

考虑拘束的核电主管道损伤容限分析

柏承志¹, 刘芳², 崔元元², 王骁晓³, 杨杰¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;

3. 华东理工大学 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 基于拘束相关断裂韧性确定方法, 对含椭圆形裂纹核电主管道的拘束相关剩余强度进行了计算; 基于 Paris 公式, 对裂纹扩展到不同尺寸时所对应的裂纹扩展寿命进行了计算; 根据得到的拘束相关剩余强度与裂纹扩展寿命, 对裂纹沿深度方向扩展和沿长度方向扩展两种情况分别进行了损伤容限分析, 并构建了损伤容限评定图。结果表明: 随着裂纹深度和裂纹长度的增加, 裂尖应力场增大, 拘束相关剩余强度下降。根据损伤容限评定图可以清楚地观察到裂纹扩展到不同尺寸时所对应的剩余强度与裂纹扩展寿命。本文将损伤容限分析方法从航空航天装备领域拓展到核电领域, 并在损伤容限分析中纳入了拘束的影响。

关键词: 损伤容限分析; 拘束; 核电主管道

中图分类号: TH 114

文献标志码: A

Damage tolerance analysis of nuclear power main pipeline considering constraint

BAI Chengzhi¹, LIU Fang², CUI Yuanyuan², WANG Xiaoxiao³, YANG Jie¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Based on the constraint-related fracture toughness determination method, the constraint-related residual strength of the nuclear power main pipeline with elliptical crack was calculated. Based on the Paris formula, the crack propagation life corresponding to different crack sizes was calculated. Further, based on the obtained constraint-related residual strength and crack propagation life, damage

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375154, 52375154)

第一作者: 柏承志(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 装备强度、寿命及可靠性研究。E-mail: 15987719090@163.com

通信作者: 杨杰(1987—), 男, 教授。研究方向: 重要装备强度、寿命及可靠性等研究。E-mail: yangjie@usst.edu.cn

引文格式: 柏承志, 刘芳, 崔元元, 等. 考虑拘束的核电主管道损伤容限分析[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 385-391.

Citation: BAI Chengzhi, LIU Fang, CUI Yuanyuan, et al. Damage tolerance analysis of nuclear power main pipeline considering constraint[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 385-391.

tolerance analysis was conducted for both cases of crack propagation along the depth direction and along the length direction, and damage tolerance assessment diagram was constructed. The results show that as the crack depth and crack length increase, the stress field at the crack tip increases, and the constraint-related residual strength decreases. According to the damage tolerance assessment diagram, it is clear to observe the residual strength and crack propagation life corresponding to different crack sizes. The damage tolerance analysis method was expanded from the field of aerospace equipment to the field of nuclear power, and the influence of constraints in damage tolerance analysis was incorporated.

Keywords: *damage tolerance analysis; constraint; nuclear power main pipeline*

核安全是核电发展的生命线，由于核电特殊的工艺流程和反应条件，一旦发生事故将造成灾难性的后果。核电主管道被称为核电站的“主动脉”，在使用过程中往往会以辐照脆化、应力腐蚀、腐蚀疲劳、损伤断裂等形式失效^[1]。

为保障核电站的安全，国内外学者针对核电主管道已开展了一系列研究。薛飞等^[2]对压水堆核电站主管道进行了室温和 350 ℃ 下的低周疲劳性能试验，得到了主管道材料的循环变形规律和寿命演化模型。王博^[3]对 AP1000 反应堆用主管道进行了不同时段的热老化处理，研究了热老化时长及试样尺寸对主管道断裂性能的影响。Liu 等^[4]利用扫描电子显微镜 (SEM)、光学显微镜 (OM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对失效核电管道的腐蚀过程和关键影响因素进行了研究。结果表明，管道内壁除了存在泄漏孔外，还存在腐蚀结瘤和腐蚀凸起两种典型的腐蚀特征。Priya 等^[5]尝试使用蒙特卡罗模拟技术计算了核电主管道应力腐蚀开裂的失效概率及应力腐蚀裂纹随时间的随机扩展。Li 等^[6]基于高通量测试方法研究了瞬态水温变化对核电主管道疲劳裂纹扩展行为的影响。Shen 等^[7]在不同温度下进行了疲劳裂纹扩展试验，以对核电主管道焊缝的疲劳寿命进行评估。Wu 等^[8]对核电主管道中焊接接头的 J - R 曲线等准静态断裂性能进行了详细研究，分析其断裂失效机理，进而检查断裂韧性是否满足要求。李朋洲等^[9]对核电主管道材料及焊接材料在中低加载速率下的断裂性能进行了研究。刘庆等^[10]采用主曲线法测量了核电主管道材料的参考温度并确定了其断裂韧性。

目前针对核电主管道的评定也有一些研究。Kamaya^[11]构建了一条失效评定曲线，该曲线考虑了冷加工、中子辐照和热老化所引起的材料变形特性的变化，并对具有周向表面裂纹核电主管道

的保守失效载荷进行了预测。Kim 等^[12]利用等效直管的概念，使用 ASME BPVC 第 8 卷第 2 册中给出的结构应力方法，计算了核电管道的应力强化系数，并提出了应力评定方法。Jyotish 等^[13]基于常微分方程和可达图对核电管道关键系统进行了可靠性评定。Kong 等^[14]提出了一种基于弯头位移限制和损伤指数的简化管道安全评定程序，分别计算了多向地震输入下的损伤指数和分布间隔，以评定核电主管道安全性。安英辉等^[15]研究了基于运行参数的核电主管道断裂评定方法，并开发了主管道断裂评定软件。侍克献等^[16]针对 CAP1400 核电主管道用钢进行了不同温度下的低周疲劳试验，并采用 ASME 锅炉及压力容器规范对其低周疲劳性能进行了评定。

损伤容限评定是目前航空航天装备领域常用的评定方法。它承认初始缺陷的存在，通过对结构的剩余强度、临界裂纹长度、寿命等问题进行分析计算，使结构在规定的未修使用周期内不会由于缺陷存在而发生灾难性破坏，从而保证结构的安全^[17-18]。损伤容限思想的纳入克服了传统的、基于大量未考虑初始缺陷疲劳寿命试验曲线、经验性方法的弊端，在增加航空航天装备可靠性方面取得了显著的成效，并被逐渐推广到各个行业和领域。但针对核电主管道，尚没有研究对其进行损伤容限分析。受服役环境的影响与制造工艺的限制，核电主管道中同样难免存在缺陷。一旦在核电主管道中检测到缺陷，对其作剩余强度分析与裂纹扩展分析，并进一步进行损伤容限评定，以确保其在使用周期内的安全性是必要的。

此外，目前的损伤容限分析没有考虑裂尖拘束的影响。裂尖拘束是结构对裂尖区材料塑性变形的阻碍，受裂纹扩展方向上及裂纹前端面平行方向上结构尺寸的影响，拘束的丧失会引起结构

拘束相关断裂韧性的提高^[19]。通常, 材料的断裂韧性根据试验标准由深裂纹三点弯曲或紧凑拉伸试样来测定, 这些标准试样的设计是为了保证裂尖前的高拘束度, 以测得保守的断裂韧性。但对于实际工况中的核电主管道等结构, 由于其结构的复杂及缺陷大小的不同, 其所处的拘束状态也不同。当用高拘束标准试样的断裂韧性测定值评定低拘束缺陷结构时, 会产生保守的评定结果, 从而导致不必要的维修或报废, 产生较大的经济损失; 另一方面, 当用其评定某些更高拘束的结构裂纹时, 又可能得到非保守的结果, 从而导致危险。在损伤容限分析中纳入拘束的影响将有助于损伤容限评定精度的提高。

鉴于此, 本文针对含椭圆形裂纹核电主管道, 考虑拘束的影响, 首先基于拘束相关断裂韧性确定方法, 对含椭圆形裂纹核电主管道拘束相关剩余强度进行了计算。并基于 Paris 公式, 对裂纹扩展到不同尺寸时所对应的裂纹扩展寿命进行了计算。最后, 对主管道进行了裂纹沿深度和沿长度方向扩展时的损伤容限分析。

1 有限元数值计算及损伤容限分析过程

1.1 含椭圆形裂纹主管道

材料选用 A508 钢, 其弹性模量为 202 410 MPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 514 MPa, 断面收缩率为 72.4%, 真应力-应变曲线如图 1 所示^[20-21]。

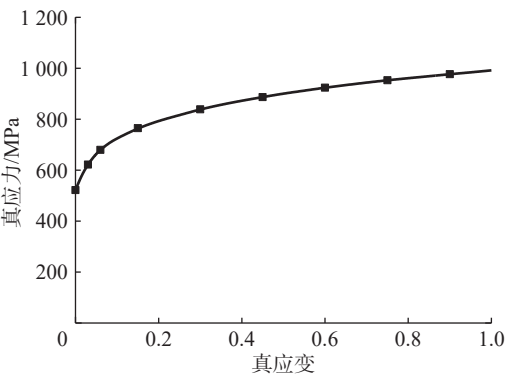


图 1 A508 钢的真应力-真应变曲线^[20-21]
Fig.1 True stress-strain curve of A508 steel^[20-21]

在主管道内壁设置初始椭圆形裂纹, 并假设椭圆形裂纹分别沿深度方向和长度方向扩展。当裂纹沿深度方向扩展时, 固定裂纹长度 $2c$ 为 167 mm, 仅改变裂纹深度 a , 令 $a/t=0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$

(其中 t 为壁厚); 当裂纹沿长度方向扩展时, 固定裂纹深度为 41.75 mm, 仅改变裂纹长度, 令 $a/c=0.8, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2$ (a/c 越小, 裂纹长度越长)。含椭圆形裂纹主管道示意图如图 2 所示: 管道内半径为 389.25 mm, 外半径为 472.75 mm, 壁厚为 83.5 mm。

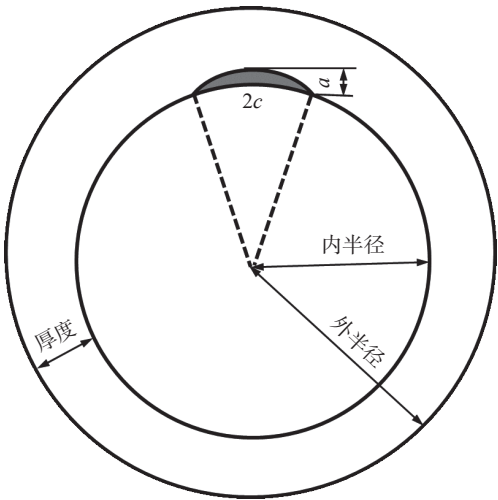


图 2 含椭圆形裂纹主管道示意图
Fig.2 Schematic diagram of the main pipeline with elliptical crack

1.2 有限元数值计算

对含椭圆形裂纹主管道进行有限元数值计算, 分析裂纹裂尖应力应变场和应力强度因子。考虑到主管道结构的对称性, 选取 1/2 主管道建立模型。主管道所受内压为工作压力 17 MPa, 内压所产生的轴向应力为 35.786 MPa。主管道模型整体网格划分及裂尖网格划分如图 3 所示^[22]。

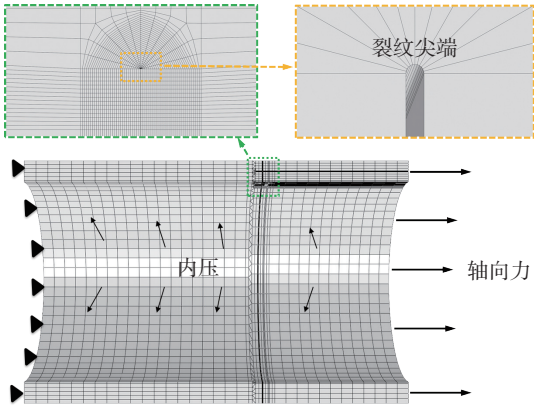


图 3 主管道模型整体网格划分及裂尖网格划分^[22]
Fig.3 Overall mesh division and crack tip mesh division of main pipeline model^[22]

1.3 损伤容限分析过程

1.3.1 拘束相关剩余强度

随着裂纹深度和裂纹长度的变化(即在不同拘

束下), 含裂纹主管道的拘束相关断裂韧性会随之改变, 为了对含裂纹主管道进行更加精确的损伤容限分析, 需首先计算含裂纹主管道的拘束相关断裂韧性, 并进一步计算其拘束相关剩余强度。在文献 [23] 中, 提出了实际结构拘束相关断裂韧性的确定方法: 建立材料的断裂曲线, 获得含裂纹结构的开动力曲线, 两条曲线的交点即为试样的起裂点, 起裂点所对应的断裂韧性值即为含裂纹结构的拘束相关断裂韧性。其中, 拘束参数 A_p 定义为

$$A_p = \frac{A_{PEEQ}}{A_{ref}} \tag{1}$$

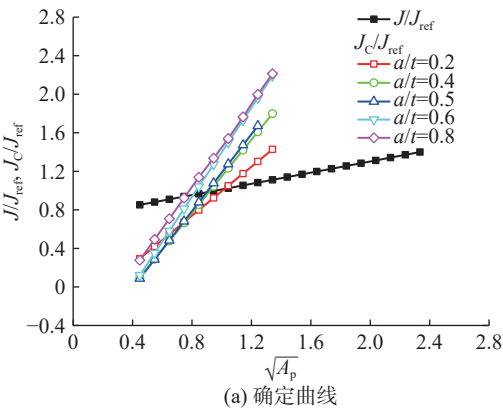
式中: A_{PEEQ} 为不同拘束试样中 PEEQ 等值线 (具有相同 PEEQ 的等值点所连成的曲线), 本文中选取 PEEQ 为 0.2 所围绕区域的面积; A_{ref} 为标准试样中 PEEQ 等值线所围绕区域的面积。

对本文而言, A508 钢的断裂曲线已在文献 [23] 中获得, 不同拘束下含裂纹主管道的开动力曲线可通过有限元数值计算得到, 根据二者交点可计算出含裂纹主管道的拘束相关断裂韧性。之后, 便可进一步对含裂纹主管道的拘束相关剩余强度进行计算。拘束相关剩余强度 σ_{rs} 满足如下关系式:

$$\sigma_{rs} = K_{IC} / \sqrt{\pi a_c} \tag{2}$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \sqrt{J_{IC}} \tag{3}$$

式中: K_{IC} 为用应力强度因子表示的断裂韧性; a_c 为裂纹尺寸; E 为弹性模量; ν 为泊松比; J_{IC} 为用 J 积分 (围绕裂纹尖端周围区域的应力应变和位移所组成的围线积分, 其值为 J) 表示的断裂韧性, 本文用计算得到的拘束相关断裂韧性 J_C 代替 J_{IC} 。



1.3.2 裂纹扩展寿命

通过有限元数值计算, 得到不同拘束下椭圆形裂纹裂尖的应力强度因子 K 。进一步, 根据 Paris 公式计算裂纹扩展速率, 并得到裂纹扩展到不同尺寸时所对应的裂纹扩展寿命。

裂纹扩展寿命为

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{da/dN} da \tag{4}$$

其中

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{5}$$

式中: N 为裂纹扩展寿命; a_0 为初始裂纹尺寸; ΔK 为应力强度因子幅度; C 和 m 为材料常数, A508 钢的 $C = 1.246 \times 10^{-10}$, $m = 1.86$ [24]。

2 核电主管道的损伤容限分析

2.1 裂纹沿深度方向扩展时的损伤容限

不同裂纹深度下主管道的拘束相关断裂韧性如图 4 所示, 图中 J_{ref} 为标准试样的断裂韧性。由图 4 可见, 随着裂纹深度的增加, 主管道的开动力曲线逐渐向左偏移, 与断裂曲线的交点逐渐下降, 即拘束相关断裂韧性逐渐下降。

这种断裂韧性的下降同样可以在裂尖应力场中得到验证。在 $J=500 \text{ kJ/m}^2$ 下, 对不同裂纹深度下主管道的裂尖应力场进行考察, 如图 5 所示。由图可见, 随着裂纹深度的增加, 裂尖应力场明显增大, 即深裂纹时应力场大, 断裂韧性低。

根据拘束相关断裂韧性可进一步计算得到主管道在不同拘束下的拘束相关剩余强度, 并可根据有限元数值计算得到的应力强度因子计算裂纹扩展到不同深度时的裂纹扩展寿命。拘束相关剩

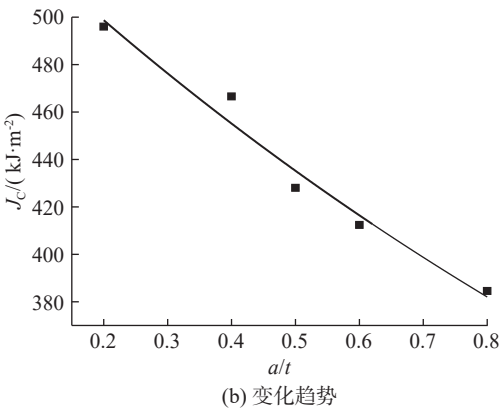


图 4 不同裂纹深度下拘束相关断裂韧性的确定及其变化趋势

Fig.4 Determination of constraint-related fracture toughness and its changing trends at different crack depths

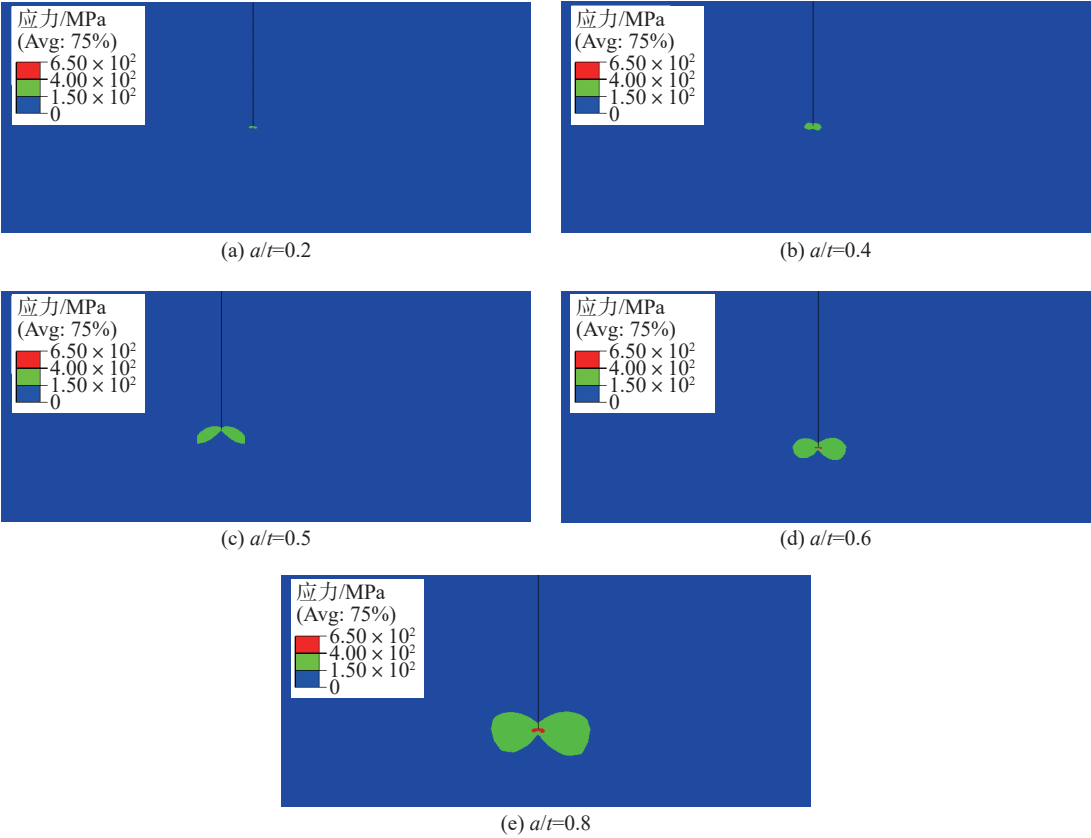


图 5 不同裂纹深度下含椭圆形裂纹主管道裂尖应力场

Fig.5 Crack tip stress field of a main pipeline with elliptical crack at different crack depths

余强度与裂纹扩展寿命一起构成损伤容限评定图, 如图 6 所示。从图 6 中可以清楚地观察到当裂纹沿深度方向扩展不同尺寸时所对应的剩余强度与裂纹扩展寿命。裂纹沿深度方向扩展时损伤容限分析中所有数据汇总如表 1 所示。

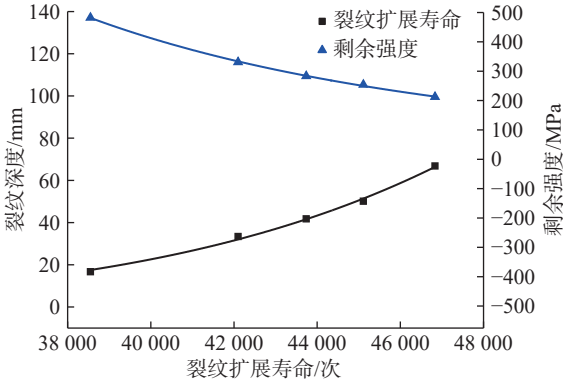


图 6 裂纹沿深度方向扩展时的损伤容限评定图

Fig.6 Damage tolerance assessment diagram when crack propagates along the depth direction

2.2 裂纹沿长度方向扩展时的损伤容限

不同裂纹长度下主管道的拘束相关断裂韧性如图 7 所示。与图 4 一致, 在图 7 中, 随着裂纹长度的增加(a/c 的减小), 主管道的开动力曲线逐渐

向左偏移, 与断裂曲线的交点逐渐下降, 拘束相关断裂韧性逐渐下降。

表 1 裂纹沿深度方向扩展时损伤容限分析中所有数据汇总

Tab.1 Summary of all data in damage tolerance analysis when crack propagates along the depth direction

a/t	$J_c/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$\sigma_{\text{TS}}/\text{MPa}$	$\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2})$	$N/\text{次}$
0.2	496.02	482.41	21.95	38 548
0.4	466.60	330.84	37.48	42 099
0.5	428.03	283.42	43.95	43 736
0.6	412.38	253.95	50.15	45 111
0.8	384.52	212.37	52.01	46 834

同样, 这种断裂韧性的下降可以在裂尖应力场中得到验证。在相同的 $J=500\text{ kJ}/\text{m}^2$ 下, 对不同裂纹长度下主管道的裂尖应力场进行考察, 如图 8 所示。由图可见, 随着裂纹长度的增加, 裂尖应力场同样明显增大。

计算拘束相关剩余强度与裂纹扩展到不同长度时的裂纹扩展寿命, 构成裂纹沿长度方向扩展时的损伤容限评定图, 如图 9 所示。根据损伤容限评定图可进一步确定维修周期和允许的最大临

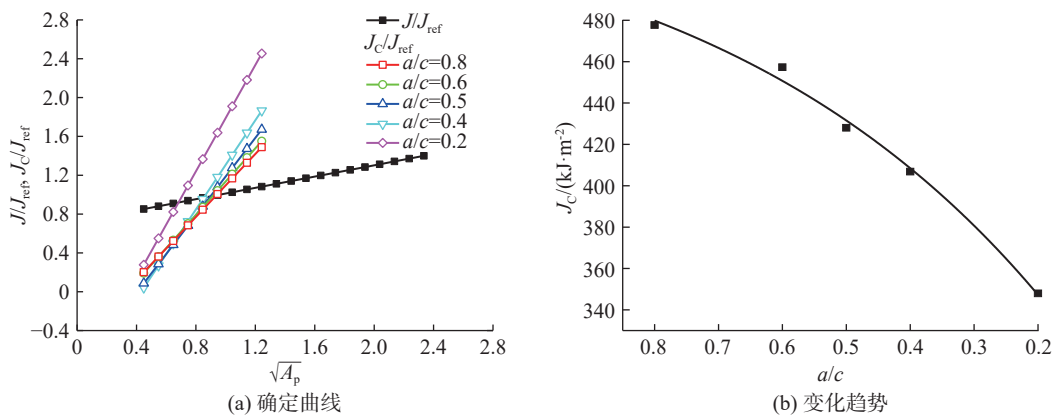


图 7 不同裂纹长度下拘束相关断裂韧性的确定及其变化趋势

Fig.7 Determination of constraint-related fracture toughness at different crack lengths and its changing trends

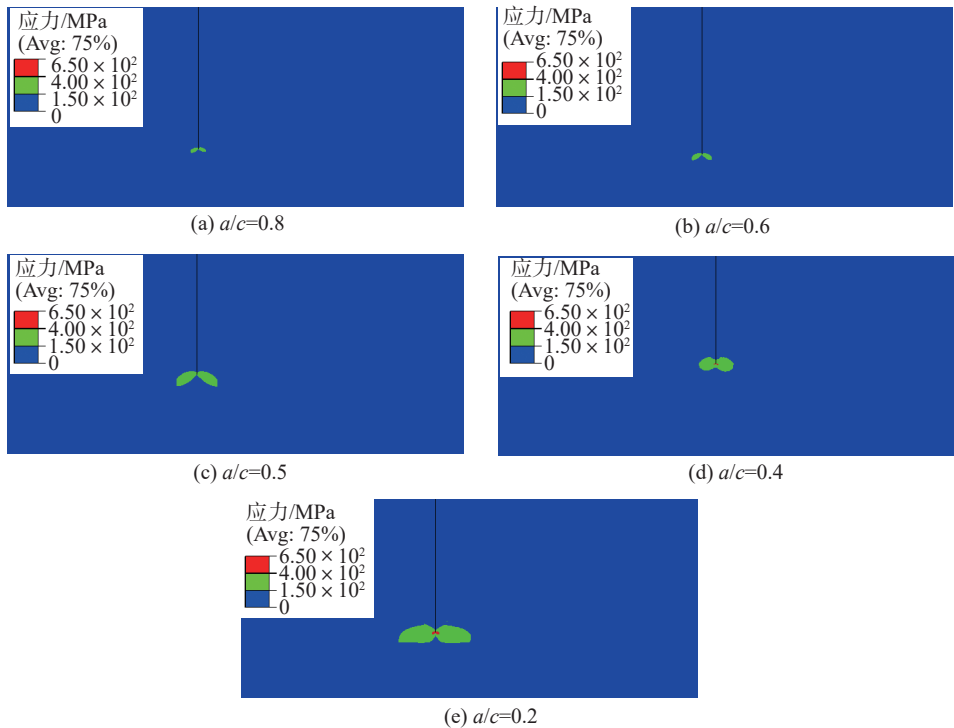


图 8 不同裂纹长度下含椭圆形裂纹主管道裂尖应力场

Fig.8 Crack tip stress field of a main pipeline with elliptical crack at different crack lengths

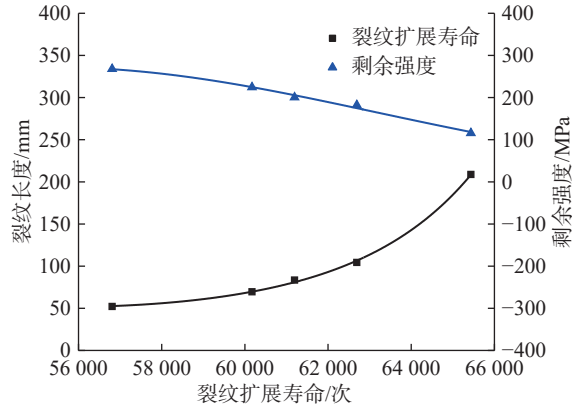


图 9 裂纹沿长度方向扩展时的损伤容限评定图

Fig.9 Damage tolerance assessment diagram when crack propagates along the length direction

界尺寸，为保障核电主管道安全提供科学支持。裂纹沿长度方向扩展时损伤容限分析中所有数据汇总如表 2 所示。

表 2 裂纹沿长度方向扩展时损伤容限分析中所有数据汇总
Tab.2 Summary of all data in damage tolerance analysis when crack propagates along the length direction

a/c	$J_c/(kJ \cdot m^{-2})$	σ_{rs}/MPa	$\Delta K/(MPa \cdot m^{-1/2})$	$N/次$
0.8	477.69	267.8	22.65	56 808
0.6	457.31	224.5	34.78	60 172
0.5	428.03	200.4	43.95	61 194
0.4	406.82	182.3	60.08	62 691
0.2	347.99	115.6	98.67	65 436

3 结 论

选用含椭圆形裂纹核电主管道为研究对象,考虑拘束的影响,基于拘束相关断裂韧性确定方法,对不同裂纹深度和裂纹长度(即不同拘束)下核电主管道的拘束相关剩余强度进行了计算,基于Paris公式对裂纹扩展到不同尺寸时所对应的裂纹扩展寿命进行了计算,并构建了裂纹沿深度和沿长度方向扩展时的损伤容限评定图。根据损伤容限评定图可以清楚地观察到裂纹扩展到不同尺寸时所对应的剩余强度与裂纹扩展寿命,并进一步确定维修周期和允许的最大临界尺寸,为保障核电主管道的安全提供了科学支持。本文的创新之处有两个:其一为将损伤容限分析方法从航空航天装备领域拓展到核电领域;其二为在损伤容限分析中纳入了拘束的影响。

参考文献:

[1] 李承亮, 张明乾. 压水堆核电站反应堆压力容器材料概述[J]. 材料导报, 2008, 22(9): 65–68.

[2] 薛飞, 余伟伟, 遆文新, 等. 压水堆核电站主管道材料的低周疲劳行为研究[J]. 机械强度, 2011, 33(6): 890–894.

[3] 王博. 考虑热老化脆化及裂尖约束效应的核电主管道不锈钢断裂行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

[4] LIU X Z, LI N N, ZHANG J, et al. Failure analysis of leaking firefighting pipeline used in nuclear power plant: corrosion development process and key influence factors[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 161: 108341.

[5] PRIYA C, RAO K B, ANOOP M B, et al. Probabilistic failure analysis of austenitic nuclear pipelines against stress corrosion cracking[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, 219(c7): 607–626.

[6] LI Z H, HAN Y M, ZHAO Y G, et al. Thermal corrosion fatigue crack growth behavior and life prediction of 304SS pipeline structures in high temperature pressurized water[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 160: 108224.

[7] SHEN M L, CHANG H J, YANG Y S, et al. Evaluation method of fatigue life for weld joints with defects in the horizontal restraint components of main steam pipelines[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 926–937.

[8] WU S W, ZHANG Z. Long term ageing effect on fracture toughness of the GTAW welded joints for nuclear power main pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, 188: 104250.

[9] 李朋洲, 李一磊, 姚迪, 等. 主管道用材中低加载速率下常温断裂性能研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(5): 123–127.

[10] 刘庆, 王庆, 马若群, 等. 基于主曲线法的核电主管道材

料断裂韧性研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(10): 1900–1903.

[11] KAMAYA M. Failure assessment curve for austenitic stainless steel pipes of nuclear power plants[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 238: 107283.

[12] KIM J Y, JANG J H, HWANG J H, et al. Stress evaluation method of reinforced wall-thinned class 2/3 nuclear pipes for structural integrity assessment[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, 56(4): 1320–1329.

[13] JYOTISH N K, SINGH L K, KUMAR C. Reliability assessment of safety-critical systems of nuclear power plant using ordinary differential equations and reachability graph[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 412: 112469.

[14] KONG D R, LIU W G, YANG J, et al. Study on seismic safety evaluation of crossover pipeline connecting containment and turbine building in three-dimensional isolated nuclear power plant[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 412: 112464.

[15] 安英辉, 王春辉, 陈明亚, 等. 基于在线监测的核电厂主管道评定技术及软件开发[J]. 化工机械, 2024, 51(2): 288–294.

[16] 侍克献, 田根起, 王苗苗, 等. 国产核电主管道用316LN钢的低周疲劳性能评估[J]. 机械工程材料, 2023, 47(5): 14–19, 25.

[17] 于培师, 赵军华, 郭万林. 三维损伤容限设计: 离面约束理论与疲劳断裂准则[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 87–105.

[18] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 26–51.

[19] 雷雪雪, 刘芳, 崔元元, 等. 残余应力与拘束对GH4169合金疲劳及蠕变-疲劳裂纹扩展速率影响研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(1): 60–68.

[20] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified characterisation of in-plane and out-of-plane constraint based on crack-tip equivalent plastic strain[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2013, 36(6): 504–514.

[21] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraints with fracture toughness[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, 37(2): 132–145.

[22] WU J, LIU F, CUI W, et al. Influence of residual stress on apparent fracture toughness of pipeline under different constraints[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(10): 1–8.

[23] 杨杰, 王雷. 实际结构拘束相关断裂韧性的确定方法研究[J]. 机械强度, 2017, 39(6): 1438–1444.

[24] 杨帆. 基于Master Curve方法的A508-III钢小尺寸断裂韧性试样加工关键问题的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.