

YG8硬质合金和低碳钢的高频感应钎焊

李卓然， 刘 兵， 樊建新， 冯吉才

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室， 哈尔滨 150001)

摘 要： 采用 BN<sub>2</sub>钎料对 YG8硬质合金 /低碳钢进行了高频感应钎焊， 对试验用高频感应钎焊设备进行了改造。 采用热电偶测温仪对温度进行实时测量， 并用 PID控制器对设备加热温度进行控制。 分析了影响接头力学性能的因素， 测试了钎焊接头的抗剪强度。 通过 SEM及 EDS对断口形貌、 成分进行分析。 结果表明， 随着钎焊温度的升高或者保温时间的延长， 接头的抗剪强度都呈先增大后减小的趋势。 焊接温度为 1 030 ℃， 保温时间为 5 min的钎焊条件下， 接头的剪切强度达到最大值 441 MPa， 断裂多发生在 YG8硬质合金母材上或钎缝处。

关键词： 硬质合金； 高频感应钎焊； 抗剪强度

中图分类号： TG454 文献标识码： A 文章编号： 0253-360X(2010)10-0097-04



李卓然

0 序 言

硬质合金是用粉末冶金法由难熔金属碳化物与粘结金属构成的， 其中金属碳化物相保证合金有高的硬度和耐磨性， 而粘结相则赋予合金具有一定的强度和韧性， 常用于切削工具、 模具、 地质矿山工具以及耐磨损件等<sup>[1-4]</sup>。 然而， 硬质合金硬度高、 脆性大、 易破损、 断裂而达不到预期的使用效果， 需要与强度较高、 韧性好的钢组成复合构件。

目前硬质合金的连接方式主要有 TG焊、 激光焊、 扩散焊和钎焊。 高频感应钎焊<sup>[5]</sup>是连接硬质合金自身或硬质合金与金属常用的方法之一。 高频感应加热钎焊的优点是加热迅速、 钎料液化过程短， 并可以在各种气氛下进行， 能减轻硬质合金过热和氧化， 有利于提高焊接质量， 能直接观察和人工调节钎焊过程， 产出效率高， 成本低， 适于大批量生产。 文中采用 BN<sub>2</sub>钎料对 YG8硬质合金与低碳钢进行高频感应钎焊连接。

为 5 mm×5 mm×3 mm和 8 mm×14 mm×4 mm试件及装配方式见图 1。

表 1 低碳钢的化学成份 (质量分数， %)  
Table 1 Chemical composition of mild steel

| C         | Si        | Mn        | S      | P      | Fe |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|----|
| 0.17~0.24 | 0.17~0.37 | 0.35~0.65 | ≤0.040 | ≤0.040 | 余量 |

表 2 钎料化学成分 (质量分数， %)  
Table 2 Chemical composition of BN<sub>2</sub>

| Cr  | Si  | B   | Fe  | C    | Ni |
|-----|-----|-----|-----|------|----|
| 7.0 | 4.5 | 3.1 | 3.0 | <0.1 | 余量 |

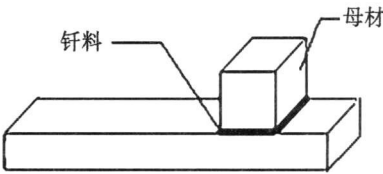


图 1 钎焊接头装配图

Fig. 1 Assembly drawing of brazing joint

1 试验方法

试验采用的 YG8 硬质合金的化学成分为 92% WC+8% Co(质量分数)， 低碳钢的化学成分如表 1 所示。 高频感应钎焊试验中所用钎料为 BN<sub>2</sub> 具体参数如表 2所示。 YG8硬质合金和低碳钢尺寸分别

高频钎焊试验时采用氩气作为保护气体而不使用任何钎剂， 选用膏状 BN<sub>2</sub> 钎料， 借助石英棒将钎料刮擦涂敷在待焊试件表面。 高频感应圈为 2 匝， 内圈直径 7.5 mm。

将焊好的试件在 Instron Model 1186 电子万能试验机上进行压剪试验， 测试接头抗剪强度。 采用

扫描电镜 (SEM S- 4700) 观察断口形貌, 利用能谱仪 (EDS TN- 4700) 测定断口成分, 确定 YG8/BN<sub>2</sub> 低碳钢接头的断裂路径.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 P909 控制器控制参数

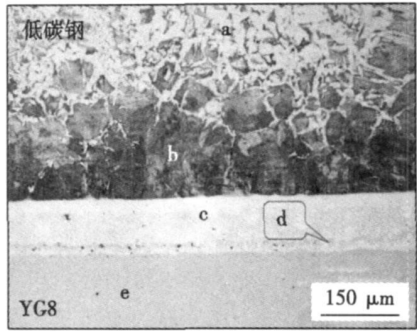
用 PD 控制器 P909 对设备加热温度进行控制调试, 获得了比例、积分和微分参数及 PD 参数与系统超调量、达到稳定震荡所需时间的关系. 采用不同预设温度, 对 PD 参数进行控制调试, 试验温度控制参数设定如下:  $K_P$  为 6~10,  $K_I$  为 8~12,  $K_D$  为 0. 其中当预设温度为 1 030 ℃ 时,  $K_P$  为 8,  $K_I$  为 10,  $K_D$  为 0 调节效果最好. 随着比例系数  $K_P$ 、积分系数  $K_I$  的增大, 系统超调量减小, 达到稳定振荡的时间增加. 微分系数  $K_D$  的增大, 使得系统达到稳定振荡的时间大大增大, 使待焊工件长时间保持在高温环境中, 硬质合金晶粒发生异常长大, 降低材料的力学性能.

### 2.2 典型接头界面组织

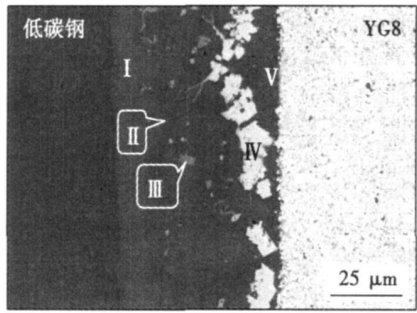
钎焊温度为 1 030 ℃、保持连接时间为 300 s 的接头界面组织如图 2 所示. 在图 2 a 中, 将钎焊接头分为 5 个区域, 分别命名为 a 区、b 区、c 区、d 区和 e 区. a 区中白色粒状组织为铁素体, 黑色或灰色块状组织为珠光体, 呈亚共析钢组织特征. b 区为灰黑色大块组织, 部分黑色块状组织内部呈条纹状为珠光体组织, 外部为白色网状条状组织隔开为二次渗碳体, 为典型的过共析钢组织. c 区与 b 区之间的过渡部分为共析钢组织. c 区为钎缝部分, 为 BN<sub>2</sub> 钎料. d 区在 c 区中靠近 YG8 硬质合金母材一侧约 10 μm 处, 宏观观察 d 区组织形貌与 c 区相似, 可能为 YG8 硬质合金颗粒, e 区为硬质合金母材.

由图 2 b 可见, 钎焊接头形成较好的结合界面, 钎缝组织结构均匀分布. 将接头分为 5 个区域, 分别命名为 I 区、II 区、III 区、IV 区和 V 区. I 区为沿着低碳钢母材的一层灰黑色组织. II 区颜色稍深, 组织形态与 I 区类似, I 区与 II 区无明显的界限. III 区为钎缝中心区形成的块状或点状的灰色和白色组织, 散乱分布在 I 区和 IV 区之间. IV 区为白色块状或条状组织, 有棱角分明的几何形状, 且 III 区与 IV 区无明显界限, III 区的部分长条状白色组织与 IV 区的大块的白色组织连接在一起. V 区为 YG8 硬质合金母材和 BN<sub>2</sub> 钎料的结合区域, 该区域硬质合金颗粒的致密度较母材小, 且呈梯度分布.

图 3 给出钎焊接头的元素定量线扫描分析. 由图中可以看出, I 区与 II 区有一定量的 N 元素和 F 元素, 且沿垂直钎缝方向, 由低碳钢母材向钎缝



(a) 接头金相放大形貌



(b) 界面结构放大背散射形貌

图 2 钎缝接头界面组织  
Fig 2 Joint interface of m41 steel/BN<sub>2</sub>/YG8

方向, F 元素逐渐减少, N 元素含量逐渐增多, 可以判断 I 区与 II 区中应为固溶体组织. II 区为 N 基固溶体相, 即  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ . IV 区中 W 含量明显上升, Ni 含量下降, 确定 IV 区为含 W 的化合物相. V 区靠近钎缝一侧与 II 区在形貌和元素分布上类似, 可确定为  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ . 靠近 YG8 母材一侧, W 含量较钎缝高, 且稳定在一定数值不变.

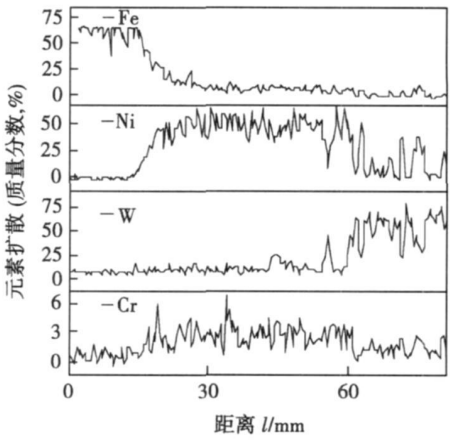


图 3 接头的背散射图像和主要元素的分布  
Fig 3 Backscattered electron image of interface and distribution of main elements

图 4 中各点能谱结果如表 3 所示. A 区为低碳钢母材, 主要含 Fe 元素. B 区主要含 Fe、N 元素, 可

能相组成为  $FeNi(\delta) + (FeNi, FeNi_3)$ 。C区位于钎缝接头中心,含 N元素最高,还含有一定量的 Fe元素、S元素,该区为  $Ni(\delta) + Ni_3Si + FeNi_3$ 。D区 W元素含量明显增加,该区为  $M_6C$ 型  $\eta$ 相。结合 D区能谱可以确定该区相组成为  $Ni_2W_4C + Fe_3W_3C + Cr_3C_6$ 。E区主要含 Fe、N元素,能谱分析为  $FeNi(\delta)$ 。F区为过渡区,其中含有未发生反应的 WC同时存在缺碳  $M_6C$ 型  $\eta$ 相。F区相组成为  $WC + Ni_2W_4C + Fe_3W_3C$ 。G区与 H区均位于 YG8硬质合金母材,根据能谱分析可以确定 G区为 WC颗粒, H

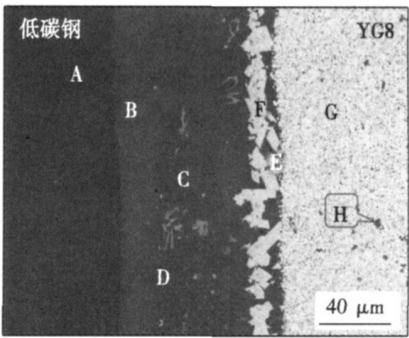


图 4 钎焊接头界面组织形貌  
Fig. 4 Backscattered electron image of joint interface

表 3 接头组织各点能谱分析结果(原子分数,%)  
Table 3 Results of EDS of spots

| 位置 | Ni   | Fe   | W    | Co   | Cr   | Si    | 可能相                             |
|----|------|------|------|------|------|-------|---------------------------------|
| A  | 0.97 | 92.0 | 2.36 | 2.66 | 1.00 | 1.05  | Fe                              |
| B  | 48.3 | 33.6 | 4.02 | 5.22 | 4.17 | 4.74  | $FeNi(\delta) + (FeNi, FeNi_3)$ |
| C  | 58.6 | 15.0 | 2.65 | 5.58 | 2.42 | 15.81 | $Ni(\delta) + Ni_3Si + FeNi_3$  |
| D  | 15.0 | 24.7 | 44.0 | 8.90 | 4.76 | 2.70  | $Ni_2W_4C + Fe_3W_3C + Cr_3C_6$ |
| E  | 49.7 | 29.1 | 4.43 | 7.49 | 3.54 | 5.78  | $FeNi(\delta)$                  |
| F  | 18.8 | 11.4 | 50.2 | 6.96 | 7.34 | 5.40  | $WC + Ni_2W_4C + Fe_3W_3C$      |
| G  | 11.5 | 7.2  | 64.6 | 5.00 | 3.18 | 8.51  | WC                              |
| H  | 18.1 | 10.9 | 58.1 | 5.30 | 2.66 | 4.90  | $WC + \gamma$                   |

区为  $\gamma$ 相,是 Co基 CoW-C的固溶体,其中固溶了部分 N和 Fe元素。

图 5为钎焊温度 1 030 ℃,保温时间 5 min时的接头断口不同位置的 XRD结果。XRD的衍射结果分析与能谱分析基本一致,钎缝中存在  $FeNi(\delta)$ ,

$Ni(\delta)$ 等固溶体相,存在  $FeNi, FeNi_3, Ni_3Si, Ni_3B, Cr_3C_6$ 等金属间化合物以及形式为  $Fe_3W_3C, Ni_2W_4C$ 等  $M_6C$ 型  $\eta$ 相。

2.3 连接温度对接头抗剪强度的影响

采用 BN2钎料连接 YG8硬质合金和低碳钢,保温时间为 300 s,测试不同钎焊温度下钎焊接头抗剪强度平均值,如图 6所示,接头抗剪强度在钎焊温度为 1 030 ℃时达到最大值,为 441 MPa。

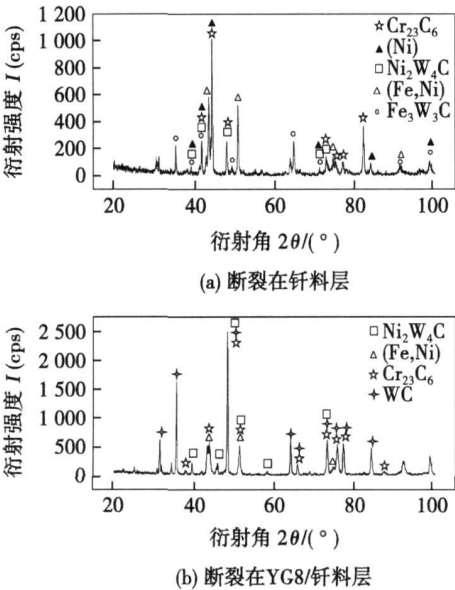


图 5 接头断口 XRD衍射结果  
Fig. 5 XRD patterns of interface of steel/BN2/YG8 (1 030 ℃, 5 min)

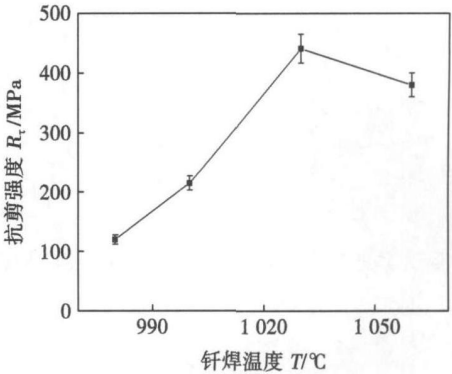


图 6 钎焊温度对接头的抗剪强度的影响 (t = 5 min)  
Fig. 6 Effect of brazing temperature on joint shear strength

当钎焊温度低于 1 000 ℃时,抗剪强度较低,是由于 WC晶粒和  $M_6C$ 型  $\eta$ 相异常长大,过大的晶粒

内部将产生微裂纹,如图 7所示,这将导致 IV区脆性增大. 在发生断裂的过程中,微裂纹由  $\eta$ 相产生,在外载荷作用下微裂纹既可能沿  $\eta$ 相继续扩展,也可能由于  $\eta$ 相分布不连续,裂纹沿母材继续扩展. 在温度达到 1 030 °C以后,IV区的晶粒度,明显减小,产生微裂纹倾向减小,接头的强度有较大提高. 随着温度的进一步提高,由 WC颗粒转化生成的  $\eta$ 相增多,局部脆性增加使得产生微裂纹的倾向增大.

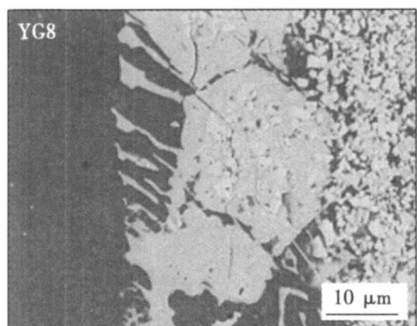


图 7 异常长大晶粒中的微裂纹

Fig. 7 Tiny cracks in disorder growing crystal grain

## 2.4 保温时间对接头抗剪强度的影响

采用 BN<sub>2</sub>钎料钎焊 YG8硬质合金和低碳钢,钎焊温度为 1 030 °C,改变保温时间,测试不同保温时间下钎焊接头抗剪强度平均值,如图 8所示,接头抗剪强度在保温时间为 300 s时达到最高值,为 441 MPa.

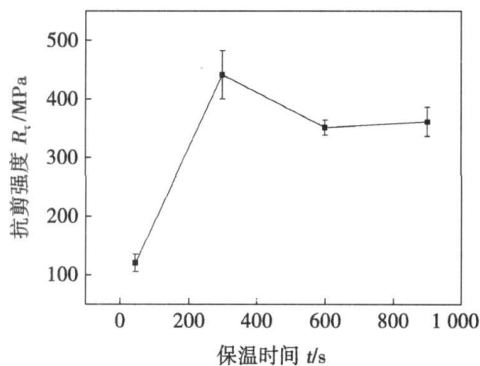


图 8 保温时间对接头的抗剪强度的影响 ( $T=1\ 030\ ^\circ\text{C}$ )

Fig. 8 Effect of holding time on joint shear strength

保温时间为 1 min时,接头界面为基本无扩散的固相连接,且由于高频感应钎焊加热迅速,使得母材中产生较大的内应力,当内应力的数值大于材料的抗拉强度时,就会在母材中产生微裂纹. 随着保温时间的延长,反应生成的  $\eta$ 相在钎缝中的分布逐渐弥散化,减少了大尺寸  $\eta$ 相产生微裂纹的倾向,

同时增加了钎缝的强度. 保温时间为 5 min时获得最大抗剪强度为 441 MPa. 随着保温时间进一步增加,钎缝中的  $\eta$ 相呈花纹状均匀分布,使得钎缝性能得到进一步加强,但在硬质合金母材一侧,WC颗粒和  $\eta$ 相不断长大,其中一部分弥散分解成花纹状分布在钎缝中,还有部分大尺寸晶粒未充分分解而残留在硬质合金母材一侧,导致钎焊接头抗剪强度未能进一步提高,反而有所下降.

## 3 结 论

(1) 用 PD控制器对设备加热温度进行了控制调试,当钎焊温度为 1 030 °C时,  $K_p$  为 8  $K_i$  为 10  $K_d$  为 0时调节效果最好.

(2) 采用 BN<sub>2</sub>钎料钎焊 YG8/低碳钢接头,钎焊温度为 1 030 °C,保温时间为 5 min时,主要由钢/铁、镍固溶体/ $\eta$ 相/硬质合金构成.

(3) 随着钎焊温度的升高或者保温时间的延长,接头的抗剪强度都呈先增大后减小的趋势. 当钎焊温度为 1 030 °C,保温时间为 5 min时达到最大值,为 441 MPa.

## 参考文献:

- [1] Wang Yisan, Zhang Xinyuan, Li Fengchun. Study on an Fe-TC surface composite produced in situ[J]. Materials & Design, 1999, 20(5): 233-236.
- [2] 朱警雷, 黄继华, 张 华, 等. 硬质合金与钢异种金属焊接的研究进展[J]. 焊接, 2008(2): 15-19.  
Zhu Jinglei, Huang Jihua, Zhang Hua, et al. Progress in research on welding of cemented carbide with steel[J]. Welding & Joining, 2008(2): 15-19.
- [3] 何 平. WC-CoN硬质合金的微观组织和断裂强度[J]. 粉末冶金技术, 1996, 14(4): 287-290.  
He Ping. Microstructure and rupture strength of WC-CoNi cemented carbide[J]. Powder Metallurgy Technology, 1996, 14(4): 287-290.
- [4] 李 宁, 龙坚战, 周永贵, 等. 超细 WC-Co硬质合金的组织与性能特征[J]. 硬质合金, 2005, 22(2): 107-111.  
Lin Ning, Long Jianzhan, Zhou Yonggui, et al. Structure and performance features of ultra-fine WC-Co cemented carbides[J]. Cemented Carbide, 2005, 22(2): 107-111.
- [5] Kim H J, Hwang S Y, Lee C H, et al. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172(2-3): 262-269.

作者简介: 李卓然, 男, 1971年出生, 博士, 副教授. 主要从事新材料及异种材料连接方面的研究. 发表论文 50余篇.

Email: liz@hit.edu.cn

Welding Technology Jiangsu University of Science and Technology Zhenjiang 212003 China). P93—96

**Abstract** An aluminum alloy sheet 2A12-T4 two millimeters thick was welded in friction stir spot welding with re-filling probe hole and the influence of processing parameters on mechanical properties of joint was studied. The results show that the shearing resistance of the joint reaches the maximum value of 4 707 N when rotational speed is 600 r/min and other parameters keep constant. The shearing resistance of joint decreases with the increasing of rotational speed in range from 600 to 1 000 r/min, increases with the increasing of the distance of shoulder plunged, which reaches maximum when the distance of shoulder plunged is 1.2 mm, and increases with the increasing of extension length of pin, which reaches the maximum when the extension length is 3.4 mm. The microhardness of the joint is between 100 to 150 HV, and that in mixed zone is highest and that in stir zone is lowest.

**Key words** friction stir spot welding; probe hole; processing parameter; microstructure

High-frequency induction brazing of YG8 sintered carbide to mild steel LI Zhuran, LIU Bing, FAN Jianxin, FENG Jicai (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China). P97—100

**Abstract** YG8 sintered carbide and mild steel was joined with BN<sub>2</sub> brazing filler metal and with the high frequency induction brazing. The high-frequency induction brazing equipment was rebuilt, which measures the real time temperature with the thermocouple therm detector and controls the heating temperature of the equipment with the PID controller. The effect of processing parameters including brazing temperature and holding time on the joint mechanical property was discussed by scanning electron microscopes and energy dispersive X-ray spectroscopy. Results show that the maximum shear strength is 441 MPa when the brazing temperature is 1 030 °C and holding time is 5 min. In this case, fracture happens mainly at the YG8 sintered carbide or the brazing seam.

**Key words** sintered carbide; high frequency induction brazing; shear strength

Analysis of exposed particles and mechanical performance of brazing joints of SiC<sub>p</sub>/2024Al composites FENG Tao, WANG Yinzhen, SUN Yuwei, YI Dongxu, LOU Songjian (1. College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China; 2. School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China). P101—104

**Abstract** The effect of brazing parameters on the vacuum brazing microstructure and mechanical performance of SiC<sub>p</sub>/2014Al aluminum matrix composite (MMC) was studied. The SiC reinforcements on the parent composite surface were exposed by the surface reinforcement exposing technique, and then Cu was deposited on the parent matrix composite. By using Mg aluminum alloy as the filler metal, the parent composites were brazed under several different parameters. The test results show

that if the brazing temperature is lower or the keeping time is shorter, there is Cu retained on MMC surface. With the increasing of brazing parameters (brazing temperature and keeping time), Cu reacts with Al base metal completely. If the brazing parameters are too high, the porosities by overburning appear in the base metal. X-ray diffractometry analysis indicates that there is no Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> brittle phase formed in the brazing joint. The tensile test indicates that the strength of the joint is 202 MPa at brazing temperature 620 °C and keeping time 20 min. The fractography of the brazing joint indicates that the filler metal is unwetting to the parent composite, the porosities in the parent composite and the aggregated particles in the parent composite are the reasons for the joint cracking.

**Key words** aluminum matrix composite; reinforcement; exposing; surface alloying; brazing

FEM analysis of distribution of residual thermal stress at Ti alloy/stainless steel brazed joint WANG Guojian, ZHOU Jianyong, XU Fang, SUN Dong, ZHU Ying (1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Beihang University, Beijing 100195, China). P105—109

**Abstract** The influence of welding parameters on residual stress distribution and the residual stress field of TC4 and 1Cr18Ni9Ti brazed joint were analyzed with finite element model (FEM) method. The results indicate that the stress concentrates on the both sides of joint, becomes the positive maximum on 0.45 mm beside the Ti alloy, and is the smallest at the gap length of 50 μm and linear expansion coefficient of 12 × 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>. Bonding temperature influences little on the stress distribution and stress concentration.

**Key words** Ti alloy; residual stress; bonding temperature; expansion coefficient

Welding deformation prediction of side beam of locomotive bogie frame ZHANG Sanlei, LUO Yu, CHEN Buyou (1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Zhuzhou Electrical Locomotive Co., LTD, Zhuzhou 412001, China). P110—112

**Abstract** The bogie frame is the most important bearing structure of the locomotive, and its prediction of welding deformation has important significance in ensuring manufacturing accuracy and quality. First, the database of inherent strain for bogie frame structure was established by a lot of computing and practical measure. Then the welding deformation of hexaxial locomotive bogie frame side beam was predicted by using software WSDP (welding structure deformation prediction), which is based on the theory of inherent strain and elastic finite element model. The results were totally consistent with experimental data, and the reliability of the database was proved. The study shows WSDP is very useful in welding deformation prediction of large and complex structures.

**Key words** welding deformation; inherent strain; software WSDP; bogie side beam