

OCP 反应器疲劳-蠕变失效模式分析

李伟强

惠生工程(中国)有限公司, 上海 201210

[摘要]OCP 反应器是烯烃裂解工艺中的核心设备, 该设备在 513℃~585℃操作温度下运行, 伴随交变载荷工况, 存在疲劳-蠕变失效模式。文中采用 ANSYS 软件对反应器进行整体建模, 基于 ASME VIII-2 和 ASME CODE CASE 规范案例 2843 方法对疲劳-蠕变过程包括强度校核, 热-机械耦合, 应变极限校核及蠕变-疲劳交互进行分析, 最终评定合格。提出了反应器在交互作用中蠕变损伤比疲劳损伤占比更高的结论, 同时分析过程为此类设备的工程设计提供了一定的参考依据。

[关键词]OCP 反应器; 疲劳-蠕变; 热-机械耦合; 规范案例 2843

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16855

中图分类号: TN9

文献标识码: A

Fatigue Creep Failure Mode Analysis of OCP Reactor

LI Weiqiang

Wison Engineering (China) Co., Ltd., Shanghai, 201210, China

Abstract: OCP reactor is the core equipment in olefin cracking process. The equipment operates at an operating temperature of 513℃~585℃, accompanied by alternating load conditions, and has fatigue creep failure mode. In the article, ANSYS software was used to model the reactor as a whole, and the fatigue creep process including strength verification, thermo mechanical coupling, strain limit verification, and creep fatigue interaction was analyzed based on ASME VIII-2 and ASME CODE CASE code case 2843 method. The final evaluation was qualified. The conclusion was proposed that creep damage accounts for a higher proportion than fatigue damage in the interaction of reactors, and the analysis process also provides a certain reference for the engineering design of such equipment.

Keywords: OCP reactor; fatigue creep; thermo mechanical coupling; standard case 2843

引言

近年来,随着石油化工行业的飞速发展,高温、高压、大尺寸、高循环等极端苛刻工况的设备越来越多,尤其多种工况同时叠加交互的工况将导致设计工作相当具有挑战性。如高温蠕变-疲劳交互的失效形式的设备在实际项目中也愈发常见,而往往这些设备又是装置最重要的核心设备之一。

烯烃裂解工艺(OCP)中的核心设备 OCP 反应器便是高温蠕变-疲劳交互工况的代表设备,因其反应工况苛刻,反应温度高,反应和再生工况频繁切换,设计难度大而著称。

目前,国内外对纯蠕变或纯疲劳的分析设计及预防措施已经比较成熟。而对于高温蠕变与疲劳交互作用的评定国内 GB/T 4732—2024^[1]已经收录,因标准刚颁布不久,实践经验还不多。在国标颁布之前,国内的研究和工程设计人员考多参考 ASME CODE CASE 规范案例 2605-4(以下简称 CC2605)^[2]和 ASME CODE CASE 范案例 2843-2(以下简称 CC2843)^[3]。CC2843 与 CC2605 相比,温度范围从 317~454℃提高到了 371~538℃,并提供蠕变-疲劳分析具体流程。Gong 等^[4]曾在研究中回顾 CC2605 的疲劳设计方法并且讨论了纯蠕变评定下的应力分析。法程钟等^[5]采用最新 CC2843,对某一加氢反应器在高温蠕变-疲劳交互作用下进行了分析校核。本文反应器因业主及专利商外资背景要求,基于 ASMEVIII-2^[6]和 CC2843 进行分析。

1 设计条件与有限元建模

1.1 设计条件

本文以某项目直径 2400 的 OCP 反应器为分析对象,厚度 36/54mm,腐蚀裕量 1.5mm,设计压力为 1.4MPa(G)。主体材质为 SA-240 304 不锈钢,材料的物理性能和传热性能按 AMSE Sec.II,Part.D^[7]。设计寿命为 20 年。设计温度为 615℃,其中,操作温度范围为 513℃~585℃,进出口温度随时间变化的曲线按照图 1 的要求。对于 304 不锈钢材料,427℃以上就进入蠕变状态,故此设备始终工作在蠕变工况下。

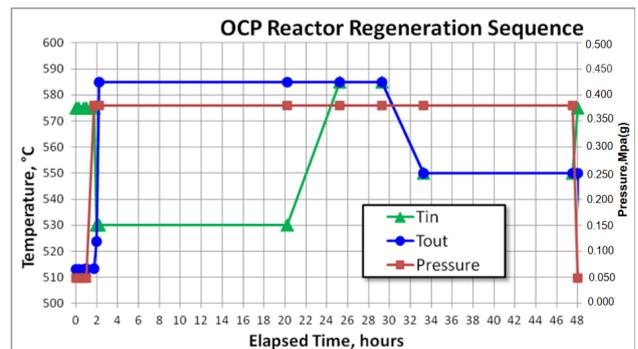


图 1 48 小时运行与再生周期内的温度和压力分布情况

考虑设备自重、内件、瓷球、催化剂、保温、防火和操作介质质量,设备总的操作重量为 70100kg。基本风压值: 750N/m²。在计算时地震载荷按照 7 度, 0.1g 查取。

根据项目绝热规定,保温材料为硅酸铝纤维制品,厚度为240mm,密度为 128kg/m^3 ,其导热系数见表1。操作介质与内壁的对流传热系数: $250\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。

表1 保温材料的属性

Tm / °C	导热系数 K W/(m·°C)	等效对流传热系数 heqv W/(m²·°C)
500	0.146	0.5790
550	0.164	0.6465
600	0.182	0.7133

1.2 有限元建模

由于疲劳、蠕变对设备为整体影响,且施加的风载、地震载荷为非对称载荷,因此设备采用整体建模,建立的有限元模型考虑了腐蚀裕量,受压部件的腐蚀裕量为1.5mm,裙座的为0mm。模型体现接管倒角、设备法兰的螺栓和热箱等细节,如图2所示。

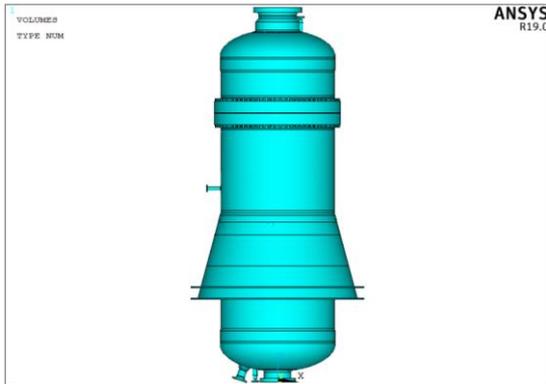


图2 OCP反应器整体模型

对于该工况和结构设计,温差应力不可忽视,需要对结构进行详细的温度场分布,然后进行热-机械载荷耦合分析。对于温度场分析,采用热分析单元 Solid 90 进行网格划分;对于机械场分析,采用20节点高阶单元 Solid 186 进行六面体网格划分。根据设备结构的特点,不断对网格进行细化,直至求解的结果基本不变,具体网格划分见图3。

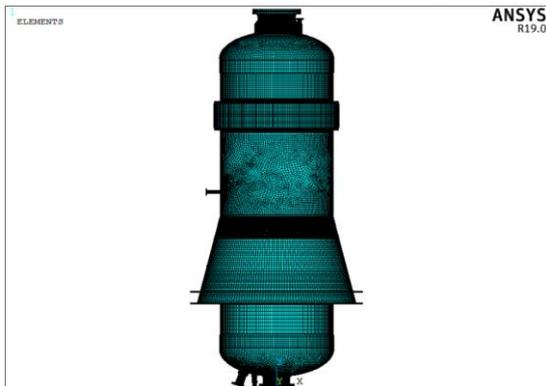


图3 OCP反应器整体模型网格划分

2 结果分析

2.1 机械场分析

首先对设备在设计工况下进行应力强度校核,只考虑

机械载荷导致的一次应力,不包括热载荷。载荷条件:内表面施加设计压力=1.4MPa;设计温度 615°C;设备法兰螺栓总的最大载荷 9710400N,每个螺栓最大预紧载荷=142800N;水平地震载荷 56080N;重力载荷 701000N(考虑了内件、介质和保温、防火、壳体质量等);按项目管口载荷表施加管口载荷及管口等效压力;在裙座基础环板底部约束环向和轴向位移约束。

图4为设备设计工况整体应力分布云图。最大 Mises 等效应力 134.611MPa 发生在温度计口 T01, T02 根部内表面处。分别对接管根部及其焊缝处,上封头与筒体,法兰与筒体连接处,裙座连接处,下封头与筒体接处及结构连续处划分路径并进行应力评定。最终结果显示各路径的一次薄膜应力 Pm, PL 和一次应力 PL+Pb 分别小于许用值 S, 1.5S, 1.5S, 评定通过。其中: S—许用应力强度, 57MPa。

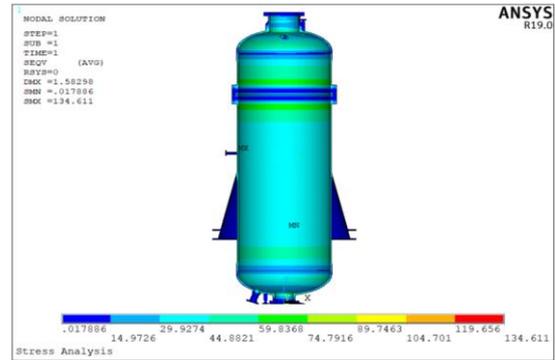


图4 整体应力分布云图(设计工况)

然后对设备在操作工况下进行应力强度校核,只考虑机械载荷导致的一次应力,不包括热载荷。载荷条件:内表面施加最大操作压力=0.379MPa;最大操作温度 585°C;其余载荷边界条件及约束同上述设计工况。

图5为设备操作工况整体应力分布云图。最大 Mises 等效应力 56.236MPa 发发在上封头接管 M01 根部下表面处。分别对接管根部及其焊缝处,上封头与筒体,法兰与筒体连接处,裙座连接处,下封头与筒体接处及结构连续处划分路径并进行应力评定。最终结果显示各路径的一次薄膜应力 Pm, 一次应力 PL+Pb 及 (PL+ Pb/Kt) 分别小于许用值 Smt, 1.5Sm, St, 评定通过。

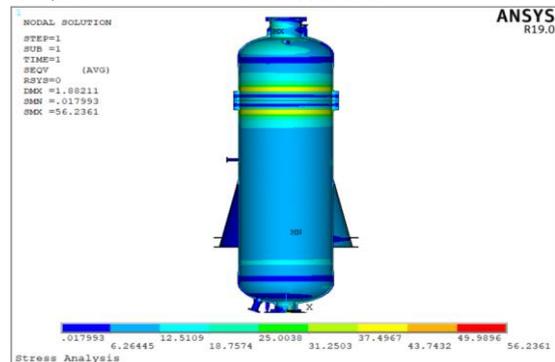


图5 整体应力分布云图(操作工况)

其中： S_m —与时间无关的应力强度，68.8MPa； S_t —与时间相关的应力强度极限，47.9MPa； S_{mt} —许用应力强度，47.9MPa； K_t —蠕变分析的截面系数，取 1.25。

2.2 温度场分析

为了准确对反应器温度场进行瞬态分析，将内部介质的对流换热系数 $250W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，有保温的设备外壁的等效对流传热系数按表 1，无保温的裙座内外壁与空气的对流传热系数 $12W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 及裙座热箱表面的热辐射均考虑在分析模型中。裙座底板温度按 $22.3^\circ C$ 考虑，进出口操作温度按照工艺条件设置，温度随着时间和空间变化。任一时刻，内部操作温度基于进出口温度沿设备高度方向呈线性分布。对一个周期（48 小时）进行瞬态热分析，获得每一时刻的温度分布。这一系列的温度分布将作为结构的热载荷。

2.3 热-机械耦合分析

对反应器进行热-机械耦合分析前，首先导入各个时刻的热载荷，按工艺条件施加各个时刻的操作压力，其他边界条件施加如本文 2.1 节。计算完成后，获得一个周期（48 小时）每一时刻的应力分布。

2.4 应变极限校核

按 CC2843 中 6.1 节测试 A-1 判断蠕变效应是否可以忽略。如果满足该筛选准则时，则蠕变效应很小。在同时满足下面 2 个不等式的条件下，蠕变在极限应变校核中可以忽略，则可以按照 ASME VIII-2 中的 5.5.6 节方法进行极限应变的校核。

$$\sum_i (t_i/r \cdot t_{id}) \leq 0.1 \quad (1)$$

$$\sum_i \epsilon_i \leq 0.2\% \quad (2)$$

根据温度压力曲线，可以得出不同温度下，反应器工作的时间，总的循环次数为 3700 次，根据 CC2843 中的表 6 查得 $r=1.0$ ， $s=1.5$ 。对于公式（1）计算过程如表 2：

表 2 计算数据表

温度/ $^\circ C$	575	530	585	550
一个周期持续时间/h	2.5	0.25	27.25	18.25
整个寿命持续时间 t_i /h	9250	925	100825	67525
对应屈服强度 S_y /MPa	104	107.6	103.2	106
1.5 S_y /MPa	156	161.4	154.8	159
t_{id} /h	1454	17758	2519	5625
$\sum_i (t_i/r \cdot t_{id}) = 58.44 > 0.1$				

585 $^\circ C$ 时材料屈服强度 $S_y=103.2MPa$ ，则 $1.25S_y=129MPa$ ，查等时应力应变曲线，应力在曲线范围外，则在 585 $^\circ C$ 下，结构的蠕变应变超出了 0.2%，因此结构在应变极限设计中无法忽略蠕变作用，需要按照 CC2843 中 6.2 节测试 A-2 的应变限值对热-机械载荷的计算结果进行评定。路径位置同本文 2.1 节设计工况。评定结果符合 CC2843 中 6.2 评定要求，均合格。

2.5 蠕变-疲劳评定

满足以下情况时，可以使用 CC2843 第 7 节的蠕变-

疲劳方法进行评定：(a) 满足 CC2843 第 6.2 节测试 A-2 和 A-3 准则或者 6.3 节中测试 B-1 和 B-2 准则；(b) 在测试 A-1 中满足 $PL+Pb+Q \leq 3S$ 准则；(c) 压力导致的薄膜和弯曲应力以及热导致的薄膜应力被分类为一次应力。

本文采用累积蠕变-疲劳损伤采用线性组合的方法，分别计算蠕变损伤和疲劳损伤，再将两者相加，可表示为（3）的形式。

$$\sum_{k=1}^q \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)_k + \sum_{j=1}^p \left(\frac{n}{N_d} \right)_j \leq D \quad (3)$$

其中，等式左边的第一项为蠕变损伤，第二项为疲劳损伤。D 为许用蠕变-疲劳总损伤； $(T_d)_k$ 为在时间间隔 k 内，根据所考察点上的应力和最高温度，在最小断裂强度曲线上确定的持续时间； $(n)_j$ 为第 j 类循环的设计循环次数； $(N_d)_j$ 为第 j 类循环的许用循环次数。总蠕变-疲劳损伤不应超过 CC2843 中图 6 给出的蠕变-疲劳损伤包络线。

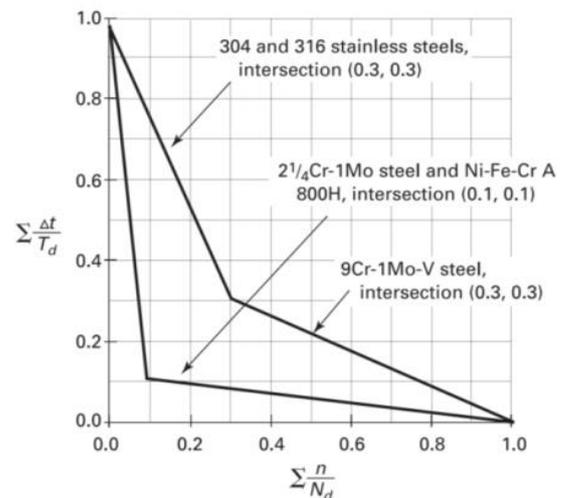


图 6 蠕变-疲劳损伤包络线

进行蠕变-疲劳分析时，首先要根据公式（4）计算总的应变范围 $\Delta \epsilon t$ ，从而根据疲劳设计曲线得到许用循环次数 Nd。

$$\Delta \epsilon t = K_v \Delta \epsilon_{mod} + K_{\Delta \epsilon c} \quad (4)$$

其 K_v 中为多轴塑性和泊松比调整系数， $\Delta \epsilon_{mod}$ 为修正的最大等效应变范围，考虑了局部塑性和蠕变效应； $\Delta \epsilon c$ 为每个循环蠕变应变增量，然后利用等时应力应变曲线，考虑应力松弛的影响，评价蠕变累积应变带来的蠕变损伤。

蠕变-疲劳路径划分同本文 2.1 节操作工况。蠕变-疲劳损伤最大值发生在上封头接管 M01 根部，蠕变-疲劳损伤求和结果如表 3：

表 3 蠕变-疲劳损伤求和结果

路径	$\sum (n/N_d)$	$\sum (\Delta t/T_d)$	$\sum (n/N_d) + \sum (\Delta t/T_d)$	许用值	结果
Path-h	0.0037	0.8528	0.8565	0.9914	合格

3 结论

(1) OCP 反应器承受多种苛刻操作工况，失效模式

不是单一的强度问题,需要对每一种可能发生的失效模式进行安全分析和评定。本文对其进行了强度校核,热-机械耦合,应变极限校核,蠕变分析,疲劳分析及蠕变-疲劳交互分析,最终评定合格。

(2) 本文反应器,蠕变损伤占比远大于疲劳损伤,说明蠕变损伤带来的危害一般要大于疲劳损伤。

(3) 本文反应器,各工况危险截面均位于接管根部附近,除了考虑接管、壳体足够的厚度外,对接管结构进行了优化考虑,比如接管均为带翻边整体加强结构,避免应力集中部位发生根部焊缝处。

[参考文献]

- [1]GB/T 4732—2024, 压力容器分析设计[S].
[2]ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case 2605-4[S].2023.
[3]ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case

2843-2[S].2023.

[4]Gong J G, Liu F, Xuan F Z. On fatigue design curves for 2.25Cr—1Mo—V steel reactors at elevated temperature in Code Case 2605[J].Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME,2018,140(2):21101.

[5]法程钟,苏文献.基于 ASME 规范案例 2843 的加氢反应器蠕变—疲劳强度分析与考核[J].压力容器,2018,35(9):21-29.

[6]ASME Boiler and Pressure Vessel Code—Section VIII, Division 2, Alternative Rules[S].2023.

[7]ASME Boiler and Pressure Vessel Code—ASME Section II,Materials Part D Properties(Metric)[S].2023.

作者简介:李伟强(1986.11—),男,上海,汉族,硕士研究生,工程师,就职于惠生工程(中国)有限公司,主要从事化工设备设计工作。