

# GH99镍基合金焊接热裂纹行为的高温金相观察研究

张延生 柯明 段世驯 史常瑾 沙允慈

## 一、前言

GH99合金是我国新研制的一种沉淀强化镍基高温合金板材,具有较高的热强性、较好的塑性和抗氧化性,用于制造喷气发动机高温(700~900℃)工作的薄壁受力焊件,这种焊接结构比较复杂,焊缝较多也较集中。由于GH99的强化合金元素,尤其是Al、Ti含量较高,其焊接裂纹倾向性可能偏高<sup>[1,2]</sup>,将给生产带来不利影响,难以保证焊接质量,有些作者对其焊接性作过研究<sup>[3,4]</sup>。为了进一步弄清该合金焊接热裂纹的成机理,本文利用高温金相显微镜,将焊接接头加热到合金的零塑性温度上下,施加一定应力应变,在高倍下直接观察裂纹的起始、扩展、断裂的动态过程,探明影响热裂纹的一些因素,这对焊接热裂纹的预防和故障分析有一定的指导意义。

## 二、试验设备、材料和方法

### 1. 试验设备

主要试验设备为HM-100高温金相显微镜。该装置采用电子束快速加热试样,最高温度2000℃,拉伸加载为980N,放大倍数:观察200~400倍,照相80倍。

### 2. 试验用料

试验用母材为微调成分的GH99镍基合金,其主要化学成分见表1,符合技术标准规定,有关冶金特点列于表2。

### 3. 试验方法

用钨极氩弧焊在板材上熔敷一条焊缝(不加填充材料),经机加工、磨光、抛光制成高温金相显微镜拉伸试样,尺寸见图1。将试样夹持于装置上,抽真空,用电子束将焊缝及热影

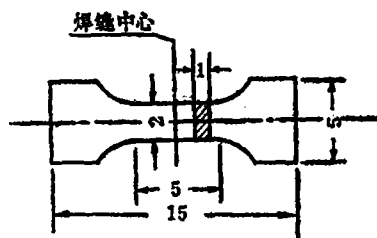


图1 高温金相焊接试样

表1 试验用料化学成分(%)

炉号	C	Mn	Si	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
352	0.087	0.02	0.035	19.83	8.06	6.71	4.57	2.54	1.53	基
353	0.050	0.02	0.053	18.18	6.10	5.85	3.87	1.93	1.53	基
929	0.052	0.02	0.190	18.15	5.97	5.87	4.00	2.18	1.28	基

表2 试验用料的有关冶金特点<sup>[1]</sup>

炉号	成 分 特 点			裂纹倾向性*	零塑性温度, °C**	
	Al+Ti, %	上 下 限	Al/Ti		加 热	冷 却
352	4.07	全上限	1.66	11.0	1220	1200
353	3.36	低Al高Ti	1.20	19.3	1210	1190
929	3.46	中限	1.70	8.3	1250	1240

\* TIG焊十字搭接裂纹倾向性试验。\*\* 母材焊接热模拟试验,零塑性温度。

响区加热到1200℃。

一般认为,焊缝金属从液态冷却凝固到固一液态阶段时,金属收缩受到拘束而产生拉伸应力和应变,枝晶间残留液膜,塑性较低,其塑变能力不足以承受应变所产生的晶间滑动而形成微裂,继之扩展直至断裂。因此选择加载条件时采用恒慢速应变,以观察其塑性状态,评价抗热裂纹的能力:①929炉分别以四种恒应变速率拉伸;②三个炉号以同一恒应变速率拉伸。用X-Y记录仪测绘 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线,同时通过金相显微镜直接观察焊缝及热影响区裂纹起始部位及其扩展、断裂的动态过程,测定相关的时间,选择典型组织拍照,也可连续拍照。

试验温度1200℃是参照GH99合金的零塑性温度(见表2)选择的,这时枝晶间或晶间可能液化,抗应变能力较低,可能形成热裂纹。

### 三、试验结果及讨论

#### 1. 应变对热裂纹的影响

图2所示为929炉合金1200℃以四种恒应变速率拉伸时的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线,图3所示为929炉合金1200℃拉伸时应力变化、裂纹起始与时间的关系。由图可见,不同应力应变条件,对合金的断裂特征有不同的影响,但差别不大,应变

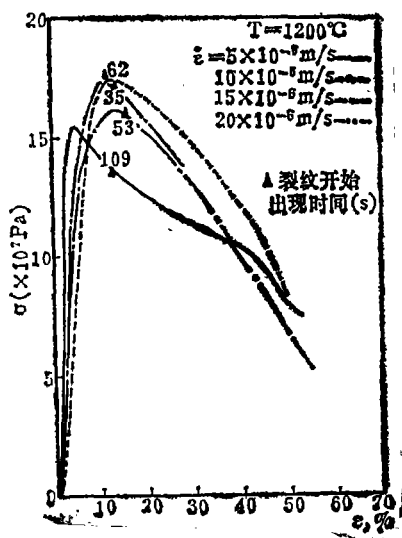


图2 929炉GH99合金1200℃不同恒应变速率拉伸的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线

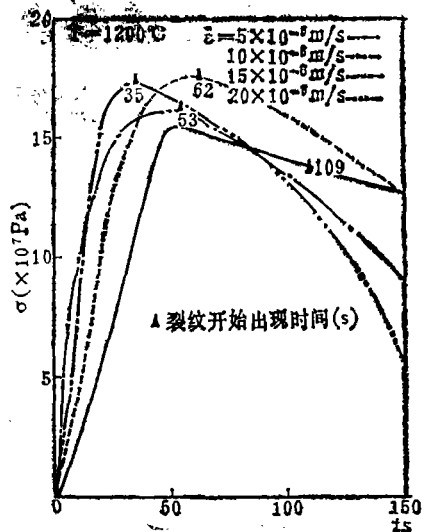


图3 929炉GH99合金1200℃拉伸时应力变化、裂纹起始与时间的关系

速率最小者起裂较晚,应力随时间增长的下降速度较慢,即延续时间较长,但应变量都是达到某一数值后起裂。可以认为,从工艺角度考虑,应尽量减少接头的应力应变,例如生产中采用较小的焊接线能量、焊前预热和焊后缓冷等措施,以减少或防止热裂纹。

#### 2. 化学成分对热裂纹的影响

图4所示为三个炉号合金1200℃拉伸的 $\sigma$ - $\varepsilon$

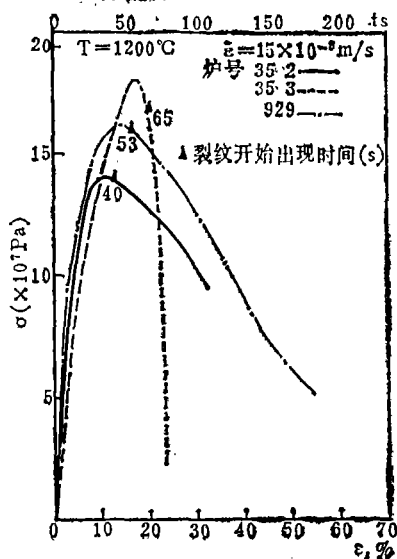


图4 不同炉号GH99合金1200℃以恒应变速率拉伸的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线与开裂时间

ε曲线与开裂时间。由图可知,低Al高Ti的335炉强度最高,但下降最快,在很短时间内裂纹迅速扩展断裂,且应变量较小,这表明高温塑性较差。全上限成分的352炉和中限的929炉强度较低,但下降较慢,起裂较早而扩展延续时间较长,断裂时应变量较大,这表明其高温塑性较好。分析认为,试验温度超过353炉的零塑性温度,由于晶间液化,强度、塑性均迅速下降,导致晶间断裂。而试验温度未超过352炉和929炉的零塑性温度,晶间液化的可能性很小,塑性较好,有较强的抗应变能力,吸收较多的形变功,使应力得以松弛,不易形成晶间裂纹,即使形成微裂也不会迅速扩展失稳断裂。因此,从合金化学成分考虑,对Al、Ti含量及Al/Ti比值所决定的零塑性温度要求要高一些,要有较好的高温塑性,这样合金才具有较好的抗焊接热裂纹能力。

### 3. 高温拉伸时的组织变化

1200℃拉伸时,通过显微镜直接观察接头的组织变化,主要是枝晶间、晶界的状态变化。图5所示为应变率5μm/s,变形量超过3%时焊缝的组织状态,可以看到晶间液化和微裂;继续拉伸,晶间断裂,如图6所示。图7所示为热影响区的组织,可看到晶界滑动、微裂迹象,晶界角隅处存在空洞,这是由于晶界液化所致。图8为焊缝沿枝晶间断裂的断口扫描电镜照片,具有典型的晶间局部液化特征,

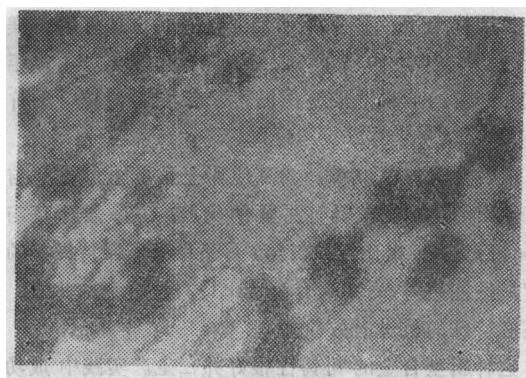


图5 1200℃拉伸时焊缝枝晶间微裂,高温金相照片

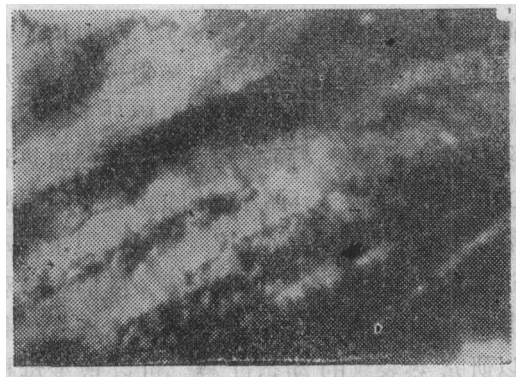


图6 图5试样枝晶断裂,高温金相照片

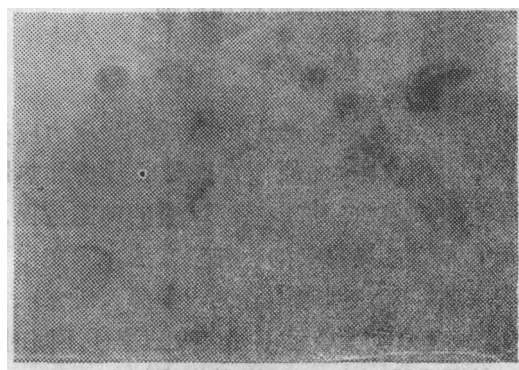


图7 1200℃拉伸时热影响区晶界的微裂和角隅空洞,高温金相照片

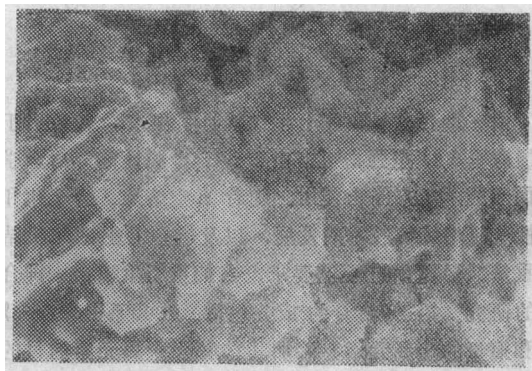


图8 图6断口SEM照片

表明它是热裂纹。

由上述试验可知,利用高温金相显微镜力学试验和组织观察、宏微观结合同步进行研究

这一特点, 将焊接接头加热到 $1200^{\circ}\text{C}$  (接近或稍高于或低于合金零塑性温度), 施加拉伸应力, 产生一定应变, 这样可以模拟焊缝金属从液态冷却到 $1200^{\circ}\text{C}$ 并已大部分凝固处于固-液态阶段的实际状态, 同时反映热影响区加热到 $1200^{\circ}\text{C}$ 的实际状态。测绘这时的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线, 测定裂纹起始部位以及裂纹扩展直至断裂全部动态过程的相关时间、应力应变等, 同时直接观察其组织变化, 尤其晶间、晶界的状态变化和用以研究热裂纹的动态过程。可以改变母材焊缝的化学成分、焊接条件、受力条件等因素, 进行对比试验和综合分析, 从而进一步研究焊接热裂纹的形成规律和机理。

## 四、结 论

1. 利用高温金相显微镜在高温、应力应变条件下, 测绘 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线, 直接观察焊缝和热影响区的裂纹起始、扩展直至断裂的动态过程, 这是研究焊接热裂纹的一种新方法。本文作了初次尝试, 有的问题尚需进一步深入研究。

2. 应力应变条件 (如应变速率) 不同时, 同一炉号GH99合金的热裂纹特征有所不同。从工艺角度出发, 为了防止和减少热裂纹, 应尽量减小应力应变, 使应变不超过合金抗热裂

纹的临界塑变能力。

3. GH99合金的化学成分不同, 其热裂纹的动态行为也不同。决定其零塑性温度高低的Al、Ti含量以及Al/Ti比值的影响是主要的。试验结果表明, 不能单纯从Al、Ti含量多少, 还应从Al/Ti比值来分析评定, 主要是从其所决定的零塑性温度高低来评定。因此建议, 重要的复杂的焊接结构在大批量生产中, 可参照本研究结果选择抗热裂性较好的炉号投产, 即择优选用。

4. 高温金相直接观察结果表明, 在高温、应力作用下, 焊缝枝晶间存在液膜和热影响区晶界液化, 沿晶滑动产生微裂, 裂纹扩展断裂, 导致热裂纹的产生。高温金相观察研究的结果进一步阐明了热裂纹形成的机理。

## 参 考 文 献

- [1] Prager, M. et al, WRC Bulletin, 128, Feb. 1968.
- [2] 张延生等, 焊接学报, 1982, No. 2.
- [3] 段世驯等, GH99合金焊接性能及工艺研究技术总结, 航空材料研究所 (内部报告), 1982.
- [4] 柯明, 沉淀强化镍基高温合金焊接裂纹敏感性研究, 硕士学位论文, 航空材料研究所, 1985.

※

※

※

※

## 铝-锂合金研究新动向

铝-锂合金早在五十年代就研制出来, 曾应用于美国海军A3J型强击机。由于该合金脆性高等冶金学方面的问题, 后来停止使用。随着真空熔炼、合金化和惰性气氛熔炼等技术的发展, 以及航空工业对飞机结构重量减轻提出的更高要求, 人们重新重视铝-锂合金的研究。铝-锂合金的成分包括: 7000系铝、2~3%锂和痕量的金属元素。添加其它痕量金属元素的目的是提高合金的强度和弹性模量。根据理论估算, 铝-锂合金能使波音747飞机的重量减轻6吨左右, 因此西方一些飞机制造厂家对该合金的开发应用颇感兴趣。

除了美国Alcoa铝公司外, 英国Alcan铝公司有年产2000~4000吨铝-锂合金的能力。

(赵)

## 新型铸造镁合金

英国镁电子产品公司研制了一种稀土改性的铸镁合金——Electron WE54。这种合金是该公司多年研究和开发的成果, 最近在巴黎国际航空博览会上首次展出。

该合金含钕5.25%, 含其他稀土元素3.5%, 它与现在使用的材料比较具有明显的优点, 室温强度可与A356铸铝合金相比美, 在 $300^{\circ}\text{C}$ 条件下能保持极好的强度, 性能超过A356铝合金和EQ21镁合金。此外, 它还有特殊的抗过时效性。

这种新型合金的可铸性很好并在生产实践中成功地进行了铸造试验。目前正广泛进行现场试验和使用评价。

(白)