cu}$	168	3.0	755	10	18	WJ/T9026

1.3 测试分析方法

从复合板的外观结合较好的部分用线切割取截面为 15 mm × 15 mm 试样,用于宏观形貌观察和显微硬度测试。为得到 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板与 QCr0.5 板爆炸焊接接头各不同区域显微硬度的分布情况,沿垂直焊缝方向连续进行了微压痕测试。为保证得到材料的真实硬度,所采用的载荷为 490.3 mN,载荷保持时间为 5 s,结合面硬度测试方法如图 2 所示。然后对试样在各种粒度的砂纸上细磨,采用可进行调速的普通金相抛光机机械抛光,使用腐蚀剂(40 mL H_2O 、1.5 mL 的 HCl 溶液和 2 g 的 FeCl_3 按比例进行配置)均匀腐蚀,用日产 OLYMPUS PMG3 型倒置式光学金相显微镜进行金相组织观察,并进行组织分析。

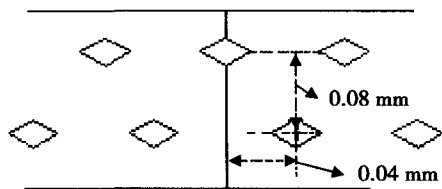


图 2 结合面显微硬度测试示意图

2 试验结果与分析

2.1 复合板的宏观形貌

图 3 为利用爆炸焊制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板。从图 3 可以看出:图 3a 焊接较好,除周边破裂外,其余较为完好;图 3b 周边未焊接区域较大,且有裂纹区。材料外围被打伤是由于在复合板的爆炸焊接工艺中,存在一种称为边界效应的物理现象,即在爆炸焊接的复合材料中,会出现雷管区不复焊、其余周边被打伤、打裂和变形等问题。这些现象都会或多或少的存在,并且不可避免。由于雷管区不复焊和其余周边打伤打裂等现象均存在于爆炸复合的边部,故都称为爆炸焊接的边界效应^[11-12]。边界效应的出现与能量有关:雷管区焊接不上,是由于能量不足;其余边部被打伤打裂,因为对应位置能量过大。图 3b 存在裂纹区主要原因是其 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板中 Al_2O_3 含量高,脆性较大所致。对于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 而言,抗

冲击性能差是可能导致破裂的内在原因,而爆炸焊接又是一个强冲击载荷过程,因此, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板在爆炸焊接过程中不仅容易产生裂纹,而且破裂也最容易出现板的边缘部位。 Al_2O_3 含量较高可能也是导致 Al_2O_3 质量分数 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板边缘开裂现象要比 Al_2O_3 质量分数 0.5% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板的严重的原因。

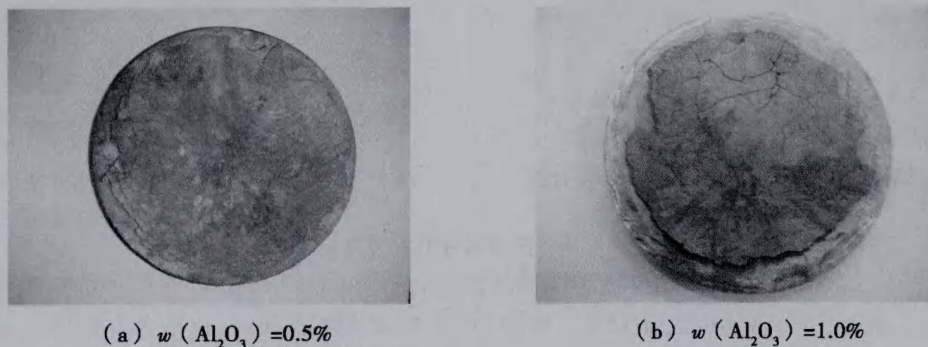


图3 爆炸焊接制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板

2.2 显微硬度测试

复合板与结合面垂直方向的显微硬度测试结果如图4所示,其中,图4a为 Al_2O_3 质量分数为 0.5% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板爆炸焊接试样的显微维氏硬度分布图;图4b为 Al_2O_3 质量分数为 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板爆炸焊接试样的显微维氏硬度分布图。

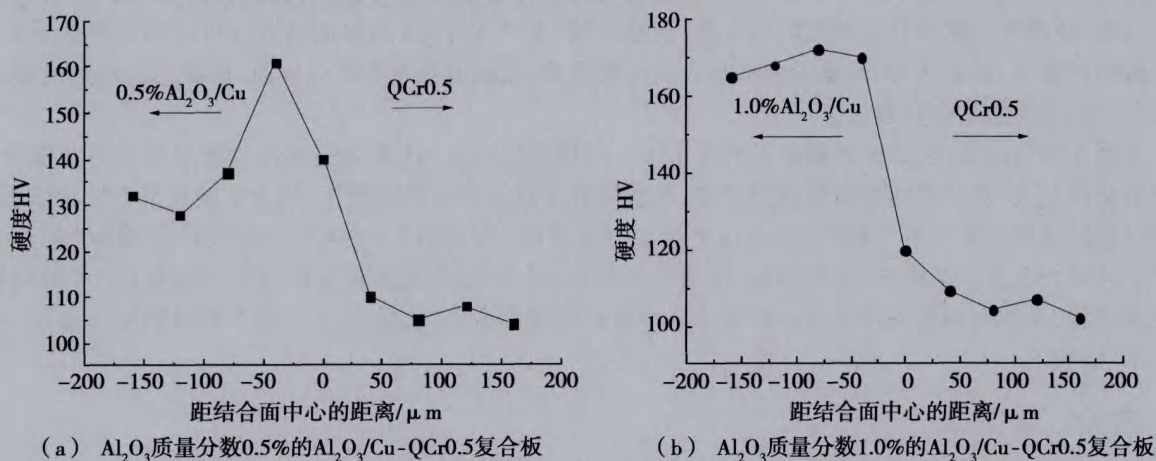


图4 结合面垂直方向的硬度分布图

从图4可以看出:结合界面宽度约为 $100\ \mu\text{m}$; Al_2O_3 质量分数 0.5% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板结合界面上的硬度呈现先升高后降低的趋势; Al_2O_3 质量分数 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板结合界面硬度呈下降趋势,且比 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 基体的硬度低,比 QCr0.5 基体的硬度高。爆炸焊过程中, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板与 QCr0.5 板强烈碰撞,高温环境使金属局部熔化,发生相互扩散,产生冶金结合,生成不同于基体材料的新相,新相硬度不同于基体硬度。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 基体到 QCr0.5 基体方向,结合界面中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 含量呈下降趋势, QCr0.5 含量呈上升趋势, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 硬度较 QCr0.5 硬度高,从而导致结合界面处硬度呈下降趋势。界面层硬度还与该位置上金属塑性变形的程度强烈有关。随着与界面距离的增加,靠近 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 和 QCr0.5 基体内的硬度总体呈下降趋势。这主要是相应位置上的金属塑性变形的程度逐渐减弱所致。

2.3 微观组织分析

图5a为 Al_2O_3 质量分数 0.5% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板爆炸焊接试样的金相组织图,图5b为 Al_2O_3 质量分数 1.0% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5 复合板爆炸焊接试样的金相组织图,金相观察面是爆轰波传播方向的截面。图5所显示爆炸焊接结合界面结合良好,有起伏。主要特征:结合界面呈波浪形,这是由于炸药爆轰过程中,其能量呈波形增加,有漩涡^[12-13],有熔化现象。

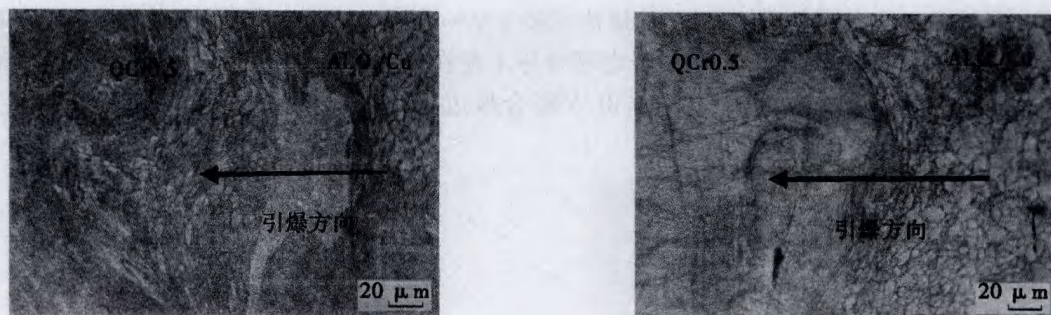
(a) Al_2O_3 质量分数0.5%的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5复合板(b) Al_2O_3 质量分数1.0%的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5复合板

图5 爆炸焊接试样的金相组织图

图5a中两材料结合界面是由曲线结合区和漩涡区组成,波峰两侧均有漩涡,右侧的为前漩涡,以基层成分为主,左侧的为后漩涡,以复板成分为主。从图5b中可以清晰地看到:在结合界面结合良好,无明显开裂及气孔产生,结合界面有较小起伏,略微呈现出漩涡状态。漩涡是爆炸焊接金属射流在界面上被复板或基板捕获后凝固而成的,其成分介于覆板和基板之间。被基板捕获的称前涡,被复板捕获的称后涡。图5a所示的为前漩涡。漩涡是几种物质的机械混合物,有新生成的金属间化合物,有高速碰撞过程中飞溅进入的基体金属碎块,也有滞留于漩涡中心的待焊金属板面污染物和中间空气层,另外漩涡内还存在疏松、裂纹等缺陷^[14-15]。漩涡应作为一种尽量避免的缺陷。界面漩涡的产生以及其大小受爆炸焊接参数的制约,当爆炸焊接参数不当(如碰撞速度较大)时,漩涡的尺寸较大,这样会影响界面的结合性能。目前,还没有文献来具体研究漩涡参数(包括形状、尺寸和分布)与界面结合强度之间的具体关系。关于漩涡的意义,通常认为:漩涡沿着结合界面周期性地、间断地分布在结合界面,漩涡内的缺陷受漩涡边界的制约不易扩展到金属内。

从图5还可以看出:结合界面附近有大小不一的块状体存在,这主要是爆炸过程中界面熔化所致。如果装药量过大,焊接界面处热量沉积过多,就会使复合界面局部过度熔化,结合界面就呈大波状结合,使得过渡区域中产生一定“缝隙”,在基材上会出现大量的“空洞物”。这些“缝隙”和“空洞物”将会削弱界面的结合强度。从图5b可以看出:在结合界面处的晶粒塑性变形程度明显要比远处的大,晶粒被压成扁平状,从结合面到基体方向晶粒塑性变形的程度逐渐减轻,试样随着与结合界面距离的增加,硬度呈下降趋势。

3 结论

- (1) 在1 000 ℃,压力为4 MPa的条件下,经3 h真空热压烧结可以制备性能良好的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 板。
- (2) 利用爆炸焊方法可以制备出界面结合良好的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5复合板,且结合界面处硬度介于两侧基体之间。
- (3) 爆炸焊制备出的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 中 Al_2O_3 质量分数为1.0%的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5复合板界面结合较好, Al_2O_3 质量分数为0.5%的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ -QCr0.5界面结合较差。

参考文献:

- [1] 李斌,刘贵民,丁东华,等.弥散强化铜合金的研究现状[J].材料导报,2012,26(17):107-111.
- [2] 刘爱辉,丁红燕,周广宏,等.原位反应法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的工艺研究[J].润滑与密封,2012,37(2):65-68.
- [3] 郑翼,赵乃勤,李宝银,等.内氧化 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CuCr}$ 复合材料工艺与性能的研究[J].材料热处理学报,2001,22(4):48-51.
- [4] 李美霞,郭志猛,赵奇特.氧化铝弥散强化铜的研究进展及其应用[J].粉末冶金工业,2008,18(1):36-40.
- [5] 高闰丰,梅炳初,朱教群,等.弥散强化铜基复合材料的研究现状与展望[J].稀有金属快报,2005,24(8):1-7.

(下转第18页)

较好地实现缺陷类型的区分。

(2) 利用朴素贝叶斯分类器与图像处理技术相结合,实现了对缺陷小样本数据的统计分析,提高了航空滚动轴承典型缺陷的识别准确率。

参考文献:

- [1] 苏敏,王勇,何惜港,等.基于 LabVIEW 的滚动轴承故障诊断系统[J].轴承,2010(9):41-44.
- [2] 王中宇,夏新涛,朱坚民,等.精密仪器的小样本非统计分析原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [3] 金光.小子样条件下航天轴承性能可靠性建模与评估[J].国防科技大学学报,2010,32(1):133-137.
- [4] 陈龙,夏新涛,王中宇,等.航空发动机主轴轴承可靠性评估方法[J].机械制造,2004,42(478):18-20.
- [5] 涂宏斌,周新建.基于支持向量机的轴承表面缺陷检测[J].现代制造工程,2006(9):90-92.
- [6] 祝世丰.贝叶斯网络分类模型研究及其在小样本故障诊断中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [7] 刘天羽,李国正.滚动轴承故障诊断中数据不均衡问题的研究[J].计算机工程科学,2010,32(5):150-153.
- [8] 林士敏,田风占,陆玉昌.用于数据挖掘的贝叶斯分类器研究[J].计算机科学,2000,27(10):73-76.
- [9] 林士敏,田风占,陆玉昌. Bayesian 方法的计算学习机制和问题求解[J].清华大学学报,2000,40(9):61-64.
- [10] 侯文英,杨懿,王铁辉,等.基于视觉的铁路货车滚动轴承表面缺陷分类研究[J].轴承,2012(7):43-46.
- [11] Rafael C G, Richard E W. 数字图像处理[M].阮秋琦,阮宇智,译.北京:电子工业出版社,2003.
- [12] 杨阳,蒋先刚.基于图像分析的滚动轴承表面缺陷识别技术研究[J].华东交通大学学报,2008,25(6):41-45.
- [13] 刘剑平,朱坤平,陆元鸿.应用数理统计[M].上海:华东理工大学出版社,2012.

(上接第 12 页)

- [6] 国秀花,宋克兴,郜建新,等. Al_2O_3 弥散强化铜基复合材料的研究现状与进展[J].材料开发与应用,2006,21(4):41-46.
- [7] 李韶林,宋克兴,国秀花.制备方法对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2013,33(3):272-275.
- [8] 刘瑞华,宋克兴,贾淑果,等.铬青铜高温力学性能研究[J].铸造技术,2008,29(3):338-340.
- [9] 郑远谋.爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M].长沙:中南大学出版社,2002.
- [10] 张鹏,董文忠.2#岩石炸药在铜钢爆炸焊接中的应用[J].电焊机,2001,31(3):45-46.
- [11] 李明,张新华.工具钢-普碳钢复合板爆炸焊接试验与分析[J].爆破,2009,26(2):74-76.
- [12] 王飞,刘广初,王连来.减小爆炸焊接边界效应影响研究[J].工程爆破,2005,11(2):6-9.
- [13] 张保奇.异种金属爆炸焊接结合界面的研究[D].大连:大连理工大学,2005:6-20.
- [14] Li Y, Hashimoto H, Sukedai E, et al. Morphology and Structure of Various Phases at the Bonding Interface of Al/Steel Formed by Explosive Welding[J]. Journal of Electron Microscopy, 2000, 49(1):5-16.
- [15] 王建民.爆炸焊接工艺对铝-钢复合板界面性能的影响[J].武汉理工大学学报,2007,29(7):103-105.