

# 高温合金钨极氩弧焊时冶金及工艺因素 对形成热裂纹的影响

张延生 钟祖桂

## 前言

航空喷气发动机上大量采用高温合金制造各种零部件,焊接是制造中的主要工艺。合金零件进行钨极氩弧焊时,焊缝金属中常出现结晶裂纹,热影响区则出现液化裂纹,如图1所示。金相分析表明,这些是沿晶界和枝晶间形

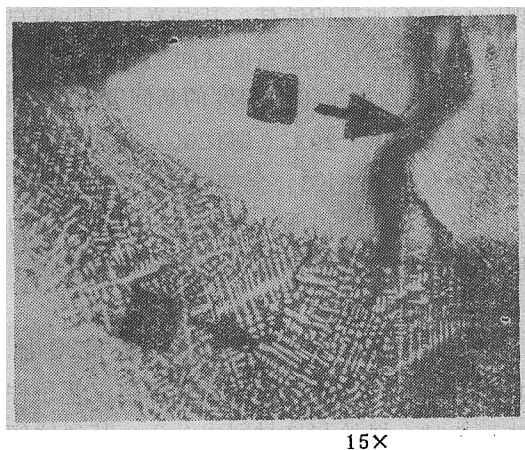


图1 K3合金钨极氩弧焊时,焊缝金属的结晶裂纹(上箭头A)和热影响区的液化裂纹(下箭头B)

成的热裂纹。这些裂纹的存在严重地影响合金的使用以及产品的质量和寿命。研究其形成的原因和影响因素,并提出预防措施,具有重要的意义。

## 一、形成焊接热裂纹的影响因素

### 1. 合金元素及组织的影响

#### 1) 铝、钛合金元素的影响

对9种镍基(及镍铁基)高温合金进行了

钨极氩弧焊裂纹倾向性试验,结果列于表1。从试验结果可知,固溶强化变形合金(序号1~4)的铝、钛含量较低,其裂纹倾向性较小;时效强化变形合金(序号5和6)的铝、钛含量较高,其裂纹倾向性较大;铸造高温合金(序号7~9)的铝、钛(及铌)含量最高,其裂纹倾向性最大,也最难焊接。按这三种情况,根据焊接难易程度(与形成热裂纹相对应)与合金中铝、钛含量的多少划分为A、B、C三类,示于图2。同时示出一些美国牌号的高温合金,以便分析比较。焊接裂纹倾向性较小( $K_1 < 10\%$ )的易焊合金列入A类,焊接裂纹倾向性较大( $K_1 = 10 \sim 20\%$ )的可焊合金列入B类,焊接裂纹倾向性最大( $K_1 > 20\%$ )的

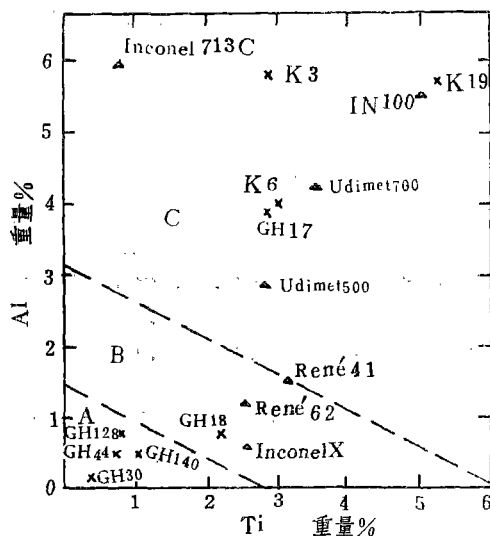


图2 不同牌号高温合金焊接难易程度与铝、钛含量的关系

A—易焊; B—可焊; C—难焊。

表1 不同牌号高温合金焊接裂纹倾向性

序号	牌 号	化 学 成 分, %									焊 丝 牌 号	裂 纹 倾向性 K <sub>I</sub> , %
		Ni	Cr	Fe	C	W+Mo	Al	Ti	B	其 它		
1	GH30	75	20	<1	0.12	—	0.15	0.35	—	—	GH30	5.5
2	GH44	60	25	<4	0.10	16.0	0.50	0.70	—	—	GH44	6.0
3	GH140	37	22	36	0.12	4.3	0.5	1.05	—	—	GH140	7.5
4	GH128	66	20	<1	0.05	18	0.8	0.8	0.005	Zr 0.04	GH128	8.0
5	GH18	40	20	30	0.06	6.5	0.75	2.2	0.014	Zr 0.10	GH18	15.8
6	GH17	56	14	—	0.085	9.5	3.92	2.88	0.02	Co 15	GH17	26.7
7	K6	70	15	<5	0.20	6.0	4.0	3.0	0.10	Zr 0.08	GH113	25.2
8	K3	70	11	<2	0.18	10.0	5.9	2.9	0.018	Zr 0.08	GH113	35.2
9	K19	60	6	—	0.14	12.8	5.7	1.5	0.10	Co 12, Nb 3.7	GH113	47.2

注: 1. 序号1~6变形合金板厚1.5毫米, 序号7~9铸造合金板厚3.0毫米。焊前固溶处理状态。

2. 钨极氩弧焊接裂纹倾向性试样, 是由四条焊缝组成的封闭正方形焊缝, 每边长60毫米。裂纹倾向性(K<sub>I</sub>)为裂纹总长与焊缝总长(240毫米)之比的百分数。

3. GH113焊丝为60Ni-15Cr-16Mo-5Fe-3W合金。

难焊合金列入C类。这一分类与航空喷气发动机高温合金零部件焊接生产的实际情况基本相符。

由实验结果可知, 铸造高温合金的焊接裂纹倾向性大大高于固溶强化的变形合金, 其中尤以K19合金的裂纹倾向性最大。金相分析表明, 这与合金中低熔点共晶的含量有密切的关系。表2所列3种铸造镍基高温合金的相组成和低熔点共晶( $\gamma+\gamma'$ )的含量。与表1所

温度(间隔20℃)加热后水冷, 金相检查发现, 1220℃加热的试样, 其晶界上的低熔点共晶开始熔化。在上述温度区间加热水冷的K19合金试样, 均产生不同程度的晶间裂纹, 其中以合金固相线以上20℃(即1260℃)加热试样的裂纹最为严重。K3合金的同样试验也有类似的结果。这可以说明, 焊接加热时, 在应力作用下, 热影响区可能形成晶界液化裂纹。

## 2) 硼的影响

将表1中GH128合金的含硼量增加到0.016%, 而其它合金元素及焊接工艺条件保持不变时(焊丝与母材同成分), 其裂纹倾向性为12.3%, 比表1中含硼0.005%的GH128合金高一倍多。GH140合金(试验炉号)焊接时, 也发现含硼合金的裂纹倾向性较无硼合金的高。表2所列K19合金含硼化物较多, 焊接裂纹倾向性也较大。合金中微量的硼(或锆)元素可以细化晶粒, 改善晶界状态, 提高合金及焊接接头的塑性, 对提高合金的抗裂性是有利的。但硼含量过高时, 将形成硼化物和低熔点共晶, 起有害作用。K6合金中所形成的M<sub>3</sub>B<sub>2</sub>的化学式为(Cr<sub>0.64</sub>Mo<sub>0.45</sub>Ni<sub>0.20</sub>Ti<sub>0.04</sub>)<sub>3</sub>B<sub>2</sub>, 熔点大约为1240℃左右, 在焊

表2 铸造镍基高温合金相的组成

序号	牌号	$\gamma'$ 重量 %	( $\gamma+\gamma'$ ) 共晶 体积%	M <sub>3</sub> B <sub>2</sub> 重量 %	MC 重量 %	固-液相线 温度 ℃
1	K6	31~36	微量	0.2~0.5	1.0~1.5	1260~1345
2	K3	58	1~3	微量	1.5	—
3	K19	60	5~14	0.8	1.0	1240~1340

列焊接裂纹倾向性对照分析可知, 合金中低熔点共晶组织较多的, 裂纹倾向性较大。主要是合金中的铝、钛合金元素形成 $\gamma'$ 相(铌形成 $\gamma''$ 相), 再与 $\gamma$ 形成( $\gamma+\gamma'$ )共晶组织, 其熔点为1220~1245℃, 低于奥氏体基体(约低70℃)。将K19合金于1200~1320℃之间不同

接加热条件下,晶界上的低熔点硼化物,在应力作用下开裂,形成裂纹。K6合金试样于1260℃加热水冷时,晶界产生裂纹,金相检查发现裂纹处存在硼碳化物共晶薄膜,说明硼对抗裂性有不利的影响。

### 3) 碳的影响

表3列出GH44合金的不同含碳量对焊接裂纹倾向性的影响。可以看出含碳量较高的合金,其裂纹倾向性高,且对焊接加热较敏感,

表3 GH44合金含碳量与焊接裂纹倾向性的关系

含碳量, %	焊接线能量, 焦耳/厘米	裂纹倾向性 $K_I$ , %	注
0.01	6000	4.2	板厚1.5毫米, 其它元素含量接近, 均为中上限
0.08	6000	8	
	9560	27	

当焊接线能量增加约50%, 裂纹倾向性增大2倍多。分析认为, 固溶强化合金的含碳量增高时, 可能于晶界形成含碳化物的薄膜; 而铸造高温合金的含碳量偏高时, 可能于晶界形成硼碳化物共晶。它们分布于晶界和枝晶间, 将促使焊接热裂纹的形成和发展。

### 4) 钨、钼的影响

表1所列实验结果表明, 固溶强化合金中钨、钼总量高达16~18%, 但裂纹倾向性并不高。这些合金已广泛用于航空发动机的焊接件, 可采用氩弧焊和电阻点焊、滚焊, 且焊接质量良好, 性能稳定。可以认为, 尚未发现这一含量对焊接裂纹倾向性产生不利影响。

## 2. 板材焊前状态的影响

表4列出固溶强化GH140合金板材焊前

表4 不同状态GH140合金的焊接裂纹倾向性(%)

焊前状态	炉号						注
	03	022	244	323	44		
淬火(固溶)	15	10	6	8	5		TIG焊板厚1.5毫米
冷轧	30	31	—	—	—		
平整	—	—	15	18	17		

不同状态与焊接裂纹倾向性的关系。同一种板材, 焊前经固溶处理的裂纹倾向性较小; 焊前经平整(小量冷变形)的裂纹倾向性较大; 焊前经冷轧(变形量较大)的裂纹倾向性最大。这是由于冷变形提高了板材的硬度和强度, 焊接时接头不易变形, 焊缝所受的拘束度较大, 导致裂纹倾向性增大。图3所示为GH140合金钨极氩弧焊裂纹倾向性与板材固溶处理后平整

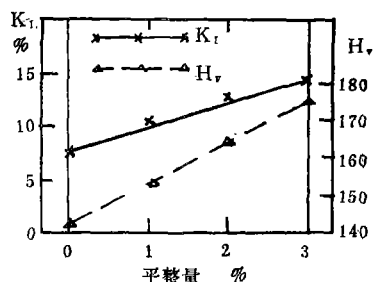


图3 GH140合金钨极氩弧焊裂纹倾向性  $K_I$  与板材平整量和硬度  $H_v$  的关系

(冷轧)量和硬度的关系。裂纹倾向性随平整量和硬度的增加而增大。

由铝、钛形成 $\gamma'$ 相沉淀强化的时效高温合金, 焊前热处理状态对焊接裂纹倾向性有直接影响。表5所列实验结果表明, GH18时效强化合金, 焊前经固溶处理, 强度较低, 塑性较高, 焊缝所受拘束度较小, 裂纹倾向性较小。焊前固溶处理后进行时效强化, 则强度较高, 塑性较低, 焊缝所受拘束度较大, 裂纹倾向性也随着增大。

表5 GH18合金焊前热处理状态对焊接裂纹倾向性的影响

焊前热处理状态	母材室温机械性能		裂纹倾向性 %	注
	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta$ %		
1130°C 固溶	70	48	15.7	同炉板厚1.5毫米, 同条件TIG焊
1130°C 固溶, 800°C 时效16小时	120	25	27.0	

### 3. 焊接线能量的影响

图4所示为高温合金板材钨极氩弧焊裂纹

倾向性与焊接线能量的关系。裂纹倾向性随着焊接线能量的增加而增大, 几种高温合金均有这一规律, 且为生产实践所证实。例如, 用1.5毫米厚GH140合金板材制成发动机筒形件, 进行钨极氩弧焊时, 其它条件基本相同, 焊接电流为70~80安时, 很少发现焊接裂纹; 当焊接电流超过100安, 焊缝增宽, 焊缝背面高增大时, 经常出现裂纹; 当采用钨极脉冲氩弧焊, 总平均焊接电流约为40安时, 基本上消除了裂纹。这是由于焊接线能量增大时, 合金受热温度过高, 易过热, 热影响区扩大, 焊接应力增大, 从而导致热裂纹倾向性增大。

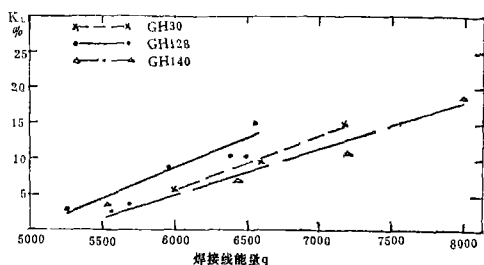


图 4 高温合金氩弧焊裂纹倾向K与焊接线能量q (焦耳/厘米) 的关系

## 二、裂纹的特征及防裂措施

金相分析表明, 上述实验中所发现的焊接

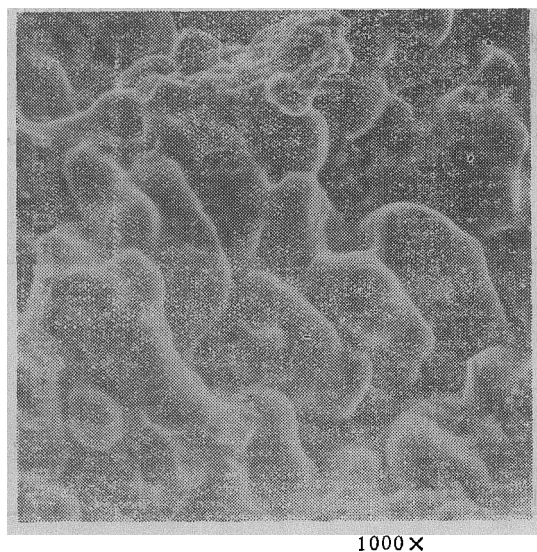


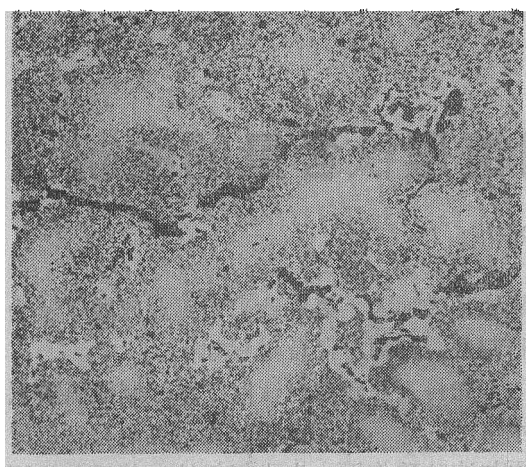
图 5 GH30 合金氩弧焊焊缝结晶裂纹断口扫描电镜照片

裂纹, 均为沿晶界或枝晶间分布的热裂纹。图 5 所示为 GH30 合金钨极氩弧焊 (用 GH30 焊丝) 的焊缝金属结晶裂纹的断口, 裂纹是沿枝晶间分布的。断口表现土豆状特征。由于形成裂纹时温度偏低, 断口带有少量撕裂棱。

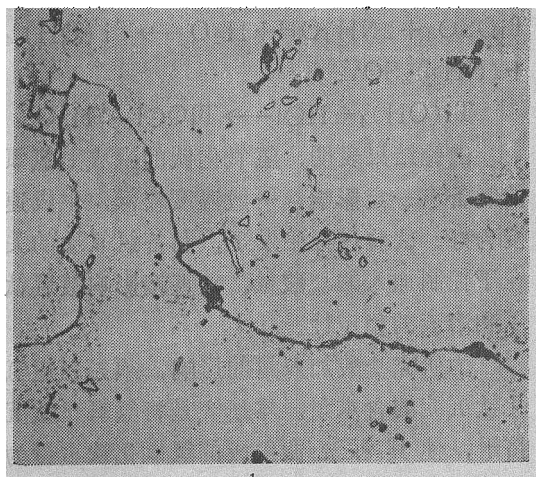
图 6 所示为 K3 和 K6 合金母材产生的晶界液化裂纹。图 6a 和 b 均为沿  $(\gamma + \gamma')$  共晶的晶界形成的裂纹。图 6c 为沿硼碳化物共晶的晶界形成的裂纹。金相分析表明, K6 合金晶界和枝晶间存在 0.2~0.5% 的  $M_3B_2$  相。

高温合金钨极氩弧焊焊缝金属, 从液态冷却下来凝固时, 由于成分中存在一些形成低熔点物的元素, 引起偏析, 凝固接近结束时, 枝晶间残留少量低熔点薄膜, 在焊接应力作用下枝晶间开裂而形成结晶热裂纹。母材晶界上若存在这类低熔点物, 热影响区加热达到熔点时, 会促使晶界局部熔化而形成液态薄膜, 在焊接应力作用下, 晶界开裂而形成液化热裂纹。这就是焊接热裂纹的液膜理论。本文上述时效变形高温合金和铸造高温合金中加入的时效强化合金元素铝、钛 (及铌), 主要是形成  $\gamma'$  相沉淀析出, 提高合金的强度, 但这种  $\gamma'$  (或  $\gamma''$ ) 相较多时易形成  $(\gamma + \gamma')$  共晶, 其熔点低于基体, 在晶界或枝晶间偏析出来, 易导致裂纹的产生。因此可以说铸造高温合金中铝、钛 (及铌) 含量较高就是焊接裂纹倾向性较大的原因。国外文献报导 Inconel 713C 合金也有类似情况。变形高温合金中铝、钛含量较低 (约 2.0% 以下) 时, 没有形成共晶的倾向, 焊接裂纹倾向性较小; 如铝、钛含量增加, 形成  $\gamma'$  相沉淀强化, 就会导致裂纹倾向性增大, 这是由于合金强度增高, 塑性下降, 造成焊接接头拘束度增大所引起的, 例如 GH18 合金焊接时便是这样。

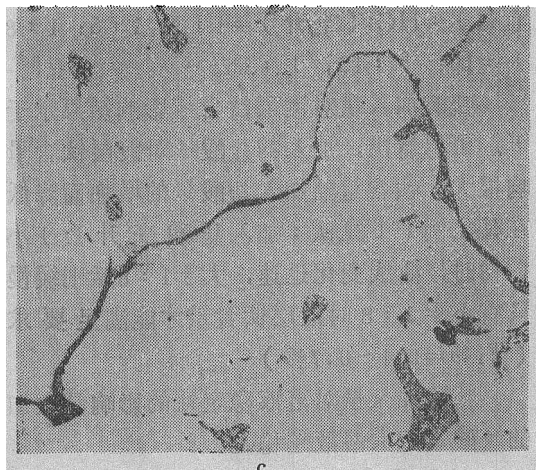
碳和硼 (或锆) 含量较高时, 易形成硼碳化物共晶, 而促使焊接热裂纹的形成。因此主要用于焊接结构的一些变形高温合金中, 把含碳量限制为不超过 0.05%, 硼含量为 0.005~0.01%。



a



b



c

图 6 高温合金液化裂纹 200×

- a—K3合金氩弧焊热影响区液化裂纹；  
b—K3母材1220°C加热水冷产生的晶界裂纹；  
c—K6母材1260°C加热水冷产生的晶界裂纹。

钨、钼是固溶强化元素，本文所述高温合金中，钨、钼总含量不超过16~18%时，对抗裂性无不利影响。但应考虑其含量更高时，有可能引起固溶体过饱和而析出大量较脆的 $\mu$ 相和 $M_6C$ ，使固溶体贫化，合金的高温持久强度和塑性下降。

铜、硫、磷的有害影响是众所周知的，由于易形成低熔点化合物或脆性物，促使裂纹的形成和扩展，故应严加控制。有的高温合金，在焊接中由于铜对合金表面的污染，在热影响区形成表面热裂纹。建议高温合金焊接所用的铜制夹具表面应该镀镍(或铬)，以防止产生这类热裂纹。

除了合金化学成分的影响之外，要求焊接结构的设计尽量减少外加应力，焊接工艺条件也应尽量减少焊接应力。因为当晶界或枝晶间存在一定的液膜时，如果应力较小则可能不形成裂纹。例如，采用焊接线能量较低的焊接参数，以及设计夹具时使接头所受拘束力最小。建议合金焊接前进行固溶处理。冷作硬化的变形合金或长期高温使用中有时效强化倾向的高温合金零件，建议在焊接(或补焊)前进行退火，消除内应力，以减少焊接裂纹。合理选用塑性较高和抗裂性较好的填充焊丝，以及焊丝成分与母材成分的合理匹配，以获得抗裂的焊缝金属，这些都是防止焊接热裂纹的有效措施。

### 三、结 论

本文总结和阐述了我国几种高温合金钨极氩弧焊时，一些冶金及工艺因素对其形成结晶裂纹和液化裂纹的影响，分析了形成这些热裂纹的原因，并提出了一些防止裂纹的措施。但由于高温合金种类很多，化学成分和显微结构各不相同，各种合金元素之间发生相互影响，焊接条件也不相同，情况比较复杂，必须结合具体情况考虑合金的焊接裂纹问题，必须从合金本身及焊接条件两个方面来考虑焊接热裂纹问题。

(段世驯、李朝光、史常瑾等同志所作的有关高温合金焊接裂纹倾向性的试验为本文提供了一些数据，特此致谢。)