

焊缝热裂纹强度准则分析

陈章兰，熊云峰，郭学平，戴乐阳  
(集美大学 轮机工程学院, 厦门 361021)

**摘 要:**采用数值模拟和断口试验的方法分析焊接热裂纹与应力参量间关系. 采用有限单元法分析焊接热弹塑性过程,提取焊缝热过程应力参量的时历. 以热裂纹中纵向裂纹、横向裂纹、焊趾裂纹以及弧坑裂纹为例,对比不同类型的热裂纹所处焊道区域的应力三维度、第一主应力以及剪应力等应力参量在热脆性敏感温度区间的分布特征及对焊接热量输入的依赖性,结合工程经验及断口试验,探讨焊接热裂纹开裂的应力参量作用机制. 结果表明,不同类型热裂纹对应应力参量敏感性各不相同,具有不同开裂机理,由此建立不同裂纹类型的强度准则.

**关键词:**热裂纹; 应力参量; 强度准则; 数值模拟; 断口分析

**中图分类号:** TG 404      **文献标识码:** A      **doi:**10. 12073/j. hjxb. 20161209001

0 序 言

焊接热裂纹是常见焊接缺陷,特别是高强度钢,热裂纹率相当高. 焊接热裂纹的产生与冶金及力学因素有关,冶金因素方面的研究,如日本 JWS 建立的低合金钢 HCS 热裂纹敏感指标、美国的低合金钢 HCS 以及奥氏体不锈钢的 HCI 指标等,已非常成熟. 对引起热裂纹的力因素主要有两种观点,在拉应力作用下、脆性转变温度区间的沿晶开裂,即基于第一强度理论;另一种观点以第二强度理论为基础,由横向拉伸应力所引起的内部变形率超过材料延性而致<sup>[1-3]</sup>. 可以看出,在高温试验测量难度大的情况下,力行为是以低温情况下残余应力分布间接获得的. 然而,焊接热过程中高温和冷却后的常温导致的力呈强非线性特征<sup>[4]</sup>,基于低温应力推理忽略了热裂纹高温时效性. 在试验成本高以及在高温环境仪器测量困难的背景下,采用非试验方法,分析焊缝脆性温度敏感区间热力行为,明晰热力物理量与热裂纹的对应关系,为焊接热裂纹理论提供直接支撑数据,对于热裂纹控制具有重要的科学意义和工程应用价值.

对于高温冷却中的焊缝金属,虽具有固态金属连续体强度,但强度、塑性和应力行为具有强烈的温度依赖性和非线性. 采用基于热弹塑性有限单元法的数值方法,再现焊接工艺过程以及脆性温度转变区间的热力耦合特征. 在此基础上,应用强度理论

探求焊缝热裂纹开裂力学机理,建立焊缝热裂纹判据,为丰富和完善焊接热裂纹相关理论提供参考.

1 连续体强度理论中相关应力参量

第一和第二强度理论分别以拉应力和最大伸长线应变为参量建立断裂破坏理论,此处不再赘述. 第四强度理论考虑三向主应力对形状改变的影响,近期研究以第四强度理论为基础<sup>[5-6]</sup>,采用无量纲化后的应力三维度为参量,即

$$R_{\sigma} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (1)$$

式中: $R_{\sigma}$  为应力三维度; $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\sigma_3$  分别为第一、第二和第三主应力.

一般认为, $R_{\sigma}$  值大,应力状态处于三向受拉状态,破坏形式表现为拉断; $R_{\sigma}$  值小,应力状态处于三向受压,破坏形式表现为剪断. 显然  $R_{\sigma}$  值与受力的复杂状态具有明确的物理对应关系<sup>[5-6]</sup>.

由第三强度理论,在复杂应力状态下,当最大剪应力达到临界值时,流动破坏发生. 其中,最大剪应力可表示为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

式中: $\tau_{\max}$  最大剪应力,其所在平面的法线平行于  $\sigma_2$  且与  $\sigma_1$  所在平面的法线呈  $45^{\circ}$ .

2 应力场数值获取

采用有限单元法的数值方法求解应力场. 由傅

立叶热传导控制方程以及结构耦合计算,对时间和空间域进行离散,采用高斯模型模拟 CO<sub>2</sub> 气体保护焊热源,对流和辐射换热边界条件,生死单元法模拟焊道的逐步形成,APDL 编制自动程序,大变形设置以及 Full-Newton 迭代算法. 以 T 形接头为例,腹板和面板尺寸分别为 500 mm×500 mm×10 mm,1 000 mm×500 mm×10 mm,焊脚高度 10 mm. 获得的温

度场分布、纵向和横向残余应力分布如图 1. T 形接头单侧焊接情况下,焊后冷却 5 s 后温度分布云图如图 1a. 图 1b 是残余应力分布,其中纵向应力  $S_z$  为不对称的焊缝拉应力而两侧母材压应力;横向应力  $S_x$  是整个面板表面受拉应力,且终焊点拉应力大于起焊点的,焊缝中部拉应力最大. 数值模拟的温度场和应力场分布趋势与理论基本相符.

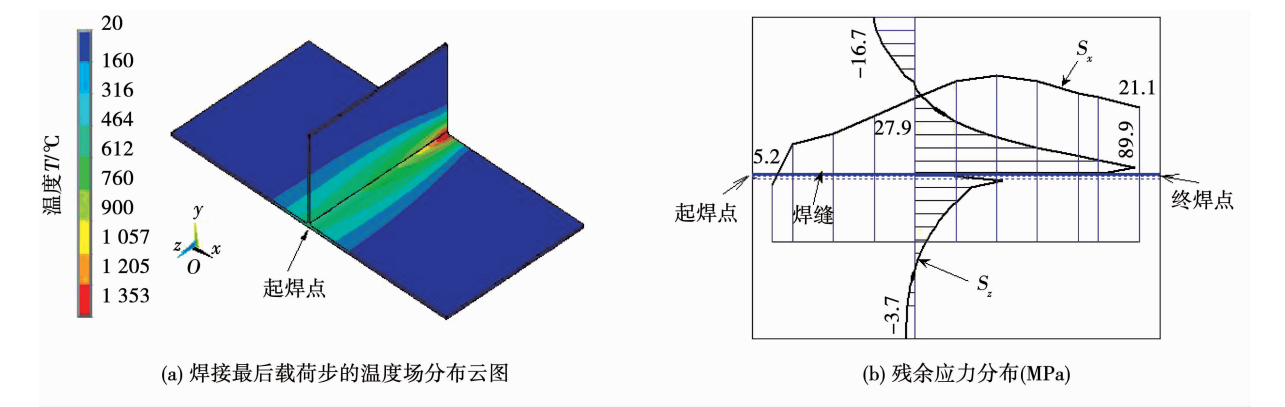


图 1 焊接过程模拟结果  
Fig. 1 Numerical result of weld thermal process

3 焊缝应力参量热时历特征

3.1 应力参量时程

提取焊缝中间横剖面表面上各节点主应力时历,由式(1),式(2)计算得到最大剪应力和应力三维度分布. 发现中间部位的节点时历基本相同,而两端焊趾节点时历相同但不同于中间节点,典型中间节点和焊趾节点应力参量时历如图 2 所示. 图 2 的焊接时历划分为加热和冷却两个阶段. 图 2a 表明,加热时,焊缝中间节点应力三维度随温度升高渐渐增大,甚至由负转正. 冷却阶段,无论中间节点还

是趾部节点,应力三维度基本为负值. 实际上,应力三维度冷却至环境温度时才转为正值,表明应力复杂状态变化明显且基本为压应力状态. 改变接头约束和尺寸,上述结论仍具有很好的重复性. 主要原因在于焊缝金属高温膨胀,使中间金属受拉,而与母材接触的趾部,金属膨胀受到约束,因而趾部受压. 第三主应力数值大,方向基本沿着焊缝长度方向,表明纵向膨胀受到约束较横剖面更大. 图 2b 表明,冷却阶段最大剪应力出现大幅波动,峰值出现在离散点 970 ℃左右,之后随温度降低而逐步下降. 焊趾节点最大剪应力时程与中间节点的随温度变化趋势相同. 图 2 表明,应力参量中,最大剪应力对温度敏感性更强.

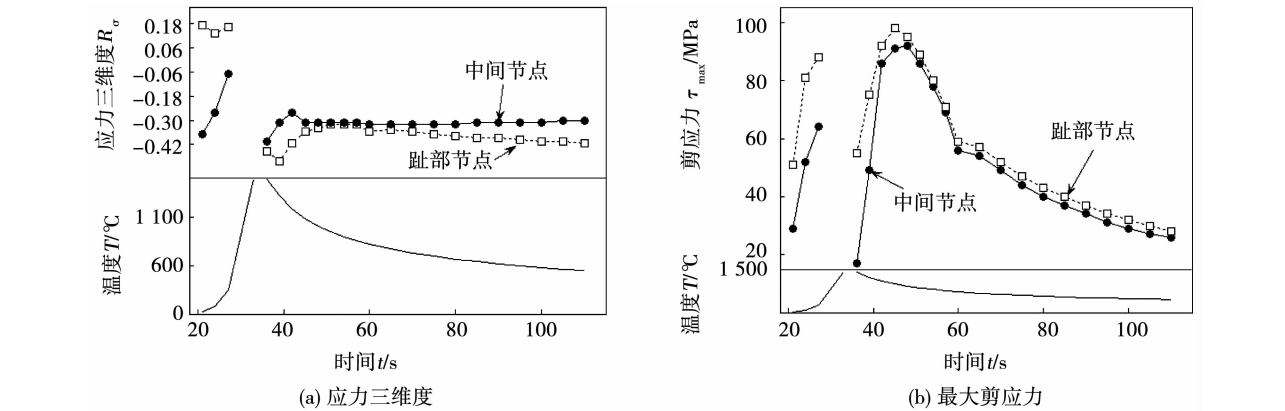


图 2 应力参量时程  
Fig. 2 History of stress parameters

金属处于液态相时,其应力状态没有意义. 且焊接热裂纹脆性敏感区域温度高于 800 ℃,故下面以 800 ~ 1 200 ℃ 的区间讨论应力参量特性.

3.2 焊缝纵向中间横剖面应力参量特征

对焊缝横剖面节点应力参量特征的分析可以获得特定温度下焊缝中间与趾部应力特点.

3.2.1 应力参量分布特征

温度场时历中,高温的 800 ~ 1 200 ℃ 区间涉及连续 5 个纵向焊缝节点,其最大剪应力分布如图 3 所示. 由图 3 可以看出,同一横剖面上,节点处于相同温度时,焊趾处最大剪应力比同一横剖面上其它中间节点的剪应力要大.

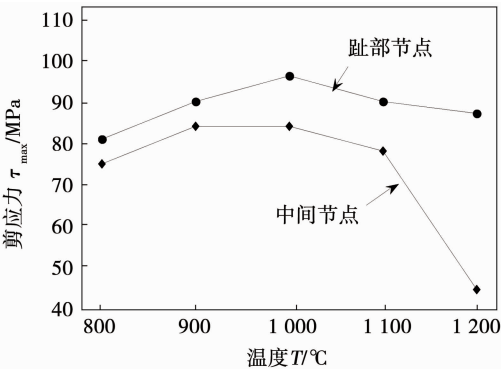


图 3 焊缝中部温度敏感区间节点最大剪应力  
Fig. 3 Profile of max shear stress in middle seam section

焊缝中间的应力三维度为单向压应力状态,而趾部为单向或复杂应力状态;焊缝中间节点第一主应力为拉应力,小于最大剪应力 1 ~ 2 个数量级.

3.2.2 焊接速度对应力参量的影响

数值分别计算三个焊接速度:0.5,0.63 和 0.83 m/min. 进行线性插值,获得同一节点、相同温度下最大剪应力,如图 4 所示.

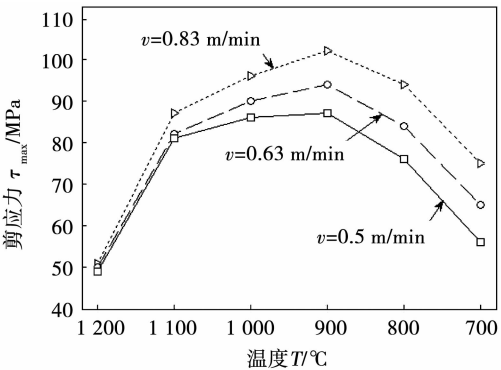


图 4 不同焊接速度时应力参量比较  
Fig. 4 Effect of velocities on shear stress

图 4 表明,随焊接速度增加,处于 1 100 ℃ 以下焊缝部位的最大剪应力随之增加. 在 900 ℃ 处增加幅度约为 20 MPa. 因为焊接速度越快,热输入减小,末端剖面上冷却梯度增大,致使热应力越大. 此外,不同速度时应力三维度差别不大;焊接速度不改变趾部为三个主应力均为压应力而中间节点第一主应力为拉应力且为小量的状态.

3.3 焊缝纵向端面应力参量比较

同一焊接速度情况下,比较收弧部位与中间节点最大剪应力  $\tau_{max}$  和第一主应力  $\sigma_1$ ,发现第一主应力由中间横剖面趾部压应力和中间较小拉应力,变为收弧处数量级与剪应力同量级的拉应力,如图 5 所示. 此外,应力三维度亦是中间剖面为负而末端面为正,即为拉应力状态.

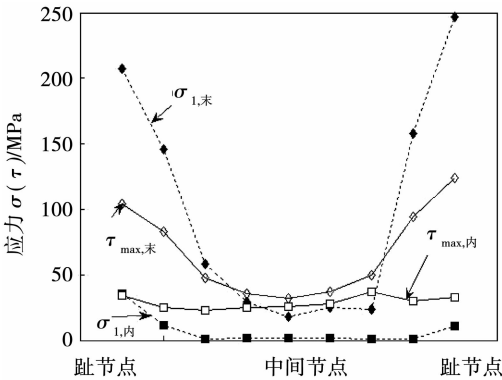


图 5 末端剖面与邻近内剖面节点的应力参量比较  
Fig. 5 Comparison of stress parameters between end and inner seam sections

4 焊缝热裂纹强度准则讨论

综合前述数值分析、焊接冶金因素,探讨焊缝中部、趾部及弧坑处上出现热裂纹的应力诱导机制.

中部焊缝的趾部在高温阶段由于焊缝金属的热膨胀受到母材挤压,因而处于三向压应力状态,且最大剪应力大,应力集中明显. 趾部母材若无杂质影响,即与生长于晶界的液态薄膜无关,则趾部裂纹属于剪应力为主因的破坏机制,即

$$\tau_{max} \leq R_{\tau}(T) \tag{3}$$

式中:  $R_{\tau}(T)$  为该温度  $T$  下焊缝抗剪强度.

焊缝中部热裂纹敏感温度区间处于压应力状态;第三主应力  $\sigma_3$  矢量方向沿焊缝纵向,焊接冶金诱致的液态薄膜孔洞受挤压而极易愈合,且横向裂纹无沿晶界的液态薄膜作用. 由于散热梯度缘故,树状裂纹晶轴线易与焊缝中心垂直,在会合面形成显著的偏析弱晶界面,表明出现横向裂纹可能性小

于纵向裂纹. 当改变焊接速度时,应力参量中最大剪应力速度敏感性更强. 因此,纵向裂纹启裂及扩展方向属于在液态薄膜形部位起裂,在剪应力作用下开裂的破坏机制,即

$$\tau_{\max} \leq R_{\tau}(T, HCS) \tag{4}$$

式中: $R_{\tau}(T, HCS)$  为温度  $T$  下焊缝材料的抗剪强度; $HCS$  是与焊缝金属有关的热裂纹敏感指数.

进行船用高强钢 H36 的  $\text{CO}_2$  气体保护焊工艺试验获得纵向热裂纹及线切割取得断口,如图 6 所示. 图 6a 为裂纹示意图,图 6b 为激光显微镜观测到的断口的韧窝,但大量的滑移线表明滑移在断裂中起主要作用,属于快速剪切穿晶断裂. 印证了纵向裂纹的剪切开裂的论断. 而且,这一论断与工程中纵向裂纹率远高于横向裂纹率以及增加焊接速度使裂纹率增加的现象相符.

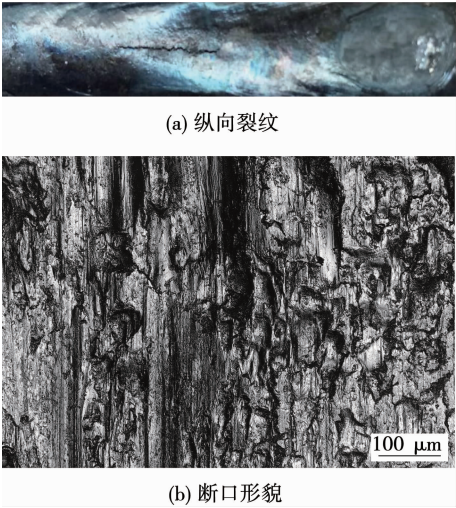


图 6 焊接热裂纹断口  
Fig. 6 Profile of hot-crack

焊缝末端由于散热方向不同于中部,应力分布也不同. 第一主应力为大数值的拉应力;在两个焊趾处,第一主应力均为沿着板厚方向,为垂直于板厚方向焊趾裂纹的外因. 而在弧坑的中间部分,拉应力方向是沿着焊缝表面指向焊缝纵向,是弧坑中横向裂纹的诱因. 工程上弧坑横向裂纹率高于焊缝中部的经验也印证了这一论断;而弧坑中出现的纵向裂纹是因液态薄膜冶金因素起主导作用. 综合以上弧坑热裂纹形成机制,即

$$\begin{cases} \sigma \leq R_m, \text{趾部, 横向裂纹} \\ \tau \leq R_{\tau}(T, HCS), \text{纵向裂纹} \end{cases} \tag{5}$$

式中: $R_m$  为抗拉强度; $T$  为温度.

5 结 论

(1) 数值模拟结果表明,焊趾部位最大剪应力显著高于同横剖面焊缝中间部位,因此,同等冶金因素影响时,趾部开裂概率高于焊缝中部,且为剪切断裂形式;弧坑裂纹属于拉应力作用机制. 由于试验条件所限,有待直接断口分析证实.

(2) 数值及试验结果表明,焊缝中部区域纵向裂纹冶金因素占主导作用,在剪应力作用下沿着偏析弱晶面的剪切断裂.

参考文献:

[1] 李一楠, 闫久春, 郭峰, 等. 紫铜厚大结构件钨极氩弧焊热裂纹形成机理[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 43-47.  
Li Yinan, Yan Jiuchun, Guo Feng, et al. Formation process of hot cracking in copper He shielding gas tungsten welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 43-47.

[2] Mei Y P, Liu Y C, Liu C X, et al. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718[J]. Material and Design, 2016, 89: 964-977.

[3] 龚练, 朱亮, 周超, 等. 焊接工艺参数对超窄间隙焊接热裂纹的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 93-96.  
Gong Lian, Zhu Liang, Zhou Chao, et al. Effect of welding parameters on ultra-narrow gap welding hot cracking[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 93-96.

[4] Lei Z L, Li B W, Ni L C, et al. Mechanism of the crack formation and suppression in laser-MAG hybrid welded 30CrMnSiA joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 187-194.

[5] 李智慧. 金属材料裂纹体与无裂纹体统一断裂理论若干问题的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.

[6] Bao Y B. Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(4): 505-522.

作者简介: 陈章兰, 女, 1970 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 主要从事船体结构焊接工艺方面的科研和教学工作. 已发表论文 20 余篇. Email: zhanglanchent@jmu.edu.cn