

# X80 管线钢焊接热影响区的韧性分析

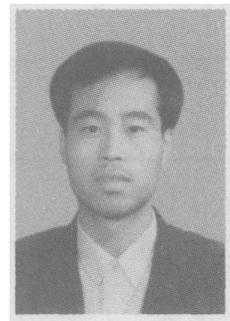
李为卫<sup>1,2</sup>, 刘亚旭<sup>1</sup>, 高惠临<sup>2</sup>, 赵新伟<sup>1</sup>, 冯耀荣<sup>1</sup>, 吉玲康<sup>1</sup>

(1. 中国石油管材研究所 石油管力学与环境行为重点实验室, 西安 710065 2 西安石油大学, 西安 710065)

摘 要: X80 管线钢在焊接过程中, 热影响区由于受到焊接过程热的作用, 其组织和性能会发生较大的变化。韧性是天然气长输管线的重要性能, 采用热模拟技术、现代工程测试手段和显微分析方法, 分析了不同热输入参数下 X80 管线钢焊接热影响区粗晶区 (CGHAZ) 韧性 (夏比冲击功和 CTOD) 的差异及其原因。在一定范围内, 较高焊接热输入下 CGHAZ 的韧性比较低热输入下 CGHAZ 的韧性明显高, 超过一定范围, 随着热输入的增加韧性急剧下降。造成不同热输入下韧性差异的根本原因是由 CGHAZ 显微组织的差异引起的。较低的热输入下 CGHAZ 中产生了一定量的低碳马氏体, 从而导致韧性较差。

关键词: X80 管线钢; 热影响区粗晶区; 热输入; 韧性

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)02-43-04



李为卫

## 0 序 言

为适应未来长输油气管线大口径、高压输送的发展需要, X80 高性能管线钢的研制和开发正日益受到重视。目前, 通过采用微合金化、超纯净冶炼和控轧控冷技术, X80 管线钢原材料的强韧性已基本得到解决, 然而, 在焊接过程中组织恶化和性能损伤的问题仍未很好地解决, 焊接技术相对不成熟, 制约着 X80 管线钢的进一步应用。截至目前, 全世界采用 X80 管线钢铺设的油气管道仅数百公里, 远不及 X70 管线钢应用的普遍。对国内来说, 管线钢的研究和应用相对较晚, X70 管线钢刚开发应用成功, 对 X80 管线钢的焊接研究很少。韧性是焊接接头一项重要的性能, 对天然气管道的起裂和止裂有重要影响。为了掌握 X80 管线钢材料焊接过程中的韧性行为, 为制定焊接工艺参数提供依据, 作者采用热模拟技术、现代工程测试手段和显微分析方法, 对不同焊接热输入下 X80 管线钢热影响区粗晶区 (CGHAZ) 的夏比冲击韧性和裂纹尖端张开位移 (CTOD) 进行了测试、分析和研究<sup>[1~3]</sup>。

## 1 试验材料及方法

试验材料采用某公司试制 14.6 mm 厚的 X80

管线钢, 其化学成分见表 1, 常规力学性能见表 2, 显微组织见图 1, 属微合金针状铁素体型管线钢<sup>[2]</sup>。

沿板材横向取 11 mm × 11 mm × 55 mm 的试样, 在 Gleeble1500 型热-力学模拟机上模拟焊接热影响区粗晶区一次加热过程进行热模拟试验, 热模拟试验参数 (热输入  $E$ 、峰值温度  $T_{max}$ 、冷却时间  $t_{8/5}$ 、高温停留时间  $t_h$ ) 见表 3。选取的热输入值覆盖了制管埋弧焊焊接 (一般为 20 ~ 35 kJ/cm) 和管道现场焊接 (焊接方法包括手工电弧焊、药芯焊丝电弧焊、熔化极气体保护焊, 热输入一般为 5 ~ 15 kJ/cm) 通常采用的参数范围。

将热模拟后的部分试样加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的 V 形缺口冲击试样进行不同温度的夏比冲击试验。试样缺口沿厚度方向, 试验在 TNUS OLSEN 试验机上进行。

将热模拟后的另一部分试样加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的三点弯曲断裂韧性试样, 在试样单侧用线切割加工深度为 2 mm 的缺口, 缺口沿板厚方向。然后在 MTS-800 试验机上预制疲劳裂纹, 其尺寸为  $a_0/w = 0.45 \sim 0.55$  ( $a_0$  为原始裂纹长度, mm;  $w$  为试样宽度, mm), 跨距  $s = 4w$ 。CTOD 测试按国家标准 GB/T 2358《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》进行, 采用多试样法确定裂纹扩展阻力曲线<sup>[4]</sup>。

对热模拟试验后的部分试样在光学金相显微镜下和透射电镜下进行显微组织分析。

收稿日期: 2005-01-17

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油管力学与环境行为重点实验室的应用基础研究项目 (2002G10311)

表 1 试验材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of test material

| C     | Si   | Mn   | P     | S      | Nb    | V     | Ti    | Cr    | Mo   | Ni   | Cu   | B      |
|-------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|
| 0.065 | 0.24 | 1.85 | 0.011 | 0.0028 | 0.057 | 0.005 | 0.024 | 0.022 | 0.34 | 0.38 | 0.01 | 0.0006 |

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test material

| 屈服强度 $R_e$ /MPa | 抗拉强度 $R_m$ /MPa | 伸长率 $A$ (%) | 冲击吸收功 $A_{kv}$ ( $-20^\circ\text{C}$ ) /J |
|-----------------|-----------------|-------------|---|
| 567             | 739             | 33.0        | 300                                       |

表 3 粗晶热影响区焊接热模拟主要参数

Table 3 Heat simulation test parameters of CGHAZ

| 热输入 $E$ ( $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 峰值温度 $T_{m\max}$ / $^\circ\text{C}$ | 冷却时间 $t_{8/5}$ /s | 高温停留时间 $t_H$ /s     |                     |
|--|-------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
|  |                                     |                   | $900^\circ\text{C}$ | $900^\circ\text{C}$ |
| 5  | 1300                                | 3                 | 1.82                | 1.49                |
| 10   | 1300                                | 5                 | 2.71                | 1.80                |
| 15   | 1300                                | 10                | 5.43                | 3.60                |
| 20   | 1300                                | 20                | 10.86               | 7.20                |
| 30   | 1300                                | 40                | 21.71               | 14.41               |
| 40   | 1300                                | 70                | 38.00               | 25.23               |
| 50   | 1300                                | 100               | 54.28               | 36.06               |



图 1 试验材料的显微组织

Fig. 1 Microstructure of test material

## 2 试验结果及分析

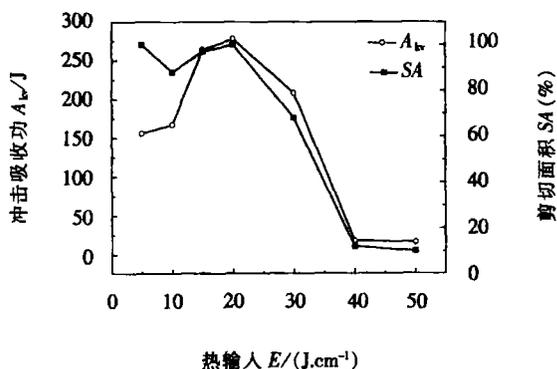
经过不同热输入的模拟热循环后, X80材料模拟粗晶热影响区(CGHAZ)  $-20^\circ\text{C}$ 冲击吸收功( $A_{kv}$ )和断口剪切面积( $SA$  (%))试验结果见图 2。两种热输入(10  $\text{kJ}/\text{cm}$ 和 20  $\text{kJ}/\text{cm}$ )的 CGHAZ系列温度下的夏比冲击韧性试验结果见图 3。常温下断裂韧性测试结果见表 4。根据试验数据拟合的  $\delta$ 曲线见图 4。

由图 2可以看出, 热输入参数对 CGHAZ的韧性有很大影响。在 20  $\text{kJ}/\text{cm}$ 的热输入参数下, CGHAZ的韧性最好, 低于这一热输入, 随着热输入

表 4 两种热输入下 CGHAZ断裂韧性测试结果

Table 4 Test result of CTOD of CGHAZ in two heat input

| 热输入<br>$E$ ( $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | 阻力曲线方程  | 条件启裂值<br>$\delta$ /mm |
|---|---|-----------------------|
| 10  | $\delta=0.41105\times(0.246+\Delta a)$          | 0.183                 |
| 20  | $\delta=0.6956\times(0.0753+\Delta a)^{0.8451}$ | 0.233                 |

图 2 不同热输入 CGHAZ  $-20^\circ\text{C}$ 冲击韧性试验结果Fig. 2 Test result of impact toughness (at  $-20^\circ\text{C}$ ) of CGHAZ in multifold heat input

的增加, 冲击韧性值升高, 高于这一热输入, 随着热输入的升高, 冲击韧性降低。当热输入超过 30  $\text{kJ}/\text{cm}$ , 试验材料 CGHAZ韧性急剧下降。

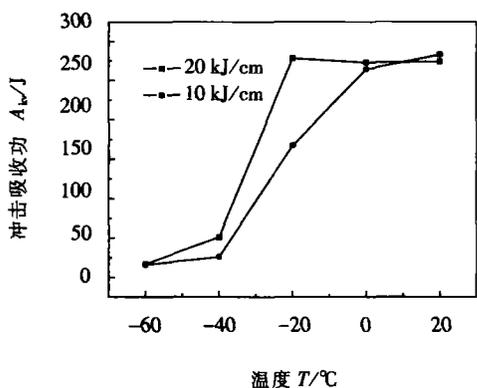


图 3 两种热输入 CGHAZ 系列温度冲击韧度试验结果  
 Fig 3 Test result of impact toughness ( at series temperatures) of CGHAZ in two heat input

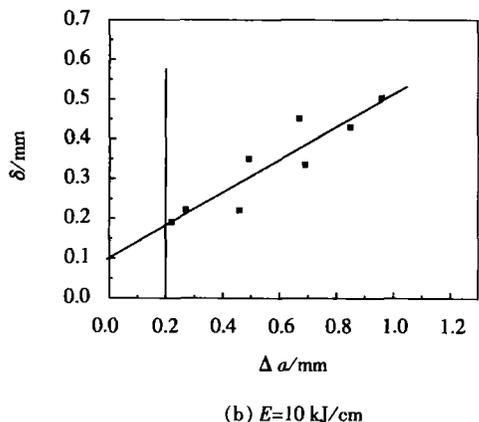
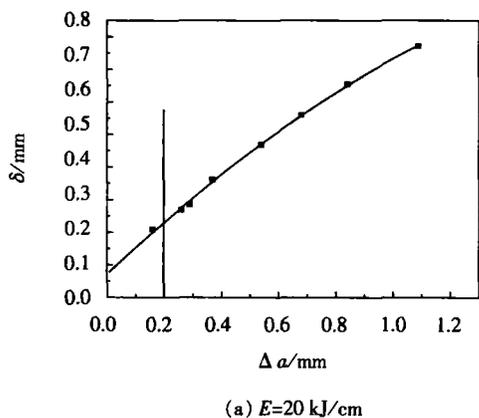


图 4 两种热输入下 CGHAZ 的 CTOD 阻力曲线  
 Fig 4  $\delta_r$  - curve of CGHAZ in two heat input

进一步分析上述试验结果,可以看出,经过 20 kJ/cm 热输入的焊接热循环后,CGHAZ -20 °C 冲击韧度 (278 J) 比原始母材 (300 J) 降低 22 J 下降了 7.3%, 而经过 10 kJ/cm 热输入的焊接热循环后,CGHAZ -20 °C 冲击韧度 (167 J) 比原始母材降低 133 J 下降了 44%。从断裂韧度值来看,20 kJ/cm 热输入时 CGHAZ 的条件启裂值  $\delta$  比 10 kJ/cm 时明显高,裂纹扩展阻力较大。可见,两种情况相比,较高热输入下试验材料 CGHAZ 的韧性比较低热输入

的好。

造成不同热输入下韧性的差异,究其原因,是由焊接热过程造成材料组织的变化引起的。随着焊接热输入增大,CGHAZ 的晶粒尺寸变大,引起粗晶脆化,导致韧性变差;如果材料的碳当量较高,材料有一定的淬透性,热输入过小时焊接过程快速冷却会产生一定量的淬硬的马氏体组织,也会造成材料的韧性下降<sup>[5,6]</sup>。两个因素造成材料韧性的变化,究竟哪个因素起主要作用与热输入参数范围有关。

图 5 是两种不同热输入下 CGHAZ 的光学金相组织 (OM)。从晶粒尺寸来看,两种热输入下 CGHAZ 的晶粒尺寸 (晶粒度等级为 7 级) 比原始母材 (晶粒度等级为 12 级) 增大很多,而两种热输入下,CGHAZ 的平均晶粒尺寸没有明显差异,可见粗晶脆化因素引起韧性差异的作用较小。

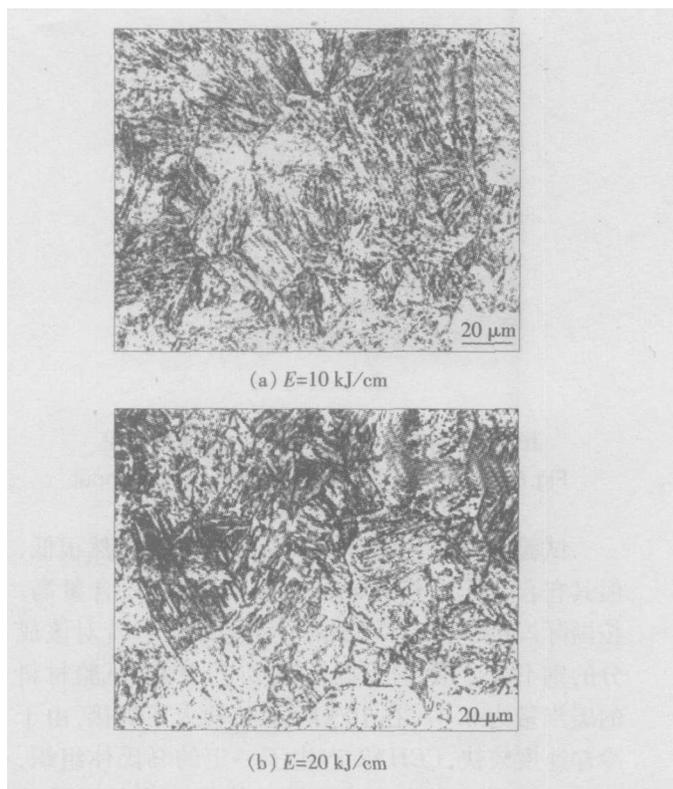


图 5 两种热输入下 CGHAZ 的光学金相组织  
 Fig. 5 Optical micrograph of CGHAZ in difference heat input

从显微组织类型来看,20 kJ/cm 热输入下 CGHAZ 为粒状贝氏体组织,未发现马氏体,而在 10 kJ/cm 热输入下的 CGHAZ 发现了相当数量的低碳马氏体组织。图 6 是两种热输入下 CGHAZ 的透射电镜组织 (TEM) 照片。10 kJ/cm 热输入下,CGHAZ 存在于贝氏体铁素体板条之间的马氏体由于硬而脆,与贝氏体铁素体之间的变形协调性差,容

易在两相的交界处产生微裂纹而损害韧性。而在 20 kJ/cm 热输入下其组织形态为沿晶界形成的不同位向的针状铁素体组织。在 TEM 下可观察到这种针状铁素体的细小、密集分布形态,且这种针状铁素体经常从原奥氏体的晶界以不同的位向插入晶内,因而使得钢材的有效晶粒尺寸减小,从而有利于韧性的提高<sup>[2~3]</sup>。

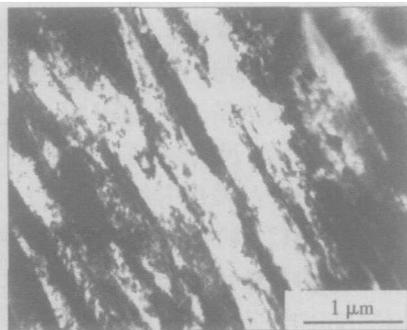
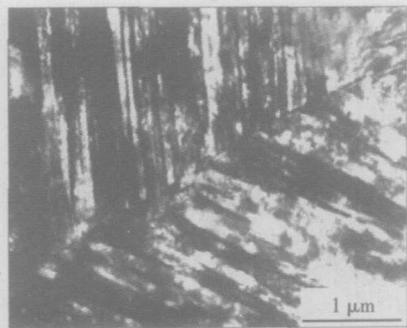
(a)  $E=10 \text{ kJ/cm}$ (b)  $E=20 \text{ kJ/cm}$ 

图 6 两种热输入下粗晶区中的 TEM 组织

Fig 6 TEM of CGHAZ in difference heat input

试验 X80 材料的含碳量为 0.065%, 虽然很低, 但其它合金元素较一般低合金钢种类多, 含量高。按国际焊接学会 (IWI) 的碳当量公式 (尽管对该成分的钢不太适用, 但可以作为参考) 计算, 试验材料的碳当量为 0.47。在 10 kJ/cm 热输入下焊接, 由于冷却速度较快, CGHAZ 产生了一定的马氏体组织, 从而引起韧性下降。这种马氏体组织为低碳马氏体。在 14.6 mm 厚度的试验材料上进行了小铁研试验, 在不预热及预热 50 °C 条件下, 热影响区产生了一定长度的裂纹 (见图 7), 也表明这种材料有一定的淬透性。

可见, 较低热输入下产生的低碳马氏体组织是造成 CGHAZ 韧性较差的主要原因。在 20 kJ/cm 焊接热输入下 CGHAZ 表现了较好的韧性。当然, 热输入不是越高越好, 在更高的热输入下, 粗晶脆化引起韧性下降的作用非常明显。由图 2 可见当热输入在 30 kJ/cm 以上时, 试验材料 CGHAZ 韧性急剧变差。

对小热输入参数而言, 在焊接方法和位置等条件确定的情况下, 焊接热输入不可能作太大范围的调整, 防止 CGHAZ 产生淬硬马氏体的有效措施就是采取焊前预热, 并在焊接过程控制层间温度, 降低焊接冷却速度, 从而减少或消除这种对韧性有害的组织。

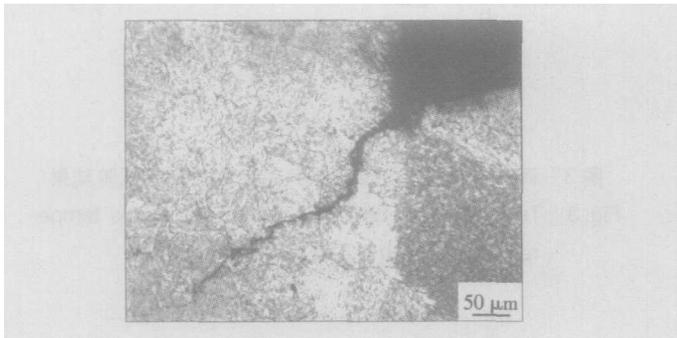


图 7 X80 材料焊接性试验裂纹情况

Fig 7 Crack status in test of X80 pipeline steel weldability

### 3 结 论

(1) 在一定范围内, 较高焊接热输入下 CGHAZ 的韧性比较低热输入下 CGHAZ 的韧性明显高, 超过一定范围, 韧性急剧下降, 因此焊接过程要尽可能采用适中的焊接热输入, 避免采用过小或过大的热输入。

(2) 在较低热输入下, 由于冷却速度较快, 在 CGHAZ 产生了低碳淬硬马氏体组织, 因此造成 CGHAZ 韧性降低。

(3) 该种材料在较低热输入下焊接, 必须采取预热等措施, 防止 CGHAZ 产生淬硬马氏体组织, 避免 CGHAZ 韧性下降过多。

#### 参考文献:

- [1] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J]. 焊管, 2000, 23(3): 43-61
- [2] 高惠临. 管线钢—组织、性能、焊接行为[M]. 陕西: 科技出版社, 1995, 119-131
- [3] 高惠临, 辛希贤, 徐学利, 等. 输油管线钢焊接粗晶区韧脆规律的研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(7): 39-44.
- [4] 唐幕尧. 焊接测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988, 239-245
- [5] 薛小怀, 周 昀, 钱百年, 等. X80 管线钢焊接粗晶区组织与韧性的研究[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1854-1857.
- [6] 田志凌. TMCP 钢局部脆性区断裂韧性的研究[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(4): 50-53

作者简介: 李为卫, 男, 1965 年 11 月出生, 高级工程师。主要从事油气输送管材料及焊接研究, 获省部级科技进步二、三等奖各 1 项, 发表论文 20 余篇。

Email: liww@gric.org

QU Shi yao (School of Materials Science and Engineering Shandong University Jinan 250061 China). 39 - 42

**Abstract** Using replaced Fe based self flux melting alloy with carbide forming elements Ti as well as graphite Fe based alloy composite coating reinforced by in situ TiC particles was produced on the substrate of carbon steel by gas tungsten arc welding (GTAW) process. Microstructure and properties of the coating were investigated by means of SEM, cEPMA, X ray diffractometer and analysis system of image. The results show that the fine TiC particles which distributed in the matrix can be formed by using GTAW process. TiC particles possess gradient distribution along the depth of the coating. A good formation microstructure and properties of the composite coating can be obtained by adjusting the replaced thickness of the coating welding parameters as well as a amount of FeTi and graphite.

**Keywords** GTAW; in situ formation TiC particles Fe based composite coating

**Analysis of toughness in HAZ for X80 pipeline steel welding** LI Weiwei<sup>1,2</sup>, LIU Ya xu<sup>1</sup>, GAO Hui lin<sup>2</sup>, ZHAO Xin wei<sup>1</sup>, FENG Yao rong<sup>1</sup>, JI Ling kang<sup>1</sup> (1 The Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods CNPC Xi'an 710065 China 2 Xi'an Petroleum University Xi'an 710065 China). p43 - 46

**Abstract** The microstructure and properties of X80 steel will be changed greatly because of heat cycle in welding process. Toughness is a very important property of long distance natural gas transmission pipeline. The toughness characteristic (Charpy V impact and crack opening displacement i.e. CTOD) and reason of X80 Coarse Grained Heat Affect Zone (CGHAZ) with different welding heat inputs was analyzed by weld thermal simulation technique, modern test and microstructure analysis methods. The results indicated that the toughness of CGHAZ of higher heat input is better than that of lower heat input in some extent and the toughness violently decrease as increasing of heat input beyond the extent. The essential reason of these results is the different microstructures of CGHAZ for different heat input. The low carbon martensite constituent found for lower heat input makes CGHAZ toughness be bad.

**Keywords** X80 pipeline steel coarse grained heat affect zone; heat input toughness

**Pulsed gas metal arc welding of thin plate with high speed** LU Zhen yang HUANG Peng fei ZHANG Han peng YIN Shu yan (Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p47 - 50

**Abstract** It is the key problem to realize stable arc welding process with high current and low voltage in order to avoid the undercut occurred in high speed arc welding. A new kind of single cycle voltage

feedback control system was designed which ensured the constant average voltage and stable arc length in each pulse cycle. Noise voltage was cut off and waveform of current during short circuit was controlled. It is demonstrated that the system has an excellent arc length self adjusting ability. Compared with conventional welding power source the working voltage of the system can be decrease about 1 - 5V at the same wire feed rate. The welding bead is very nice and defects are completely avoided when the welding speed is high as 1.3m/min.

**Key words** single chip computer inverter pulsed gas metal arc welding

**Influence of medium tempering treatment on microstructure and properties of Ni based spray welded coating on titanium substrate**

WANG Hong yu XU Xiao jing CHEN Kang mia WANG Lan ZHANG Xue feng (School of Mechanical Engineering Jiangsu University Jiangsu Zhenjiang 212013 China). p51 - 54 58

**Abstract** The microstructure and properties of Ni based coating on Ti6Al4V alloys substrate fabricated by flames spray welding and subsequently treated by medium tempering were studied. The results show that a lot of hard particles are separated out after the medium tempering treatment which has the dispersion strengthen effect on spray welded coating. After the medium tempering treatment the uniformity of coating's microstructure is improved and the transition layer widens obviously and the micro hardness of coating changes more smoothly along depth direction and the grads gradient of properties from soft substrate to hard coating decreases obviously and the micro hardness of the spray welded surface increases a little but the wear loss of sample after tempering treatment is only equal to that of 1/2 - 33 of the before.

**Key words** medium tempering spray welded coating titanium substrate microstructure properties

**Effect of simulated welding parameter on residual stress of vacuum electron beam welding**

CHEN Fu rong<sup>1</sup>, XIE Rui jun<sup>1</sup>, ZHANG Ke rong<sup>1</sup>, LIU Fang jun<sup>2</sup>, MAO Zhi yong<sup>2</sup> (1. College of Materials Science and Engineering Inner Mongolia University of Technology Hulhot 010062 China 2 Beijing Aviation Manufacturing Engineering Institute Beijing 100024 China). p55 - 58

**Abstract** The measurement of residual stress of electron beam welding need to expend great cost so it is important to numerically simulate the value and distribution of welding residual stresses. The welding temperature field the distributions of residual stresses of TC4 plates was simulated with a three dimensional finite element model (FEM). The effects of medium and high accelerated voltage on the residual stresses of electron beam welding were mainly studied. The purpose is to study the