

基于断裂力学的立式杀菌锅全寿命疲劳分析

Full-life fatigue analysis of vertical retort based on fracture mechanics

刘金鹏 张丽梅 黄志刚

LIU Jin-peng ZHANG Li-mei HUANG Zhi-gang

(北京工商大学人工智能学院, 北京 100048)

(School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

摘要:目的:研究一种新型立式杀菌锅在热机循环载荷下的疲劳强度,特别是在锅体出现裂纹后的剩余疲劳寿命以及影响杀菌锅疲劳裂纹扩展的因素。方法:从杀菌锅结构完好的设计疲劳寿命和有裂纹后的剩余疲劳寿命两个方面对其进行全寿命疲劳分析。采用 Workbench 分析杀菌和 3 种循环载荷下杀菌锅的力学特性;基于 S-N 曲线研究杀菌锅在 3 种交变应力下的设计疲劳寿命;基于断裂力学原理研究初始裂纹尺寸、压力、温度对有裂纹杀菌锅应力强度因子和剩余疲劳寿命的影响。结果:此类立式杀菌锅的设计疲劳寿命为 5×10^5 次,满足设计需要且有一定安全余量;基于断裂力学分析得出杀菌锅裂纹尺寸寿命曲线,对含缺陷杀菌锅剩余寿命进行预测,具有一定创新性。结论:使用过程中应关注锅体内部裂纹的产生和扩展情况,可以根据试验提出的方法对杀菌锅裂纹缺陷进行强度分析和寿命预测。

关键词:食品杀菌;立式杀菌锅;S-N 曲线;断裂力学;全寿命疲劳分析

Abstract: **Objective:** The fatigue strength of a new type of vertical retort under the cyclic load of heat engine was studied, especially the residual fatigue life of the pot body after the crack appeared and the factors affecting the fatigue crack propagation of the germicidal pot. **Methods:** The mechanical characteristics of retort under sterilization and three kinds of cyclic loads were analyzed by Workbench, the design fatigue life of the retort under three alternating stresses was studied based on the S-N curve. The effect of the initial crack size, pressure and temperature on the stress strength factor and residual fatigue life of the crack retort were studied based on fracture mechanics. **Results:** The design fatigue life of this type of vertical retort was calculated to

be 5×10^5 times, which meet the design requirements, and has a certain safety margin. Based on the fracture mechanics analysis, the crack size life curve of the sterilization retort was obtained, and the residual life of the sterilization retort with defects was predicted, which had certain innovation. **Conclusion:** Attention should be paid to the occurrence and propagation of cracks in the pot during use. The strength analysis and life prediction analysis of crack defects in the sterilization retort can be carried out according to the method proposed in this paper and experiment.

Keywords: food sterilization; vertical retort; S-N curve; fracture mechanics; full-life fatigue analysis

杀菌锅是食品杀菌的关键设备,传统杀菌锅通常采用卧式,需要借助灭菌篮装卸物料,生产效率低;为提高生产效率,在先进的自动化生产线上可以同时使用多个立式杀菌锅,不再需杀菌篮,可通过自动控制实现自动杀菌,大大提高了生产效率。但该杀菌锅在使用中承受温度、压力、物料等的循环载荷作用,其疲劳强度成为考验设备的关键问题。

通常此类立式杀菌锅压力容器的疲劳分析分为设计和使用两个阶段^[1]。在压力容器疲劳的分析设计阶段,张杰等^[2]基于 S-N 曲线对一种气象干燥器进行设计疲劳分析,探讨了典型结构的特点和应力分布规律的成因;张振华等^[3]对增压锅炉锅筒的冷态启动过程进行瞬态有限元分析,获得了锅筒整体的温度、耦合应力及危险点的分布情况并依据 S-N 曲线设计了疲劳强度评定。在基于断裂力学的压力容器的疲劳强度研究方面,Newman 等^[4]提出了表面裂纹在扩展过程中保持半圆形或半椭圆形的扩展理论模型;谢阳等^[5]基于断裂力学以及 Newman 理论分析了压力容器埋藏裂纹长度、深度之比对裂纹扩展的影响规律;Susmikanti 等^[6]采用应力强度因子作为裂纹参数,基于有限元法和半椭圆裂纹模型分析了反应堆压力容器表面裂纹长深比和应力幅值对裂纹扩展的影响;杨玉强等^[7]提出了含体积型缺陷波纹管疲劳寿命的

基金项目:河北省重点研发计划项目(编号:20321201D)

作者简介:刘金鹏,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:张丽梅(1979—),女,北京工商大学教授,硕士生导师,博士。E-mail: zhanglimei@btbu.edu.cn

收稿日期:2022-02-25 **改回日期:**2022-10-17

评估方法;Wu 等^[8]建立了高压储氢船的疲劳寿命预测方法;Liu 等^[9]采用数值模拟的方法研究了热应力对反应堆压力容器接管口处裂纹的影响;李荆礼等^[10]采用随机有限元法分析了温度压力等影响因素对有裂纹杀菌锅可靠性的影响。

研究以立式杀菌锅为分析对象,从杀菌锅完好时的设计疲劳寿命和有裂纹的剩余疲劳寿命两个方面展开全寿命疲劳研究。根据杀菌锅杀菌流程,采用 Workbench 分析各阶段杀菌锅的力学特性;基于 S-N 曲线,分析杀菌锅的设计疲劳寿命;基于断裂力学原理,研究有裂纹杀菌锅的剩余疲劳寿命,并对比分析压力、温度、裂纹尺寸等因素对杀菌锅表面裂纹应力强度因子的影响,旨在为此类立式杀菌锅的设计提供依据。

1 立式杀菌锅的杀菌流程和力学特性

1.1 杀菌锅杀菌流程

根据实际生产流程,立式杀菌锅杀菌流程可分为 5 个阶段。

(1) 进料:杀菌锅内注入常温缓冲水,物料从进料口进入,逐渐装满锅体。

(2) 升温加压:高温蒸汽进入锅体,锅内温度升至 121 ℃,压力升至 0.2 MPa。

(3) 杀菌:锅内蒸汽温度保持 121 ℃,对物料进行高温杀菌。

(4) 冷却:杀菌结束后,锅内蒸汽逐步排出减压并充入常温给水给罐体降温。

(5) 出料:初步冷却完毕,物料从底部出料口排出,经出料装置至下一生产工序。

整个流程中有两个典型的受力阶段:杀菌时,锅体承受最大温度载荷 121 ℃ 和压力载荷 0.2 MPa;一个杀菌周期有 3 种循环载荷:① 水压循环载荷,缓冲水注出导致的水压变化,最大水压值;② 进出料循环载荷,待杀菌物料进出的物料压力;③ 进出蒸汽与升降温循环载荷。

采用 Workbench 基于静力学理论、瞬态传热和热—结构耦合等分析立式杀菌锅两个典型阶段的力学特性。

1.2 杀菌锅的力学特性分析

1.2.1 杀菌锅模型 立式杀菌锅几何尺寸如图 1 所示,包括锅体和支撑腿两部分;有限元模型如图 2 所示,锅体采用 solid186 单元,连接和支撑采用 solid187 单元并进行网格加密。杀菌锅使用材料为 304 不锈钢,弹性模量 2×10^5 MPa,泊松比 0.28,热膨胀系数 $1.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,传热系数 $0.016 \text{ W}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

1.2.2 杀菌时的力学特性 根据杀菌流程对杀菌锅进行瞬态传热分析,内部施加温度载荷在 30 min 内从室温 22 ℃ 匀速升至 121 ℃,锅体外表面上部施加温度为 22 ℃,对流换热系数为 $5 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的热对流模拟空气的对流散热,锅体外表面下部施加温度为 22 ℃,

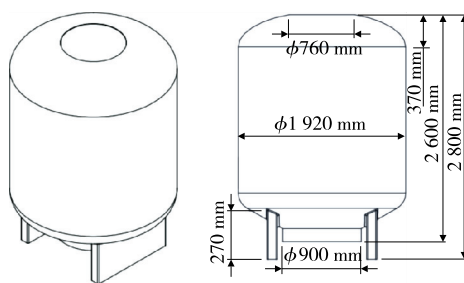


图 1 立式杀菌锅几何模型

Figure 1 Geometric model of vertical retort

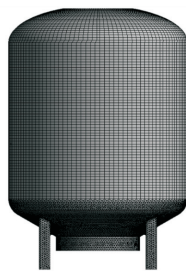


图 2 立式杀菌锅有限元模型

Figure 2 The finite model of vertical retort

对流换热系数为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的热对流模拟缓冲水的对流换热,经瞬态传热分析得到杀菌锅的锅体温度分布。

由图 3 可知,以锅体和支撑腿间的连接处为界分成两部分,上部温度均匀为 121 ℃,下部温度约 90 ℃,过渡位置存在显著温度变化。造成这种现象的原因是杀菌锅内部温度在较短时间内快速上升,锅体外部换热介质不同导致温度差异。

将杀菌锅温度场导入结构场中进行顺序热结构分析,考虑温度循环与结构载荷对锅体强度的共同影响。固定支撑腿底面,对杀菌锅整体施加标准重力加速度,考虑自重对结构的影响。对锅体内部施加 0.2 MPa 压力模拟工作时的蒸汽压力,锅体内部满载物料 50 kN 压力加载锅体底部。

由图 4 可知,应力强度最大值为 396 MPa,出现在锅体内部和支撑腿连接位置,此处出现几何结构突变并且承受锅体内部压力,因此应力集中现象显著,出现较大热应力。

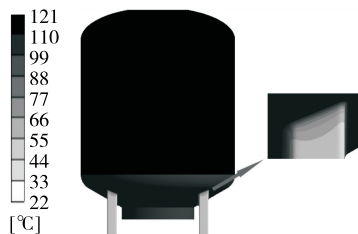


图 3 杀菌锅温度分布

Figure 3 Temperature distribution on the vertical retort

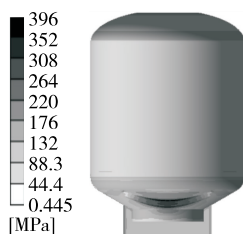


图4 杀菌锅的应力强度分布

Figure 4 The stress intensity distribution of the vertical retort

1.2.3 循环载荷作用下的力学特性 根据杀菌流程对1个杀菌周期内的3种循环载荷进行有限元分析。由图5~图7可知,3种循环载荷的应力强度最大部位均出现在锅体外表面与支撑腿连接位置,水压循环、物料压力循环以及进出蒸汽与升降温循环的最大应力强度分别为119,114,428 MPa,表明支撑腿与锅体连接过渡位置由于几何突变出现应力集中现象。

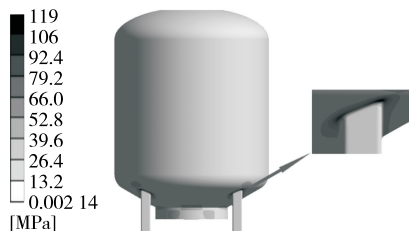


图5 水压循环下的应力强度分布

Figure 5 Stress intensity distribution under water pressure cycle

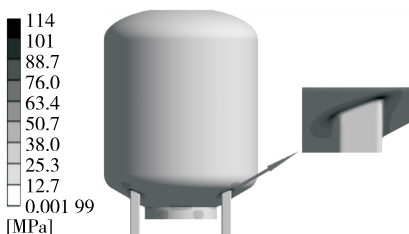


图6 进出料循环下的应力强度分布

Figure 6 Stress intensity distribution under cycle in and out of cans

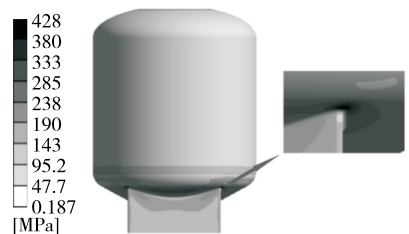


图7 进出蒸汽与温度循环下的应力强度分布

Figure 7 Stress intensity distribution on the vertical retort under in and out of the steam and temperature cycle

2 基于 S-N 曲线的设计疲劳寿命分析

此类立式杀菌锅是一种新式的杀菌容器,属于低压压力容器,锅体使用材质为 304 不锈钢、设计压力 $0.35 \text{ MPa} > 0.10 \text{ MPa}$,设计温度 145°C 低于以钢材蠕变控制其许用应力强度的相应温度,使用过程中需要频繁承受温度和压力载荷的循环升降。此类立式杀菌锅符合 JB 4732—1995 压力容器分析设计标准 1.2 标准的适用范围但不适用于标准 3.10 中的免除疲劳分析的条件。针对锅体内部易产生疲劳裂纹的现象,根据标准对其进行疲劳分析。

JB 4732—1995 给出了疲劳分析的方法,选用标准中的奥氏体不锈钢的设计疲劳曲线确定交变应力强度峰值 S_r 。将杀菌流程中的循环载荷作为交变载荷,将循环载荷最大应力强度值作为 S_r ,按式(1)计算 3 种循环对应的交变应力强度幅值 S_a :

$$S_a = 0.5 S_r. \quad (1)$$

经计算,3 种交变应力的幅值分别为 $S_{a1} = 59.5 \text{ MPa}$, $S_{a2} = 57 \text{ MPa}$, $S_{a3} = 214 \text{ MPa}$,其中 S_{a1} 和 S_{a2} 均低于最低疲劳应力值 194 MPa ,表明对疲劳寿命的影响较小,可以免除疲劳分析;而 $S_{a3} > 194 \text{ MPa}$,参照图 8 中的 S-N 曲线,确定其设计疲劳寿命 $N = 5 \times 10^5$ 次,理论使用年限达到 25 年以上,满足设计需求。

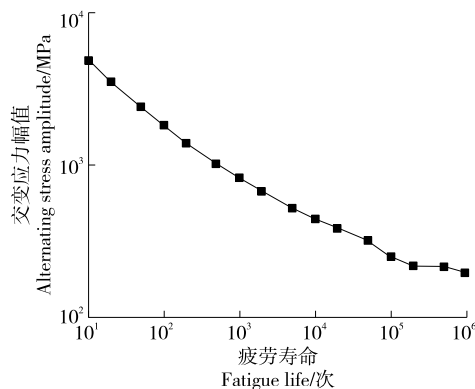


图8 奥氏体不锈钢的 S-N 曲线

Figure 8 S-N curve of Auschwitz stainless steel in JB4732 standard

3 基于断裂力学的有裂纹杀菌锅剩余疲劳寿命分析

3.1 原理分析

杀菌锅在使用过程中因初始缺陷、腐蚀、循环加载等原因容易出现裂纹,裂纹将产生局部应力集中,并逐渐扩展导致结构破坏。断裂力学是研究含疲劳裂纹的构件在各种环境下裂纹扩展直至断裂的方法^[11],传统的结构力学特性分析以应力作为结构状态的判据,而构件断裂后裂纹处出现应力奇异,单一应力值无法准确描述裂纹发

展情况^[12]。分析中将应力强度因子 K 作为裂纹扩展的判据,基于断裂力学研究有裂纹的杀菌锅剩余疲劳寿命问题。

工程中疲劳裂纹产生后剩余寿命的预测方法通常采用 Paris 公式^[13]:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m, \quad (2)$$

式中:

a —— 裂纹深度;

N —— 循环次数;

ΔK —— 应力强度因子变化幅度;

C, m —— 材料参数,分别取 4.61×10^{-9} 和 3.05 ^[14]。

对式(2)进行积分,得到剩余寿命 N_c 的计算式:

$$N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C (\Delta K)^m} = \frac{a_c - a_0}{C (\Delta K)^m}, \quad (3)$$

式中:

a_0 —— 裂纹初始深度, mm;

a_c —— 裂纹破坏深度, mm。

3.2 裂纹设置

在立式杀菌锅内部的 3 个不同位置设置张开 I 型表面裂纹(见图 9),将锅体内部温度设置为 120°C ,内部压力设置为 0.2 MPa ,模拟杀菌工作载荷。使用 Workbench 中的 Fracture 模块在杀菌锅表面设置半椭圆裂纹,裂纹深度为 0.5 mm ,裂纹部位如图 10 所示。分别计算得到 3 个位置裂纹张开 I 型应力强度因子 K_I (顶部裂纹 $0.13\text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$;中部裂纹 $0.04\text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 底部裂纹 $5.50\text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)。杀菌锅底部裂纹在工作载荷下的应力强度因子值远高于其他部位,最易发生破坏。可以确定锅体内部与支撑腿连接位置是杀菌锅杀菌过程中的危险部位,因此重点分析此位置初始裂纹在不同条件下的应力强度因子。

3.3 不同因素对有裂纹杀菌锅应力强度因子的影响

杀菌锅内部压力值设置为 $0.10 \sim 0.35\text{ MPa}$,锅体内

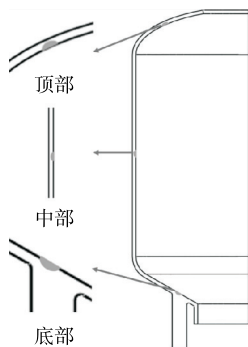


图 9 3 种杀菌锅裂纹位置示意图

Figure 9 Three kinds of sterilization retort crack location map

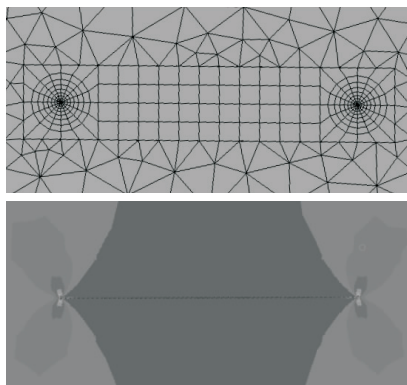


图 10 半椭圆裂纹

Figure 10 Semi-elliptical crack

部温度为 $120 \sim 145^\circ\text{C}$,裂纹深度分别设置为 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ mm}$ 。由图 11 可知,裂纹的应力强度因子随压力和温度变化的趋势相似,均随裂纹深度的增长整体上升。裂纹的应力强度因子与压力值成正比,相同压力下裂纹应力强度因子随温度的升高而增长。温度与压力两种载荷互相影响加剧了锅体裂纹的扩展,4 种不同深度裂纹的应力强度因子随温度和压力的上升整体增长都达到 64% 以上。因此,对含裂纹的立式杀菌锅应重点关注压力和温度对裂纹的影响,特别是高压条件下的温度变化。

3.4 有裂纹杀菌锅剩余疲劳寿命分析

根据 GB/T 19624—2019,将锅体壁厚 $1/3$ 即 2 mm 作为裂纹的容许深度,达到这一尺寸裂纹标志着杀菌锅发生破坏。在工作载荷(压力 0.2 MPa ,温度 121°C)和设计载荷(压力 0.35 MPa ,温度 145°C)两种情况下,裂纹初始深度为 $0.5 \sim 2.0\text{ mm}$ 的应力强度因子如图 12 所示。由图 12 可知,工作载荷与设计载荷下, $2.0, 0.5\text{ mm}$ 深裂纹的应力强度因子增长分别达到了 72.7% 和 87.9% ,并且裂纹增长速率随尺寸的增长逐渐加快。

由图 13 可知,初始裂纹尺寸和载荷决定了含缺陷杀菌锅剩余寿命。工作载荷、设计载荷下,含深度为 1.0 mm 表面裂纹杀菌锅的剩余寿命分别为 $3 \times 10^5, 1 \times 10^5$ 次,远低于杀菌锅的设计疲劳寿命 5×10^5 次。杀菌锅表面裂纹扩展速度逐渐升高,直至达到裂纹破坏尺寸 2 mm 时,杀菌锅剩余寿命为零,不能继续使用。随着载荷的升高,剩余寿命值大幅下降,说明承受载荷对含缺陷杀菌锅影响显著。

4 结论

基于 S-N 曲线和断裂力学原理进行了立式杀菌锅的全寿命疲劳分析。结果表明:① 从力学特性来看,立式杀菌锅支撑腿与锅体连接处存在几何突变,在杀菌过程中受到显著热应力影响,出现了明显的应力集中现象,设计时应尽量使连接部位过渡平滑。② 根据杀菌流程,将

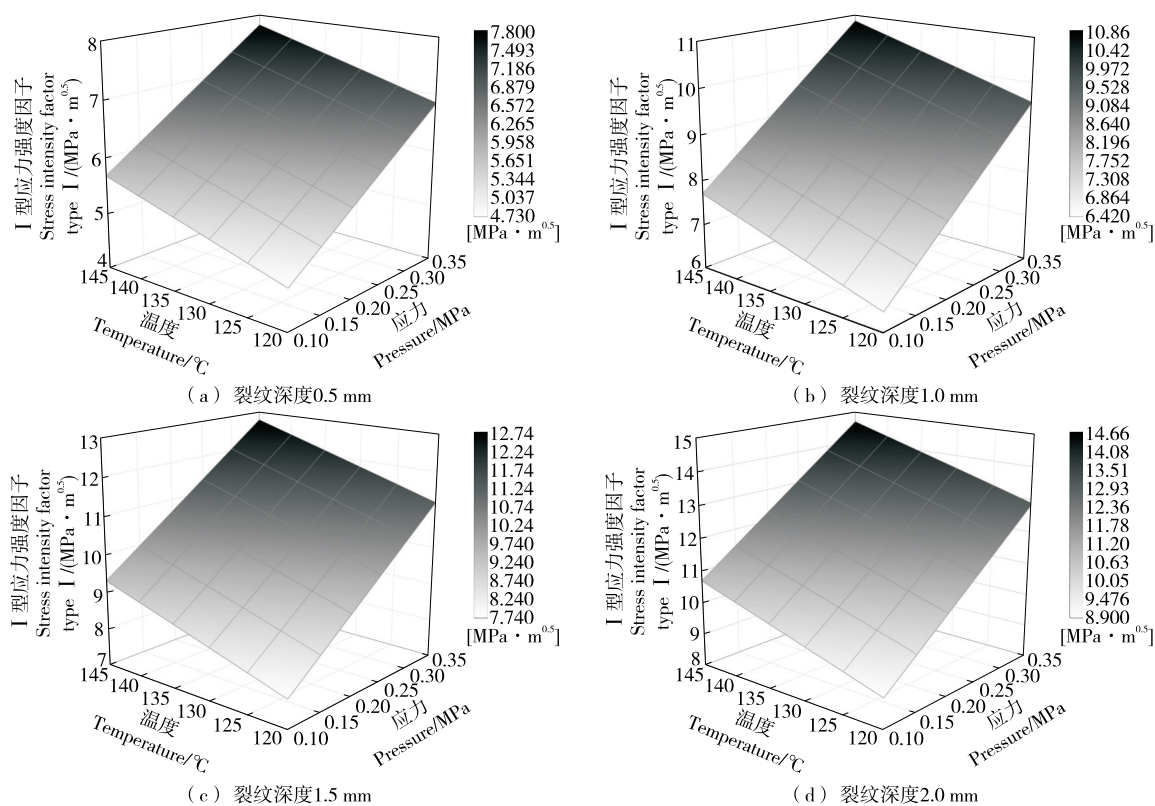


图 11 不同深度裂纹应力强度因子随压力和温度的变化曲面图

Figure 11 Surface plots of stress intensity factors for cracks of different depths vary with pressure and temperature

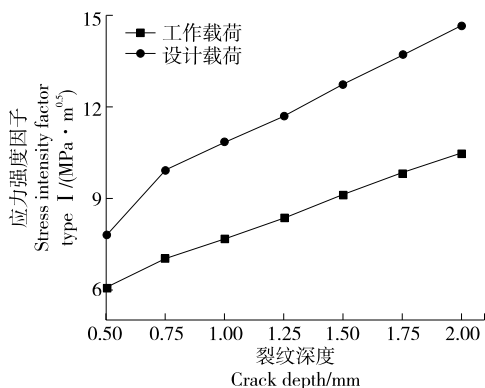


图 12 不同载荷下的应力强度因子

Figure 12 Stress strength factors under different loads

3 种循环载荷作为交变载荷,采用 S-N 曲线得到设计疲劳寿命为 5×10^5 次,满足设计需求。③ 压力、温度、初始裂纹深度等因素对杀菌锅应力强度因子均有显著影响,杀菌锅裂纹扩展使剩余寿命大幅下降,且裂纹扩展速度逐渐升高。因此在使用过程中及时进行安全检查,可以采用试验所使用的分析方法对含裂纹缺陷的杀菌锅进行剩余寿命分析,对杀菌锅损伤及时预警,采用局部补强、补焊等措施并控制锅体内部载荷,保证其安全使用。后续可以对杀菌锅进行弹塑性疲劳分析以及弹塑性断裂分

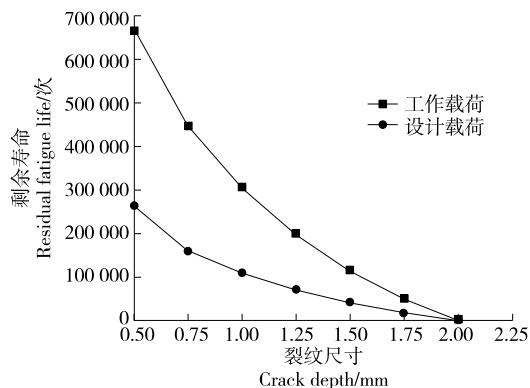


图 13 不同初始裂纹的杀菌锅剩余寿命

Figure 13 The remaining life of vertical retort with different initial crack sizes

析,研究的关键点在于材料弹塑性模型的建立与材料非线性有限元分析。

参考文献

- [1] 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.
- XUAN F Z, ZHU M L, WANG G B. Retrospect and prospect on century-long research of structural fatigue[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2021, 57(6): 26-51.
- [2] 张杰, 郝明涛, 江保全, 等. 具有典型结构压力容器的疲劳分析设计[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(2): 5-10, 21.
ZHANG J, HAO M T, JIANG B Q, et al. Fatigue analysis and design of pressure vessel with typical structure[J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 24(2): 5-10, 21.
- [3] 张振华, 史建新, 李小龙, 等. 增压锅炉冷态启动过程中耦合应力及疲劳分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(7): 997-1 002.
ZHANG Z H, SHI J X, LI X L, et al. Coupling stress and fatigue analysis during cold start-up of the supercharged boiler[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(7): 997-1 002.
- [4] NEWMAN J C, RAJU I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1976, 15(1/2): 185-192.
- [5] 谢阳, 龙伟, 赵波, 等. 压力容器疲劳加载下埋藏裂纹扩展规律的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(2): 149-154.
XIE Y, LONG W, ZHAO B, et al. Research on embedded crack propagation law of pressure vessel under fatigue loading[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2021, 58(2): 149-154.
- [6] SUSMIKANTI M, HIMAWAN R, HARTINI E, et al. Analysis of 3d semi-elliptical crack on reactor pressure vessel wall with load stress and crack ratio[J]. Journal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, 2019, 21(1): 33-38.
- [7] 杨玉强, 李张治, 李德雨, 等. 基于 ANSYS 含体形型缺陷波纹管疲劳寿命研究[J]. 压力容器, 2020, 37(11): 33-38, 64, 69.
YANG Y Q, LI Z Z, LI D Y, et al. Research on fatigue life of bellows containing volumetric defects based on ANSYS[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(11): 33-38, 64, 69.
- [8] WU E, ZHAO Y, ZHAO B, et al. Fatigue life prediction and verification of high-pressure hydrogen storage vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(59): 30 412-30 422.
- [9] LIU K T, HUANG M, LIN J J, et al. The effects of thermal stress on the crack propagation in AP1000 reactor pressure vessel [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 110: 102798.
- [10] 李荆礼, 张丽梅, 吴丹, 等. 有裂纹立式杀菌锅的力学特性与可靠性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 109-113, 161.
LI J L, ZHANG L M, WU D, et al. Study of mechanical characteristics and reliability on cracked vertical retort[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 109-113, 161.
- [11] AINSWORTH R A, ZERBST U. Review on fracture and crack propagation in weldments: A fracture mechanics perspective[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 132(2): 200-276.
- [12] 邱海飞, 韩斌斌. 模具用弓形架结构拓扑优化及疲劳分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 99-103.
QIU H F, HAN B B. Topology optimization and fatigue analysis of bow frame for die[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 99-103.
- [13] PARIS P. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [14] 赵少汴. 抗疲劳设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 266.
ZHAO S B. Fatigue design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 266.

(上接第 84 页)

- [2] 刘睿. 螺杆挤出机优化设计的现状[J]. 塑料科技, 2016, 44(3): 85-88.
LIU R. Present situation of optimal design of screw extruder[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(3): 85-88.
- [3] 黄志刚, 刘凯, 付晓宇, 等. 单螺杆挤出机固体输送段的优化设计[J]. 中国塑料, 2014, 28(11): 104-107.
HUANG Z G, LIU K, FU X Y, et al. Optimization design of single-screw extrusion mechanism on the solid conveying section[J]. China Plastics, 2014, 28(11): 104-107.
- [4] 王华峰, 周才根. 多螺杆挤出机的研究与应用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(9): 85-88.
WANG H F, ZHOU C G. The research and application of multi-screw extruders[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(9): 85-88.
- [5] 陈怡, 刘廷华. 多螺杆挤出机的开发与应用进展[J]. 中国塑料, 2004(6): 29-32.
CHEN Y, LIU Y H. The development and application progress of multiple-screw extruders[J]. China Plastics, 2004(6): 29-32.
- [6] 郭树国, 于森, 王丽艳, 等. 带有开槽中性捏合块和反向螺纹双螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 沈阳化工大学学报, 2020, 34(4): 358-362.
GUO S G, YU M, WANG L Y, et al. Three dimensional flow field analysis of twin screw extruder with slotted neutral kneading block and reverse thread[J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2020, 34(4): 358-362.
- [7] 潘龙, 张玉霞, 金志明, 等. 单螺杆挤出机高速挤出技术研究进展[J]. 中国塑料, 2009, 23(8): 1-6.
PAN L, ZHANG Y X, JING Z M, et al. technological progress in high speed extrusion of single-screw extruders[J]. China Plastics, 2009, 23(8): 1-6.
- [8] 黄元昌. 单螺杆挤出机混炼效果[J]. 橡塑技术与装备, 2014, 40(6): 37-39.
HUANG Y C. Mixing effect of single-screw extruder[J]. Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(6): 37-39.
- [9] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析 [J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 107-110.
TANG L S, GUO S G, WANG L Y. Three-dimensional flow field analysis of coaxial variable speed single screw extruder with planetary gears based on ANSYS[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 107-110.