

一种镍基高温合金部件循环蠕变及裂纹扩展研究

管迎博 蔡兴彪

东方汽轮机有限公司 四川德阳 618000

摘要: 本文对优质GH4169甩油孔模拟试样以及自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样进行了相关高温循环蠕变试验,并对自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样在高温循环蠕变过程中的裂纹扩展进行了研究。所有断裂后的断口采用SEM电镜扫描观察细观断口形貌。

关键词: 镍基高温合金; 循环蠕变; 裂纹扩展

引言

当材料在高温情况下,在恒定应力的长期作用下发生塑性变形的现象,称为静蠕变。若材料受到的是循环应力的作用,则称为循环蠕变。在循环蠕变加载下材料既会受到疲劳损伤又会受到高温蠕变损伤,还会受到二者交互作用的损伤,造成材料性能劣化影响寿命。

目前很多研究学者已经展开了对材料承受循环蠕变疲劳作用力学行为的研究。范志超等在循环蠕变本构模型和延性耗散理论的基础上,提出一种循环蠕变与疲劳交互作用下的损伤力学模型,该模型能综合反映循环蠕变的损伤描述。并且,当发生疲劳蠕变交互作用时,疲劳引起晶内塑性延性耗散,蠕变引起晶界蠕变延性耗散,二者相互促进、相互叠加,加速材料的破坏,这对于材料延性的充分发挥最为不利,从而导致塑性延性和蠕变延性都没有发挥到极至,材料就已经发生断裂。文献研究了我国第二代镍基单晶高温合金DD6的高温循环蠕变性能,进行了一系列含气膜孔和不含气膜孔平板试样的循环蠕变试验,得出了不含气膜孔平板试样蠕变损伤起主要作用,含气膜孔试样疲劳损伤起主要作用。文献从“等效裂纹”扩展导致材料破坏角度出发,将一个循环内裂纹扩展分成时间无关疲劳裂纹扩展、时间相关的静蠕变裂纹扩展和循环蠕变裂纹扩展三部分。得到了一种基于微裂纹扩展的疲劳蠕变寿命预测方程。在蠕变-疲劳交互作用的寿命预测方面,陈立杰系统的研究了GH4049高温合金的循环蠕变力学行为,基于低循环疲劳寿命预测的幂指函数模型给出了循环蠕变作用下的寿命预测模型,并对涡轮叶片的蠕变-疲劳交互作用寿命预测结果进行了验证。

现阶段对循环蠕变加载下疲劳寿命的研究较多,但

对裂纹扩展的研究相对较少,难以满足工程需求。于强对循环蠕变加载下疲劳裂纹扩展速率进行了探讨,提出了以能量密度为损伤参量,参照单轴疲劳加载的研究方法,导出了循环蠕变加载下疲劳短裂纹扩展速率的计算公式。但仅限于理论研究,缺少试验方面的验证。其他研究,也注意到了机械疲劳与蠕变的交互作用对构件寿命的影响。而关于裂纹扩展速率的计算,研究提出可以将总的扩展量分解为与时间无关的机械疲劳裂纹扩展和与时间相关的蠕变裂纹扩展,然后再将这两者进行线性叠加的方法来描述裂纹扩展。

优质GH4169相对于普通GH4169,在合金的碳、铌、硫和气体含量的控制更严格,已用于制作航空发动机各个高温关键部位。本文将对两种形式集中应力缺口的优质GH4169进行循环蠕变试验研究,并对其裂纹扩展速率公式的拟合。

一、试验材料及试验过程

1. 取样说明

试验试样需从甩油盘毛坯割取。为满足数量以及尺寸要求,试样设计直径为16mm,为留出下一步加工余量,取材按照直径17mm,采用线切割方法沿甩油盘毛坯弦向割取,两个甩油盘共割取14个试样毛坯。

2. 试验材料

鉴于本试验要求测量疲劳裂纹,需采用板状试样进行试验,进一步为满足试验应力集中水平的要求,经过有限元计算,两种模拟试样采用以下形式(见图1)。

3. 集中应力计算及试验过程

在试样的设计过程中,采用有限元软件Abaqus对两种试样缺口处的应力集中情况进行了计算,见表1。

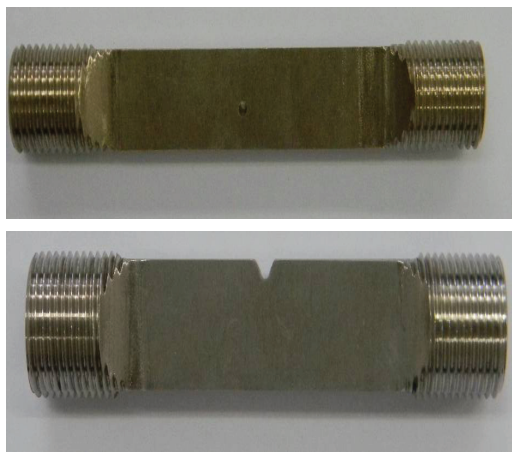


图1 优质GH4169甩油孔模拟试样(上)以及自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样(下)实物图

表1 Abaqus计算集中应力结果

GH4169集中槽板模拟试样	最大拉伸方向应力/MPa	平均拉伸方向应力/MPa	应力集中系数
	1470.17	483.811	3.038
GH4169集中槽板模拟试样	最大Mises应力/MPa	平均Mises应力/MPa	
	1233	446.858	
GH4169甩油孔模拟试样	最大拉伸方向应力/MPa	平均拉伸方向应力/MPa	应力集中系数
	1245.18	525.979	2.37
GH4169甩油孔模拟试样	最大mises应力/MPa	平均mises应力/MPa	
	1166.33	505.453	

优质GH4169合金甩油孔模拟试样和自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样的循环蠕变及裂纹扩展试验,有效试验数分布及试验要求见表2,表3。每种温度下有效试验数板状试样6根,共12个。

表2 GH4169合金甩油孔模拟试样循环蠕变试验

材料	Kt	截面最大平均应力	温度/℃	R	加载/卸载	保载时间
GH4169	2.3	526MPa	526	0.1	1s	1s
GH4169	2.3	579MPa	526	0.1	1s	1s

表3 GH4169合金自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样循环及裂纹扩展试验

材料	Kt	截面最大平均应力	温度/℃	R	加载/卸载	保载时间
GH4169	3.0	482MPa	600	0.1	1s	2s

优质GH4169的甩油孔模拟试样和自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样的循环蠕变试验,参照GB/T15248-94《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》,所有试验在Instron

公司产Instron8801液压伺服高温疲劳试验机上完成。

二、试验结果

优质GH4169高温合金甩油孔循环蠕变试验结果如表4所示,可以看出来,在300℃,526MPa条件下,优质GH4169甩油孔形式试样的循环次数达到50000次还未发生断裂,宏观上也没有观察到裂纹的产生。而将应力水平提高到579MPa后,试验的循环次数基本都在29000次左右发生断裂,循环蠕变的寿命为24h左右。

表4 优质GH4169甩油孔模拟试样循环蠕变试验结果

序号	截面最大平均应力	Kt	温度/℃	孔径/mm	循环次数	循环蠕变寿命
1	526MPa	2.3	300	1.7	50000 (未断裂)	>41.6h
2	526MPa				50000 (未断裂)	>41.6h
3	526MPa				50000 (未断裂)	>41.6h
4	579MPa				28932	24.11h
5	579MPa				29822	24.85h
6	579MPa				29606	24.67h

优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽试样循环蠕变结果如表5所示,可以看到,在600℃,482MPa条件下,优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽试样的循环次数大致在4800次左右。在试验过程的前期和中期,裂纹扩展规律明显,在后期,裂纹会迅速扩展导致试样发生断裂。所有试样循环蠕变寿命都在5.4h左右。

表5 优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样循环蠕变试验结果

序号	截面最大平均应力	Kt	温度/℃	循环次数	循环蠕变寿命
1	482MPa	3.0	600	4914	5.46h
2				4800	5.33h
3				4784	5.31h
4				4861	5.40h
5				4880	5.42h

通过查询高温合金材料手册,优质GH4169在300℃,576MPa和600℃,482MPa条件下的蠕变和疲劳寿命均远大于本次试验循环蠕变寿命。这一方面是由于本文试验试样有甩油孔和缺口这样的集中应力影响,使寿命变短。第二也验证了循环蠕变荷载下造成的材料损伤比纯蠕变和纯疲劳荷载下造成的损伤要大,寿命也相应更短。

结论

本文对优质GH4169甩油孔模拟试样以及自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样进行了相关高温循环蠕变试验，并对自由涡轮盘轮缘榫槽模拟试样在高温循环蠕变过程中的裂纹扩展进行了研究。所有断裂后的断口采用SEM电镜扫描观察细观断口形貌。得到结论如下：

(1) 优质GH4169甩油孔模拟试样在300℃，579MPa作用下循环蠕变次数在29000次左右发生断裂，循环蠕变的寿命为24h左右。优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽试样在600℃，482MPa条件下，循环次数大致在4800次左右，循环蠕变寿命在5.4h左右。

(2) 优质GH4169在循环蠕变荷载下造成的材料损伤比纯蠕变和纯疲劳荷载下造成的损伤要大，寿命也相应更短。

(3) 根据试验结果拟合优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽试样在600℃，482MPa条件下的裂纹扩展速率，呈线性关系，裂纹扩展速率公式：

$$\log(da/dN) = 0.82837 \log \Delta K - 8.40201$$

(4) 优质GH4169高温合金甩油孔试样在300℃，579MPa循环蠕变加载下，微观断口显示沿缺口分布有多个疲劳裂纹源，在裂纹扩展区有呈辐射状条纹，其他部

位均有韧窝的出现。

(5) 优质GH4169自由涡轮盘轮缘榫槽试样在600℃，482MPa循环蠕变加载下，微观断口显示，裂纹源在试样内部萌生。沿缺口分布有多个疲劳裂纹源，在裂纹扩展区有呈辐射状条纹。其他部位有韧窝的出现，且观察到二相粒子夹杂的存在，这些二相粒子夹杂在循环蠕变过程中对裂纹扩展过程具有加速作用。

参考文献

- [1] 贺斟酌. 镍基单晶涡轮叶片循环蠕变特性及寿命预测方法研究[D]. 中南大学, 2023.
- [2] 石多奇, 张雨曼, 隋天校, 等. 单晶涡轮叶片典型任务循环蠕变分析[J]. 航空动力学报, 2024: 1-9.
- [3] 陈学东, 范志超, 陈凌, 等. 三种疲劳蠕变交互作用寿命预测模型的比较及其应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 62-68.
- [4] 周煜, 范志超, 姜恒, 等. 改进Logistic蠕变应变预测模型及其有限元实现[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 82-89.
- [5] 卿华, 江和甫, 温卫东, 等. DD6单晶合金循环蠕变性能研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007(3): 51-56.