

# K465 铸造高温合金高温钎焊接头的显微组织

Microstructures of High Temperature Brazed  
Joints of Cast Superalloy K465

梁海, 毛唯, 孙计生

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

LIANG Hai, MAO Wei, SUN Jisheng

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 采用一种含有铝、钛活性元素的镍基高温钎料, 对 K465 镍基铸造高温合金在 1220℃ 进行了高温真空钎焊实验, 通过光镜、扫描电镜和能谱分析研究分析了不同钎焊间隙和焊后热处理状态下的钎焊接头组织。研究表明 0.1~0.2mm 钎焊间隙的钎缝组织由( $\gamma + \gamma'$ ) 共晶、呈块状、骨架状或羽毛状和不规则形状的化合物相和  $\gamma$  固溶体组成; 0.35mm 间隙中填充镍网的钎缝组织, 主要由大量  $\gamma$  枝晶、少量( $\gamma + \gamma'$ ) 共晶和少量的化合物相组成。钎焊接头间隙在 0.1~0.2mm 时钎焊后固溶热处理不能明显消除有害化合物相; 而接头添加镍网可明显改善接头组织, 减少有害化合物相, 提高固溶热处理的效果。

**关键词:** 铸造高温合金; 高温钎焊; 活性钎料; 接头组织;  $\gamma'$  相

中图分类号: TG146.1+5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)09-0007-04

**Abstract:** An experimental investigation of high temperature vacuum brazing at 1220 °C of nickel-based cast superalloy K465 was performed by using a type of nickel-based high temperature active brazing filler metal bearing aluminum and titanium elements. The microstructures of brazed joints with different clearances and post-braze heat treatment conditions were analyzed by optical microscope, SEM and EDS. The investigation shows that the structure of brazing seam with 0.1~0.2mm clearance consists of ( $\gamma + \gamma'$ ) eutectic, compounds in blocky, Chinese script or feathery and irregular forms, and  $\gamma$  solid solution. The structure of brazing seam with nickel mesh addition to the brazing clearance primarily consists of a large amount of  $\gamma$  dendrite, a small quantity of ( $\gamma + \gamma'$ ) eutectic and compounds. Post-braze heat treatment was not apparently able to eliminate detrimental compounds in the brazing seam with 0.1~0.2mm clearance, but with nickel mesh addition to the braze clearance, resulting in considerable improvement of brazed joint structure, reduction of detrimental compounds and significant post-braze heat treatment effects.

**Key words:** cast superalloy; high temperature brazing; active filler metal; joint structure;  $\gamma'$  phase

K465 镍基铸造高温合金是一种综合性能好的航空喷气发动机的叶片材料, 该材料能在 1000℃ 以下的发动机工作环境下长期使用, 可用于先进航空发动机的涡轮工作叶片和导向叶片的制造<sup>[1]</sup>。涡轮叶片是发动机的核心件, 工作温度高, 受力情况复杂。叶片在制造中需要采用钎焊进行连接, 如涡轮导向器叶片之间及叶身与导流片之间的连接等。由于现代航空发动机的叶片工作温度不断提高, 因此对钎焊接头的高温性能要求也越来越高。本工作采用一种高温活性钎料对 K465 镍基铸造高温合金进行了高温真空钎焊实验研究。

## 1 实验条件

### 1.1 钎焊材料

实验用钎料为镍基活性钎料, 其中含有 Al, Ti,

Nb, W, Mo, Co, Cr, B, Si, C 等元素, 熔化温度范围为 1194~1210℃。该钎料采用惰性气体雾化工艺制备, 钎料为球形粉末, 粒度为-80 目。大间隙钎焊时预填充间隙材料为纯镍丝网, 丝网规格为 130 目, 镍丝直径为 0.071mm。

### 1.2 母材

实验用母材为 K465 镍基铸造高温合金试棒, 试棒采用等轴晶熔模精密铸造工艺, 铸造后进行 1210℃, 4h 的固溶热处理, 其主要化学成分(质量分数/%): C 0.18, Cr 8.72, Ti 2.68, Al 5.79, Mo 1.65, W 10.21, Co 9.64, Nb 1.03, Ni 余量。

### 1.3 实验设备

真空钎焊使用 ZKH-1 型真空扩散炉和 ZM-454 型真空钎焊炉, 其最高加热温度分别为 1240℃ 和 1350℃, 电脑程序控温, 控温精度  $\pm 1^\circ\text{C}$ , 热态真空度为

$1 \times 10^{-2}$  Pa 左右。

钎焊接头的显微组织分析使用 Leica DMRM/E 光学显微镜、JEOL JSM-5600LV 扫描电子显微镜和 Link ISIS300 能谱仪。

#### 1.4 钎焊试样

钎焊工艺实验使用 K465 圆片试样, 圆片试样尺寸为  $\phi 12\text{mm} \times (3 \sim 4\text{mm})$  厚。钎焊表面用 400 号水砂纸磨光, 然后用丙酮在超声波清洗机中清洗 10~15min。

#### 1.5 钎焊工艺

钎焊工艺参数为: 接头间隙 0.1, 0.2, 0.35mm, 钎焊温度 1220℃, 钎焊时间 20min; 钎焊后固溶热处理制度为: 温度 1210℃, 保温 4h, 1210℃至 1000℃冷速为

30℃/min。

## 2 实验结果

### 2.1 钎焊接头显微组织

钎焊接头的光学显微组织照片见图 1。钎焊接头的扫描电镜显微组织照片见图 2。

从图 1a, c 和图 2a, c 可观察到, 0.1~0.2mm 钎焊间隙的钎缝组织由  $(\gamma + \gamma')$  共晶、白色块状相、白色骨架状相(或呈羽毛状)、灰色不规则条状相(或呈骨架状)和  $\gamma$  固溶体组成。 $(\gamma + \gamma')$  共晶分布在钎缝的两侧边缘, 并由母材向钎缝内生长; 块状化合物相分布在钎

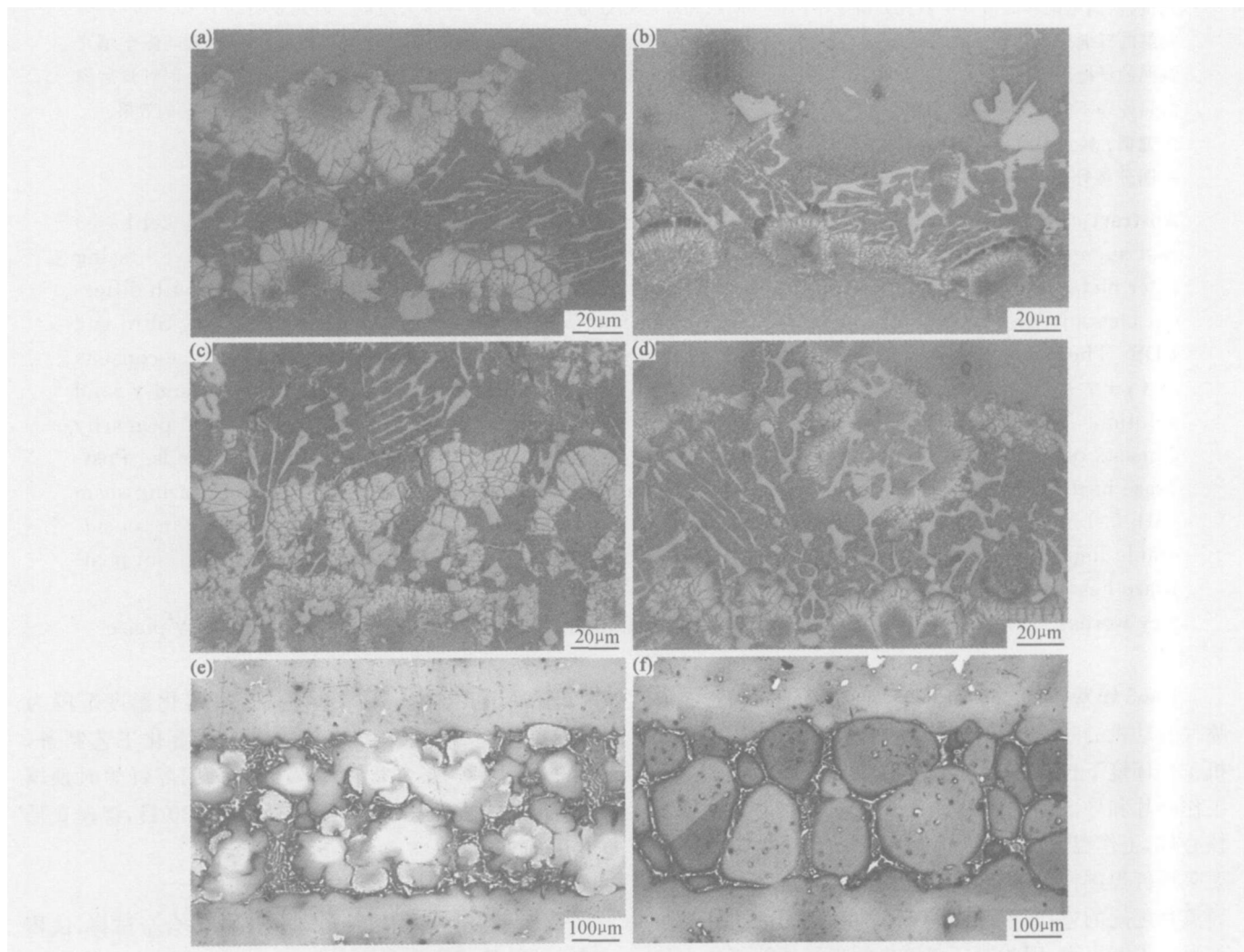


图 1 K465 合金钎焊接头的光学显微组织

(a) 间隙 0.1mm, 钎焊; (b) 间隙 0.1mm, 钎焊+ 热处理; (c) 间隙 0.2mm, 钎焊; (d) 间隙 0.2mm, 钎焊+ 热处理;  
(e) 间隙 0.35mm 填加镍网, 钎焊; (f) 间隙 0.35mm 填加镍网, 钎焊+ 热处理

Fig. 1 Optical micrographs of K465 alloy brazed joints

(a) 0.1mm joint clearance, as brazed; (b) 0.1mm joint clearance, brazed and heat treated;  
(c) 0.2mm joint clearance, as brazed; (d) 0.2mm joint clearance, brazed and heat treated;  
(e) 0.35mm joint clearance with nickel mesh filler, as brazed;  
(f) 0.35mm joint clearance with nickel mesh filler, brazed and heat treated

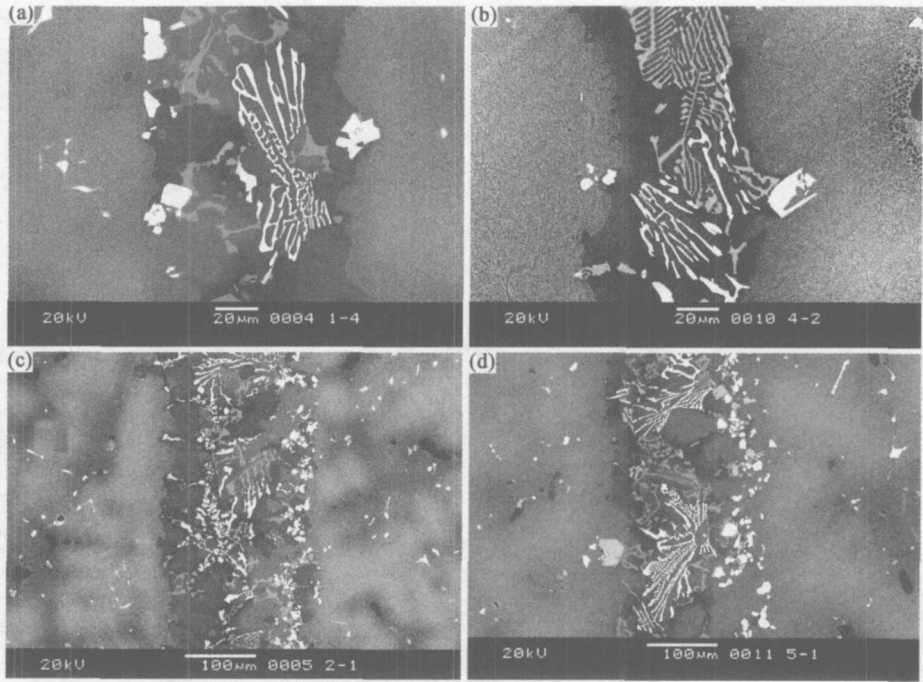


图 2 K465 合金钎焊接头的 SEM 背散射显微组织

(a) 间隙 0.1mm, 钎焊;(b) 间隙 0.1mm, 钎焊+ 热处理;  
(c) 间隙 0.2mm, 钎焊;(d) 间隙 0.2mm, 钎焊+ 热处理

Fig. 2 SEM backscatter electron micrographs of K465 alloy brazed joints

(a) 0.1mm joint clearance, as brazed; (b) 0.1mm joint clearance, brazed and heat treated;  
(c) 0.2mm joint clearance, as brazed; (d) 0.2mm joint clearance, brazed and heat treated

缝边缘并有沉淀偏聚现象; 骨架状和不规则条状化合物相主要分布在钎缝中部。0.1mm 和 0.2mm 钎焊间隙的接头组织构成和形态相似, 但 0.2mm 钎焊间隙的钎缝组织中化合物相和共晶组织的数量要比 0.1mm 钎焊间隙的多。

通过对钎缝中的各相进行电子能谱成分分析, 可以判定灰色骨架相为富含 Nb 的  $Ni_3Si$  相; 白色骨架状相为硼化物相,  $M_3B_2$  硼化物相形态常呈骨架状或羽毛状; 白色块状相为富含 W 和 Ni 的高温初生相, 初步判断它为含硅的硼化物或碳化物( MC 或  $M_6C$ ) 相或者硼碳化物相。

从图 1e 可观察到, 0.35mm 钎焊间隙中填充镍网的钎缝组织, 主要由大量  $\gamma$  枝晶、少量  $(\gamma + \gamma')$  共晶、少量的白色骨架状相(或呈羽毛状)和灰色骨架状相(或呈不规则片状)组成, 无白色块状初生化合物相存在;  $(\gamma + \gamma')$  共晶分布在  $\gamma$  枝晶间; 少量的化合物相分布在枝晶间隙中或枝晶界上; 与 0.1~0.2mm 钎焊间隙接头相比, 钎缝组织中的共晶组织和化合物相的分布变得分散和均匀, 数量也显著减少; 而  $\gamma$  初生固溶体数量明显增多, 并成为钎缝显微组织的主要组成相。

2.2 焊后固溶热处理后的接头组织

从图 1b, d 和图 2b, d 可观察到, 对于 0.1~

0.2mm 的钎焊间隙的钎焊接头, 固溶处理后, 钎缝中的  $\gamma$  固溶体枝晶增多, 并以两侧母材原始晶粒为基础向钎缝内部生长, 使钎缝宽度变窄;  $(\gamma + \gamma')$  共晶数量减少并分布在  $\gamma$  固溶体枝晶的前沿; 白块化合物相没有明显变化; 骨架和条状化合物相数量也没有明显变化, 但骨架形状变得细密、完整和规则。

从图 1f 可观察到, 对于添加镍网的钎焊间隙为 0.35mm 的钎焊接头, 固溶处理后, 钎缝中原来的  $\gamma$  固溶体枝晶聚集长大, 形成了大颗粒的枝晶; 两侧母材原始晶粒向钎缝内部生长, 使钎缝宽度变窄;  $\gamma$  固溶体枝晶间分布的  $(\gamma + \gamma')$  共晶数量明显减少; 钎缝中颗粒  $\gamma$  固溶体内部析出了白色小块硼化物相; 枝晶间的骨架和条状化合物相数量明显减少, 骨架形态则变得细密、完整和规则。

2.3 钎缝接头显微组织中的  $\gamma'$  强化相

K465 合金中含有 5.1% ~ 6.0% 铝和 2.0% ~ 2.9% 钛, 它是以  $\gamma'$  相沉淀强化为主的合金。本实验用钎料中含有 4.0% ~ 5.0% 铝和 0.3% ~ 0.9% 钛。由于钎料也含有较多的铝、钛  $\gamma'$  强化相形成元素, 因此在钎缝组织中形成了大量的  $\gamma'$  相。

图 3a 是钎焊间隙为 0.1mm 的钎焊态钎缝组织中的  $\gamma'$  相形貌, 其中的  $\gamma'$  相呈不规则的块状, 分布和大小不

均匀; 经过 1210 °C/4h 的固溶处理后(图 3b), 钎缝中  $\gamma$  相转变为立方形, 分布和大小变得较为均匀, 尺寸略有长大。固溶处理后钎缝中的  $\gamma$  相数量、形状、大小和分布与 K465 母材的  $\gamma$  相相似。

图 3c, d, e 是钎焊间隙为 0.35mm 添加镍网的钎缝组织中  $\gamma$  相的形貌。在钎焊态钎缝组织中  $\gamma$  相呈不规则的块状,  $\gamma$  相在枝晶内和枝晶间分布不均匀, 枝

晶间的  $\gamma$  相数量多、尺寸大, 而枝晶内的  $\gamma$  相数量少、尺寸小; 经过 1210 °C/4h 的固溶处理后, 钎缝中  $\gamma$  相转变为立方形。热处理时, 铝、钛元素的均匀化扩散使  $\gamma$  相在枝晶内和枝晶间的分布和大小变得较为均匀一致。与不加镍网的经固溶处理的钎焊接头相比, 由于镍网的加入, 使钎缝金属中的铝、钛元素含量降低, 而造成  $\gamma$  相数量减少。

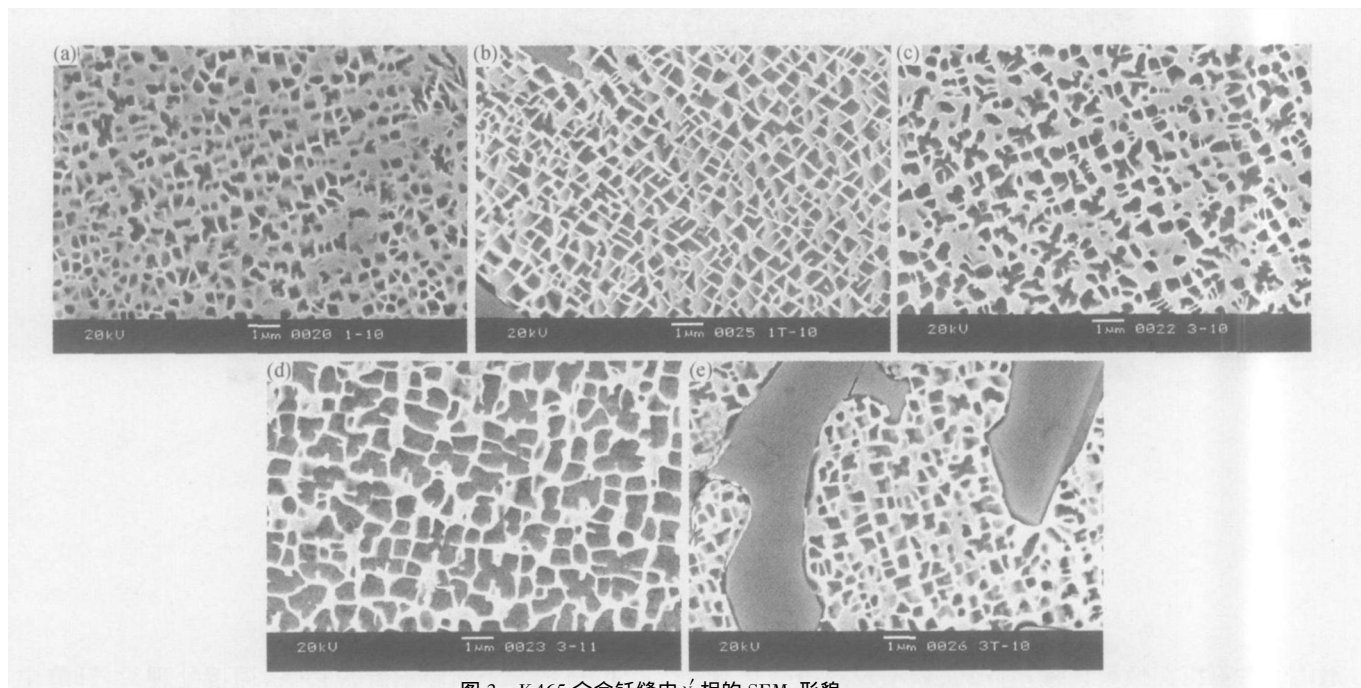


图 3 K465 合金钎缝中  $\gamma$  相的 SEM 形貌

- (a) 间隙 0.1mm, 钎焊; (b) 间隙 0.1mm, 钎焊+ 固溶处理; (c) 间隙 0.35mm 填加镍网, 钎焊,  $\gamma$  晶粒内部;  
(d) 间隙 0.35mm 填加镍网, 钎焊,  $\gamma$  晶粒之间; (e) 间隙 0.35mm 填加镍网, 钎焊+ 热处理,  $\gamma$  晶粒之间

Fig. 2 SEM micrographs of  $\gamma$  phase in K465 alloy brazing seam

- (a) 0.1mm joint clearance, as brazed; (b) 0.1mm joint clearance, brazed and heat treated;  
(c) 0.35mm joint clearance with nickel mesh filler, as brazed, in  $\gamma$  grains;  
(d) 0.35mm joint clearance with nickel mesh filler, as brazed, between  $\gamma$  grains;  
(e) 0.35mm joint clearance with nickel mesh filler, brazed and heat treated, between  $\gamma$  grains

### 3 分析与讨论

从钎焊接头显微组织分析可知, 对于 0.1 ~ 0.2mm 钎焊间隙的 K465 合金接头, 其钎焊态和固溶热处理后的显微组织构成和形态特征没有实质差别。实验用钎料的主要降熔元素为硅, 而硼则很少。由于硅的原子半径较大, 扩散速度慢, 在钎焊接头中不容易均匀化, 要达到均匀化需要长时间的高温扩散处理。因此, 在实验中无论是钎焊时的 20min 短时保温还是焊后固溶热处理时的 4h 长时保温, 都难以有效减少或消除钎缝组织中的有害化合物相和低熔共晶。但比较而言, 0.1mm 钎焊间隙的钎缝经热处理后组织变化比 0.2mm 钎焊间隙的要大些。因为钎焊间隙小, 则钎缝

中填充的钎料总量也少, 钎料合金元素向两侧母材的扩散距离短, 在相同的热处理条件下钎料中合金元素的均匀化过程就比较快。因此, 在钎焊件结构允许的情况下应尽量减少钎焊间隙。

对于钎焊间隙添加镍网的钎焊接头<sup>[2]</sup>, 由于镍网本身为纯金属, 在与液态钎料作用后, 相互溶解和扩散, 大大增加了  $\gamma$  固溶体的析出量, 同时减少了低熔点共晶和化合物相的大量析出,  $\gamma$  固溶体成为钎焊接头组织的主要组成部分; 在热处理时,  $\gamma$  固溶体枝晶逐渐等温凝固长大, 分布在  $\gamma$  固溶体枝晶间的少量化合物和液态共晶, 随着硼、硅元素向  $\gamma$  固溶体内部的扩散, 数量逐渐减少; 镍网的添加在显著增加  $\gamma$  固溶体析出

(下转第 15 页)

版), 1994, 30(1): 90– 96.

[ 7 ] TAKAHASHI K , WAKI M I . Chemical and electrochemical properties of ion implanted metals[ J]. Surface and Coatings Technology, 1994, ( 65): 57– 62.

[ 8 ] 黄华鹏, 张通和, 陈俊, 等. 用 V+ C 双重离子注入 H13 钢合成表面优化层的研究[ J]. 核技术, 1995, 18(2): 65– 72.

[ 9 ] 张通和, 王晓研, 邓志威, 等. Mo 注入 H13 钢抗腐蚀结构的分析[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 1996, 32(3): 330– 333.

[ 10 ] 李永良, 林文廉, 丁晓纪. Si<sup>+</sup> 和 Ti<sup>+</sup> 注入 H13 钢注入层微观结构的研究[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 1997, 33(2): 201– 203.

[ 11 ] 李永良, 林文廉. 离子注入 H13 钢注入层微观结构的研究[ J]. 电子显微学报, 1998, 17(3): 263– 266.

[ 12 ] 杨建华, 张通和. 强束流铈、碳离子共注入 H13 钢改善其耐磨性的研究[ J]. 真空, 2000, ( 5): 27– 29.

[ 13 ] 李永良, 李维超, 周固. C+ Ti 双离子注入 H13 钢抗腐蚀结构的分析[ J]. 核技术, 2001, 24(1): 33– 38.

[ 14 ] 张通和, 马芙蓉, 吴瑜光, 等. C+ W+ C 离子注入 H13 钢复合钝化层的抗腐蚀特性[ J]. 核技术, 2001, 24(3): 161– 165.

[ 15 ] 张通和, 吴瑜光, 王晓妍. C 和 Mo 多重离子注入 H13 钢的腐蚀性能[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2001, 37(1): 22– 25.

[ 16 ] 张通和, 吴瑜光, 易仲珍. C 和金属( Mo, Ti) 离子双注入 H13 钢抗腐蚀纳米丝状结构的形成[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2001, 37(3): 348– 351.

[ 17 ] 马芙蓉, 张通和, 梁宏, 等. 碳、钨离子共注入 H13 钢表面改性的研究[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2002, 38(1): 45– 47.

[ 18 ] 易仲珍, 张旭, 张通和, 等. C+ Mo 离子共注入 H13 钢中抗腐蚀性能的研究[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2002, 38(1):

59– 62.

[ 19 ] 张通和, 吴瑜光, 刘安安, 等. 金属离子注入纳米结构和特性[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2002, 38(5): 620– 623.

[ 20 ] 张通和, 吴瑜光, 刘安安, 等. C 和 Ti 双注入 H13 钢抗腐蚀钝化层的形成[ J]. 北京师范大学学报( 自然科学版), 2002, 38( 6): 751– 754.

[ 21 ] 丁晓纪, 林文廉, 桑吉梅, 等. MEVVA 源离子注入金属表面优化应用[ J]. 原子核物理评论, 1997, 14(3): 170– 172.

[ 22 ] 易建军. 离子注入对金属材料的改性[ J]. 表面技术, 1997, 26( 4): 28– 29.

[ 23 ] 陈俊, 张通和, 姬成周, 等. Ti 注入改变钢表面摩擦性质的扫描电镜分析[ J]. 功能材料, 1991, 22(1): 54– 58.

[ 24 ] 黄拿灿, 吴起白, 胡社军. 工模具钢的金属离子注入及其强化机理[ J]. 热加工工艺, 2000, ( 2): 8– 10.

[ 25 ] 杨建华, 张通和. 注钼 H13 钢的抗磨损机理研究[ J]. 微细加工技术, 1992, ( 4): 6– 8.

[ 26 ] 林子光. 80 年代摩擦学[ M]. 北京: 航空工业出版社, 1988. 63.

[ 27 ] 孙晓东, 王佩璇. 离子注入纯 Fe 表面微观结构研究[ J]. 材料科学与工程, 1997, 15(2): 45– 48.

收稿日期: 2004 10 20; 修订日期: 2005 04 06

作者简介: 李才巨( 1977– ), 男, 助教, 硕士, 现主要从事离子注入表面改性理论及应用研究, 联系地址: 云南昆明学府路 253 号昆明理工大学金属材料系( 650093)。

( 上接第 10 页)

量的同时, 也显著增加了硼、硅等合金元素的扩散速度。因为, 第一,  $\gamma$  固溶体枝晶对低熔点共晶和化合物相有分割作用, 缩短了元素的相互扩散距离; 第二,  $\gamma$  固溶体与低熔点共晶和化合物相之间的相界面积很大( 母材与钎料间只有两个平行的界面), 元素的扩散通道面积显著扩大; 第三, 镍网的加入使初生  $\gamma$  固溶体的合金化水平降低, 使合金元素的浓度梯度增加, 提高了元素扩散的驱动力。因此, 镍网的添加, 有利于改善接头组织的构成, 减少有害化合物相和低熔共晶的数量, 提高焊后固溶热处理的效果。

另一方面, 钎焊间隙中添加了镍网, 则在钎缝中形成了均匀、分散和规则的毛细空间, 有利于钎料均匀、稳定地填缝; 同时镍网也起到了过滤作用, 防止氧化物和夹杂物进入钎缝而造成的钎焊缺陷。

4 结论

( 1) 用镍基活性钎料高温钎焊 K465 合金时可得由  $\gamma$  固溶体、(  $\gamma$ +  $\gamma'$  ) 共晶及呈块状和骨架状相( 或

呈羽毛状) 等化合物相组成的显微组织。 $\gamma'$  强化相呈球形或立方形弥散分布于  $\gamma$  固溶体组织中, 对钎缝起到高温强化作用。

( 2) K465 合金钎焊接头间隙在 0. 1~ 0. 2mm 时钎焊后固溶热处理不能明显消除有害化合物相; 间隙中添加镍网可明显改善接头组织, 减少有害化合物相, 提高固溶热处理的效果。

参考文献

[ 1 ] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第 2 卷 变形高温合金 铸造高温合金[ M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002. 555– 565.

[ 2 ] 庄鸿寿, E 罗格夏特. 高温钎焊[ M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 188– 190.

收稿日期: 2005 03 10; 修订日期: 2005 07 08

作者简介: 梁海( 1965– ), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事钎焊和压力焊的研发工作, 联系地址: 北京市 81 信箱 20 分箱( 100095)。