

钛合金材料弹塑性修正因子研究

杜娟¹, 邵雪娇¹, 张丽屏¹, 阚前华², 郭素娟²

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041; 2. 西南交通大学, 成都, 610031

摘要: 对核级设备的疲劳分析计算通常是采用美国工程师机械学会 (ASME) 或法国《压水堆核岛机械设备设计和建造准则》(RCC-M) 规定的简化弹塑性疲劳分析方法。进行简化的弹塑性疲劳分析需要确定弹塑性修正因子 (K_e) 及其相关参数。规范给出了核级设备常用材料的 K_e 基于大量试验数据拟合的经验公式及其相关系数。但目前, 规范并没有提供钛合金材料的这些相关数据。由于试验获取钛合金材料 K_e 需要耗费大量时间和物力, 因此, 通过数值分析方法获取钛合金材料的 K_e , 并验证核级设备常用材料规范提供的经验公式是数值分析方法获取 K_e 的包络值, 同时确定包络的最小保守裕量。以此为依据, 确定钛合金材料 K_e 的表达式及其相关系数, 以满足钛合金 TA17 的简化弹塑性疲劳分析要求。

关键词: 弹塑性修正因子 K_e ; 钛合金; 简化弹塑性疲劳分析

中图分类号: TL34 **文献标志码:** A

0 概述

核级设备疲劳分析计算的通常采用美国工程师机械协会 (ASME) 或法国《压水堆核岛机械设备设计和建造准则》(RCC-M) 规范规定的计算分析方法。根据 ASME 和 RCC-M, 分析法设计通常采用弹性分析或简化弹塑性分析方法计算疲劳使用系数, 而材料的弹塑性修正因子 (K_e) 是简化弹塑性分析方法的重要参数。2 个规范在大量试验数据基础上, 考虑一定的保守裕量, 给出了核级设备常用材料诸如铁素体钢和不锈钢的 K_e 的通用表达式及相关系数, 但没有提供钛合金材料的相关数据。因此, 在现有规范的基础上, 无法利用规范提供的分析法对钛合金材料进行简化弹塑性疲劳计算。对于钛合金材料若要采用上述方法进行简化弹塑性疲劳分析, 必须要有 K_e 的通用表达式及相关系数。由于试验获取 K_e 需要耗费大量时间和物力, 因此, 有必要通过数值分析方法获取钛合金的 K_e 的通用表达式及相关系数, 从而掌握理论分析手段, 为采用分析法开展钛合金材料疲劳分析奠定基础。

本文基于 ANSYS 有限元程序通过数值分析方法获取材料 K_e , 验证核级设备常用材料规范提供的经验公式是数值分析方法获取 K_e 的包络值, 同时确定包络的最小保守裕量。以此为依据, 确定钛合金材料 K_e 的表达式及其相关系数。

1 分析方法

1.1 K_e 的定义

根据 ASME 和 RCC-M 的定义, $K_{e(EP)}$ 表示弹塑性分析得到的弹塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_{ep}$ 与弹性分析得到的等效弹性应变范围 $\Delta\varepsilon_e$ 的比值, 即:

$$K_{e(EP)} = \Delta\varepsilon_{ep} / \Delta\varepsilon_e \quad (1)$$

由于 RCC-M 对 K_e 的计算公式可以包络 ASME 的相关内容, 本文仅对 RCC-M 的表达式进行讨论。

在进行简化弹塑性疲劳分析的时候, 对于机械载荷作用的情形, RCC-M 根据一次加二次应力幅值 (S_n) 采用经验公式来计算机械载荷作用下的弹塑性修正因子 $K_{e(mech)}$:

$$K_{e(mech)} = \begin{cases} 1 & (S_n \leq 3S_m) \\ 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right) & (3S_m < S_n \leq 3mS_m) \\ 1/n & (S_n > 3mS_m) \end{cases} \quad (2)$$

对于热机载荷共同作用的情形, 机械载荷作用下, 按照式 (2) 计算 $K_{e(mech)}$, 热载荷作用下的 $K_{e(therm)}$ 则按式 (3) 计算:

$$K_{e(\text{therm})} = \frac{-A}{(S_n/S_m) + B} + C \quad (3)$$

最后, 根据 $K_{e(\text{mech})}$ 和 $K_{e(\text{therm})}$ 即可得到规范关于 K_e 的表达式:

$$K_{e(\text{RCCM})} = \left[K_{e(\text{mech})} \frac{S_{p(\text{mech})}}{S_{p(\text{total})}} + K_{e(\text{therm})} \frac{S_{p(\text{therm})}}{S_{p(\text{total})}} \right] \quad (4)$$

式中, S_m 为设计应力强度; S_p 为总应力幅值; n 为材料硬化指数; m 为 K_e 达到最大值时 $S_n/3S_m$ 的比值。

1.2 分析方案

由于规范对于不同的核级常用材料采用同一经验式, 并根据不同材料给定不同的参数, 因此本文对于钛合金材料 TA17 也沿用规范提供的经验式(2)~式(4), 只需确定参数即可。

数值分析方法确定 TA17 的 K_e 表达式相关参数的步骤如下:

(1) 针对 ASME 和 RCC-M 规范提供的核级常用材料奥氏体不锈钢, 选取典型结构进行有限元分析; 根据式(1)通过弹性和弹塑性有限元分析获取奥氏体不锈钢的 $K_{e(\text{EP})}$, 验证根据式(4)确定的 $K_{e(\text{RCCM})}$ 为 $K_{e(\text{EP})}$ 的包络值, 并确定最小保守裕量。

(2) 基于 TA17 的材料物理性能和力学性能, 在考虑结构、载荷、本构关系等影响因素的情况下, 通过有限元进行弹性和弹塑性分析, 获取钛合金的 $K_{e(\text{EP})}$ 。

(3) 以 $K_{e(\text{RCCM})}$ 为 $K_{e(\text{EP})}$ 的包络值及所确定的保守裕量为依据, 确定 TA17 的 K_e 表达式的相关系数。

1.3 影响 K_e 的主要因素

分析中需考虑的影响 K_e 的主要因素有:

(1) 加载方式: 采用载荷(应力)控制和位移控制两种加载控制方式, 讨论加载控制方式对 K_e 的影响。

(2) 本构模型: 分别采用多线性弹塑性本构模型和非线性随动硬化 Chaboche 模型计算弹塑性修正因子, 考察 ANSYS 中两种分别对单轴和循环描述最准确的材料本构模型对 K_e 的影响。

(3) 载荷类型: 选取热载荷和机械载荷两种类型, 比较热载荷和机械载荷取不同比值时所求得的 $K_{e(\text{EP})}$ 与 $K_{e(\text{RCCM})}$ 的大小关系, 讨论热机械

比值对 K_e 的影响。

(4) 温度: 材料的单轴拉伸行为随着温度的升高有很明显的变化。通过选取 30 和 350 两种温度考虑材料单轴拉伸行为对弹塑性修正因子的影响。

另外, 为了使计算得到的 S_n 分布在规范关心的区间 ($3S_m \sim 6S_m$) 内, 采用如下调整方法:

几何形状调整: 选取 4 种具有不均匀应力场的典型结构(图 1), 通过调节几何模型的相关尺寸参数, 改变模型的应力集中程度, 从而使得 S_n 发生变化; 加载波形调整: 选取不同的循环载荷不对称系数 R 为 0、-0.5、-0.8 和 -1 的 4 种情况来获得不同的 S_n 。 R 表示循环加载过程中的最小载荷与最大载荷之比。

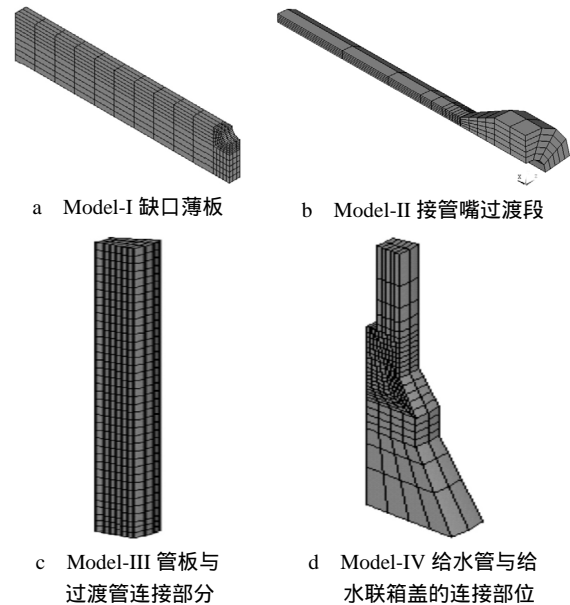


图 1 典型结构有限元模型图

Fig. 1 Finite Element Model

2 钛合金材料弹塑性修正因子研究

2.1 钛合金材料本构描述

在 30 和 350 两种温度下, 通过对 TA17 进行单轴拉伸、应变循环和应力循环试验, 得出结论: TA17 在给定测试条件下表现出明显的循环稳定特性; TA17 在非对称应力循环下, 表现出明显的棘轮行为。

由应变控制、不同温度下的稳定循环应力-应变曲线通过最小二乘法拟合获得相关材料常数, 从而确定出 Chaboche 模型材料参数(表 1)。

利用多线性弹塑性本构模型, 对 TA17 稳定

循环下的单轴拉伸曲线进行了模拟，结果见图 2。利用表 1 中的材料参数对 TA17 不同温度下的稳定循环应力应变曲线进行模拟，结果见图 3。从图 3 中可以看出，模拟结果与试验结果吻合。

表 1 Chaboche 模型材料参数

Table 1 Material Parameters of Chaboche Model

材料	温度/	C1/MPa	γ_1	C2/MPa	γ_2
TA17	30	1×10^4	10	3×10^4	30
	350	0.2×10^4	13	1×10^4	5

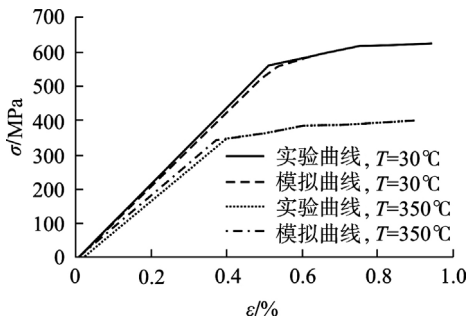


图 2 多线性弹塑性本构模型模拟的稳定循环下的单轴拉伸曲线

Fig. 2 Stable Cyclic Monotonic Tensile Stress-strain Curves using Multi-Linear Elasto-Plastic Constitutive Equations

2.2 弹塑性修正因子研究

钛合金的 K_e 表达式相关系数 m 、 n 和 A 、 B 、 C 的确定方法参见图 4。

分别对 TA17 的 4 种具有不均匀应力场的模型进行有限元分析，根据式 (1) 计算的各种载荷情况下的 $K_{e(EP)}$ 值汇总于图 5 中散点处。无论是热载荷、机械载荷，还是热机耦合载荷，通过不断优化 m 、 n 和 A 、 B 、 C ，调整 $K_{e(RCCM)}$ 随 S_n 变

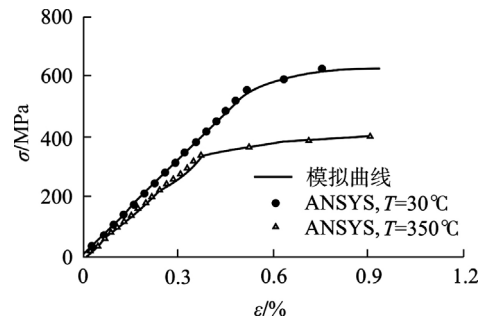


图 3 Chaboche 模型模拟的稳定循环应力应变曲线
Fig. 3 Stable Cyclic Monotonic Tensile Stress-strain Curves Using Chaboche Model

化曲线，使得 $K_{e(RCCM)}$ 均完全包络 $K_{e(EP)}$ ，且最小保守裕量满足奥氏体不锈钢材料 Z2 CND18.12 (控氮) 的最小保守裕量要求。

根据式 (2)、式 (4) 可知，TA17 的屈服强度 S_y 和 S_m 的波动影响 K_e 的取值。在常温和高温下， S_y 和 S_m 分别取平均值、最大值、最小值计算得到的 K_e 与本报告采用的稳定循环值计算得到的 K_e 十分接近。对于 TA17，最大误差为 5.6% (20，由 S_y 引起)。因此，在 K_e 的相关系数确定中，在奥氏体不锈钢机械载荷作用下的最小保守裕量的基础上考虑钛合金材料参数的波动而增加保守量。

经过上述分析可知，通过不断优化参数的取值，最终计算得到的弹塑性修正因子 $K_{e(RCCM)}$ 完全包络 $K_{e(EP)}$ ，且最小保守裕量略大于表 2 中奥氏体不锈钢材料 Z2 CND18.12 (控氮) 的最小保守裕量要求。

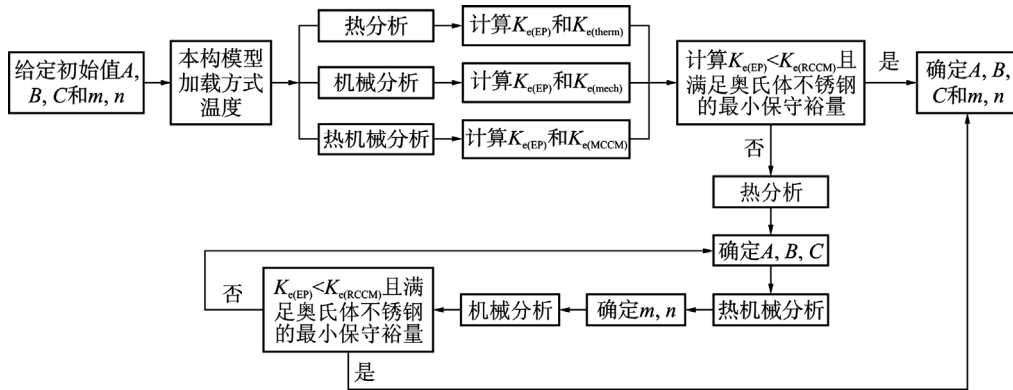


图 4 K_e 表达式相关系数的确定流程

Fig. 4 Flow Chart of Determination of Parameters of K_e

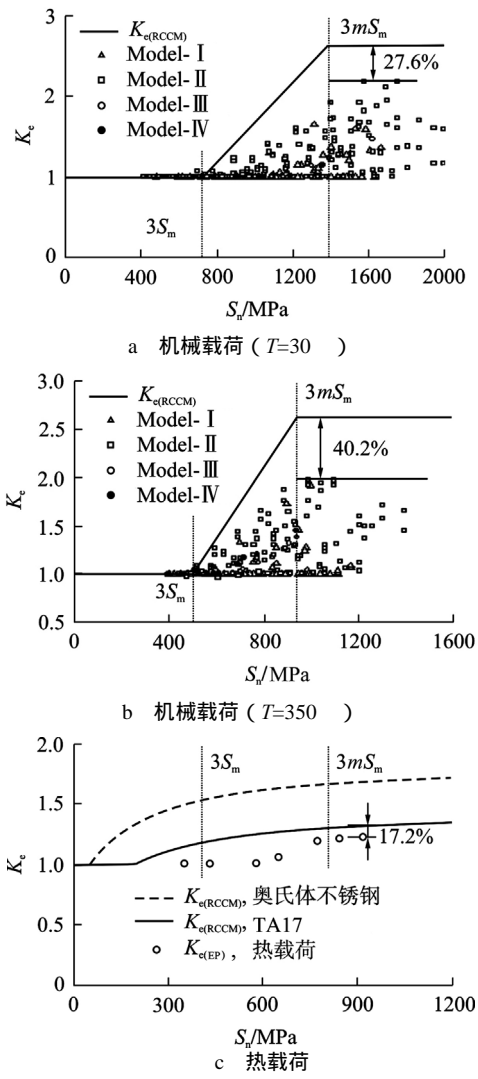


图5 弹塑性修正因子 K_e 随 S_n 变化曲线 ($m=1.9, n=0.38$)

Fig. 5 Relationship of K_e and S_n ($m=1.9, n=0.38$)

3 总结

通过对弹塑性修正因子表达式中的相关系数 m 、 n 和 A 、 B 、 C 给定初始值，沿用奥氏体不锈钢弹塑性修正因子的相关系数的取值对 4 种典型结构进行了有限元分析，讨论了加载方式、本构关系、温度和载荷类型等因素对 K_e 的影响。进而

表2 Z2 CND18.12 (控氮) 和钛合金 TA17 在各类载荷作用下的最小保守裕量的对比

Table 2 Comparison of Margin of CND18.12 (Nitrogen Controlled) with TA17 Under Different Loading Condition

材料	最小保守裕量/%		
	热载荷	机械载荷	热机械载荷
Z2 CND18.12 (控氮)	16.9	20.0	13.3
TA17	17.2	22.3	20.9

注：考虑 TA17 材料参数的波动而增加保守量后的值 (增加值为 5.6%)

对数据进行优化分析，最终确定的钛合金材料 TA17 在机械载荷、热载荷及热机载荷共同作用下的弹塑性修正因子的表达式分别见式 (5) 式 (6) 式 (7) 及其相关系数为：

$$K_{e(mech)} = \begin{cases} 1 & (S_n \leq 3S_m) \\ 1 + \frac{1-n}{n(m-1)} \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right) & (3S_m < S_n \leq 3mS_m) \\ 1/n & (S_n > 3mS_m) \end{cases} \quad (5)$$

$$K_{e(therm)} = \max \left[-A / (S_n / S_m + B) + C, 1 \right] \quad (6)$$

$$K_{e(RCCM)} = K_{e(mech)} \frac{S_{p(meca)}}{S_{p(total)}} + K_{e(therm)} \frac{S_{p(therm)}}{S_{p(total)}} \quad (7)$$

表3 钛合金材料 TA17 弹塑性修正因子相关参数

Table 3 Material Parameters of Elastoplastic Strain Correction Factor for TA17

材料	m	n	A	B	C
TA17	1.9	0.38	1.46	1.26	1.46

经过验证，上述参数计算的弹塑性修正因子不仅满足 $K_{e(RCCM)}$ 的值完全包络 $K_{e(EP)}$ 的值，且热载荷、机械载荷和热机械载荷作用下弹塑性修正因子的最小保守裕量均略大于 RCC-M 规范提供的奥氏体不锈钢材料 Z2 CND18.12 (控氮) 相应的最小保守裕量，上述参数适用于钛合金 TA17 的简化弹塑性疲劳分析要求。

Research on Elastoplastic Strain Correction Factor of Titanium Alloy

Du Juan¹, Shao Xuejiao¹, Zhang Liping¹, Kan Qianhua², Guo Sujuan²

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China

Abstract: The ASME and RCC-M codes include a detailed fatigue evaluation based on elastically predicted stresses. A prerequisite for the fatigue analysis is that the primary-plus-secondary stress range does not exceed $3S_m$. If this limit is exceeded, the code provides “simplified Elastoplastic Analysis” rules for the fatigue evaluation. A K_e penalty factor is the most important parameter of this method. The ASME and RCC-M codes provides the codified expressions of K_e and material parameters for general materials of nuclear components, but there is no expressions and material parameters for the Titanium Alloy. The determination of K_e expressions and parameters for Titanium Alloy is discussed. A exemplary verification calculations of general materials that have been performed and the conservative allowance is obtained. Based on the results, the proposed K_e factors of Titanium Alloy has been determined and deliver the same sufficiently conservative results.

Key words: Elastoplastic strain correction factor K_e , Titanium alloy, Simplified elastoplastic analysis

作者简介：

杜娟（1980—），女，高级工程师。2005年毕业于重庆大学固体力学专业，获硕士学位。现从事反应堆结构力学工作。

邵雪娇（1984—），女，工程师。2009年毕业于西南交通大学固体力学专业，获硕士学位。现从事反应堆结构力学工作。

张丽屏（1970—），女，高级工程师。1992年毕业于清华大学固体力学专业，获硕士学位。现从事反应堆结构力学工作。

（责任编辑：刘君）

（上接第96页）

作者简介：

龙冲生（1961—），男，研究员。2001年毕业于中国核动力研究设计院核燃料与循环专业，获工学博士学位。现从事核材料研究工作。

赵毅（1982—），男，在读博士研究生。2005年毕业于中国科学院金属研究所材料加工工程专业，获工学硕士学位。现从事核材料研究工作。

高雯（1983—），女，助理研究员。2009年毕业于中国核动力研究设计院核燃料与循环专业，获工学硕士学位。现从事核材料研究工作。

（责任编辑：马蓉）