

火焰筒掺混孔边裂纹在变温情形下的 J 积分、 $C(t)$ 积分

秦亮¹, 张克实¹, 郭运强¹, 耿小亮¹, 董书惠²

(1. 西北工业大学 工程力学系, 陕西 西安 710072; 2. 沈阳黎明发动机制造公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要:针对某型火焰筒高温条件下裂纹萌生以及扩展问题,利用含裂纹圆孔模型和有限元方法分别在稳定温度场和瞬态变化温度场下进行数值模拟,通过 J 积分和 $C(t)$ 积分结果估计裂纹尖端场强度。 J 积分和 $C(t)$ 积分在两种情况下表现出明显差异,表明瞬态温度场下的裂纹扩展与稳态温度场下的情况显著不同。对这种现象进行了初步探讨,利用 J 积分和 $C(t)$ 积分判断火焰筒掺混孔边裂纹扩展趋势。

关键词: J 积分; $C(t)$ 积分; 瞬态温度场; 裂纹尖端

中图分类号: V231.95; O346.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)06-0021-03

高温结构往往由于温度的不均匀在结构中造成温度梯度,导致局部较大应力应变的产生。对于温度场造成的疲劳载荷导致裂纹萌生和扩展,国内外许多学者进行了研究。稳定温度场中,对小范围屈服下裂纹的启裂和扩展问题, K 、 J 积分作为描述裂纹前缘场强的参数,已获得广泛的应用:线弹性情形下, K 作为主要的裂纹扩展判据;弹塑性情形下,主要采用 J 积分。蠕变情形下,采用由 Landes 和 Begley 引入的 C 积分来描述进入稳定阶段的蠕变裂纹尖端场强度。时间相关的 C 积分形式 $C(t)$ 积分考虑裂纹尖端应力应变的奇异性,可以用来分析非稳定蠕变裂纹。柴国钟对稳态温度场下的 J 以及 $C(t)$ 积分进行了理论推导和分析^[1]。Yun-jae Kim 等人对稳定的 C^* 积分以及非稳定的 $C(t)$ 积分进行了大量理论研究和计算^[2]。

在某型现役火焰筒的使用过程中发现,有些火焰筒未及使用期限就出现裂纹,相当一部分出现在掺混孔附近。这一现象涉及到高温温度场下的裂纹扩展问题。由于孔边温度场具有较大梯度,不同温度区域裂纹扩展的机理可能极不相同。为研究火焰筒掺混孔边裂纹的扩展规律,本文分别考虑稳态温度场和瞬态温度变化过程,探讨利用 J 积分和 $C(t)$ 积分来判断裂纹产生后的扩展趋势。

1 J 积分和 $C(t)$ 积分

在稳态情形下,工程上广泛采用 J 积分。对于高温蠕变裂纹扩展的研究,目前主要集中在恒定载荷作用下的裂纹研究,并以 Landes 和 Begley 引入的稳态蠕变 C^* 积分作为判断裂纹尖端场强的主要参量,但是 C^* 仅适用于稳态蠕变。研究非稳态蠕变裂纹扩展,首先要研究非稳态蠕变条件下瞬态裂纹尖端场强度因子。对于非稳态蠕变裂纹扩展,文献[3]采用与时间有关的 C 积分形式 $C(t)$ 积分来判断裂纹尖端场强度。 $C(t)$ 积分代表虚拟裂纹扩展过程中单位时间内流入裂尖的能量。若载荷稳定,则当 $t \rightarrow \infty$ 时裂纹尖端趋于稳定 C 积分和 J 积分均与积分路径无关而趋于稳定值, $C(t) \rightarrow C^*$ 。 J 积分见式(1),式中: Γ 为积分路径; δ_{ij} 为 Kronecker δ 。

$$J = \int_{\Gamma} (W \delta_{ij} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) n_i ds \quad (1)$$

对于 C 积分的形式,只需要 J 积分公式中利用速度取代位移,利用应变能密度率取代应变能密度,则得到与时间相关的 $C(t)$ 积分的公式。 $C(t)$ 积分公式表示如下:

收稿日期:2004-12-31

基金项目:航空基础科学基金资助项目(04C53027)

作者简介:秦亮(1978-),男,湖北随州人,博士生,主要从事高温合金材料的力学行为研究。

$$C(t) = \int_{\Gamma=0} [n_1 \dot{W} - n_j \tau_{ij} \frac{\partial \dot{u}}{\partial x_i}] dS \quad (2)$$

$$\dot{W} \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma : d\dot{\epsilon} \quad (3)$$

在文献[3]中,稳定蠕变阶段的蠕变律默采用 Norton 律,则 $\dot{W} = \frac{n}{n+1} q \dot{\epsilon}$ 。且 $C(t)$ 与 C^* 之间存在:

$$C(t) = C^* \left(\frac{t}{t_r} + 1 \right) \quad (4) \quad t_r = \frac{1}{(n+1)} \frac{1}{C^*} \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2 \quad (5)$$

式中 t_r 表示材料由非稳定蠕变进入稳定蠕变的转变时间,由式(5)可以确定。

2 孔边含裂纹火焰筒模型边界设定与材料特性

目前航空发动机中使用的多为气膜冷却火焰筒,在火焰筒筒壁上分布有很多掺混孔。考虑气膜冷却火焰筒的冷却机理以及火焰筒掺混孔的实际分布,依据实际问题的近似对称性,建立了包含裂纹的1/4平板模型。参考现有文献假设掺混孔边有如下的温度分布,见图1, $T_1 = 900^\circ\text{C}$, $T_2 = 450^\circ\text{C}$, 参考温度为 20°C (室温), 裂纹长度 $a = 3 \sim 20 \text{ mm}$ 。网格划分如图2。作为初步分析,现就一个飞行起落中的起飞和巡航过程进行计算。依据实际发动机火焰筒的工况以及参考文献,计算中由参考温度到达设定温度值,传热时间 20 s , 然后保持瞬态传热后形成的稳定温度场,经历时间 $3\ 600 \text{ s}$ 。分析中,本模型采用8节点平面传热单元 CPS8T,共有9 149个节点,2 978个单元。

材料为高温合金 GH3536,它是一种含铁量较高,主要用铬和钼固溶强化的镍基合金,具有良好的抗氧化和耐腐蚀性。在 900°C 以下,具有中等的持久和蠕变强度,冷热加工和焊接性能良好,适合制作在 900°C 以下长期使用的航空发动机燃烧室部件和其他高温部件。GH3536 合金成分与物理性能参数见文献[4]。

3 数值模拟结果及分析

计算中,由于 $C(t)$ 要求积分路径趋近于裂纹尖端,所以取第一条围道积分的数值结果。对于 J 积分,由于裂纹尖端区域大应变的影响,一般舍去第一积分围道的结果而取平均值(本文采用这种方法)。在稳态温度场下,保持一定的机械载荷,材料发生蠕变, J 积分表现出增长的趋势,见图3。而 $C(t)$ 表现出向一稳定值收敛的趋势,见图4。这一结果显示出与参考文献[1]相同的变化趋势。

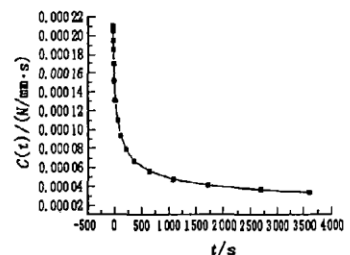
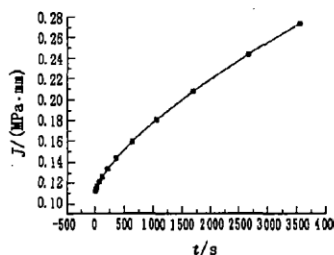
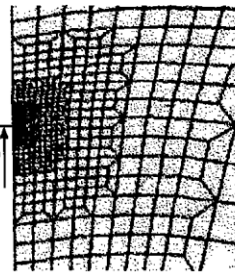
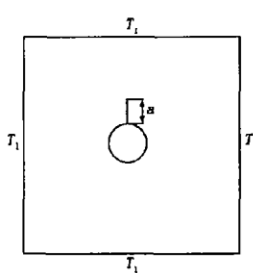


图1 温度边界载荷示意

图2 网格局部放大

图3 稳态温度场 J 积分变化趋势

图4 稳态温度场 $C(t)$ 积分变化趋势

在瞬态温度场下, J 积分和 $C(t)$ 积分表现出与稳态温度场显著不同的趋势, J 积分先增长然后减弱,见图5。 $C(t)$ 积分在短裂纹时有正负跳跃,长裂纹时呈现下降趋势,见图6。 $C(t)$ 积分的结果是和裂纹尖端的应力应变状态直接相关。裂纹长度较短时,裂纹尖端主要处于温度相对较低的区域,裂纹尖端的应变主要是塑性应变,由于热膨胀的不一致,裂纹尖端承受较大的拉应力。当材料进入稳态蠕变后,应力应变重新分布,裂纹尖端由于应力集中承受较大应力,有较大蠕变应变。承受较大应力的蠕变区也有较大的蠕变变形,此时蠕变应变占主导地位,由于应变的不均匀,裂纹尖端承受压应力。随着裂纹长度增加,裂纹延伸进入高温蠕变区,这时裂纹尖端处于非稳定高温蠕变区,裂纹尖端承受拉应力。裂尖应力场的变化见图7。

瞬态温度场下, J 积分先上升后下降,然后趋向稳定, $C(t)$ 积分在初始阶段也是始终保持为正值。 $C(t)$ 积分为正值说明蠕变情形下裂纹有扩展趋势。这表明裂纹在初始阶段表现出较强的扩展趋势,经历一段时间的蠕变,裂纹向前扩展的驱动力减弱。

瞬态传热过程中产生与稳态传热过程中不同的应力应变场,导致 $C(t)$ 积分以及 J 积分表现出与稳态温

度场下完全不同的变化趋势。因此,对裂纹的扩展问题,应该将瞬态温度场与稳态温度场情形区分对待。

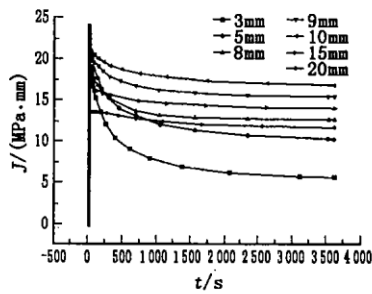
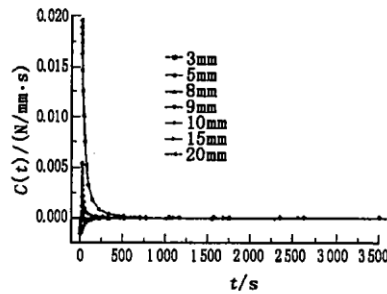
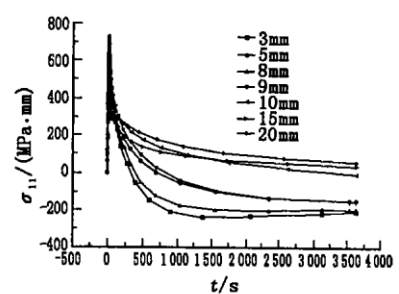
图5 瞬态温度场 J 积分数值结果图6 瞬态温度场 $C(t)$ 积分数值结果

图7 裂纹尖端应力随时间变化趋势

4 结论

本文考虑飞机发动机火焰筒的实际温度工作环境,建立瞬态温度场下的掺混孔孔边含裂纹的有限元分析模型,对瞬态传热和蠕变裂纹扩展趋势进行了有限元初步分析,所得结果显示:

1) 稳态温度场下 J 积分表现出增长的趋势, $C(t)$ 积分表现出向一稳定值收敛的趋势。

2) 瞬态温度场下,瞬态传热过程中温度梯度造成的应力分布不均匀,两种积分的数值结果出现跳跃。通过分析裂纹前端的实际应力状态以及 $C(t)$ 积分的物理意义,此现象与裂纹尖端的应力应变场直接相关。因此,对火焰筒进行瞬态温度场下裂纹扩展分析,必须充分考虑温度分布不均匀导致的应力分布不均匀。

3) 瞬态温度场下 J 积分和 $C(t)$ 积分的变化趋势显示,火焰筒孔边产生裂纹以后,开始有较强的扩展趋势。经过一段时间的蠕变以后,扩展驱动力减弱。

参考文献:

- [1] 柴国钟,张淑佳. 非稳态蠕变裂纹 $C(t)$ 积分和 $J(t)$ 积分的有限元分析[J]. 浙江工业大学学报,1998,26(3):177-183.
- [2] Yun-Jae Kim. Contour Integral Calculations for Generalised Creep Laws Within ABAQUS[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001,78:661-666.
- [3] HKS Inc. ABAQUS version 5.8, User's manual[M]. RI: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 1999.
- [4] 航空材料手册编写组. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

(编辑:姚树峰)

Research on J and $C(t)$ Integrals of Crack at the Edge of a Dilution Hole in Combustor's Liner at Transient Temperature

QIN Liang¹, ZHANG Ke-shi¹, GUO Yun-qiang¹, GENG Xiao-liang¹, DONG Shu-hui²

(1. Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. Shenyang Liming Aero-engine Group Corporation, Shenyang 110043, China)

Abstract: This paper analyzes the crack initiation and fatigue propagation at the edge of a dilution hole in combustor's liner at high temperature. A plane model with a crack at the edge of a round hole is built at high temperature and under anisothermal condition, and the numerical simulations via finite element method at stable temperature and transient temperature are performed respectively. Furthermore, the comparison between evaluations of stress intensity at crack tip respectively by J -integral and $C(t)$ -integral is made. According to the analysis, it is found that there is evident difference between the results J -integral and $C(t)$ integral under the conditions of stable and transient temperature. This phenomenon is tentatively discussed for the judgment of the crack fatigue propagation.

Key words: J -integral; $C(t)$ -integral; transient temperature field; crack front