

高温合金 CT 试样裂纹前沿应力分布及第二相影响的模拟计算

Simulation of Stress Distribution and Precipitate Influence at the Crack Tip of CT Sample in Superalloy

董建新, 张麦仓, 曾燕屏, 谢锡善 (北京科技大学, 北京 100083)

DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, ZENG Yan-ping, XIE Xi-shan
(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要: 利用有限元方法分析了 IN718 合金 CT 试样裂纹区域的应力应变分布、裂纹尖端应力强度因子及第二相状态对它的影响, 计算结果与实测数据基本一致, 表明采用有限元方法研究含裂纹体构件的蠕变行为是一种较好的研究手段。通过计算认为, IN718 合金在时效初期虽然有 γ -Cr 相的析出而不至于促进蠕变裂纹扩展, 是由于 γ -Cr 于相周围贫化区 (微塑性区) 内析出而处于微塑性区内使得裂纹尖端钝化, 不利于裂纹扩展。

关键词: 有限元模拟; 应力强度因子; 高温合金

中图分类号: TG14 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2003) 10-0026-03

Abstract: The stress distribution and precipitation phase around creep crack during the initial stage of creep crack propagation of IN718 alloy were investigated, and the stress intensity factor was calculated at different stress levels by using FEM calculation method. The agreement of the calculated data with the tested data shows that the FEM model and the calculation method are suitable for studying the effect of creep crack propagation in superalloys. Furthermore, the influence of precipitation phase and the plastic zone around the precipitation phase on stress distribution was studied. Calculation results show that the precipitation of γ -Cr phase within plastic zone does not promote the creep crack propagation.

Key words: FEM simulation; stress intensity factor; superalloy

目前对裂纹体的研究主要是通过计算裂纹区域和破坏结构的断裂参数来进行。通过数值计算的方法研究裂纹扩展问题一直以来是一个热门课题^[1-3]。本研究利用有限元计算方法, 基于蠕变裂纹非连续扩展的观点, 在介于宏观和微观之间的尺度上, 探讨蠕变裂纹尖端附近的应力应变场分布情况, 以及对裂纹尖端应力强度因子及第二相对它的影响, 并与实验数据进行了比较, 从而进一步为不同析出相对蠕变裂纹扩展影响的研究奠定理论研究基础。

1 模型建立与分析方法

本研究是根据标准紧凑拉伸试样 (CT 试样) 建立实体模型并进行网格划分的。由于试样是对称的, 只须模拟裂纹区的一半, 其 2-D 模型如图 1 所示。图 1 中 ef 段是线切割的部分, fa 段是预制部分的裂纹。加载和约束情况如图 1 所示, 即裂纹尖端 a 在 X 和 Y 方向上位移为 0, ab 段无 Y 方向上的位移; 同时在 hjk 圆弧段施加均匀的载荷。

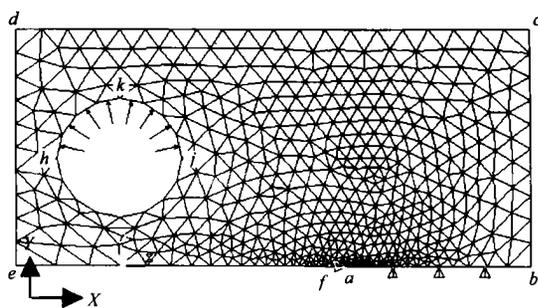


图 1 有限元模型及其加载约束情况

Fig. 1 FEM model and its restrict situation

计算材料采用 IN718 合金, 基体的弹性模量 $E = 183.9\text{GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.31$, 屈服强度 $\sigma_s = 1140\text{MPa}$ 。依据材料实际受力时的情况, 材料在变形过程中, 局部区域由于应力集中可能由弹性状态转变为塑性状态。所以除了要输入基体的弹性模量和泊松比之外, 还要输入材料的拉伸曲线 (真应力-真应变曲线)。

2 计算结果与分析

2.1 应力应变分布

图 2 为 $P = 40\text{MPa}$ 时的裂纹尖端 VonMises 等效应力分布图。从图中可以看到大部分基体仍处于弹性的低应力状态，而裂纹尖端区域是应力最大区域。因为考虑了材料性能的非线性，计算得到了裂纹尖端的塑性区。该塑性区的存在使得裂纹尖端的应力奇异点消失。在以后的分析中，主要围绕这一区域进行研究。

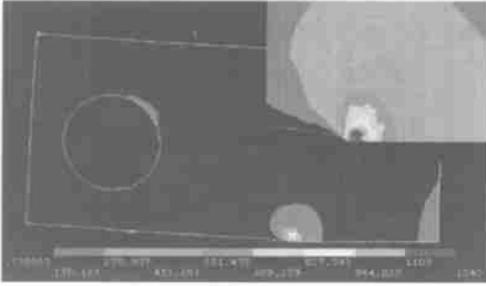


图 2 等效应力分布 ($P = 40\text{MPa}$) 及裂纹尖端局部放大
Fig. 2 Stress distribution around crack and its magnification map

裂纹前方的应力应变分布强烈地影响着裂纹扩展，控制着裂纹扩展驱动力，必须对此进行详细地分析。经过计算，得到裂纹前方 X 方向上应力应变分布如图 3。从图中可以看出，在弹性状态下应力和应变随着距离的增加迅速降低；而当应力逐渐增加时，裂纹

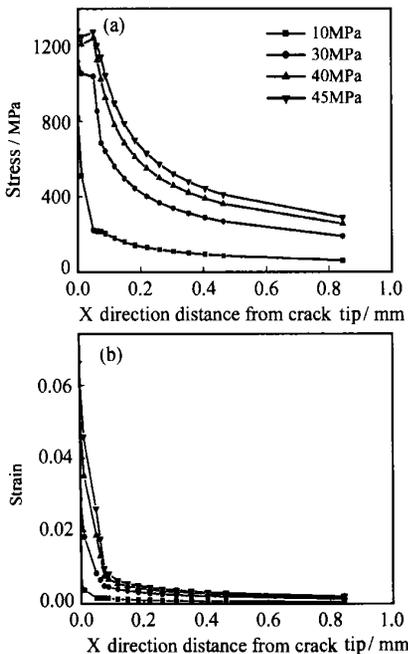


图 3 裂纹前方的应力应变分布
Fig. 3 Distribution of stress and strain in front

前方开始进入屈服状态，如当外载荷 $P = 40\text{MPa}$ 和 45MPa 时，在裂纹前方很小的范围内应力几乎不变，而应变还是增加，形成了一个小范围的塑性区。

2.2 应力强度因子

因为裂纹前方存在塑性区，所以不能直接用线弹性条件下导出应力强度因子。ANSYS 软件采用数值计算方法计算应力强度因子，在裂纹表面取两个节点的计算位移来推算。

本研究所进行的蠕变实验是在仿 2 型高温裂纹扩展速率试验机上进行的。试验是在预先给定一个应力强度因子 K 以后， P 按下式计算：

$$K = \frac{P}{B} \frac{f}{W} (aw)$$

其中： B 为试样厚度， W 是受力点到边沿的长度， f 是一个函数因子。然后在给定的外力下，用 ANSYS 有限元软件计算了各自的应力强度因子，结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出计算值与实验值相差不大，尤其是在外力低时，两者非常接近。表明用 ANSYS 有限元软件计算应力强度因子基本上是符合实际情况的。

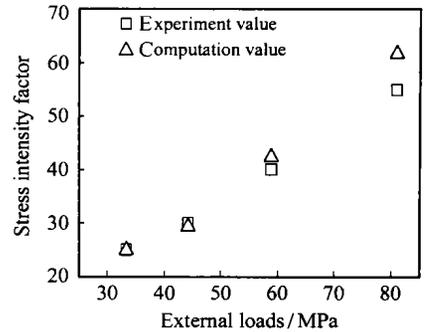


图 4 应力强度因子的比较
Fig. 4 Stress intensity factor vs external load

2.3 第二相对强度因子的影响

模拟在裂纹尖端存在一个硬颗粒，此颗粒处于塑性层的包围之中（如图 5）。与裂纹前沿没有第二相相比（此时应力强度因子为 K_{10} ），应力最大值分布在颗粒内，应变最大值则分布于裂尖，同时塑性层内也有较大应变。应力强度因子降低到约 $0.55K_{10}$ 。

通常认为，IN718 合金晶界上分布的粒状或短棒状相对裂纹扩展有着机械阻挡的作用。本研究的模拟分析认为，IN718 合金经过长期高温时效后，相周围出现了贫相的“软化区”，在相周围出现了塑性层，这也是相阻止裂纹扩展的重要原因。 $-Cr$ 相经常在相旁边析出^[4]，刚析出时尺寸比较小，所以仍然处于相周围的塑性层内，此时的 $-Cr$ 也不会造成裂纹的快速扩展。

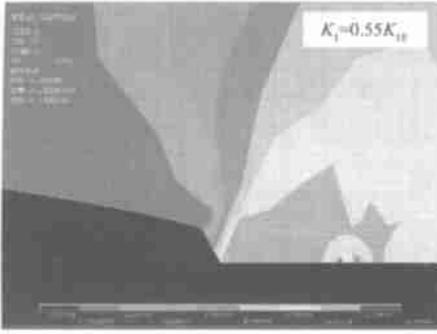


图 5 裂尖颗粒处于塑性层中的模拟 (y 方向应力分布)

Fig. 5 Stress distribution as particle within the plastic zone

如果析出相周围没有塑性层, $-Cr$ 就不再是阻碍裂纹扩展的因素了。试样加载后, 应力应变分布如图 6 所示。虽然应力最大值分布在颗粒内, 但是裂纹尖端的应力集中也很严重, 裂尖 y 方向应力比没有孔洞也没有颗粒的情形下的裂尖应力高两倍。应力强度因子也从有塑性层包围时的 $0.55K_{I0}$ 增加到 $1.0004 K_{I0}$ 。

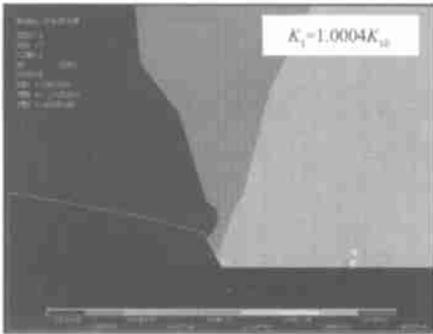


图 6 裂尖颗粒周围没有塑性层的模拟 (y 方向应力分布)

Fig.6 Stress distribution as particle without plastic zone

从以上计算结果可以看出, 裂尖存在硬颗粒能够促进裂纹的萌生与扩展。进一步的计算表明, 如果硬颗粒距离裂尖的距离更近, 则裂尖应力集中更严重, 对裂纹扩展的促进作用也更明显。有关第二相析出颗粒性质分布大小等对它的影响, 并结合具体的 IN718 合金时效过程中和 $-Cr$ 相对蠕变裂纹扩展的贡献有待进一步分析。

3 结论

(1) 可以用有限元方法对紧凑拉伸试样裂纹前沿的应力情况进行模拟计算, 模拟中关键在于模型的建立及描述好裂纹区域的情况。

(2) 通过模拟计算, 可以给出裂纹周围各单元应力的演变情况及对应的应力强度因子, 其计算值与实

验值基本吻合。

(3) IN718 合金中 $-Cr$ 的析出并不至于促进蠕变裂纹扩展, 这是由于 $-Cr$ 处于相周围的贫化区——微塑性区内, 微塑性区使得裂纹尖端钝化, 不利于裂纹扩展。

参考文献

[1] BROCKS W. Numerical investigations on the significance of J for large stable crack growth [J]. Engineering Fracture Mech, 1989, (32): 459- 468.

[2] 杨庆生, 杨卫. 断裂过程的有限元模拟 [J]. 计算力学学报, 1997, 14 (4): 407- 412.

[3] 朱文浩. 幂硬化材料平面应力裂纹稳定扩展的有限元模拟 [J]. 航空学报, 1995, 16 (2): 247- 252.

[4] 董建新, 张麦仓, 曾燕屏, 谢锡善 [J]. 北京科技大学学报, 2002, 24: 186.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50171005)

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2003-08-18

作者简介: 董建新 (1965-), 男, 博士/教授, 主要研究方向为高温合金、耐热耐蚀合金、材料仿真和优化设计等, 联系地址: 北京科技大学材料学院高温材料及应用研究室 (100083)。

* * * * *

第八届中国国际质量控制与测试工业设备展览会 暨第八届中国国际无损检测技术及设备展览会 第八届中国国际物理测试与材料试验机展览会 第八届中国国际分析仪器与实验室设备展览会

主办单位: 上海材料研究所

承办单位: 上海华亿展览广告有限公司
中国贸促会机械行业分会

支持单位: 中国机械工业联合会
中国国际商会机械行业商会
中国机械工程学会无损检测分会
中国机械工程学会理化检验分会
中国机械工程学会材料分会
机械工业材料性能测试技术中心

时 间: 2003 年 11 月 11- 14 日

地 址: 上海国际展览中心

本届展会将集中展出当今世界最先进的测试仪器与检测设备, 同期还将举办多场新技术、新产品交流会。我们将以热忱宽广的胸怀接纳国内外宾朋, 为中外展商提供一个技术交流、贸易洽谈、寻求技术合作和经济合作伙伴的舞台。让我们期盼这一盛会的到来, 欢迎国内外专业人士前来参观。

有关展会详情可查询: 中国材料与测试网 (<http://www.mat-test.com>) 电话: 021-65556775-366 联系人: 王为纲 樊晓艳