

# 多功能焊接热模拟软件的研制与应用

冯莹莹<sup>1</sup>, 骆宗安<sup>1</sup>, 张殿华<sup>1</sup>, 苏海龙<sup>1</sup>, 王黎筠<sup>2</sup>

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004;

2. 鞍钢股份有限公司 设计研究院, 辽宁 鞍山 114001)

**摘 要:** 成功研制出多功能焊接热模拟软件, 该软件以实测和经典的数学模型为基础, 应用 Labview 8.2 和 STEP 7 进行编程。用该软件绘制焊接热循环曲线, 操作界面简单易行。针对多道次焊接热模拟试验设计的道次间隔时间参数, 可以保证试验时每一个道次的初始温度与设定值相一致, 有效地改善了以往焊接热模拟试验的不足。软件凭借其稳定性、可靠性、快捷方便性, 应用于国产 MMS 系列热力模拟实验机, 完善了国产热力模拟实验机的功能, 进一步拓宽了其应用领域。

**关键词:** 焊接热模拟; 数学模型; 多道次焊接; 间隔时间

**中图分类号:** TE972 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)07-0077-04



冯莹莹

## 0 序 言

焊接热影响区是焊件母材在焊接过程中, 经受特有的加热及冷却过程后, 明显地发生组织和性能变化的区域。该区域的宽度很窄, 一般只有几毫米, 若想在实际的焊接接头中, 对该区域的金属进行力学性能试验或可靠地测定焊接特性是困难的<sup>[1, 2]</sup>。为了使焊接热影响区各特定部位的尺寸大到足以进行正常的性能试验, 只有采用焊接热模拟的方法才能实现, 多功能焊接热模拟软件正是通过绘制焊接热循环曲线实现焊接热模拟的方便工具。

多功能焊接热模拟软件以实测和经典的数学解析表达式<sup>[3]</sup>为基础, 应用 LabVIEW 8.2 和 STEP 7 进行编程, 定量地反映与描述影响各热循环参数的主要因素及其相互关系, 同时也是计算焊接应力、应变的基础, 预测接头组织和性能的依据。此软件已成功嵌入东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室自主研制的集拉伸、压缩、扭转、热处理等功能于一体的 MMS 系列热力模拟实验机, 拓宽了热力模拟实验机的应用领域。

## 1 研制依据

### 1.1 数学模型理论基础

多功能焊接热模拟计算机软件以实测和经典的数学解析表达式为基础, 共包含 7 种数学模型: Han-

nerz 数学模型, Rykalin 系列数学模型, Exponential cooling Equation 数学模型, Rosental 数学模型等; 其中 Rykalin 系列数学模型包括 Rykalin2-D(由  $t_{8/5}$  求  $Q$ ), Rykalin2-D(由  $Q$  求  $t_{8/5}$ ), Rykalin3-D(由  $t_{8/5}$  求  $Q$ ) 和 Rykalin3-D(由  $Q$  求  $t_{8/5}$ ) 4 种模型。

这些数学模型均根据自身特点应用于焊接热模拟试验的各个领域, 这里只介绍下面 2 种数学模型。

#### (1) Hannerz 数学模型

$$T = T_0 + \sqrt{\frac{\Delta t (500 - T_0)^2 (800 - T_0)^2}{300 (1300 - 2T_0) t}} \times \exp \left[ \frac{\Delta t (500 - T_0)^2 - (800 - T_0)^2}{2e300 (1300 - 2T_0) (T_{\max} - T_0)^2 t} \right] \quad (1)$$

式中:  $T_{\max}$  为峰值温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  为预热温度或道次之间的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t$  为  $800 \sim 500^{\circ}\text{C}$  的冷却时间 (即  $t_{8/5}$ ), s。

该数学模型公式虽冗长、复杂, 但操作简单易行, 操作者只需输入  $T_{\max}$ ,  $T_0$ ,  $\Delta t$  三项数值, 即可绘制出曲线。但由于公式本身的局限性,  $T_0$  不能等于  $500, 800, 650^{\circ}\text{C}$  和  $T_{\max}$ , 而且不能将升温段和降温段分开控制, 所以加热速率和高温停留时间不能在曲线中体现出来。

#### (2) Rykalin 系列数学模型

经研究发现 Rykalin 系列数学模型的理论基础与 Hannerz 数学模型的基本一致, 只是为了便于用户设定的需要, 将预热温度、峰值温度、加热速率、保温时间、 $800 \sim 500^{\circ}\text{C}$  的冷却时间等详细的参数都设置在界面上, 以满足用户对焊接热循环曲线的详细要求。由于 Rykalin 系列数学模型的多用性<sup>[4]</sup>, 碳

钢、不锈钢、钛合金等不同金属材料的焊接热循环曲线,均采用此系列方法完成,具有较大的实用性。

1.2 控制系统依据

多功能焊接热模拟软件已嵌入 MMS 系列国产热力模拟实验机<sup>[5-7]</sup>,采用 S7-400、FM458 下位机实时控制。使用 STEP7 实时编程软件,可以实现快速、准确、可靠的实时控制性能。PID 循环处理时间最小可达 0.125 ms,实时控制数据采集、存储,并与采集卡同步存储数据<sup>[8-9]</sup>。上位机采用 Dell Pentium 计算机,用 LabVIEW 8.2 进行编程,驱动两台显示器:一台显示器置于桌面,用于试验编程、试验参数录入、试验后数据处理;另一台显示器安放在控制柜中上部,用于监测试验状态、实时显示试验数据、监测故障状态。系统按设定曲线数值实时采集数据绘制实际曲线,并同时完成材料试样的焊接热模拟处理,通过测得的曲线和试样热处理后的组织性能变化情况完成材料焊接方面的分析。

2 焊接热循环曲线的绘制

2.1 焊接热模拟软件的界面操作

焊接热模拟软件上位机程序在 Labview8.2 环境中运行,最多支持 10 道次焊接热模拟试验。先选择焊接热模拟的道次数,界面左上角会增加相应道次的 Tab 页;再选择每个道次的焊接方法,每张 Tab 页上会显示所选方法的参数列表。点击左上角的数字,依次填入每个页面即每种方法所需的参数,按下绘图键便可绘制出所需曲线。在右侧“焊接热模拟设定曲线”窗口可以观察曲线,其下方的“输入参数数组”显示此次试验用户输入的所有参数的数值,以备用户查看。另外,根据程序控制和操作的需要,为每道次即在每张 Tab 页内增设了最大运行时间、结束温度、以及针对多道次试验设计的道次间隔时间 3 个参数。为更好的控制采样点数,在主界面增设了采样频率控制参数和相应的采样点数显示窗口,方便用户操作。此软件具体操作界面如图 1 所示。

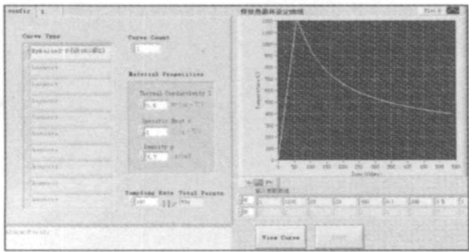


图 1 焊接热模拟软件的界面

Fig 1 Interface of welding heat simulating software

2.2 焊接热循环曲线的绘制

2.2.1 单道次焊接热循环曲线的绘制

根据第 2.1 节中所述方法,按下列方案绘制单道次焊接热循环曲线。

方案一:先选择焊接热模拟的道次数为 1,选择该道次的焊接方法为 Rykalin2-D(由  $t_{8/5}$  求  $Q$ ),采样频率为 100 Hz。具体参数如下:  $T_{max}=1\ 200\ ^\circ\text{C}$ ,  $T_0=20\ ^\circ\text{C}$ ,  $t_{8/5}=10\ \text{s}$ ,  $\delta=2\ \text{cm}$ ,其中  $\delta$  为板厚度。编程序设置高温停留时间 0.5 s,加热速率为  $200\ ^\circ\text{C/s}$ ,最大运行时间为 1 000 s,结束温度为  $300\ ^\circ\text{C}$ ,热传导率为  $0.5\ \text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$ ,比热容为  $1\ \text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ ,密度为  $6.7\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。按下绘图键,便可绘制出所需曲线如图 2 所示,并可同时算出  $Q=24.988\ \text{kJ}/\text{cm}$ 。

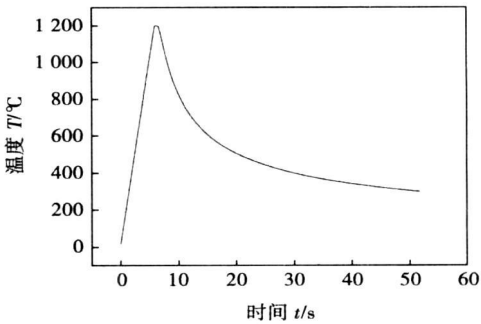


图 2 单道次焊接热循环设定曲线示意图

Fig.2 Setting curve of single process welding heat cycle

2.2.2 多道次焊接热循环曲线的绘制

对于多道次焊接热模拟试验,前一道次的结束温度不一定恰好等于下一个道次的初始温度(即预热温度)。若恰好等于,则无需道次间隔时间;若低于下一个道次的初始温度,加热系统会在下一道次开始时自动将温度升到设定值,亦无需道次间隔时间;若高于下一个道次的初始温度,试样的温度不可能马上冷却到下一道次的初始温度,这是需要一段时间的。而每一道次的初始温度对材料焊接热模拟后的组织形貌有非常大的影响<sup>[10-12]</sup>,如果初始温度不准确便达不到焊接热模拟的理想效果。考虑到这一点,在两个道次之间增设了道次间隔时间这项参数,用户可根据实际降温情况来自行设定道次间隔时间的长短,如果不需要时间间隔,可将其设置为零。这样就可以保证每一个道次实际试验时的初始温度与设定值相一致,有效地改善了以往焊接热模拟试验的不足。

方案二:选择焊接热模拟的道次数为 2,选择第一道次的焊接方法为 Rykalin2-D(由  $t_{8/5}$  求  $Q$ ),第二

道次的焊接方法为 Rykalin3-D (由  $Q$  求  $t_{8/5}$ ), 采样频率为 100 Hz。输入的具体参数如下: 第一道次,  $T_{\max}=1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_0=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{8/5}=10\text{ s}$ ,  $\delta=2\text{ cm}$ , 高温停留时间 0.5 s, 加热速率为  $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , 最大运行时间为 1 000 s, 结束温度为  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 第二道次,  $T_{\max}=1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_0=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $Q=15\text{ kJ/cm}$ , 高温停留时间 0.5 s, 加热速率为  $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , 最大运行时间为 1 000 s, 结束温度为  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以及此种材料的热传导率为  $0.5\text{ W/(cm}\cdot^{\circ}\text{C)}$ , 比热容为  $1\text{ J/(g}\cdot^{\circ}\text{C)}$ , 密度为  $6.7\text{ g/cm}^3$ 。

依次做两个试验: 第一个试验不设置时间间隔, 第二个试验依据经验设置两道次的时间间隔为 8 s。图 3、图 4 分别显示了在方案二的相同参数下, 未设置时间间隔和设置了时间间隔两种情况下, 试验实际得到的曲线的差异。软件可同时得出第一道次的  $Q=35.339\text{ kJ/cm}$ , 第二道次的  $t_{8/5}=10.61\text{ s}$ 。

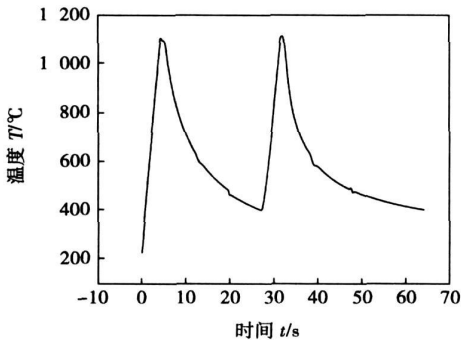


图 3 未设置时间间隔的双道次焊接热循环实际曲线  
Fig. 3 Practical curve of double-pass welding heat cycle without interval

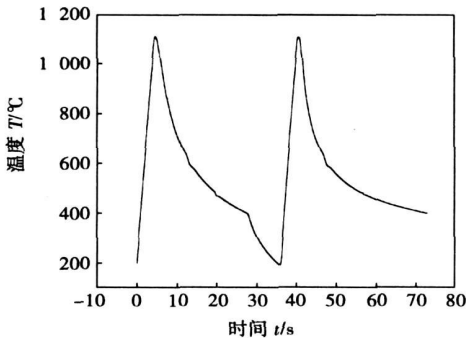


图 4 设置时间间隔的双道次焊接热循环实际曲线  
Fig. 4 Practical curve of double-pass welding heat cycle with interval

成了  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而方案二中设定的第二道次的初始温度是  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是由于第一道次的结束温度是  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 道次之间又没有设置时间间隔, 试样的温度不可能马上从  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷却到  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 所以第二道次的初始温度就变成了  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这是与设定完全不相符的。而图 4 中第二道次的初始温度则是  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 是跟设定相符的。这是因为在程序中加入了时间间隔的设置, 这段时间可以让试样依靠自然冷却完成温度过渡。所以道次间时间间隔的设置有效地改善了多道次焊接热模拟试验的对道次间初始温度的控制, 完善了以往多道次焊接热模拟试验的不足。

3 多功能焊接热模拟软件的应用

该软件已嵌入国产 MMS-200、MMS-300 热力模拟实验机, 在温度闭环 10 ms 一个周期的控制下, 快速、准确地采集数据, 实现实际曲线的跟踪绘制。按照方案 1 中的参数进行试验, 将试验测得的曲线与设定曲线在 Origin 环境下进行比较, 比较情况如图 5 所示。可看出实际曲线与设定曲线几乎完全重合, 说明软件的适用性、准确性及控制系统的稳定性均良好。

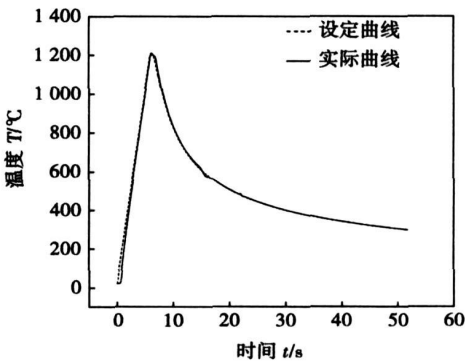


图 5 实际曲线与设定曲线的对比情况  
Fig. 5 Contrast of practical and setting curves

4 结 论

(1) 多功能焊接热模拟软件以经验和实测的数学模型为基础, 在 LabVIEW8.2 和 STEP7 环境中运用合适的编程策略, 方便、快捷的绘制焊接热循环曲线。该软件共提供 7 种焊接方法, 最多支持 10 道次焊接热循环模拟试验, 对焊接工艺的研究有着重要价值。

(2) 针对多道次焊接热模拟试验, 提出了设置

从图 3 中可以观察到, 第二道次的初始温度变

道次时间间隔的合理化策略并付诸实践,有效地改善了多道次焊接热模拟试验对道次间初始温度的控制,完善了以往多道次焊接热模拟试验的不足。

(3) 通过实际曲线与设定曲线的对比,验证了软件的适用性、准确性及控制系统的稳定性均良好。该软件已应用于国产 MMS-200 和 MMS-300 热力模拟实验机,完善了国产热力模拟实验机的功能,进一步拓宽了其应用领域。

参考文献:

[ 1 ] 陈 楚,张月嫦. 焊接热模拟技术[ M] . 北京: 机械工业出版社, 1985.

[ 2 ] Lenard J G, Pietrzyk M, Cser L. Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products[ M] . Oxford: Elsevier Science Ltd Press, 1999.

[ 3 ] 牛济泰. 材料和热加工领域的物理模拟技术[ M] . 北京: 国防工业出版社, 1999.

[ 4 ] 郭会光, 刘建生. 金属塑性加工模拟与控制的研究[ J] . 太原

重型机械学院学报, 1997, 18(3): 195.

[ 5 ] Ferguson H S, Chen W C. Development of Gleeble system and its applications[ J] . Journal of Harbin Institute of Technology, 1996, 28 (12): 12—14.

[ 6 ] Dynamic System Inc. Recommended physical simulation procedures using Gleeble systems[ M] . Poestenkill: Dynamic System Inc Press, 1995.

[ 7 ] Dynamic System Inc. The Gleeble at the University of Birmingham [ M] . Poestenkill: Dynamic System Inc Press, 2000.

[ 8 ] Truhard J. PXI solutions[ M] . Austin: National Instruments Corporation Press, 2001.

[ 9 ] Johnson G W, Jennings R. LabVIEW graphical programming[ M] . New York: McGraw-Hill Press, 2001.

[ 10 ] 郭耀华. 熔焊原理[ M] . 北京: 机械工业出版社, 2006.

[ 11 ] 陈伟昌, 党紫九. 热轧过程的物理模拟[ J] . 特殊钢, 1996, 17 (3): 27—28.

[ 12 ] 林滋泉. 我国轧钢生产技术的进步和展望[ C] // 中国金属学会. 北京: 冶金出版社. 2002: 2—10.

作者简介: 冯莹莹, 女, 1982 年出生, 博士研究生。从事热力模拟实验机的工艺及应用软件开发方面的研究工作。发表论文 6 篇。

Email: Fengyingying-1982@163.com

[ 上接第 68 页]

[ 5 ] 程汉池, 栗卓新, 史耀武, 等. 纳米粉末对轴向等离子喷涂 TiB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的影响[ J] . 焊接学报, 2008 29(1): 40—44.

[ 6 ] Horlock A J, McCartney D G, Shipway P H. Thermally sprayed Ni (Cr)-TiB<sub>2</sub> coatings using powder produced by self-propagating high temperature synthesis: Microstructure and abrasive wear behaviour [ J] . Materials Science & Engineering A, 2002, 336(1): 88—98.

[ 7 ] Lotfi B, Shipway P H, McCartney D G, *et al.* Abrasive wear behaviour of Ni(Cr)-TiB<sub>2</sub> coatings deposited by HVOF spraying of SHS-derived cemet powders[ J] . Wear, 2003, 254: 340—349.

[ 8 ] McIlvain J F, Neumeier L A. Plasma sprayed iron base wear resistance coatings containing titanium diboride; Bureau of Mines Report of Investigations 8984[ R] . United States: Department of Interior,

1985.

[ 9 ] Li Changjiu, Yang Guanjun, Li Chengxin. Lamellar microstructure feature of plasma-sprayed ceramic coating and its dominant influence over coating properties[ C] // The 2nd Asian Thermal Spray Conference. Korea, 2006: 12—13.

[ 10 ] 董艳玲, 王为民. TiB<sub>2</sub> 复合材料的研究进展及其应用[ J] . 佛山陶瓷, 2004, 14(2): 7—10.

[ 11 ] 邓建新, 丁泽良, 艾 兴, 等. 高温自润滑陶瓷刀具材料及其切削性能的研究[ J] . 机械工程学报, 2003, 39(8): 106—109.

作者简介: 程汉池, 男, 1968 年出生, 博士研究生。主要从事热喷涂方面的研究工作。发表论文 6 篇。

Email: chc@emails.bjut.edu.cn

vanadium content and B<sub>4</sub>C in flux core on the properties of surfacing alloy was also studied. The microstructures of hardfacing alloy consist of ferrite, martensite and carbide such as (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. The micro-analysis with electron spectrometer show that the content of chromium and vanadium in grain boundary is richer than those in transgranular and the gap becomes bigger as WC content in flux core increases. The carbides distributing along grain boundary such as (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> appear strip or discontinuous network form, which caused by the precipitation of vanadium carbide. It plays a role as the skeleton to prevent cutting wear of abrasive particles and refrains from the strong brittleness of network carbide. Comparing to the deposited alloy of H25Cr3Mo2MnV solid wire, the abrasion resistance of Fe-Cr-V alloy was more deliberately excellent.

**Key words:** wear resistance; hardfacing; flux-cored wire; ferrite; carbide

#### Development of multi-functions welding heat simulating software

FENG Yingying<sup>1</sup>, LUO Zongan<sup>1</sup>, ZHANG Dianhua<sup>1</sup>, SU Hailong<sup>1</sup>, WANG Lijun<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Rolling & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Science and Technology Stock Corporation of Angang, Anshan 114001, China). p77—80

**Abstract:** The software for welding heat simulating was developed successfully based on some classical mathematic models measured data and programmed appropriately by LabVIEW8.2 and STEP7. The interface is simple to draw welding heat simulating curve with this software. Setting parameters of interval time for multi-pass welding heat simulating experiments can make the preheat temperature be consistent to the setting value. The software with good stability, reliability and convenience has been applied to the series of domestic thermo-mechanical simulator, which consummates the simulator's functions.

**Key words:** welding heat simulating; mathematic model; multi-pass welding; interval time

#### Prediction of mechanical properties of welded joints based on RBF neural network

ZHANG Yongzhi, DONG Junhui, ZHANG Yanfei (College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China). p81—84

**Abstract:** A RBF neural network model on the welding parameters and the mechanical properties of TC4 titanium alloy joints welded by TIG welding was established. The 27 sets of experimental data are used to train this model, and other 9 sets are used to simulation. The results show that the welding parameters including welding current, welding speed and argon gas flow rate as network input parameters can predict mechanical properties including tensile strength, bend strength and ductility. The efficiency and accuracy of the RBF network predictions have improved comparing with common standard BP neural network, which overcome the BP network's disadvantage of long time to train and plunge in part smallest easily.

**Key words:** RBF neural network; titanium alloy; prediction

#### Fatigue life prediction of SnAgCu soldered joints of FCBGA device

ZHANG Liang<sup>1</sup>, XUE Songbai<sup>1</sup>, HAN Zongjie<sup>1</sup>, LU Fangyan<sup>1</sup>, YU Shenglin<sup>1,2</sup>, LAI Zhongmin<sup>1,3</sup> (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China; 3. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China). p85—88

**Abstract:** Anand model was used to establish the constitutive equation of Sn<sub>3</sub>0Ag0.5Cu solder, and the stress distribution of soldered joints was analyzed with and without underfill. The results indicate that the stress concentrates on the top surface of outermost soldered joint whether the underfill is here or not, and the stress decreases and distributes evenly on the top surface of soldered joint by using of underfill. The Modified Coffin-Manson equation by Engelmaier was utilized to predict the fatigue life of soldered joint; the fatigue life of soldered joint with underfill is longer than that without it. The effects of underfill properties were investigated. The results indicate that the CTE of underfill influences strongly the fatigue life of soldered joints, but the influence of Young's Modulus is little, which will provide a theory guide for practical applications.

**Key words:** constitutive equation; underfill; fatigue life

#### Interfacial reaction product and mechanical properties of the electron beam brazed Ni-based superalloy joints

WANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Binggang<sup>1</sup>, HE Jingshan<sup>1</sup>, FENG Jicai<sup>1</sup>, JIANG Weiming<sup>2</sup>, WU Yingjie<sup>3</sup> (1. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Jilin Petroleum Construction Metal Factory, Songyuan 138000, China; 3. Quality Control Department, Harbin Jiancheng Industry Company Limited, Harbin 150030, China). p89—92

**Abstract:** Ni-based superalloy K465 was brazed with B1p27 filler metal by vacuum electron beam brazing, and the effects of primary processing parameters on shear strength of joints were investigated. Microstructure of the brazed joints with B1p27 filler metal is studied by scanning electron microscopy (SEM), energy disperse spectrum (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the structure of brazing seam consists of a large amount of  $\gamma$  solid solution ( $\gamma' + \gamma$ ), rich W in Ni<sub>3</sub>B and CrB, and a small quantity of NbC. With the beam current and heating time increasing, the tendency of shear strength of the joints firstly increased, and then decreased. The excellent shear strength of the joints is 436 MPa when the beam current of welding is 2.6 mA, heating time is 560s and focused current is 1 800 mA.

**Key words:** electron beam; brazing; interfacial reaction product; shear strength

#### Finite element analysis on influencing factors of soldered column