



(10) 授权公告号 CN 115048832 B

(45) 授权公告日 2025. 04. 22

(21) 申请号 202210579604.0

(22) 申请日 2022.05.25

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115048832 A

(43) 申请公布日 2022.09.13

(73) 专利权人 华东理工大学

地址 200237 上海市徐汇区梅陇路130号

专利权人 中国联合重型燃气轮机技术有限公司

苏州热工研究院有限公司

(72) 发明人 张昱程 卢荣生 杨杰 涂善东

赵宇辰 张丁午 束国刚 张国栋

夏咸喜 谈建平 唐敏锦 石俊秒

(74) 专利代理机构 北京方圆嘉禾知识产权代理有限公司 11385

专利代理师 程华

(51) Int.Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G01N 3/18 (2006.01)

G06F 113/14 (2020.01)

G06F 119/04 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 112380656 A, 2021.02.19

CN 113654918 A, 2021.11.16

审查员 徐生芹

权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统

(57) 摘要

本发明涉及一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统,涉及损伤容限领域,方法包括:建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型并进行数值计算,得到管道内裂纹尖端的应力强度因子;获取裂纹扩展模型和管道裂纹尺寸;根据管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率;根据应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命;根据管道裂纹尺寸确定断裂韧性;根据断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度;根据裂纹扩展寿命和剩余强度,构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图。本发明能够为管道结构的损伤容限评定提供思路,助力管道的断裂评定和剩余寿命预测,并对其结构的维护和检修提供指导建议。



1. 一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法,其特征在于,包括:
建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型;
对所述管道有限元模型进行数值计算,得到管道内裂纹尖端的应力强度因子;
获取裂纹扩展模型;
获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸;

根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率,所述裂纹扩展速率采用如下公式计算:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n + A(K_{\max})^m \cdot t_h + D(\Delta K)^q \cdot \exp\left(-p_1(\ln f + p_2 \Delta K + p_3)^2\right)$$

$$K_{\max} = \Delta K / (1-R)$$

$$f = (T + t_h)^{-1}$$

其中, da/dN 为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子范围变量; C 和 n 是由疲劳裂纹扩展实验获得的拟合参数; A 和 m 是由蠕变裂纹扩展实验获得的拟合参数; D, q, p_1, p_2, p_3 均为材料参数; $K_{\max}$ 为最大应力强度因子; R 为应力比; f 为频率; T 为加卸载过程的周期; t_h 为蠕变载荷保持时间;

根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命,所述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的寿命,所述裂纹扩展寿命采用如下公式计算:

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(da/dN)} da$$

其中, N 为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; a_c 为临界裂纹尺寸;

根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性;

根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度;

根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度,构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图,所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

2. 根据权利要求1所述的蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法,其特征在于,所述应力强度因子采用如下公式计算:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

其中, K 为应力强度因子; Y 为形状系数; σ 为应力; a 为裂纹尺寸。

3. 根据权利要求1所述的蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法,其特征在于,所述剩余强度采用如下公式计算:

$$\sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c}$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}}$$

其中, σ_{rs} 为剩余强度; K_{IC} 是用临界裂纹尖端应力强度因子表示的断裂韧性,记为第一断裂韧性; a_c 为临界裂纹尺寸; E 为管道材料的弹性模量; ν 为管道材料的泊松比, J_{IC} 是用临界 J

积分表示的断裂韧性,记为第二断裂韧性。

4.一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统,其特征在于,包括:

管道有限元模型建立模块,用于建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型;

应力强度因子计算模块,用于对所述管道有限元模型进行数值计算,得到管道内裂纹尖端的应力强度因子;

裂纹扩展模型获取模块,用于获取裂纹扩展模型;

管道裂纹尺寸获取模块,用于获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸;

蠕变疲劳裂纹扩展速率确定模块,用于根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率,所述蠕变疲劳裂纹扩展速率确定模块采用如下公式计算:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n + A(K_{\max})^m \cdot t_h + D(\Delta K)^q \cdot \exp\left(-p_1 (\ln f + p_2 \Delta K + p_3)^2\right)$$

$$K_{\max} = \Delta K / (1-R)$$

$$f = (T+t_h)^{-1}$$

其中, da/dN 为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子范围变量; C 和 n 是由疲劳裂纹扩展实验获得的拟合参数; A 和 m 是由蠕变裂纹扩展实验获得的拟合参数; D, q, p_1, p_2, p_3 均为材料参数; $K_{\max}$ 为最大应力强度因子; R 为应力比; f 为频率; T 为加卸载过程的周期; t_h 为蠕变载荷保持时间;

裂纹扩展寿命计算模块,用于根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命,所述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的寿命,所述裂纹扩展寿命计算模块采用如下公式计算:

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(da/dN)} da$$

其中, N 为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; a_c 为临界裂纹尺寸;

断裂韧性确定模块,用于根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性;

剩余强度计算模块,用于根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度;

损伤容限评定模块,用于根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度,构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图,所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

5.根据权利要求4所述的蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统,其特征在于,所述应力强度因子计算模块采用如下公式计算:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

其中, K 为应力强度因子; Y 为形状系数; σ 为应力; a 为裂纹尺寸。

6.根据权利要求4所述的蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统,其特征在于,所述剩余强度计算模块采用如下公式计算:

$$\sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c}$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}}$$

其中, σ_{rs} 为剩余强度; K_{Ic} 是用临界裂纹尖端应力强度因子表示的断裂韧性,记为第一断裂韧性; a_c 为临界裂纹尺寸; E 为管道材料的弹性模量; ν 为管道材料的泊松比, J_{Ic} 是用临界J积分表示的断裂韧性,记为第二断裂韧性。

蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及损伤容限领域,特别是涉及一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道结构损伤容限评定方法。

背景技术

[0002] 随着断裂力学理论的发展,以及对复杂结构在加工、运输、使用中的失效分析需求增加,学者们逐渐认识到损伤容限评定是必要的。损伤容限理论是为了确立结构剩余强度,裂纹扩展速率与设备检修周期三者关系而存在一种结构设计理论。而失效主要是由结构内部不易发现的裂纹引起的,裂纹会在载荷的作用下增加构件失效的风险。随着使用时间的增加,长期处于恶劣的工作环境中,导致复杂结构的剩余寿命大幅减少。

[0003] 随着对设备可靠性与剩余强度的要求不断提高,学者们开始关注含裂纹结构的损伤容限评定方法。因此,本发明提出一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统,基于本发明的方法可以获得与含裂纹管道裂纹尺寸相关的应力强度因子、裂纹扩展寿命、断裂韧性和剩余强度等关键指标,以此对含裂纹管道进行损伤容限评定。该方法对于研究管道结构损伤容限评定有着重要意义。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统,为管道结构的损伤容限评定提供思路,助力管道的断裂评定和剩余寿命预测,并对其结构的维护和检修提供指导建议。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0006] 一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法,包括:

[0007] 建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型;

[0008] 对所述管道有限元模型进行数值计算,得到管道内裂纹尖端的应力强度因子;

[0009] 获取裂纹扩展模型;

[0010] 获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸;

[0011] 根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率;

[0012] 根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命,所述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的寿命;

[0013] 根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性;

[0014] 根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度;

[0015] 根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度,构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图,所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

[0016] 可选的,所述应力强度因子采用如下公式计算:

$$[0017] \quad K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

[0018] 其中,K为应力强度因子;Y为形状系数; σ 为应力;a为裂纹尺寸。

[0019] 可选的,所述裂纹扩展速率采用如下公式计算:

$$[0020] \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n + A(K_{\max})^m \cdot t_h + D(\Delta K)^q \cdot \exp(-p_1(\ln f + p_2 \Delta K + p_3)^2)$$

$$[0021] \quad K_{\max} = \Delta K / (1 - R)$$

$$[0022] \quad f = (T + t_h)^{-1}$$

[0023] 其中, da/dN 为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子范围变量; C 和 n 是由疲劳裂纹扩展实验获得的拟合参数; A 和 m 是由蠕变裂纹扩展实验获得的拟合参数; D, q, p_1, p_2, p_3 均为材料参数; $K_{\max}$ 为最大应力强度因子; R 为应力比; f 为频率; T 为加卸载过程的周期; t_h 为蠕变载荷保持时间。

[0024] 可选的,所述裂纹扩展寿命采用如下公式计算:

$$[0025] \quad N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(da/dN)} da$$

[0026] 其中, N 为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; a_c 为临界裂纹尺寸。

[0027] 可选的,所述剩余强度采用如下公式计算:

$$[0028] \quad \sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c}$$

$$[0029] \quad K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}}$$

[0030] 其中, σ_{rs} 为剩余强度; K_{IC} 是用临界裂纹尖端应力强度因子表示的断裂韧性, 记为第一断裂韧性; a_c 为临界裂纹尺寸; E 为管道材料的弹性模量; ν 为管道材料的泊松比, J_{IC} 是用临界 J 积分表示的断裂韧性, 记为第二断裂韧性。

[0031] 一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统, 包括:

[0032] 管道有限元模型建立模块, 用于建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型;

[0033] 应力强度因子计算模块, 用于对所述管道有限元模型进行数值计算, 得到管道内裂纹尖端的应力强度因子;

[0034] 裂纹扩展模型获取模块, 用于获取裂纹扩展模型;

[0035] 管道裂纹尺寸获取模块, 用于获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸;

[0036] 蠕变疲劳裂纹扩展速率确定模块, 用于根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率;

[0037] 裂纹扩展寿命计算模块, 用于根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命, 所述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的时间;

[0038] 断裂韧性确定模块, 用于根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性;

[0039] 剩余强度计算模块, 用于根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度;

[0040] 损伤容限评定模块, 用于根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度, 构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图, 所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

[0041] 可选的,所述应力强度因子计算模块采用如下公式计算:

$$[0042] \quad K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

[0043] 其中,K为应力强度因子;Y为形状系数; σ 为应力;a为裂纹尺寸。

[0044] 可选的,所述蠕变疲劳裂纹扩展速率确定模块采用如下公式计算:

$$[0045] \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n + A(K_{\max})^m \cdot t_h + D(\Delta K)^q \cdot \exp(-p_1(\ln f + p_2 \Delta K + p_3)^2)$$

$$[0046] \quad K_{\max} = \Delta K / (1 - R)$$

$$[0047] \quad f = (T + t_h)^{-1}$$

[0048] 其中,da/dN为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子范围变量;C和n是由疲劳裂纹扩展实验获得的拟合参数;A和m是由蠕变裂纹扩展实验获得的拟合参数;D,q,p1,p2,p3均为材料参数; $K_{\max}$ 为最大应力强度因子;R为应力比;f为频率;T为加卸载过程的周期; t_h 为蠕变载荷保持时间。

[0049] 可选的,所述裂纹扩展寿命计算模块采用如下公式计算:

$$[0050] \quad N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(da/dN)} da$$

[0051] 其中,N为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; a_c 为临界裂纹尺寸。

[0052] 可选的,所述剩余强度计算模块采用如下公式计算:

$$[0053] \quad \sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c}$$

$$[0054] \quad K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}}$$

[0055] 其中, σ_{rs} 为剩余强度; K_{IC} 为第一断裂韧性; a_c 为临界裂纹尺寸;E为管道材料的弹性模量; ν 为管道材料的泊松比; J_{IC} 为第二断裂韧性。

[0056] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0057] 本发明提出蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统,基于该方法可以获得与含裂纹管道裂纹尺寸相关的应力强度因子、裂纹扩展寿命、断裂韧性和剩余强度等关键指标,以此对含裂纹管道进行损伤容限评定。该方法对于研究管道结构损伤容限评定有着重要意义。

附图说明

[0058] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0059] 图1为本发明蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法流程图;

[0060] 图2为本发明实施例中选用管道的几何尺寸与裂纹尺寸图;

[0061] 图3A为本发明实施例中二分之一管道结构有限元模型图;

[0062] 图3B为管道有限元模型裂尖局部细化的网格图;

- [0063] 图4为本发明实施例中管道的裂纹扩展寿命曲线图；
- [0064] 图5为本发明实施例中所用材料DP2-A52钢的断裂韧性与拘束参数 A_d 之间的 $J_{IC}/J_{ref}-A_d$ 关联线图；
- [0065] 图6为本发明实施例中根据建立的含不同尺寸裂纹管道的有限元模型,获得J积分与拘束参数 A_d 之间的 $J/J_{ref}-A_d$ 关联线图；
- [0066] 图7为本发明实施例中断裂曲线与开动力曲线的交互图；
- [0067] 图8为本发明实施例中含不同尺寸裂纹管道的剩余强度曲线图；
- [0068] 图9为本发明实施例中蠕变疲劳载荷作用下高温管道结构的损伤容限评定图；
- [0069] 图10为本发明蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统模块图。

具体实施方式

[0070] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0071] 本发明的目的是提供一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法及系统,为管道结构的损伤容限评定提供思路,助力管道的断裂评定和剩余寿命预测,并对其结构的维护和检修提供指导建议。

[0072] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0073] 如图1所示,本发明提供一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定方法,包括以下步骤:

[0074] 步骤101:建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型。

[0075] 步骤101具体为:根据管道结构的真实几何和真实工况,在ABAQUS中建立含有不同尺寸裂纹的管道的有限元模型,设置合适的载荷与边界条件,并将其材料对应的本构参数输入模型,进一步包括以下步骤:

[0076] 步骤S11:如图2所示,管道的外径为406mm,内半径为396.5mm,壁厚为9.5mm。在有限元软件ABAQUS中建立含不同尺寸裂纹的管道模型,根据管道的对称性,选取二分之一结构建立有限元模型,如图3A所示。管道所受内的工作压力为1.55MPa,内压所产生的轴向力为15.41MPa。管道试样材料选用DP2-A52钢,将本模型中用到的DP2-A52钢的本构参数输入模型,如表1所示:

[0077] 表1:本模型中用到的DP2-A52钢的本构参数

材料属性		
弹性	$E = 224\text{GPa}$	$\nu = 0.3$
塑性	$\sigma = 150$	$\varepsilon = 0$
[0078]	$\sigma = 554$	$\varepsilon = 0.2$
	$\sigma = 745$	$\varepsilon = 0.4$
	$\sigma = 892$	$\varepsilon = 0.6$
	$\sigma = 1012$	$\varepsilon = 0.8$
	$\sigma = 1115$	$\varepsilon = 1$

[0079] 步骤S12:通过Interaction模块,在管道模型中添加不同尺寸的裂纹,裂纹尺寸假设分别为16.7mm、33.4mm、41.7mm。所有模型均采用线性减缩积分三维单元(C3D8R)进行分析,裂纹前端采用较细的网格划分,如图3B所示。该模型共包含60080个单元。

[0080] 步骤102:对所述管道有限元模型进行数值计算,得到管道内裂纹尖端的应力强度因子。

[0081] 步骤102具体为:对含有不同尺寸裂纹管道的有限元模型进行数值计算,获取含有不同尺寸裂纹时管道内裂纹尖端的应力强度因子,进一步包括以下步骤:

[0082] 步骤S21:有限元计算时,在Step模块中的History Output Request界面,添加所设置裂纹应力强度因子K的历史输出变量;

[0083] 步骤S22:对4个含不同裂纹尺寸的管道模型进行有限元计算,计算完成后,在Visualization模块,获得应力强度因子K的历史输出数据,应力强度因子K和裂纹的尺寸满足如下关系式:

[0084]
$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

[0085] 式中,Y为形状系数; σ 为应力;a为裂纹尺寸。

[0086] 形状系数Y可通过上式拟合求出,具体数据如表2所示:

[0087] 表2:含有不同裂纹尺寸管道的应力强度因子K

[0088]

裂 纹 $a(\text{mm})$	形状系数 Y	应 力 σ (MPa)	应力强度因子 $K (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
1.9	4.779	1.55	18.097
3.8	4.486	1.55	24.026
4.75	4.372	1.55	26.177

[0089]

[0090] 步骤103:获取裂纹扩展模型。

[0091] 步骤104:获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸。

[0092] 步骤105:根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率。

[0093] 步骤106:根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命,所

述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的寿命。

[0094] 步骤103-106具体为:确定管道裂纹尺寸相关的蠕变疲劳裂纹扩展速率,并进一步计算裂纹从某一初始尺寸 a_0 扩展到某一临界尺寸 a_c 所经历的寿命;具体包括以下步骤:

[0095] 步骤S31:根据已公布文献[Yang H,Bao R,Zhang J,et al.Crack growth behaviour of a nickel-based powder metallurgy superalloy under elevated temperature[J].International Journal of Fatigue,2011,33(4):632-641.],选择Yang的裂纹扩展模型,该模型以应力强度因子 K 为断裂参量,并且可以较为准确地描述构件的裂纹扩展行为,裂纹扩展速率曲线满足如下关系式:

$$[0096] \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n + A(K_{\max})^m \cdot t_h + D(\Delta K)^q \cdot \exp(-p_1(\ln f + p_2 \Delta K + p_3)^2)$$

$$[0097] \quad K_{\max} = \Delta K / (1-R)$$

$$[0098] \quad f = (T+t_h)^{-1}$$

[0099] 式中, da/dN 为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子范围变量; C 和 n 由疲劳裂纹扩展实验获得的拟合参数; A 和 m 由蠕变裂纹扩展实验获得的拟合参数; D, q, p_1, p_2, p_3 均为材料参数; $K_{\max}$ 为最大应力强度因子; R 为应力比; f 为启停机频率; T 为加卸载过程的时间; t_h 为管道持续运行时间。具体数据如表3所示:

[0100] 表3:裂纹扩展模型参数数据

[0101]	C	n	A	m	D	q	p_1	p_2	p_3	R	T	t_h
	2.13E-08	3.174	1.34E-16	6.858	3.06E-12	6.089	0.605	-0.01	5.92	0	8000	2592000

[0102] 步骤S32:根据选定的裂纹扩展模型,对裂纹尺寸 a 进行积分,求得构件的裂纹扩展寿命,获得含有不同裂纹尺寸管道的裂纹扩展寿命曲线,如图4所示。其寿命满足如下关系式:

$$[0103] \quad N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{(da/dN)} da$$

[0104] 式中, N 为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸,本实施例中假设 a_0 为0.5mm; a_c 为临界裂纹尺寸, a 是裂纹长度, da 是两个时刻之间裂纹的差值, dN 是两个时刻之间循环周次的差值,其中,当积分上限 a_c 为不同的尺寸的裂纹时,求解出的裂纹扩展寿命也不同。

[0105] 步骤107:根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性。

[0106] 步骤107具体为:计算管道裂纹尺寸相关的断裂韧性,其中, K_{IC} 是用临界裂纹尖端应力强度因子表示的断裂韧性,记为第一断裂韧性; J_{IC} 是用临界J积分表示的断裂韧性,记为第二断裂韧性;还有 δ_c 是用临界裂纹尖端张开位移表示的断裂韧性,记为第三断裂韧性。

[0107] 一般断裂韧性都是通过标准试样求得的,但是同种材料的试样和具体的结构,断裂韧性是不一样的,本发明的关键技术之一就是通过有限元手段,将试样的断裂韧性转变为结构(管道)的断裂韧性。

[0108] 步骤107进一步包括以下步骤:

[0109] 步骤S41:本实施例中所用的DP2-A52钢,其断裂韧性与拘束参数 A_d 之间存在特定的统一关联,即 $J_{IC}/J_{ref}-A_d$ 关联线,这条关联线为材料的断裂曲线,如图5所示。关联线的纵

坐标为 J_{IC}/J_{ref} , J_{IC} 为材料的第二断裂韧性, J_{ref} 为参考试样断裂韧性。在断裂曲线中, J_{IC} 是由试验得到的数据, J_{ref} 是其中一个参考试样的数据, A_d 是由有限元模拟出的数据。拘束参数 A_d 满足如下关系式:

$$[0110] \quad A_d = \delta / \delta_{ref}$$

[0111] 式中, δ 为试样或结构裂纹的裂纹尖端张开位移值 (CTOD值); δ_{ref} 为标准高约束参考试样在断裂时的CTOD值, 具体数据如表4所示;

[0112] 表4: 不同面内拘束的 SEN (B) 试样的断裂韧性及拘束参数

[0113]	a/W	J_{IC} (kJ/m ²)	CTOD (mm)	A_d
	0.3	160	0.260	1.24
	0.4	139	0.224	1.007
	0.5	128	0.209	1
[0114]	0.6	109	0.174	0.831
	0.7	102	0.161	0.772

[0115] 步骤S42: 根据建立的含有裂纹管道的有限元模型, 获得J积分与拘束参数 A_d 之间的关联线, 即 $J_{IC}/J_{ref}-A_d$ 关联线, 这条关联线为材料的裂纹开动力曲线, 在开动力曲线中, J_{IC} 是由有限元计算得到的数据, J_{ref} 是其中一个参考试样有限元模型的数据, A_d 也是由有限元模拟出的数据。

[0116] 其中, 断裂曲线和开动力曲线横纵坐标相同, 只是曲线数据点和斜率不同。

[0117] 如图6所示;

[0118] 步骤S43: 断裂曲线与开动力曲线的交点即为试样的起裂点, 交点纵坐标与参考试样的断裂韧性 J_{ref} 的乘积为管道裂纹尺寸相关的第二断裂韧性 J_{IC} , 如图7所示。含有不同裂纹尺寸管道的断裂韧性如表5所示:

[0119] 表5: 不同裂纹尺寸管道的断裂韧性

[0120]	裂纹 a	断裂韧性 J_{IC}
	(mm)	(kJ/m ²)
	1.9	43.5
	3.8	44
	4.75	54.1

[0121] 步骤108: 根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度。

[0122] 步骤108具体为: 基于管道裂纹尺寸相关的断裂韧性和裂纹尺寸计算管道的剩余强度, 进一步包括以下步骤:

[0123] 步骤S51: 基于步骤S43中的断裂韧性, 计算含有不同尺寸裂纹管道的剩余强度。剩余强度 σ_{rs} 满足如下关系式:

$$[0124] \quad \sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c}$$

$$[0125] \quad K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}}$$

[0126] 式中, K_{IC} 为第一断裂韧性; E 为材料的弹性模量, DP2-A52 钢的弹性模量为 224000MPa; ν 为材料的泊松比, 其值为 0.3; J_{IC} 为第二断裂韧性。

[0127] 步骤 S52: 基于步骤 S41 中含有不同尺寸裂纹管道的剩余强度结果, 绘制出管道的剩余强度曲线, 如图 8 所示。

[0128] 步骤 109: 根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度, 构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图, 所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

[0129] 步骤 109 具体为: 结合步骤 S32 中裂纹扩展寿命曲线和步骤 S52 中剩余强度曲线, 建立并绘制如图 9 所示的含有裂纹管道的损伤容限评定图。

[0130] 另外, 基于上述方法, 本发明还提供了一种蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定系统, 包括:

[0131] 管道有限元模型建立模块 201, 用于建立含有不同尺寸裂纹的管道有限元模型。

[0132] 应力强度因子计算模块 202, 用于对所述管道有限元模型进行数值计算, 得到管道内裂纹尖端的应力强度因子。

[0133] 裂纹扩展模型获取模块 203, 用于获取裂纹扩展模型。

[0134] 管道裂纹尺寸获取模块 204, 用于获取所述裂纹扩展模型的管道裂纹尺寸。

[0135] 蠕变疲劳裂纹扩展速率确定模块 205, 用于根据所述管道裂纹尺寸确定蠕变疲劳裂纹扩展速率。

[0136] 裂纹扩展寿命计算模块 206, 用于根据所述应力强度因子和蠕变疲劳裂纹扩展速率计算裂纹扩展寿命, 所述裂纹扩展寿命为裂纹从某一初始尺寸扩展到某一临界尺寸所经历的寿命。

[0137] 断裂韧性确定模块 207, 用于根据所述管道裂纹尺寸确定断裂韧性。

[0138] 剩余强度计算模块 208, 用于根据所述断裂韧性和管道裂纹尺寸计算管道的剩余强度。

[0139] 损伤容限评定模块 209, 用于根据所述裂纹扩展寿命和剩余强度, 构建蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限评定图, 所述损伤容限评定图用于评定蠕变疲劳载荷作用下高温管道的损伤容限。

[0140] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述, 每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处, 各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言, 由于其与实施例公开的方法相对应, 所以描述的比较简单, 相关之处参见方法部分说明即可。

[0141] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述, 以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想; 同时, 对于本领域的一般技术人员, 依据本发明的思想, 在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述, 本说明书内容不应理解为对本发明的限制。



图1

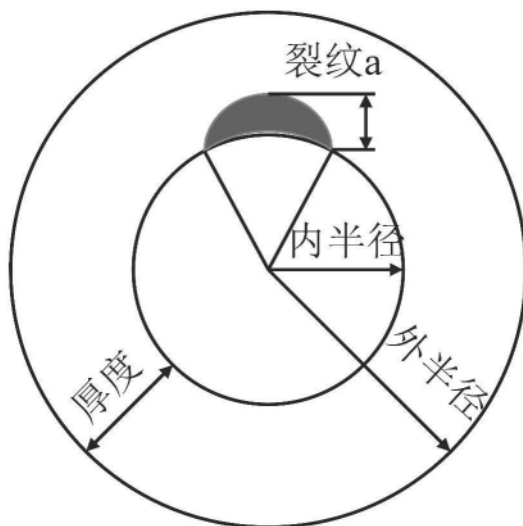


图2

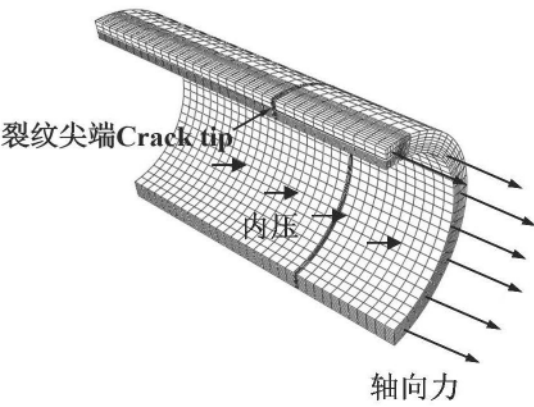


图3A

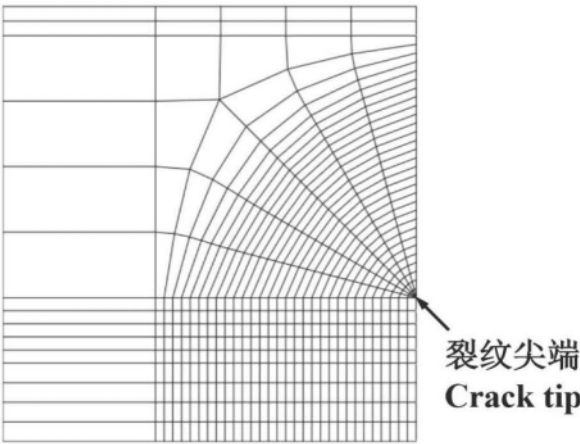


图3B

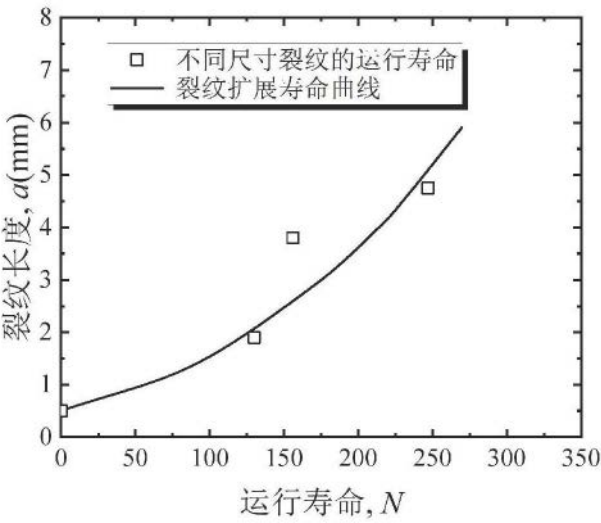


图4

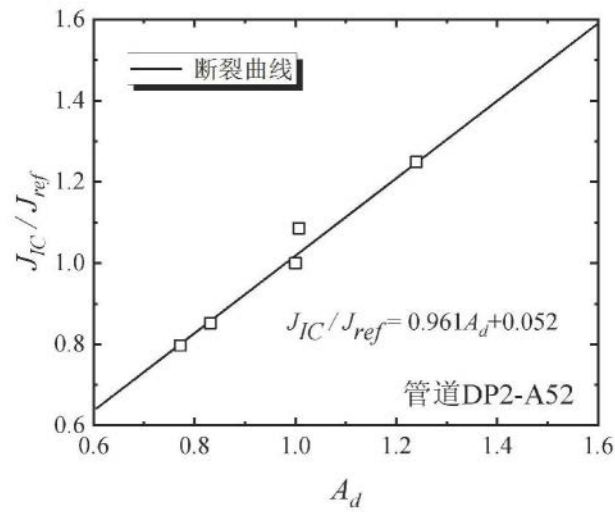


图5

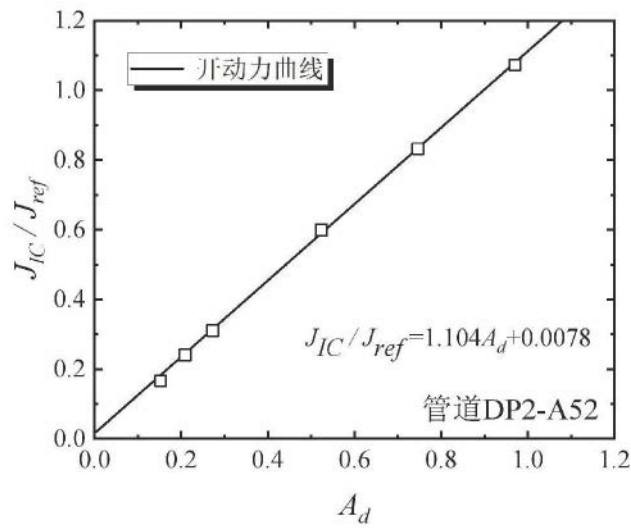


图6

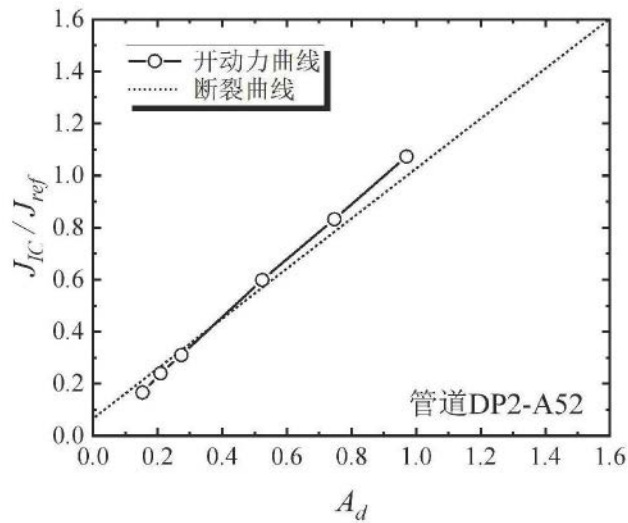


图7

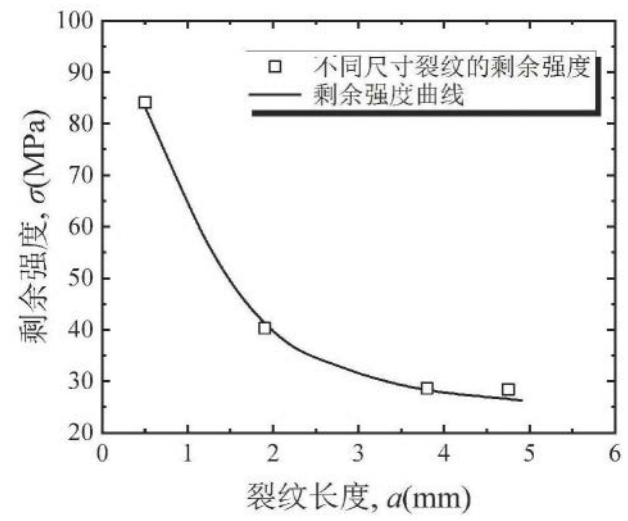


图8

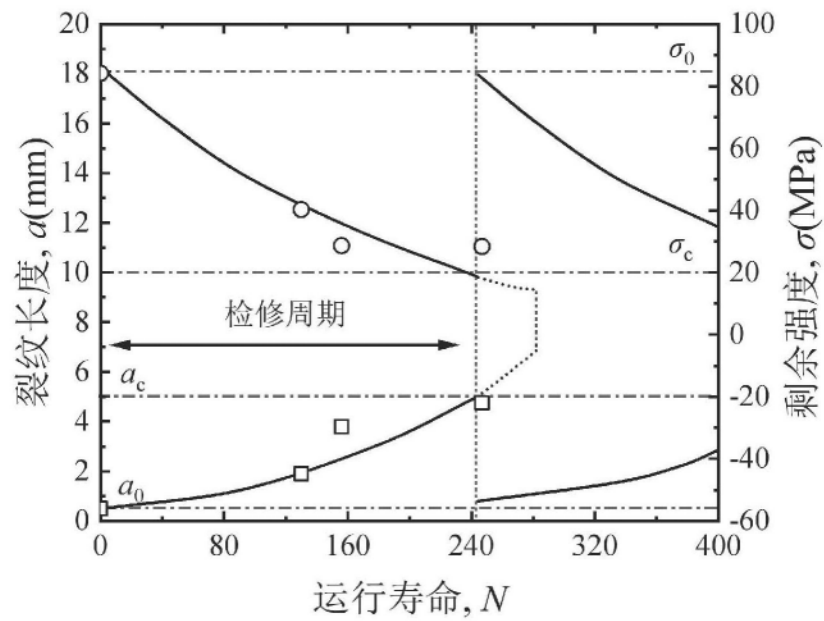


图9



图10