

砼泵耐磨板连续气氛保护钎焊工艺开发与应用

卢尚文^{1, 2}, 刘石柏¹, 文丞¹, 杨雨晴¹, 付晓波¹, 张凯¹

1. 湖南工业职业技术学院汽车工程学院 湖南长沙 410208

2. 国防科技大学空天科学学院新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室 湖南长沙 410007

摘要: 通过深入分析对比现有砼泵易损件耐磨板的生产工艺及钎焊方式, 剖析了火焰钎焊、感应钎焊、真空钎焊在实际生产中面临的问题, 结合连续气氛保护网带炉和窑炉的特点, 成功开发一种适合砼泵耐磨板大间隙、大面积、重工件连续气氛保护钎焊的工艺, 并自主研发设计了成套连续气氛保护钎焊设备。应用钎料BCu对砼泵耐磨板进行连续气氛保护钎焊, 通过外观检测、超声波无损检测、焊接接头组织分析、元素扩散及界面行为分析, 优化工艺参数。结果表明: 采用自主开发的连续气氛保护钎焊设备可以快速高效地生产高质量的砼泵耐磨板, 钎料BCu对耐磨板的衬板YG20和耐磨板本体Q235B钢具有良好的润湿性和铺展性, 焊缝填充饱满, 焊脚圆润, 焊接接头组织致密均匀, 无夹渣和气孔等焊接缺陷, 满足工业产品使用要求, 并且可以推广应用到盾构机械刀盘上的刀具等工程机械耐磨易损件的生产。

关键词: 耐磨板; 连续气氛保护钎焊; 钎焊接头

Development and research of continuous atmosphere protection brazing technology for wear-resistant plate of concrete pump

LU Shangwen^{1, 2}, LIU Shibai¹, WEN Cheng¹, YANG Yuqing¹, FU Xiaobo¹, ZHANG Kai¹

1. College of Automotive Engineering, Hunan Industry Polytechnic, Changsha 410208, Hunan, China

2. Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites Laboratory, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410007, Hunan, China

Abstract: In this paper, through in-depth analysis and comparison of the existing production process and brazing method of wear-resistant plate of concrete pump vulnerable parts, the problems faced in the actual production of flame brazing, induction brazing and vacuum brazing are analyzed. Combined with the characteristics of continuous atmosphere protection mesh belt furnace and kiln, a continuous atmosphere protection brazing process suitable for large gap, large area and heavy workpiece of concrete pump vulnerable parts is successfully developed, and a complete set of continuous atmosphere protection brazing equipment is independently developed and designed. BCu solder was used to braze the wear-resistant plate of concrete pump wearing parts under continuous atmosphere protection. Through appearance detection, ultrasonic nondestructive flaw detection, microstructure analysis of welded joints, element diffusion and interface behavior analysis, the results show that the self-developed continuous atmosphere protection brazing equipment can quickly and efficiently produce high-quality wear-resistant plate of concrete pump wearing parts. The solder (BCu) has good wettability and spread ability to the wear-resistant lining

基金项目: 湖南省职业院校教育教学改革研究项目(ZJBZ2021025); 湖南省自然科学基金部门联合基金(2023JJ60191)。

通信作者: 张凯, 博士, 主要从事高强度材料焊接研究, E-mail: jh13zhang@163.com。

plate (YG20) and the wear-resistant plate body (Q235B) of the wear-resistant plate. The weld is full and the weld foot is round. The microstructure of the welded joint is dense and uniform, and there are no welding defects such as slag inclusion and porosity, which meets the requirements of industrial products. It can also be applied to the production of wear-resistant and vulnerable parts of engineering machinery such as cutters on the cutter head of shield machinery.

Keywords: wear plate; continuous atmosphere protection brazing; brazed joints

1 序言

混凝土泵送机械用的耐磨板采用在优质普通碳素钢上钎焊硬质合金块,形成的耐磨面具有超强的硬度和耐磨性^[1-5]。目前,该砼泵耐磨板大多采用电阻炉加热火焰钎焊工艺(见图1),由于该耐磨板为异种材料大面积钎焊,在钎焊过程中受热不均,母材之间热膨胀系数相差大,因此焊接应力大,焊后母材变形和底面虚焊严重^[6-10]。感应钎焊(见图2)工艺加热速度快,生产效率高,可以大幅度提升钎焊质量,但是其趋肤效应明显,表面过烧严重,且不适合耐磨板等异形件钎焊^[11-13]。真空钎焊(见图3)虽然钎焊质量可靠,但是其生产效率低,不适合大批量重工件的连续生产。



a) 火焰钎焊



b) 补焊工艺

图1 耐磨板火焰钎焊

因此,亟待开发一种新的钎焊工艺取代现有生产工艺。针对以上大面积、大间隙、重工件连续钎焊生产的难题,本文创造性地结合连续气氛保护网带炉和窑炉的特点,通过自主研发的连续气氛保护钎焊炉进行耐磨板的生产试制^[14-17],并通过外观检

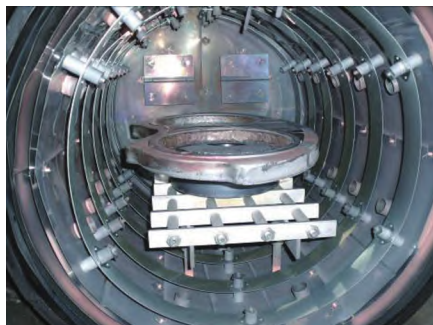


a) 感应钎焊



b) 钎焊工位

图2 耐磨环感应钎焊



a) 真空钎焊



b) 钎焊效果

图3 耐磨板真空钎焊

测、超声波检测、焊接接头组织分析、元素扩散及界面行为分析等检测分析手段,进一步优化了钎焊工艺参数,获得组织性能优良的砼泵耐磨板。

2 连续气氛保护钎焊结构设计与理论计算

2.1 连续气氛保护钎焊结构设计

针对以上问题,本文结合连续气氛保护网带炉和窑炉的特点,创造性地开发了一款适合砼泵耐磨板连续气氛保护钎焊的设备(见图4)。该设备整体设计为平行式循环结构,由上料车、摆渡小车、进料腔、预热腔、加热炉体、取料车、备料台、下料台、推板返回室、气体保护系统、炉架及电器控制系统等组成。整个传动系统采用推杆式及牵引式联合结构,由三套液压推杆系统及双向牵引结构完成自动循环,推进节拍及牵引速度在一定范围内可调。保护气氛采用氨分解气($75\%H_2 + 25\%N_2$)

作为还原性气氛。上料小车为五自由度伺服驱动,自动将备料台上的工件输送至摆渡小车内,复杂工况下均能平稳运行,重复精度高,具有工件及上料车位置记忆功能。上料完成之后,由电液推杆将工件、推板从摆渡小车输送至预热腔。预热腔由入口马弗、热胀助力系统、炉门、自动点火装置及外部防护隔离板等组成。加热炉体设计最高钎焊温度 $1150^{\circ}C$,多点独立控温,控温精度 $(1000 \pm 3)^{\circ}C$,并设有温度记录系统,可将温度存储记录,并由专用软件生成曲线或数据库,便于质量跟踪管理。马弗炉胆采用瑞典进口310S不锈钢,厚度为10mm,底部和顶部压制伸缩波纹筋,前端小法兰,后抽式设计,加热元件采用等径硅碳棒。此外,还配备有4工位备料台和推板返回室,其由牵引机构及摆渡小车组成,可以将推板及压板快速送回上料段,运送时间短,余热利用率高。

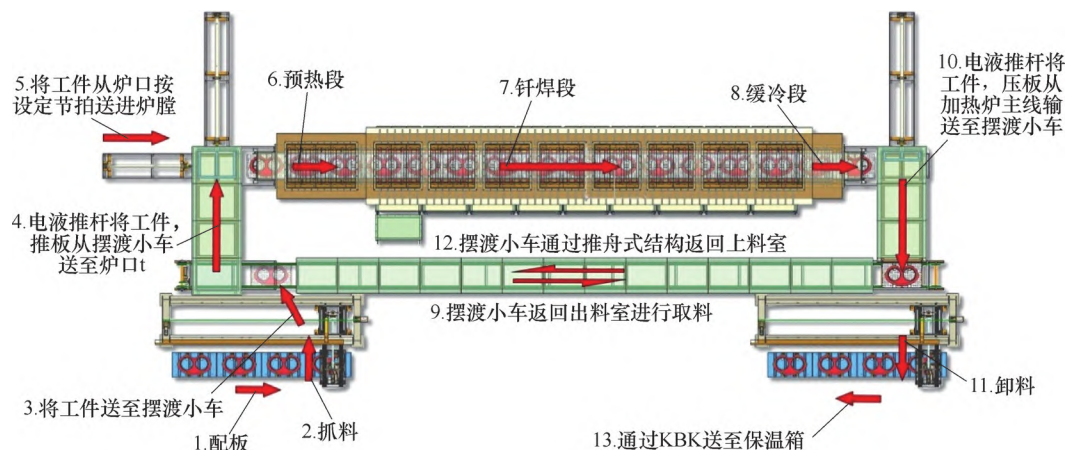


图4 连续气氛保护钎焊设备整体结构设计

注:1~13代表工作流程。

2.2 连续气氛保护钎焊设计理论计算

钎焊过程中的热消耗主要表现在4方面,即钢、棉、砖层的蓄热功率 P_1 ;上表面的对流散热功率 P_2 ;侧面的对流散热功率 P_3 ;底层及其他不确定的热损耗功率 P_4 。

(1) 条件设定 工作温度为 $1115^{\circ}C$;升温速率为 $100^{\circ}C/h$, $800 \sim 1115^{\circ}C$ 的升温时间为3h;工件的质量 $M_{\text{钢}}$ 为13620kg,保温棉的质量 $M_{\text{棉}}$ 为1113.6kg,红砖层的质量 $M_{\text{砖}}$ 为1782.7kg。其中钢板、保温棉和红砖的密度分别为 $7830\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $128\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1560\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 钢、棉、砖层的蓄热功率 P_1 保温棉的经

验平均温差为: $[(1115 + 80) - (800 + 30)]/2 = 182.5^{\circ}C$,红砖层的平均温差为 $50^{\circ}C$ 。计算出钢、棉、砖层的蓄热功率 P_1 ,即

$$P_1 = (C_{\text{钢}} \times M_{\text{钢}} \times 30 + C_{\text{棉}} \times M_{\text{棉}} \times 182.5 + C_{\text{砖}} \times M_{\text{砖}} \times 50) / t \quad (1)$$

式中 $C_{\text{钢}}$ ——钢板比热 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}C)]$,在 $400 \sim 625^{\circ}C$ 区间,取0.754;

$M_{\text{钢}}$ ——工件的质量(kg),取13620;

$C_{\text{棉}}$ ——保温棉平均比热 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}C)]$,取0.73;

$M_{\text{棉}}$ ——保温棉的质量(kg),取1113.6;

$C_{\text{砖}}$ ——红砖比热 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}C)]$,取0.816;

$M_{\text{砖}}$ ——红砖层的质量 (kg), 取17827;

t ——升温时间 (h), 取3。

将相关数据带入式 (1), 得 $P_1 = 305.17 \text{ kW}$

(3) 上表面的对流散热功率 P_2 在棉外层温度为 80°C 时的上表面空气自由流动换热的瑞利值 $R_a = 8.3 \times 10^{10}$, 此值 $> 10^9$, 因此上表面换热状态为紊流。其对流换热系数 $\alpha_2 = 1.58 \times (\Delta T)^{1/3}$, 其中 ΔT 为梯外层与空气的温差 (空气温度为 20°C), 即 $80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$, 则: $\alpha_2 = 1.58 \times 60^{1/3} = 6.19 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

计算上表面对流散热功率 P_2 的公式为

$$P_2 = \Delta T_2 / (\delta_{\text{钢}}/\lambda_1 + \delta_{\text{棉2}}/\lambda_2 + 1/\alpha_2) \times A_2 \quad (2)$$

式中 ΔT_2 ——内外换流层温差 ($^\circ\text{C}$), 取 $\Delta T_2 = 1100 - 20 = 1080$;

$\delta_{\text{钢}}$ ——钢板厚度 (m), 取0.03;

$\delta_{\text{棉2}}$ ——上表面棉层厚度 (m), 取0.08;

λ_1 ——钢板平均导热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], 取41.87;

λ_2 ——保温棉平均导热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], 取0.088;

α_2 ——对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], 取6.19;

A_2 ——上表面换热面积 (m^2), 取13.93。

将相关数据带入式 (2), 得 $P_2 = 7.87 \text{ kW}$ 。

(4) 侧面的对流散热功率 P_3 在砖外层温度为 30°C 时的侧表面空气自由流动换热的瑞利值 $R_a = 4.29 \times 10^8$, 此值小于 10^9 , 而大于 10^4 , 因此侧面换热状态为层流。其对流换热系数 $\alpha_3 = 1.49 \times (\Delta T/L)^{1/3}$, 其中 ΔT 为砖外层与空气的温差, 即 $30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$, L 为侧面的对流换热面高度, 即加热器所在空间的高度 1.09 m , 则: $\alpha_3 = 1.49 \times (10/0.68)^{1/3} = 3.12 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

计算侧面的对流散热功率 P_3 的公式为

$$P_3 = \Delta T_3 / (\delta_{\text{棉3}}/\lambda_2 + \delta_{\text{砖}}/\lambda_3 + 1/\alpha_3) \times A_3 \quad (3)$$

式中 ΔT_3 ——内外换流层温差 ($^\circ\text{C}$), $\Delta T_3 = 1100 - 20 = 1080$;

$\delta_{\text{棉3}}$ ——侧面棉层厚度 (m), 取0.1;

$\delta_{\text{砖}}$ ——砖层厚度 (m), 取0.24;

λ_3 ——红砖平均导热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], 取0.489;

α_3 ——对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], 取2.91;

A_3 ——侧面换热面积 (m^2), 取9.78。

将相关数据带入式 (3), 得 $P_3 = 4.81 \text{ kW}$ 。

(5) 底层及其他不确定的热损耗功率 P_4 计算底层及其他不确定的热损耗功率 P_4 的公式为

$$P_4 = (P_1 + P_2 + P_3) \times 10\% \quad (4)$$

将相关数据带入式 (4), 得 $P_4 = 31.84 \text{ kW}$

因此, 总功率 $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 305.17 \text{ kW} + 7.87 \text{ kW} + 4.81 \text{ kW} + 31.84 \text{ kW} = 350.23 \text{ kW}$, 取 $P = 350 \text{ kW}$ 。

2.3 连续钎焊炉数模优化控制仿真

为了对耐磨板在炉内的加热过程进行较为客观的描述, 需要进行适当的简化。

1) 炉温分布不随时间变化, 认为炉膛内介质温度在所分区段内是均匀一致的, 并且忽略沿炉长方向各个区段间的辐射换热。

2) 耐磨板在炉内匀速运动, 忽略沿钢坯长度方向 (即炉宽方向) 的导热。由于钢坯间隙放置, 因此, 可将钢坯的内部传热近似认为无限长扁坯上下两面非对称加热、左右两面对称加热的二维非稳态传热。

3) 炉墙内表面及耐磨板表面黑度视为常数。

4) 近似认为炉温与炉气温度相等。在上述假设的基础上, 建立的钢坯加热过程在线数学模型如图5所示。

控制方程为

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial t(T, X, Y)}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(T, x, y)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t(T, x, y)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

定解条件: $T=0, t(0, x, y) = t_0(x, y)$

边界条件: $x=0, \frac{\partial t(T, 0, Y)}{\partial T} = 0$

$$x=a/2, \lambda(t) \frac{\partial t(T, a/2, y)}{\partial x} = q_s$$

$$y=0, \lambda(t) \frac{\partial t(T, x, y)}{\partial x} = q_l$$

$$x=b, \lambda(t) \frac{\partial t(T, x/2, y)}{\partial x} = q_u$$

式中 ρ ——密度 (kg/m^3);

C_p ——比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$];

λ ——导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$];

q_s ——耐磨板侧表面热流密度 (W/m^2);

q_l ——耐磨板下表面热流密度 (W/m^2);

q_u ——耐磨板上表面热流密度 (W/m^2)。

其中, q_u, q_l 可按下式确定, 即

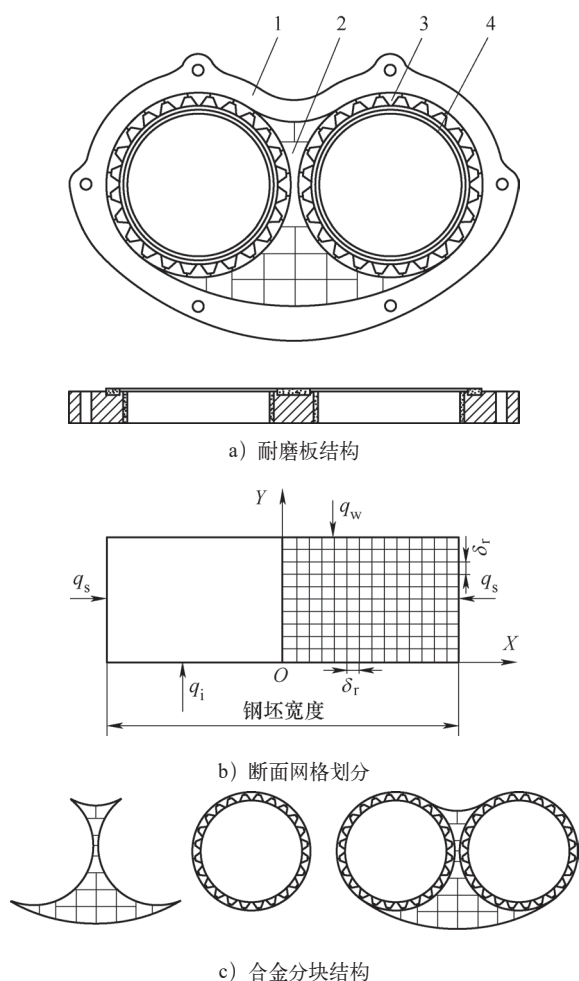


图5 耐磨板加热情况及断面网格划分

1—耐磨板本体 2—衬板硬质合金 3—耐磨环硬质合金
4—流道堆焊合金

$$q = kC_{\text{gwm}} \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

式中 k ——在线修正系数；

T_g ——炉气温度 (K)；

T_m ——耐磨板板表面温度 (K)；

C_{gwm} ——导来辐射系数, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ 。

根据假设条件, 可将耐磨板侧面的边界热流按下式近似处理, 即

$$q_s = k(q_u + q_l) \quad (7)$$

式中 k ——调节系数, $0 < k < 0.5$ 。

通过模型计算结果与现场相同工况下实测数据的对比分析, 可得出以下几点结论。

1) 模型计算出炉温度最大绝对误差为 7°C , 小于工艺要求的 $\pm 10^\circ\text{C}$, 最大相对误差仅为 1.02%, 完全满足实际需要。

2) 数学模型计算在炉内 7~8min 时间内耐磨板

整体即达到了 1115°C 目标温度。

3) 所开发的数学模型能够仿真优化计算符合现场实际的最佳加热策略, 并付诸实施。

综合考察上述各项指标, 可知该数学模型正确、可靠, 能够客观、真实、有效地反映连续钎焊炉的工艺过程, 后续将该模型集成在控制系统中, 为炉温控制策略提供数据支持。

3 连续气氛保护钎焊工艺调试与优化

3.1 耐磨板生产过程

根据设计方案, 制造的连续气氛保护钎焊设备如图6所示。其整体结构为“回”字形循环结构, 包括预热、升温、钎焊、保温及冷却等过程, 如图6a所示。在备料台完成耐磨板的装配, 耐磨板采用本体/仿形焊片/硬质合金/铜焊膏的装配方式, 如图6b所示。耐磨板在还原性气氛保护下, 经过钎焊炉的加热炉体后完成整个钎焊过程, 焊接后从出料口的窥视孔可见, 整个耐磨板表面光亮, 焊缝饱满, 焊脚圆润, 钎焊后的效果如图6c所示。自动下料小车将返回室的耐磨板夹持到备料台后送至保温箱缓冷, 如图6d所示。

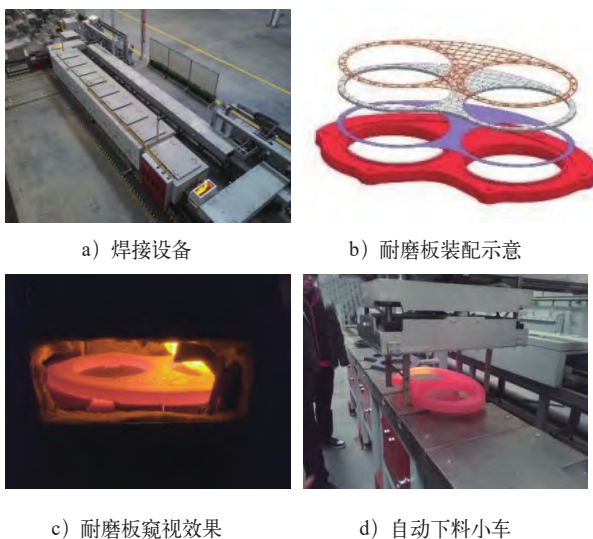


图6 耐磨板试制情况

3.2 耐磨板生产工艺规程

钎焊炉采用 10 区控温, 将随炉测温仪均匀固定在耐磨板上的 4 个象限点和鼻梁中心位置, 经过 50min 后测得温度曲线如图7所示。在前 5~10min 内, 耐磨板温度较低, 吸热量较大, 温度上升较慢, 之后整个耐磨板温度快速上升, 约在 20min 达到钎焊温度, 约在 24min 时达到耐磨板最高温度约

1115℃，钎焊时间约5min。此后，耐磨板开始进入保温冷却阶段，工件温度迅速下降。

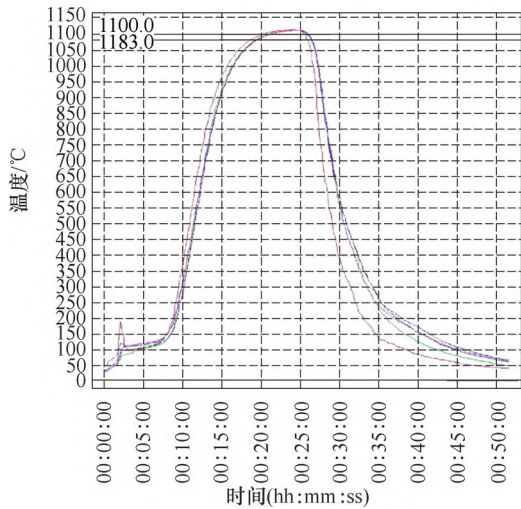


图7 随炉测温仪温度曲线

4 样品检验及分析

4.1 原材料分析

砼泵耐磨板耐磨面采用7mm厚的YG20硬质合金，化学成分（质量分数，下同）为： $w_{WC}=80\%$ ， $w_{Co}=20\%$ ；砼泵耐磨板本体采用30mm厚的Q235B钢，化学成分见表1。

表1 Q235B钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.20	0.35	1.40	0.045	0.045	0.30	0.30	0.008	余量

BCu钎料焊膏需用纯度为99.9%的铜粉，加入20%的黏结剂搅拌、沉淀而成。

4.2 取样检测

对试制的产品用线切割取标准试样，表面进行磨削加工，去除表面的氧化物和锈蚀。然后将试样浸泡在丙酮中10min，去除表面的油污。将清理过的工件通过热风吹干后按标准金相技术制备钎焊接头金相试样，用TS 516XM型扫面电镜和能谱仪分析接头组织及界面元素的分布。

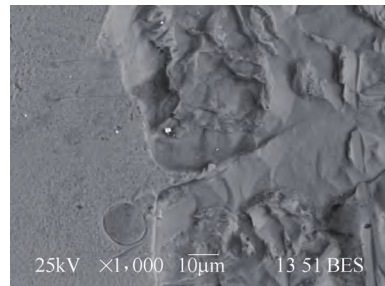
4.3 组织分析

图8a所示为Q235B钢显微组织，Q235钢为常用的碳素结构钢和工程用钢，具有一定的强度，塑性和韧性较好，而且可加工性和焊接性良好，适合大面积钎焊。基体组织一般由珠光体+铁素体组成。

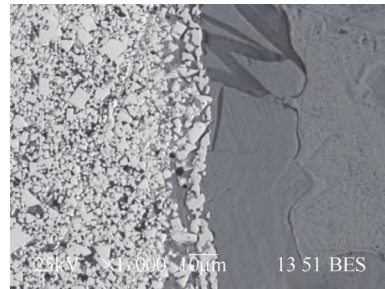
图8b所示为YG20硬质合金显微组织，硬质合金没有出现过烧、钴相溢出、起皮等缺陷。在焊后冷却过程中，钎焊应力得到有效释放，没有发现合金

开裂和微裂纹的存在。

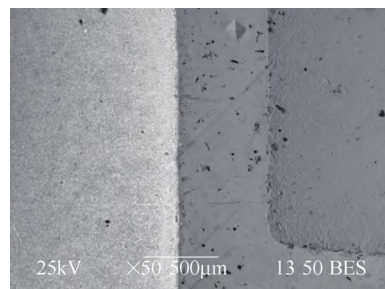
图8c所示为Q235B钢与YG20硬质合金焊缝显微组织，Q235B钢和YG20硬质合金与钎料界面结合紧密，没有发现明显的气孔和夹杂。BCu钎料与Q235B钢相互作用明显，钎料中元素与基体Q235B钢中元素相互溶解，形成一定宽度的固溶体相区。BCu钎料与YG20硬质合金界面结合紧密，钎焊效果良好，铜在碳素钢和硬质合金上的铺展性都很好。



a) Q235B钢



b) YG20硬质合金



c) 焊缝显微组织

图8 Q235B/BCu/YG20接头显微组织

4.4 成分分析

采用TS 516XM型扫面电镜自带的能谱分析仪对本体和焊料进行成分分析。如图9所示，A区域为焊缝接头，B区域为母材Q235B钢，C区域为母材YG20硬质合金。点扫描的成分分析结果显示3个区域的成分与原材料Q235B钢、YG20硬质合金和BCu钎料的成分保持一致。

4.5 冶金结合分析

为验证钎料中Cu原子向母材的扩散行为，对Q235B/BCu/YG20接头中钎缝界面进行了能谱分析

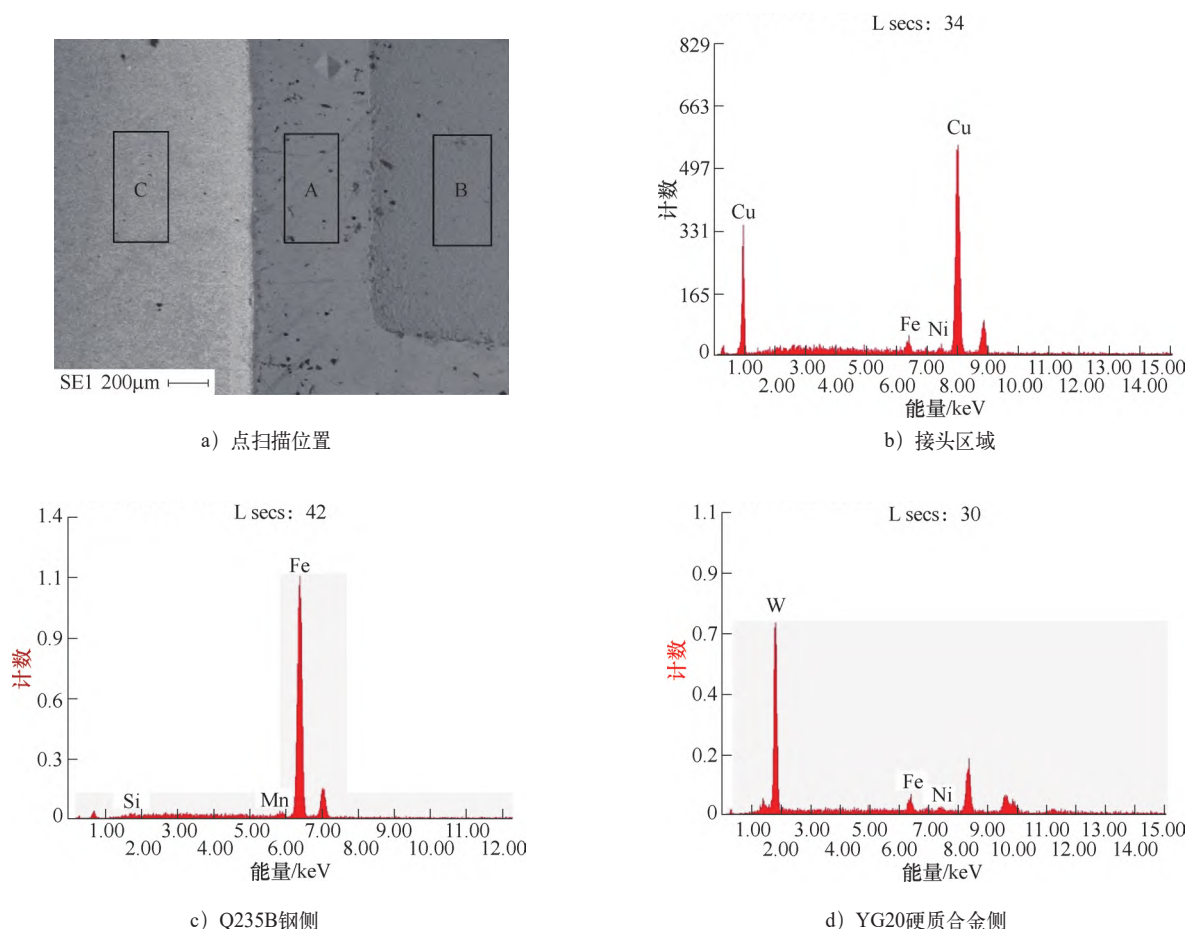


图9 接头区域化学成分点扫描图谱

(EDS)，接头区化学成分线扫描图谱如图10所示。从图10可明显看出，两个母材紧邻界面的区域存在Cu元素，显然是Cu元素在钎焊过程中的扩散进入母材的结果。这说明在钎焊过程中结合界面处发生了原子互扩散，实现了碳素钢和硬质合金之间的冶金结合。

假设扩散系数恒定，扩散方程式为

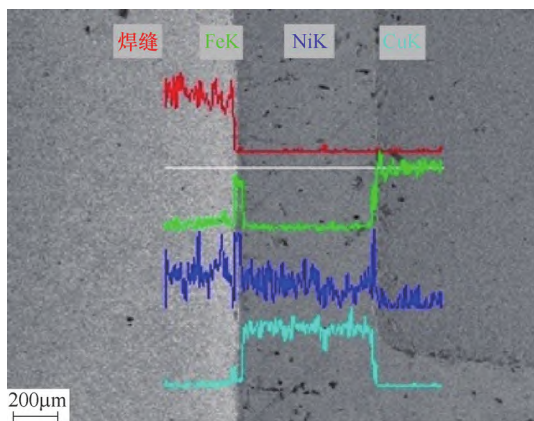


图10 接头区化学成分线扫描图谱

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (8)$$

边界条件: $C(x=0, t) = C_s$; $C(x=\infty, t) = 0$

起始条件: $C(x, t=0) = 0$

在这个条件下, 有

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (9)$$

式中 $\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$ ——误差函数。

利用Arrhenius公式计算出Cu原子在Q235B钢和YG20硬质合金总的扩散系数分别为 $6.4 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{s}$ 和 $3.6 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{s}$, 将数据代入式(8)、式(9), 可以确定铜原子向母材中扩散的厚度和表层铜原子浓度的分布曲线, 如图11所示。

通过计算, 由图11可看出, 随着与钎料层/Q235B界面距离的增大, 钢中Cu原子的浓度逐渐减小, Cu原子在钢中的扩散深度达到 $30 \mu\text{m}$; 在界面处的母材中, Cu原子的浓度高达2.5%。因为Cu原子在硬质合金中的扩散系数较小, 所以钎焊接头中Cu原子在硬质合金侧的扩散深度仅为 $11 \mu\text{m}$ 。

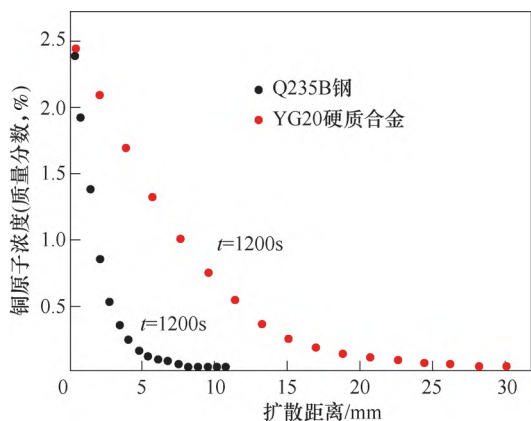


图11 母材中铜原子浓度变化曲线

5 结束语

1) 通过结合连续气氛保护网带炉和窑炉的特点自主研发了一套适合砂轮耐磨板钎焊的设备及成套钎焊工艺,成功解决了大面积、重工件异种材料连续生产的难题,并可以推广应用到盾构和掘进机械等易损件的钎焊中。

2) 在连续气氛保护钎焊炉中,采用BCu钎料钎焊Q235B/YG20接头的过程中,BCu钎料表现出良好的润湿性和铺展性,钎缝饱满,光洁致密,钎着率高,接头表现质量良好。

3) 在连续气氛保护钎焊过程中,Cu原子在Q235B/YG20接头处发生短程扩散,计算结果显示Cu原子向YG20硬质合金和Q235B钢中扩散深度分别为11 μ m、30 μ m,钎料与母材之间形成良好的冶金结合,实现了异种材料的扩散连接。

参考文献:

- [1] 魏炜,黄智泉,张海燕,等. 钢结硬质合金与钢连接技术的研究现状[J]. 焊接学报, 2024, 45 (5) : 119-128.
- [2] 丰德友,彭腊梅,李二行,等. PDC钻头钎焊工艺及接头力学性能研究[J]. 焊接技术, 2024, 53 (5) : 63-67.
- [3] 高泽,刘博,郑立彦,等. 硬质合金与结构钢钎焊结构低温力学性能试验[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54 (3) : 404-410.
- [4] 夏毅敏,仝磊,柏彬,等. 盾构切刀硬质合金与钢基体钎焊残余应力[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41 (1) : 101-107.
- [5] XIAO A, ZHANG J, PANG X T, et al. Interface bonding characteristics and thermal damage behavior of brazed diamond with Nb-added NiCr filler alloys[J]. Diamond and Related Materials, 2024,

146; 111165-111172.

- [6] 杨浩,陈睿博,杨雷,等. 基于硬质合金/钢异质钎焊感应加热有限元仿真[J]. 焊接, 2024 (9) : 23-28.
- [7] 李炎秋,程志,赵磊,等. 焊接参数对硬质合金/钢异质金属高频钎焊接头组织与性能的影响[J]. 轨道交通材料, 2024, 3 (2) : 12-20.
- [8] 杨雷,于忠婷,陈睿博,等. 连续式感应自动化钎焊机设计及钎焊性能[J]. 焊接, 2023 (12) : 45-49.
- [9] FANG J H, XIE M, ZHANG J M, et al. Optimized design of composition and brazing process for Cu-Ag-Zn-Mn-Ni-Si-B-P alloy brazing material based on machine learning strategy to improve brazing properties[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 109317-109331.
- [10] VOGLER J, VÖLKL R, SONG J, et al. High temperature and high strain rate properties of brazed honeycomb liner material Haynes 214[J]. Wear, 2024, 550-551: 205427-205434.
- [11] HAN A, WANG G, WANG W, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of SiC and Nb joint brazed with AgCuTi/(Sr0.2Ba0.8) TiO₃-Cu/AgCuTi composite fillers[J]. Ceramics International, 2024, 50 (18) : 34005-34016.
- [12] 唐威. AgCuMnNi钎料元素含量对钎焊接头组织及性能的影响[J]. 焊接, 2023 (12) : 38-44.
- [13] 刘晓芳,张冠星,钟素娟,等. 退火时间对AgCuZnNiMn/Cu/AgCuZnNiMn多层复合钎料元素扩散行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (6) : 182-190.
- [14] 翟秋亚,梁存琨,成军,等. 铜基微晶钎料连续气氛保护钎焊25Cr3MoA/YG6[J]. 金属学报, 2008, 44 (9) : 1136-1140.
- [15] 周金,王海龙. YG8硬质合金与42CrMo钢的连续气氛保护钎焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38 (7) : 109-111.
- [16] 陆杨,王海龙,周基江,等. 40Cr钢与YG8硬质合金的连续气氛保护钎焊工艺研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2007, 21 (4) : 76-79.
- [17] 张贵锋,张建勋,裴怡,等. 相变-扩散钎焊新工艺接头性能及主组元扩散行为[J]. 金属学报, 2004, 40 (6) : 653-658.