

# 低膨胀高温合金焊接性的研究现状

郭绍庆 李晓红 毛唯 颜鸣皋

( 北京航空材料研究院 北京 100095 )

**文 摘** 从焊接热裂纹的形成机理、影响因素及防止措施等多个方面系统地介绍了低膨胀高温合金焊接性的研究现状,并指出将焊接性试验、微观组织分析和数值模拟相结合,才能从冶金和力学两方面更清楚地揭示低膨胀高温合金焊接裂纹的形成机理及各种因素的影响,为最终制定合理的焊接工艺并有效防止焊接裂纹提供理论上的指导。

**关键词** 低膨胀高温合金,焊接性,热裂纹

## Current Research Aspects of the Weldability of Low-Expansion Superalloys

Guo Shaoqing Li Xiaohong Mao Wei Yan Minggao

( Beijing Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095 )

**Abstract** In this paper current research state of the weldability of low-expansion superalloy is reviewed for formation mechanism, influencing factors and preventive measures of welding hot cracking. It is pointed out that the formation mechanism and various factor s influence can be explained clearly on metallurgical and mechanical aspects only by combination of weldability test and microscopic structure analysis with numeric simulation, which may provide theoretical guidance to establish reasonable welding technique and prevent welding line from cracking.

**Key words** Low-expansion superalloys, Weldability, Hot cracks

### 1 引言

低膨胀高温合金具有高强度和低膨胀系数相结合的独特性能,有良好的冷热疲劳性能,耐热冲击、抗高压氢脆。自 70 年代开始研究开发低膨胀高温合金以来,相继有十几种不同类型的低膨胀高温合金问世,并被广泛用于航空航天工业中。

航空工业上低膨胀高温合金主要用于涡轮发动机机匣、涡轮外环以及封严圈、蜂窝支撑环等零部件的制造,以缩小叶片与机匣、封套之间的间隙,降低燃气损失,提高发动机的推力和效率。美国的 CFM-56、V-2500 和 F101 发动机都大量采用这类合金,有的用量已达到发动机质量的 25%。航天工

业上采用这类合金制造宇宙飞船和火箭发动机的主燃烧室、涡轮泵和喷嘴等零件。

低膨胀高温合金的应用不可避免要涉及到焊接加工。已有的研究表明,这类合金焊接时存在一定的焊缝结晶裂纹和热影响区微裂纹倾向。这不仅会限制新材料的应用范围,还有可能引发再热裂纹和疲劳裂纹造成产品的报废,甚至给飞机的安全飞行埋下严重隐患。因此,开展低膨胀高温合金的焊接性研究,研究其焊接裂纹的形成机理、影响因素和控制措施,不仅能够丰富焊接裂纹理论,而且对于提高航空航天发动机的可靠性和安全性有着重要意义。该领域的研究日益受到人们的重视,并且取得了一

收稿日期:1999-11-05

郭绍庆,1969 年出生,博士,主要从事焊接热裂纹和残余变形的控制、焊接热-力过程数值模拟研究工作

宇航材料工艺 2000 年 第 6 期

— 5 —

定的进展。

## 2 低膨胀高温合金的成分特点及焊接性

大致可以把低膨胀高温合金分为四类<sup>[1]</sup>。第一类是含 Nb 低膨胀高温合金,它包括 Incoloy 903 和 Pyroment CTX—1 及国产 GH903。此类合金以 Fe - Ni - Co 为基,添加 Nb、Ti、Al 等元素进行强化。第二类是降 Al 低膨胀高温合金,它包括 Incoloy 907 和 CTX—3 及国产 GH907。为提高抗应力加速晶界氧化脆性,此类合金中限制 Al 含量 < 0.1% (质量分数),适当提高了 Nb 含量。第三类是高 Si 低膨胀高温合金,它包括 Incoloy 909 和 CTX—909 及国产 GH909。这类合金是降 Al 低膨胀高温合金的改型,其基本成分相同,仅提高了 Si 含量。最后一类是抗氧化低膨胀高温合金。已有的关于低膨胀高温合金的研究,主要集中在 Incoloy 903 上,对于 Incoloy 907 和 Incoloy 909 的研究相对较少,国内对 GH907 焊接热影响区液化裂纹作过系统的研究。而关于 GH909 焊接性的研究,目前仍未见报道。

Ernst 等采用点状和小型可变拘束试验考察了 Incoloy 903、Incoloy 907 和 Incoloy 909 的焊接性<sup>[2]</sup>。结果表明,这些合金对热影响区 (HAZ) 液化裂纹和焊缝结晶裂纹的相对敏感性排序为 Incoloy 903 < Incoloy 907 < Incoloy 909,而且它们的裂纹敏感性大大高于 300 系列奥氏体不锈钢的裂纹敏感性。从已有的文献报道看,与熔合区的结晶裂纹相比,低膨胀高温合金 HAZ 微裂纹更严重。

## 3 焊缝结晶裂纹

低膨胀高温合金的焊缝结晶裂纹敏感性产生于凝固过程中 Nb、Ti、Si 向晶界和凝固亚结构边界的偏析以及终了低熔点共晶的形成。Nb、Ti、Si 的增加水平对终了共晶液相的数量和凝固温度的降低有着重要影响,从而也决定了合金对结晶裂纹的敏感性。

Chaturvedi 等研究发现,Incoloy 903 焊缝金属以胞状树枝晶方式凝固,Fe 和 Co 偏析于树枝晶,Nb、Ti、P、Si、C 偏析于树枝晶间区域,凝固终了是  $\gamma$ /MC 碳化物共晶反应,生成富 Nb MC 碳化物,另外只有少量 Laves 相生成,焊缝金属中没有出现微裂纹<sup>[3~6]</sup>。Ceslak 等采用差热分析 (DTA) 对 Incoloy 909 凝固行为的研究则表明,该合金大约在 1198℃ 凝固结束,凝固终了生成单一的  $\gamma$ /Laves 类共晶组分。这种凝固终了共晶的差异必然会对焊缝结晶裂

纹敏感性造成影响<sup>[7]</sup>。

Ernst 等对 Incoloy 900 系列熔合区显微组织的比较发现,随 Nb、Si 含量的增加 (即 909 > 907 > 903),  $\gamma$ /Laves 共晶组分增加。根据 Nb 含量的 EDS 分析数据采用 Scheil 法估算了 Incoloy 903、Incoloy 907、Incoloy 909 的共晶液相体积比率,它们依次为 2.9%、4.6% 和 8.5%。Incoloy 903 和 Incoloy 907 较高的含 C 量以及凝固过程中富 Nb 碳化物的形成,会进一步降低凝固终了  $\gamma$ /Laves 共晶组分的形成。但是,900 系列合金的结晶裂纹敏感性与共晶液相的量之间并不是线性关系。存在一晶界恰好完全润湿的临界液相量。低于该临界值,增加液相会促进晶界润湿因而增加裂纹倾向;高于该临界值,增加液相会造成裂纹愈合反而有利。可变拘束试验表明 Nb + Si 含量高的 Incoloy 909 裂纹敏感性大于 Incoloy 903 和 Incoloy 907,这意味着在这些合金中的共晶液相量低于发生裂纹愈合作用的临界值<sup>[2]</sup>。

Dupont 等系统地研究了改变 Fe、Nb、Si、C 含量时含 Nb 高温合金的凝固和焊接性,确定了合金成分、凝固行为、显微组织发展和结晶裂纹敏感性之间的关系。研究表明,这些合金的凝固顺序可以用三步过程描述:(1)初始凝固 L<sub>1</sub>,在这个过程中树枝晶间液相富集 Nb 和 C;(2)共晶反应 L<sub>1</sub> ( + NbC);(3)凝固以次共晶反应 L<sub>1</sub> ( + Laves) 结束。添加 C 对初始 L<sub>1</sub> 凝固阶段的温度间隔有强烈影响。随 C 含量增加 L<sub>1</sub> ( + NbC) 反应温度提高,因而减小了初始 L<sub>1</sub> 凝固阶段的温度间隔。在 Ni 基合金中,加入超过 0.052% (质量分数,下同) 的 C 显著提高结晶裂纹抗力。只有当 Nb 含量低于 2%、C 含量高于 0.12% 时向 Fe 基合金中添加 C 才会有利<sup>[8]</sup>。提高 C/Nb 比,避免形成低温 L<sub>1</sub> ( + Laves) 反应,能够提高熔合区对结晶裂纹的抗力<sup>[9]</sup>。

## 4 HAZ 微裂纹

### 4.1 形成机理

晶界上富 Nb、P 和 C 的连续或半连续液膜的形成是产生 HAZ 微裂纹的主要原因。如果液相以离散的形式分布于晶界的孔穴处,则不会造成 HAZ 微裂纹<sup>[5,10]</sup>。

关于 HAZ 晶界液膜的形成有多种不同的机理:  
(1) 由偏析引起的局部成分变化造成晶界的熔化;  
(2) 由初始碳化物、碳氮化物、硼化物、硫化物等的组

分液化在晶界形成液膜;(3)晶界迁移时造成相晶界溶质的积累;(4)熔合区富 Nb 的重新凝固的晶界上的 Nb 沿熔合区连续通道扩散进入 HAZ;(5)富 Nb 液相沿相晶界从熔合区向 HAZ 内贯穿<sup>[11]</sup>。

在上述各机理中组分液化得到了更多的认可与研究。Lin 等人的研究认为,Incoloy 903 中 HAZ 液相的基本来源是富 Nb 碳化物的组分液化,而 Incoloy 909 中其来源则是富 Nb 和 Si 的 Laves 相和/或 G-相的组分液化<sup>[12]</sup>。Nakkalil 等进一步的研究表明,Incoloy 903 HAZ 液相主要产生于晶界上已有的初始 MC 碳化物、MNP 磷化物以及细小碳化物的组分液化<sup>[13]</sup>。HAZ 微裂纹敏感性与 HAZ 晶界液相数量有关,随 Nb + Si 含量增加,液相增加,裂纹敏感性也增加<sup>[2]</sup>。

Nakkalil 等人的研究发现,晶界上过饱和液膜的凝固方式对微裂纹的形成有重要影响<sup>[4,13,14]</sup>。当 HAZ 晶界液膜以与熔合区相似的凝固方式凝固时,

树枝晶形核长大,然后进行终了/ MC 碳化物共晶反应,最终造成大量的微裂纹;当 HAZ 晶界液膜以液膜迁移(LFM)的方式凝固时,液膜溶解处于其前方的基体并在其后方沉积富 Nb 的固溶体,通过液膜中的溶质传输减轻过饱和,HAZ LFM 的大量发生减小了总的凝固温度范围,避免了晶界液相的低熔点终了共晶反应,因而减少了微裂纹的发生。

HAZ 微裂纹的形成机理可以归结为:焊接过程快速的热循环能够促进一些合金系统中析出物的组分液化,在 HAZ 的固相线下部分形成晶界液膜。快速冷却限制了溶质自晶界液相向基体的扩散程度,因此扩大了它的凝固范围。同时,该液相不能通过液膜迁移(LFM)减轻过饱和并避免在裂纹形成前生成终了低熔共晶液相。当局部热应力变为拉伸时存在晶界液膜,就会在 HAZ 发生液化裂纹。另外,液相吸附磷至晶界,降低固液界面能削弱晶界结合,会加剧微裂纹。直的晶粒边界通道有助于液相铺展和裂纹扩展,降低发生 LFM 的驱动力,增加微裂纹敏感性<sup>[4,15]</sup>。

#### 4.2 影响因素

热处理制度和初始组织对 HAZ 微裂纹倾向有着重要影响。通常固溶处理有利于杂质的固溶从而减小杂质的晶界积累,而时效处理则正好使杂质溶解度处于最低谷,因此对 HAZ 液化裂纹敏感的材料

通常应在固溶状态下焊接。但史常瑾等人对 GH907 电子束焊的研究发现,焊前为固溶状态时,容易发生 HAZ 液化裂纹,焊前为固溶 + 时效状态,却未出现 HAZ 裂纹,对此尚需进行进一步试验研究分析。

Lin 等人研究了 Incoloy 903 合金初始组织对 HAZ 微裂纹的影响。研究发现,在主要由粗大的温加工晶粒构成的试件中出现大量的微裂纹,而其周围的细小晶粒中只出现极少量的微裂纹。细晶的平均晶界曲率大,有利于 LFM 的发生,因而降低 HAZ 微裂纹倾向。增加粗大温加工晶粒周围细小再结晶晶粒的比例能够减少微裂纹<sup>[11]</sup>。此外,X. Huang 等人还针对铸造合金 718 系统地研究了热处理制度对显微组织 HAZ 微裂纹的影响。研究表明,不同热处理状态下裂纹敏感性排序为均匀化 + 时效(HOMO + AGE) > 均匀化(HOMO) > 均匀化 + 固溶(HOMO + S. T),裂纹敏感性的变化同晶界 B 的析出关系密切<sup>[16]</sup>。

为减小 HAZ 微裂纹的发生,Richards 等人研究了电子束焊接参数对 Incoloy 903 HAZ 微裂纹的影响,并定量确定了微裂纹敏感性同焊接参数及熔池形状的关系<sup>[17,18]</sup>。

$$C_1 = 0.000394v - 0.0034I - 0.0027U + 0.013(P/W_{mid}) + 0.0016d_w$$

式中  $C_1$  为微裂纹敏感性指数, $P/W_{mid}$  为焊缝深宽比, $d_w$  为电子束工作距离。 $I$  为电子束电流, $U$  为加速电压, $v$  为焊接速度。

该方程表明,增加热输入即增加电子束电流  $I$ 、 $U$  和降低  $v$ ,能够减少裂纹。椭圆形熔池与泪滴状熔池相比,降低裂纹倾向。此后 Richards 等人又对 Incoloy 903 电子束焊接参数进行了优化,以回归方程的形式揭示了焊接速度、电子束电流、聚焦电流和电子束振幅对 HAZ 微裂纹的影响。但该回归方程仅适用于 Incoloy 903,史常瑾等人对于 GH907 的研究表明,线能量和高温停留时间的增加以及加热和冷却速度的提高,会加剧组分液化,增加裂纹敏感性,表现出了与上述方程不同的关系规律。这可能是两种合金成分差异所致。

Boucher 等将裂纹行为同由横截面测得的焊缝最大宽度与熔深比( $W_{top}/P$ )联系起来。发现裂纹总长度随  $W_{top}/P$  的增大而减小,在  $W_{top}/P$  的值大于 1.6 时,裂纹得以消除。高焊速通过减小  $W_{top}/P$  来

影响裂纹行为。作者进一步推断,电子束摆动和预热能够通过影响焊接熔池的形状和所产生热应力的减小,减少微裂纹的发生<sup>[19]</sup>。Richards 等结合焊接热循环时 HAZ 温度—位置图和温度—时间曲线分析了焊接速度的影响。研究发现,低焊速能够造成液膜厚度减小、LFM 发生量增大、熔池呈椭圆形以及热应力的降低,因而降低微裂纹倾向<sup>[18]</sup>。

## 5 低膨胀高温合金焊接性的定量研究

焊缝结晶裂纹和 HAZ 微裂纹的产生不仅取决于凝固终了低熔点共晶和晶界液膜的形成,还要受到作用于该液膜上的应力或应变的影响。为了预测给定焊接条件下合金裂纹的敏感性,有必要对以焊缝凝固过程和晶界液化为中心的组织演变和应力应变发展进行模拟。

B. Radhakrishnan 最先提出了 HAZ 晶界液相的形成与凝固过程的一维热流与物质流耦合模型,并采用该模型计算了伪二元合金的组织演变过程,确定了增加瞬时晶界液相寿命的因素。这向预测合金焊接液化裂纹敏感性迈出了重要的一步<sup>[15]</sup>。此后 T. Zacharia 采用数值模拟研究了不同焊接速度时薄板 GTA 焊的焊缝结晶组织变化<sup>[20]</sup>。Z. Yang 采用模拟求得的冷却速度和 CCT 图预测了 HSLA—100 钢熔合区的显微组织<sup>[21]</sup>。

Dupont 等针对含 Nb 高温合金熔化焊模拟了熔合区凝固过程溶质重新分布和组织发展。将基体 (Fe, Ni, Cr) 元素看成溶剂,作为“三元系” - Nb - C 的组元,在忽略固相中 Nb 的扩散并假定 C 扩散无限快的条件下计算了初始 L 和共晶型 L ( + Nb) 凝固阶段液相比率和成分的变化。计算结果叠加在伪三元 - Nb - C 凝固相图上,预测凝固反应顺序以及凝固时形成的 /NbC 和 /Laves 共晶组分的总量和各自的量。该模拟使对含 Nb 试验合金中成分—组织—结晶裂纹之间关系的定量理解成为可能<sup>[9,22]</sup>。

最初的焊接过程数值模拟主要集中于焊接残余应力和变形的预测。O. R. Myhr 最先将数值热流模型、显微组织模型和力学模型依次结合,成功地预测了 6082—T6 铝合金空心挤压件焊接过程中显微组织演变、残余应力和变形<sup>[23]</sup>。

关于焊接热裂纹形成条件的焊接过程应力应变演变数值模拟,目前主要注意力集中在熔合区结晶

裂纹的研究上。在这方面 T. Zacharia 和冯智利等先后作了有益的探索<sup>[24,25]</sup>。冯智利为模拟凝固效应发展了两种建模技术,引入了微观凝固动力学和单元再生技术。此后他采用该模型定量评价了 Sigma-jig 试验中局部热力学条件,通过构造应力/温度/位置图,揭示了移动的熔池尾部复杂的应力发展,利用 BTR 内局部应力演变解释了不同试验条件下的热裂纹启裂现象<sup>[25]</sup>。针对 HAZ 液化裂纹形成的应力应变研究,还未曾见过报道。

## 6 结语

总的看来,目前对于低膨胀高温合金焊接性的研究,主要停留在采用微观分析手段和焊接性试验从冶金角度定性研究裂纹敏感性的阶段。将焊接过程组织演变和应力应变发展数值模拟引入焊接裂纹的研究,是材料焊接性研究的重要研究方向之一。这方面的研究还刚刚起步。另外应指出,电子束焊和激光焊等高能密度焊接方法在航空航天领域的精密制造中应用前景看好。但这类焊接热源物理模型明显不同于普通的熔化焊,热过程也具有不同的特点。因此进行高能密度焊接条件下热过程、力学过程和组织演变的数值模拟更具针对性和重要性。

只有将焊接性试验、微观组织分析和数值模拟相结合,才能从冶金和力学两方面更清楚地揭示低膨胀高温合金焊接裂纹的形成机理及各种因素的影响,为最终制定合理的焊接工艺并有效防止焊接裂纹提供理论上的指导。

## 参考文献

- 1 张绍维. 低膨胀高温合金的发展与应用. 航空制造工程, 1994; (9): 5~8
- 2 Ernst S C, Baeslack III W A, Lippold J C. Weldability of high strength, low-expansion superalloys. Welding Journal, 1989; 68(10): 418~430
- 3 Chaturvedi M C, Richards N L. Microstructure and HAZ cracking of EB welded Incoloy 903. International Journal of Materials and Product Technology, 1996; 11 (3~4): 253~270
- 4 Nakkalil R. Microstructural characterization of Incoloy 903 weldments. Dissertation Abstracts International 54, 1994; (8): 292
- 5 Nakkalil R, Chaturvedi M C, Richards N L. Microstructural characterization of Incoloy 903 weldments. Metallurgical Transactions A, 1993; 24A(5): 1169~1179
- 6 Richards N L, Nakkalil R, Chaturvedi M C. Fusion zone

microstructure of electron beam welded Incoloy 903. Scripta Metallurgica et Materialia, 1992; 26(4) : 545 ~ 550

7 Cieslak M J , Headley T J , Knorovsky G A , Romig Jr A D , Kollie T. A comparison of the solidification behavior of Incoloy 909 and Inconel 718. Metallurgical Transactions A , 1990; 21A (2) : 479 ~ 488

8 Dupont J N , Robino C V , Marder A R. Solidification and weldability of Nb-bearing superalloys. Welding Journal , 1998; 77 (10) : 417 ~ 431

9 Dupont J N. Microstructural development and solidification cracking susceptibility of a stabilized stainless steel. Welding Journal , 1999; 78(7) : 253 ~ 263

10 Nakkalil R , Chaturvedi M C , Richards N L. A study of fusion zone and heat-affected zone microstructures in electron beam welded Incoloy 903. In: International trends in welding science and technology , Gatlinburg , Tennessee , USA , 1992 : 193 ~ 197

11 Liu Y G , Nakkalil R , Richards N L , Chaturvedi M C. The effect of initial microstructure on heat-affected zone microfissuring in Incoloy 903. Materials Science and Engineering A , 1995; 202 (1 ~ 2) : 179 ~ 187

12 Lin W , Baeslack III W A , Lippold J C. Hot-ductility testing of high strength low-expansion superalloys. In: Recent trends in welding science and technology , Gatlinburg , Tennessee , USA , 1989 : 609 ~ 614

13 Nakkalil R , Chaturvedi M C , Richards N L. The influence of solidification mode on heat-affected zone microfissuring in a nickel-iron base superalloy. ACTA Metallurgica ET Materialia , 1992; 41 (12) : 3 381 ~ 3 392

14 Nakkalil R , Chaturvedi M C , Richards N L. Grain boundary liquid film migration during welding of Incoloy 903. Scripta Metallurgica et Materialia , 1992; 26(10) : 1 599 ~ 1 604

15 Radhacrishnan B , Thompson R G. A model for the formation and solidification of grain boundary liquid in the heat-affected zone (HAZ) of welds. Metallurgical Transactions A , 1992; 23 (6) :

1 783 ~ 1 799

16 Huang X , Chaturvedi M C , Richards N L. An investigation of microstructure and HAZ microfissuring of cast alloy 718. Superalloys 718 , 625 , 706 and Various Derivatives , Edward A Loria ed. 1994 : 871 ~ 880

17 Richards N L , Chaturvedi M C , Liu Y G , Mount K. Optimization of electron beam welding parameters for Incoloy 903. International Journal of Materials and Product Technology , 1996; 11 (3 ~ 4) : 284 ~ 300

18 Richards N L , Nakkalil R , Chaturvedi M C. The influence of electron beam welding parameters on heat-affected zone microfissuring in Incoloy 903. Metallurgical and Materials Transactions A , 1994; 25A (8) : 1 733 ~ 1 745

19 Boucher C , Valera D , Dadian M , Granjon H. In: Paper presented at the 15th conference on special steels , Saint Etienne , France , 1976

20 Zacharia T , Chen Y. Modeling of fundamental phenomena in gas tungsten arc welds. International Journal of Materials and Product Technology , 1998; 13 (1 ~ 2) : 77 ~ 88

21 Yang Z , Debroy T. Modeling macro and microstructures of gas-metal-arc welded HSLA-100 steel. Metallurgical and Materials Transactions B , 1999; 30B (6) : 483 ~ 493

22 Dupont J N , Robino C V , Marder A R. Modeling solute redistribution and microstructural development in fusion welds of Nb-bearing superalloys. Acta Mater. , 1998; 46(13) : 4 781 ~ 4 790

23 Myhr O R , Klokkenaug S , Gong , Fjaer H G , Klucken A O. Modeling of microstructure evolution , residual stress and distortions in 6082-T6 aluminum weldments. Welding Journal , 1998; 77 (7) : 286 ~ 292

24 Zacharia T. Dynamic stresses in weld metal hot cracking. Welding Journal , 1994; 73(7) : 164 ~ 172

25 Feng Z , Zacharia T , David S A. Thermal stress development in a nickel based superalloy during weldability test. Welding Journal , 1997; 76(11) : 470 ~ 483

## 2000 年度优秀通讯员

一年来,本刊通讯员在组稿、撰稿、征订、广告业务等工作中给予了编辑部很大的支持,编辑部对此表示衷心感谢,并对表现突出的通讯员给予表彰,在今后的中还望您们给予刊物更多的关心、支持和帮助。本年度优秀通讯员有:

陈代娣 王之华 陈力萍 张婵 王富春  
白萍 王先荣 张永安 周新贵 应瑞祥

· 本刊编辑部 ·

— 9 —