

# 电解钴始极片与吊耳电阻点焊接头的组织分析

周晓玲<sup>1</sup>, 刘 晨<sup>2</sup>, 曹保国<sup>2</sup>, 顾永刚<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 机电工程学院 昆明 650093;

2. 金川集团有限公司 甘肃 金昌市 737100)

**摘 要:** 通过对不同焊接工艺参数点焊的焊接接头组织进行金相观察与分析, 对接头组织中出现的平行滑移带、交滑移带、再结晶现象的作用也进行了分析与讨论。结果表明, 母材为单相时, 液固前沿小的过冷度及低的形核率使焊接接头易于在接头中心区域形成粗大柱状晶; 冷却过程施加的电极压力会在柱状晶中产生平行滑移带及交滑移带, 电极力越大则滑移带越密集; 在形变柱状晶内存在不完全的动态再结晶行为, 平行滑移线及交滑移线成为了新晶体形核与生长的最有利生长台阶。

**关键词:** 电解钴; 电阻点焊; 显微组织; 滑移带; 再结晶

**中图分类号:** TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)01-0037-05



周晓玲

## 0 序 言

钴的高磁性转变温度使纯度为99%~99.9%的电解钴一直在磁性合金、超合金材料领域占重要地位, 人们还期待纯度达更高品级的钴用于先进的电子仪器中。生产高品位钴已成为相关企业努力实现的目标之一<sup>[1]</sup>。始极片与吊耳的连接是影响电解钴质量的一个关键, 原则是不向电解液中带入杂质, 因为钴中杂质的含量将直接影响到成品钴的价格。以前采用的铆接方式有向电解液中引入异类杂质元素、劳动强度较大、效率低等缺点, 且电解过程中始极片与吊耳中间存在的缝隙也会因沉积逐渐增多电解钴, 使连接部位破坏, 影响电解的正常进行。金川公司采用电阻点焊方式使焊接质量达到实际生产的要求, 极大地降低了劳动强度, 提高生产效率。

由于工业中基本没有将纯钴单独应用于工程结构中, 故国内外几乎未见到有关纯钴电阻点焊方面的研究文献。涉及纯钴的报道主要是针对纯钴的制备技术<sup>[1-3]</sup>及含钴合金的焊接工艺<sup>[4,5]</sup>等。因此就金川公司自主开发电解钴始极片与吊耳电阻焊接生产线的契机, 文中对不同工艺参数点焊的焊接接头组织进行金相观察与分析, 并结合焊接工艺中的预压、焊接熔合、断电后施加电极力等工序对接头组织

中出现的平行滑移带、交滑移带、再结晶现象进行了分析与讨论。对纯钴的焊接组织与性能关系的研究将有助于纯金属点焊熔核形成理论的深入研究, 进而对设计与控制点焊接头的组织与性能方面具有指导作用。

## 1 试验方法

始极片长宽尺寸为1 000 mm×800 mm, 厚度在0.4~2.5 mm范围波动, 初始重量为3~18 kg不等。吊耳是用始极片剪成的宽为50 mm±2 mm、长为700 mm的钴条; 采用专用非标交流点焊机, 电极球面半径为9 mm、预压力为1 500 N、预热时间为10周波、预热电流15 kA、冷却时间为2周波、焊接时间为15周波等焊接参数相对固定。三板搭接方式(图1), 取样的钴板板厚范围为1~4 mm, 焊接电流取值范围为18.5~27 kA。

**焊接工艺流程:** 焊前处理(清理电极头及始极片、吊耳)→预热并加预压→通电焊接(使接触面处于熔化态)→断电并电极施压维持→检查。线切割下料(含焊点)镶嵌后进行金相样品的制备。腐蚀液成分配比: 15 mL 硝酸+15 mL 醋酸+60 mL 盐酸+15 mL 水。用Leica图像分析仪研究焊接接头的微观组织形态。现场采用拉伸撕裂试验检验是否存在虚焊, 如果母材被拉穿表明焊点牢固。

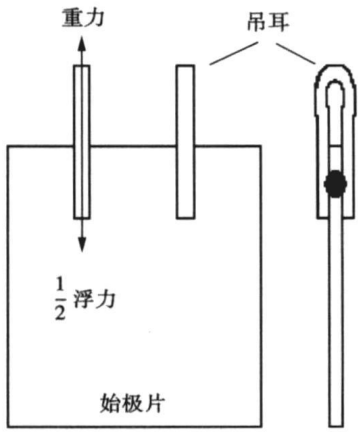


图 1 吊耳与始极片接头搭接的示意图  
Fig. 1 Schematic of starting sheet and lifting ear of three layers in the overlapping welding joint form

2 焊接强度分析与测试

当焊接后的始极片与吊耳一同浸入电解液并通电时, 会出现同时进行的两个过程: (1) 不断析出的钴离子沉积在阴(始)极片上, 使厚度增至约 6 mm, 电解钴板质量逐渐增加直至电解结束时的最后重量可达 42~60 kg. 可知, 焊接部位在竖直方向所受的力主要是电解钴板的重力及电解液的浮力, 力的作用时间为 3 天左右. (2) 焊接后在始极片与吊耳之间仍然存在空隙, 电解时在这些部位也必然会沉积电解钴. 逐渐增加的沉积钴会对焊接接头前端起到一个插入楔子的作用从而引起张力及“楔子”前端的应力集中效应, 二者是使焊接接头发生撕裂破坏的主要原因. 由此可见, 要保证电解钴生产的正常进行, 除了要保证在焊接时不要带入杂质以外, 还要保证焊接接头有一定的强度. 从而设计接头的组织构成时不必强求增加中心等轴晶区、减少柱状晶区去保证机械强度.

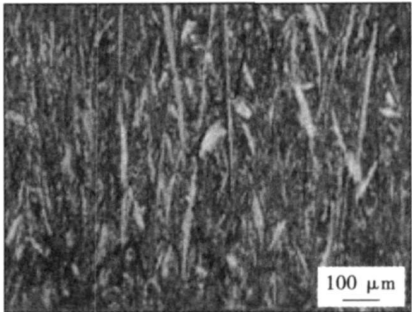
综上分析, 并不要求吊耳与始极片的焊接接头具有足够高的疲劳强度及力学性能, 只要焊接部位即能在长达 3 天的电解时间内承受渐增的电解钴板重量, 又能承受于焊点附近缝隙中逐渐沉积增加的钴的“楔子”张开撕裂作用即可.

3 试验结果与讨论

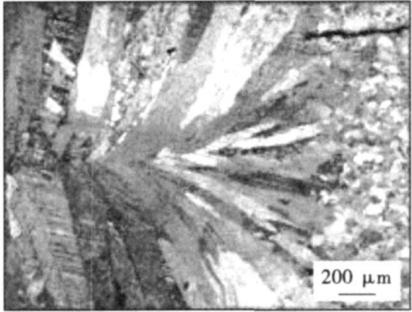
在所采用的取值范围内, 板较厚且焊接电流较小(如 23 kA 以下), 三层板搭接焊接的情况下往往不能形成良好的熔核, 导致现场撕裂试验强度不足, 不能将母材拉穿, 对组织的观察发现焊缝中心出现

较多的等轴晶; 相应增大焊接电流或延长焊接时间则可实现三层板的良好焊合, 撕裂试验强度提高, 组织上观察到柱状晶的数量增多且趋于完整, 中心等轴晶减少甚至消失. 焊接电流也不宜过大(或焊接时间过长), 否则会破坏塑性变形环的保护作用、击穿工件、损伤电极或引起焊接飞溅现象.

图 2a 为电解钴母材断面组织, 所有金相试件的组织除粗细稍有区别外, 母材均呈现相同的组织特征. 图 2b 为三层板搭接点焊焊缝的组织形态, 与母材完全不同的形态特征表明已完全实现了三层板的焊合, 晶粒呈现不同的深浅度是由于晶粒位向的差异所致. 说明焊接时在球面电极力作用下, 通电使焊接中心区域于短时间内温度达到钴的熔点 1 492 °C 以上, 形成一个封闭的液态金属区(其边界为  $T=1\,492\text{ °C}$  的等温面), 其凝固也遵循凝固理论中的结晶形核与长大的过程, 但作为纯金属, 又有着其独特的形成规律, 中心柱状晶被外围等轴晶区所包围. 进一步的显微分析还观察到柱状晶晶内大量存在的滑移线以及外围等轴晶内的滑移线痕迹, 如图 3a, b 所示. 这些组织现象必与焊接工艺流程密切相关, 如预热预压、水冷电极、断电后的施压维持等, 必然对焊接接头的性能构成影响. 文献[6]对纯钛进行了电阻点焊, 也观察到焊接区中存在形变孪晶, 增加焊

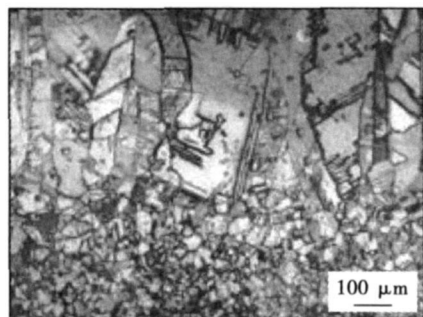


(a) 电解钴母材断面组织

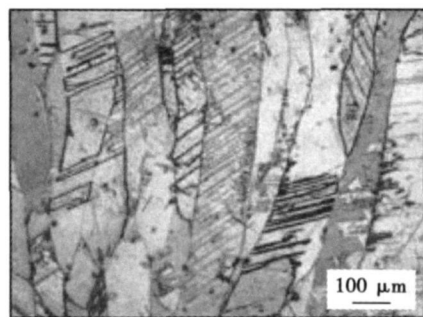


(b) 焊接接头的组织形态

图 2 电解钴母材及焊接接头的光学组织  
Fig 2 Optical micrographs of electrolytic cobalt (base metal) and resistance spot welded joint



(a) 熔合区边界及热影响区组织形态



(b) 柱状晶中的平行滑移带

图 3 熔合区边界、热影响区的组织形态及柱状晶中的平行滑移带

Fig. 3 Interface microstructures of nugget and HAZ, and parallel slip bands in columnar grains

接电流及电极力, 将增大接头的形变硬度, 也增加了其内的孪晶数量. 点焊是一个瞬间完成的过程, 难于实时观察并记录, 只能从一个焊接循环入手, 对最终的组织形态加以分析与讨论.

### 3.1 加热过程中焊接接头组织的形成

预压产生的形变能除了利于加速中心接触区的焊接熔合得到熔核外, 在熔合区边缘尚未熔化的区域内, 这种预先变形量利于发生再结晶得到比中心柱状晶更为细小均匀的等轴晶(图 3a), 此层围绕着熔核的等轴晶区构成了一个封闭的塑性环. 预压力应在焊件预热温升至  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上才增至设定值(较低温度下过大的预压力易使钴板产生微裂), 这时钴材将发生晶型转变, 由密排六方结构 HCP  $\rightarrow$  FCC 面心立方结构, 从而易于变形及建立起稳定的电流通道. 在随后温度升至  $T=0.4T_m \approx 596.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  后, 母材内储藏的形变能作为驱动力, 引起了变形钴的“动态再结晶”行为, 得到了部分或全部等轴晶组织, 再结晶程度及大小与预变形度、焊接电流或焊接时间、焊接材料的传热性能等多种因素有关. 此部分或全部等轴晶组织就是通过焊接电流加热后中心熔核、热影响区形成前的组织状态.

### 3.2 冷却过程中柱状晶的形成

通以焊接电流后, 接头中心接触区的金属迅速

升温, 形成中心熔核. 熔核的外侧是液固两相共存的半熔化区, 固相为 FCC 结构的无畸变粗等轴晶, 由于热涨落作用, 部分固相会发生着重熔及重结晶. 由图 3a 可以看出柱状晶区与热影响区前沿的等轴晶是联生生长的, 但柱状晶的数量远少于而尺寸却远大于等轴晶. 依照形核理论<sup>[7]</sup>, 位于固液两相间的界面特性不仅决定了固态晶体的形态和生长方式, 还决定了晶体的大小及界面推移速率. 在断电冷却过程中, 靠近水冷电极头的半熔化区晶粒的晶体结构、成分与液相相近, 由于前沿纯钴液体中只有小的适当的过冷度  $\Delta T$ , 临界晶核半径  $r^*$  较大, 不易形成新晶核, 只有某些液固界面的半径大于临界晶核半径时这些界面才能以联生生长方式向熔体中心推移.

$$r^* = \frac{2\gamma_{LS}T_m}{\Delta H_m \Delta T}$$

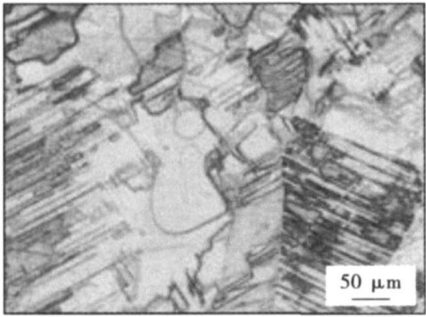
式中:  $\gamma_{LS}$  为液固两相界面能;  $T_m$  为熔化温度;  $\Delta H_m$  为凝固释放的潜热;  $\Delta T$  为过冷度. 对一个由塑性环包围的熔核而言, 凝固释放潜热  $\Delta H_m$  将使前沿温度回升, 当此潜热沿温度梯度通过塑性环向外传走后, 界面才能向熔体推进. 因夹持在内水冷电极头的两侧为最快散热通道, 沿最快散热反方向的纵向生长速度最快, 而横向生长则终止于相邻并行生长的晶粒的侧向边界相接触, 最终得到垂直于中心接触面的柱状晶. 钴的纯度越高, 液固界面前沿的过冷度越小, 熔核内形成粗大柱状晶的优势也越大; 适当增大预压力及预压时间, 可以增加熔核外侧未熔等轴晶的数量, 进而增加形核率及联生生长的晶粒数, 提升接头的抗剪强度. 对镁合金点焊的研究<sup>[8]</sup>从塑性变形抗力的角度也得到相同的分析结果; 适当降低焊接电流、减少熔核外侧的冷却速度, 将提高熔核中心区域均匀形核率, 从而促进中心等轴晶的形成, 减少柱状晶的纵向尺寸. 从文献<sup>[9]</sup>对镁合金点焊接头组织的研究也可表明, 随着电极力的减少, 接触电阻将增大, 熔核的尺寸会增大, 理论上应增加中心等轴晶的形成, 柱状晶的尺寸减小.

### 3.3 柱状晶内滑移带的形成

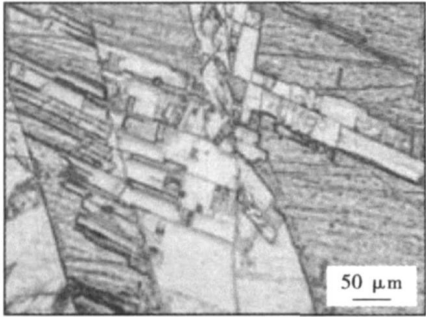
为保证焊接时建立稳定的电流通道(较为恒定的电流密度), 往往在焊接前要对焊件预压一定的时间, 所产生的变形在随后的熔化及热传递作用中将得以减轻或消除. 因此, 焊后组织中的平面滑移带及交滑移并不是由预压阶段的变形产生, 而是形成于断电后水冷电极的施压维持过程中.

液态金属钴处于封闭的塑性壳内, 在极快速的凝固过程中若无液体金属的及时补充, 极易形成缩孔、缩松或孔隙等铸造类缺陷, 降低焊接接合面的结

合强度. 故大多数电阻点焊中对较厚板(三层钴板)都会适当增加断电后的电极力来补偿收缩的熔核体积. 理论上, 这个电极压力的作用区间应不低于 430 ℃, 否则具有较少滑移系的  $\alpha$ -Co(密排六方结构)中易于形成微裂纹; 此电极力也不宜过大, 否则在快速冷却条件下会使产生裂纹, 反而降低接头结合强度. 如果电极力较小, 所能产生的变形量也较小, 再结晶动力不足, 在断电冷却中不再有动态再结晶行为, 组织表现为粗大柱状晶内有大量的平行滑移带, 产生形变硬化作用; 如果电极力引起变形量足以驱动再结晶, 那么, 显微组织中可能见到无畸变的完整晶体(图 4).



(a) 无畸变新晶体及滑移带



(b) 晶体及生长台阶

图 4 无畸变新晶体及晶体生长台阶

Fig. 4 New grains without distortion and some crystal growth steps

焊接接头的组织形态主要与施加电极力的时刻、维持时间的长短及冷却速度的快慢有关: (1) 在刚开始凝固瞬间施压, 若电极力维持时间较短, 变形将发生于较高的温度区间, 仅起到减少中心区缩孔、孔隙等铸造缺陷的作用, 柱状晶完整, 晶内无滑移痕迹; (2) 延长施压维持时间, 如果在 430 ℃以上温度停止施压, 除能起到压缩被封闭的熔核区减轻或消除凝固缺陷, 提升焊接处的结合强度外, 尚能使柱状晶产生一定的变形. 由于 FCC 晶体结构的  $\beta$ -Co 有较多的滑移系, 具有较好的塑性变形能力, 在柱状晶

内可观察到较多的、相互平行的滑移带, 如图 3b 所示, 可知柱状晶为钴单晶. 滑移带的强烈方向性现象暗示着柱状晶有着某种择优生长取向. 如果冷却速度较快, 柱状晶内将来不及发生再结晶行为, 组织中观察不到无畸变晶; 如冷却速度较慢, 则冷却过程中先变形的部分柱状晶内将发生动态再结晶, 点焊的瞬时性决定了即便是发生再结晶, 也具有不完全性, 图 4 即为不完全再结晶的组织形貌; (3) 施压维持时间较长时, 如果终止施压时焊接接头部分的温度低于 430 ℃, 则钴晶体的晶型已转变为 HCP 晶体结构, 可开动的滑移系减少, 变形能力大为降低, 为了释放变形能, 滑移将可能以交滑移的形式出现, 在提升接头强度的同时也增加了脆性, 文献[10]针对镀锌铬微合金钢板的点焊研究也称此电极力的维持时间不宜过长, 除了避免电极头过度升温影响寿命及性能外, 也应有类似的原因存在. 故通过控制电极力终止时刻能在一定程度上减少接头的脆性.

室温组织中所观察到的所有等轴晶应是在加热及熔核凝固两过程中形成的, 部分等轴晶内可见到平面滑移带及交滑移痕迹(图 5), 是由预压及断电后电极施压维持双重原因造成的. 两种施压都会对远离熔核的细等轴晶构成影响, 产生晶内滑移; 但邻近熔核部位的等轴晶主要受断电后电极施压维持所致, 形成原因与上面对柱状晶的影响分析相同.

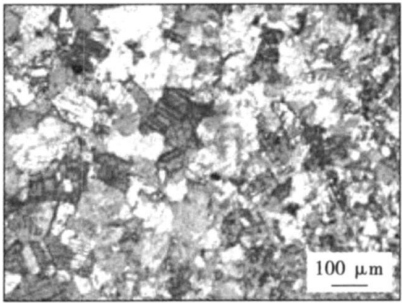


图 5 热影响区中等轴晶及其内部的滑移痕迹

Fig 5 Equiaxed grains in HAZ and slip bands in equiaxed grains

3.4 接头中心的再结晶现象

当焊接电流相对较小时, 中心柱状晶内可见无畸变的晶粒与周围滑移带共存(图 4a), 表现为柱状晶内部局部区域发生了不完全的动态再结晶. 从晶体生长理论的角度分析, 平行滑移线及交滑移线成为了晶体按螺旋位错生长机制生长的最有利的、永不消失的生长台阶, 且新晶体于晶体缺陷处形核可以降低电极力引起的畸变能, 为自发过程. 新晶体以晶体基元为单位, 牢固地结合到滑移台阶后成为

无畸变晶体的一部分,形成光滑且规则的生长面及新的生长台阶,晶体向两侧及前沿生长,当两侧相邻晶体生长边界相接触后,晶体的长大主要靠前沿界面垂直于滑移带方向推移及新生长面的形成。如此循环下去,不断地消除前方滑移台阶及形成新的生长台阶。在电阻焊接条件下,由于夹在两电极头的焊接接头部位冷却极快,在滑移台阶处不同生长程度的完整晶粒被保留了下来,平面生长特征极为明显。显然,如果减慢在较高温度区间的冷却速度,完整晶体的数量将大量增加,滑移带也将减少,如图 4 所观察到的组织形态所揭示的那样;性能上表现为接头的塑性增大,脆性降低。完整晶体的分数及大小主要取决于电极力和冷却速度。电极力越大,再结晶驱动力也越大;冷却速度越慢则再结晶完成程度越高。

综上所述,三层纯钴电阻焊接接头各区域的显微组织形态与钴的物理性能、晶体结构及焊接工艺(如焊前预压、加热熔化、断电施加电极力、冷却速度)诸多因素有着密切联系。只要能准确控制焊接中的关键工序,就能按照所设计的接头性能来控制或调整接头各区域的组织状态。

## 4 结 论

(1) 当焊接电流在 24~27 kA 时,始极片与吊耳的电阻焊工艺不存在虚焊,焊接强度满足现场实际要求;电阻焊较之于铆接方式具有不引入异类杂质、保证电解钴品级、生产效率较高的优点,已在实际生产中产生了较大的效益。

(2) 母材的纯度越高,越不易在固液两相前沿形成新晶核,越易于在接头中心区域形成的粗大柱状晶。

(3) 断电后施加的电极力会在柱状晶中产生平行滑移带及交滑移带,电极力越大则滑移带越密集。

(4) 在熔核冷却过程中,于变形柱状晶内存在不完全的动态再结晶行为,平行滑移线及交滑移线成为了新晶体按螺旋位错生长机制生长的最有利的、永不消失的生长台阶。

## 参考文献:

- [1] Mimura K, Uchikoshi M, Kekesi T, *et al.* Preparation of high-purity cobalt [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 334(1-2): 127-133.
- [2] 陈 蓉, 王力军, 罗远辉, 等. 高纯钴制备技术[J]. *稀有金属*, 2005, 29(5): 797-802.  
Chen Rong, Wang Lijun, Luo Yuanhui, *et al.* High purity cobalt manufacturing [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(5): 797-802.
- [3] Rane M V, Bafna V H, Sadanandam R, *et al.* Recovery of high purity cobalt from spent ammonia cracker catalyst [J]. *Hydrometallurgy*, 2005, 77(3-4): 247-251.
- [4] Fouliland L, Mansori M E, Gerland M. Role of welding process energy on the microstructural variations in a cobalt base superalloy hard-facing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(14): 6445-6451.
- [5] Kashani H, Amadeh A, Ghasemi H M. Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies [J]. *Wear*, 2007, 262(7-8): 800-806.
- [6] Nizamettin Kahraman. The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2): 420-427.
- [7] 肖纪美. 合金相与相变[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [8] 王亚荣, 张忠典, 冯吉才. AZ31B 镁合金交流电阻点焊接头的力学性能及显微组织分析[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 131-135.  
Wang Yarong, Zhang Zhongdian, Feng Jicai. Mechanical properties and microstructures of AZ31B Mg alloy joints welded with AC resistance spot welder [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 131-135.
- [9] 赵洪运, 袁 坤, 杨德惠, 等. 规范参数对 AZ31B 镁合金点焊接头组织和性能的影响 [J]. *汽车工艺与材料*, 2005(9): 12-15.  
Zhao Hongyun, Qiu Kun, Yang Dehui, *et al.* Effect of regular parameters on microstructure and properties of spot welding joints of AZ31B magnesium alloy [J]. *Automobile Technology & Material*, 2005(9): 12-15.
- [10] Aslanlar S, Ogur A, Ozsarac U, *et al.* Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding [J]. *Materials & Design*, 2008, 29(7): 1427-1431.

作者简介: 周晓玲, 女, 1963 年出生, 博士研究生, 副教授, 机械工程学院学会高级会员。主要从事材料表面改性及钢的强韧化处理的研究工作。已发表论文 10 余篇, 获国家实用新型专利一项。

Email: zx12004z@tom.com

edge image. The weld seam center is picked up accurately by scanning the weld seam's left and right feature points after edge detection. In order to reduce tracking error, the coordinates offset of each small segment in weld track is divided into fifty parts, at the same time, an effective robot tracking control program is presented. The tracking experiment of sidelong S-shape weld seam line showed that it can satisfy tracking demand under normal conditions.

**Key words:** vision sensing; underwater welding; image processing; weld seam tracking

### Microstructure observation and analysis of resistance spot welded joints of electrolytic cobalt starting sheet and lifting ear

ZHOU Xiaoling<sup>1</sup>, LIU Chen<sup>2</sup>, CAO Baoguo<sup>2</sup>, GU Yonggang<sup>2</sup> (1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan 650093, China; 2. Jinchuan Group LTD, Jinchang 737100 Gansu, China). p37—41

**Abstract** In this study, commercially pure cobalt starting sheet and lifting ear with the same material were welded by resistance spot welding at different welding parameters. The microstructural measurements of welded joints had been investigated metallographically. The influence of several welding steps on the phenomena of parallel slipping bands, cross slipping bands and recrystallization in columnar grains had been analyzed and discussed. The result showed that, when the base metal is pure metal, proper low supercooling on the front of solid/liquid interface and low nucleation make the columnar grain easier to form; the applied electrode pressure during cooling process was mainly responsible for the formation of slip bands in the columnar grains. The larger the electrode pressure, the denser the slip bands; there are uncompleted dynamic recrystallization in the deformed columnar grains. Parallel and crossing slip lines take the role of the growth steps of new crystal nucleation and growth.

**Key words:** electrolytic cobalt; resistance spot welding; microstructure; slip band; recrystallization

### Finite element simulation on the effect of welding residual stress on the metal dusting corrosion of welded joint

HU Guiming, ZHOU Changyu, ZHANG Guodong, CHEN Cheng, LEI Na (School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p42—46

**Abstract:** Metal dusting is a phenomenon of high temperature corrosion, which occurs in carburizing environment. The first step of this corrosion is the diffusion of carbon towards metal matrix. A coupling calculating method on carbon diffusion has been developed based on the finite element program. By this method, the effect of welding residual stress on the carbon diffusion was numerically simulated for the as-welded condition and operation condition of the tube in heating furnace. The diffusion without the effect of stress was also taken into account and compared with those under residual stress. The results show that the highest welding residual stress gradient is near the heat-affected zone (HAZ), and the peak value of carbon

concentration exists near this zone. Also the low carbon concentration valley exists at the both sides of the peak value, which is caused by the diffusion of carbon to the high stress zone. In operation conditions, stress relaxation will happen and the effect of residual stress is decreased, which can delay the metal dusting corrosion of the tube. But the influence of the residual stress still exists, the zone near the weld of the tube should be inspected carefully during the inspection period.

**Key words:** metal dusting; high temperature corrosion; coupling; welding residual stress; finite element simulation

### Welding arc emissive spectrum dynamic diagnosis and its application

HU Kunping, SONG Yonglun, XIA Yuan, CHEN Zhixiang (School of Mechatronics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p47—50

**Abstract** Emissive spectrum diagnosis is important to study welding arc phenomenon. Limited by experimental condition in the past, the knowledge of spectrum dynamic diagnosis is not enough and most of the diagnosis results come from stable TIG arc. In this paper, based on modern ICCD spectrum instrument, a new type of arc spectrum dynamic diagnosis system is established and a new diagnosis method based on time-control and statistic-average is developed to observe AC dynamic welding arc continuously. The half-height width and wavelength shifting of AC TIG arc spectrum line can be observed, furthermore electron density and Ar atom excitation temperature can be obtained. This dynamic observation is quite significant to study the time-characteristic of arc (especially alternative current arc).

**Key words:** AC dynamic arc; emissive spectrum; dynamic diagnosis; time-control and statistic-average method

### Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding

ZHAO Hongyun, YANG Xianqun, Shu Fengyuan, XU Chunhua, WU Jianqian (School of materials science and engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong China). p51—54, 59

**Abstract** A comparison between the analytical methods of multiple linear regression analysis (MLRA) and genetic algorithm optimizing neural networks was made for predicting the geometric form of laser cladding. The corresponding relationship between main processing parameters (laser power, scanning velocity and powder mass flow rate) and the geometric form of clad (cladding width, height and depth of the penetration into the substrate) was affirmed. The result proved the feasibility of using MLRA to predict the geometric form of laser cladding and the average relative error of five test values was 2.49%. In comparison, the former is convenient in application by which functional relationship between parameters such as width, height and depth of the penetration and so on. While the latter produces a better precision and an invisible function relationship with a more complex operation process. Often the MLRA method is usual-