

ASME-Ⅲ-5 高温 1 级部件 分析设计方法的改进方向探讨

刘正奇, 高付海*

(中国原子能科学研究院 核工程设计研究所, 北京 102413)

摘要: ASME 规范第Ⅲ卷第 5 册(简称 ASME-Ⅲ-5)提供了核 1 级部件在高温下使用的设计分析方法和评定准则。本文对高温的定义进行简介, 对 ASME 规范核 1 级部件在高温下考虑的设计载荷、失效机制、设计分析方法以及评定准则的特点进行总体介绍。通过对 ASME 规范与其他高温规范 R5、RCC-MRx、MONJU 在基于损伤模式下的载荷控制应力限制和变形控制限制的分析方法及准则进行对比, 探究 ASME 规范在分析方法准则中的优势与局限性, 得出 ASME 规范传统采用的基于应力分类的弹性分析法表现优异, 但由于本身固有特性并不能完美解决规范所包括的各个失效机制的结论, 提出若干项改进 ASME-Ⅲ-5 高温 1 级部件设计规范的方法。本文指出的 ASME-Ⅲ-5 可改进方向可进一步提高规范发展使用的先进性、经济性和安全性, 同时对开发构建我国自主化的核承压高温使用 1 级部件设计规范具有指导作用。

关键词: ASME 规范; 高温; 分析设计方法; 载荷控制的应力限制; 变形控制限制

中图分类号: TL3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)04-0848-08

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0435

Discussion on Improvement Aspect of Design-by-analysis Method of ASME-Ⅲ-5 Class 1 High Temperature Component

LIU Zhengqi, GAO Fuhai*

(Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Division 5 of the ASME code section Ⅲ (referred to as ASME-Ⅲ-5) provides design-by-analysis methods and evaluation criteria for Class 1 nuclear components working at high temperatures. It has a long history and is the main international design code for high temperature nuclear equipment. It took the lead in adopting the idea of stress classification and first introduced the concepts of primary stress, secondary stress and peak stress, which had a far-reaching impact on the development of subsequent other high temperature design codes. However, with the rapid development of computational methods, high-performance computer technology, commercial finite element software and high temperature inelastic analysis methods, the results derived from elastic analysis and the evaluation of stress classification used by ASME as a mainstream method exist the limitation of overly conservatism and thus insufficient design economy. This

paper first introduced the definition of high temperature condition and the insignificant creep temperature, as well as the design loads, failure mechanisms, design-by-analysis methods, and evaluation criteria of ASME code for nuclear Class 1 components at high temperature. Then, by comparing the analysis methods and criteria of primary load limit and deformation control limit of ASME with other high temperature codes, such as R5, RCC-MRx and MONJU (with or without consideration of the time dependence of creep), the advantages and limitations of ASME analysis methods and criteria were explored. Each code has its distinct characteristic. British R5 code focuses on the reference stress method and the application of limit analysis. French RCC-MRx code is in the same lineage with ASME, but distinguishes between significant/insignificant creep and significant/insignificant irradiation effects. Japanese MONJU code distinguishes the long-term load from short-term load, such as seismic load. Long-term loads and short-term loads adopt different limits to avoid overly conservatism. It is concluded that the elastic analysis based on the stress classification traditionally adopted by the ASME code is excellent, but it cannot perfectly cope with the all the code-considered failure mechanisms due to its inherent characteristics. Therefore, several methods are proposed as alternative methods for the ASME-Ⅲ-5 improvement. The pointed-out directing improvement aspects of ASME-Ⅲ-5 enable to enhance the advancement, economy and safety of the development and use of ASME, with the scientific integration of the traditional design of pressure vessels and the new era of computational analysis technology. At the same time, this study also has important guiding value for the development and construction of Chinese independent design code in nuclear Class 1 high temperature pressure-bearing components.

Key words: ASME code; high temperature; design-by-analysis; primary load control limit; deformation control limit

核压力容器高温设计规范的提出是为了核设施部件在高温下使用时有统一的设计分析评定准则,它的完善和发展与科学技术的进步、人们对失效模式的认识联系紧密,理想情况下核压力容器高温设计规范应包括:高温的定义,考虑的设计载荷与失效标准,设计准则及评价。

目前国内核承压设备设计使用的主流规范是 ASME,其在 1915 年首次颁布,该规范在力学评价弹性分析中首次提出了应力分类法的思想,为后续压力容器力学评价的弹性分析方法奠定了基础,影响深远。2015 年正式发布的 ASME 规范第Ⅲ卷第 5 册(简称 ASME-Ⅲ-5)^[1]是研究核容器中关于高温环境运行下的规范,综合了 ASME 自 1976 年以来高温设备设计规范的主要成果^[2-3],涉及蠕变、热老化等失效机制,提供了核 1 级部件设计规则。此外随着时间的发展,国际上许多其他国家核工业因为不

同的需求和侧重,也诞生了各自的核承压设备高温设计规范,且各有所长,著名的如:英国 R5 规程^[4],注重参考应力法和极限分析的应用;法国的 RCC-MRx 规范^[5],与 ASME 一脉相承,但区分蠕变显著/不显著、辐照显著/不显著,更加细化;日本的 MONJU 规范^[6-7],注重地震引起的失效和长/短期载荷作用对不同失效机制的影响。

随着当下计算方法、计算机高性能计算技术、商用有限元软件和高温非弹性分析方法技术的快速发展进步,相较而言,ASME 规范传统采用的作为主流的基于弹性分析的应力分类评价方法本身存在结果过于保守、设计经济性不够等局限性。本文通过对比 ASME-Ⅲ-5 与国际上其他主流设计规范或规程,基于损伤模式下载荷控制的应力限制和变形控制限制分析方法及准则,探讨 ASME-Ⅲ-5 规范在分析方

法准则中的优势与局限性,吸收其他规范技术强项,提出若干项改进 ASME-Ⅲ-5 高温 1 级部件设计规范的方法,指出 ASME-Ⅲ-5 高温规范改进的方向,以进一步提高规范发展使用的经济性和安全性。

1 ASME-Ⅲ-5 设计方法准则的总体考虑

1.1 理想高温及 ASME 规范高温定义

理想情况下,核反应堆运行环境中的高温指的是温度的一个工作范围,在此范围内,即使在低于屈服强度的理论稳定载荷作用下,与时间有关的热激活变形和损伤过程也可以成为影响承载部件稳定性的重要因素。

由于时间相关性是温度的平滑函数,没有可以清晰区分时间相关和时间无关行为的界限,因此对于特定的材料和使用条件,可以定义一个温度限制即高温条件,低于该限制时,温度影响可以忽略不计。此温度限制可以确定为时间相关性首次达到显著标准的阈值温度。高温条件的定义不唯一,需依据规范考虑的失效模式和设计寿命综合决定,达到或高于高温条件需要考虑时间相关的热激活变形和失效,如热老化、蠕变等,低于时可以忽略时间相关性影响。

ASME 规范有高温使用温度和不显著蠕变温度的定义,也给出了与时间、温度相关的材料许用应力限制 S_m 。对铁素体钢温度超过 700 ℉ (371 ℃)或奥氏体温度超过 800 ℉ (427 ℃)时,要考虑蠕变^[1],否则可以忽略。ASME-Ⅲ-5 关于不显著蠕变的定义是模糊的,交由设计师自行判断,但可以参考附录 T 中 Test-A3 试验给定的明确标准,即当蠕变断裂的时间使用分数为 0.1 或更小,且累积蠕变应变小于限制的 0.2%时,蠕变可认为不显著。

1.2 ASME-Ⅲ-5 关于设计载荷的考虑

ASME-Ⅲ-5 有关于不同载荷的分类和处理,包含了设计载荷、正常工作载荷、经常出现的异常载荷、罕见异常载荷、极限故障载荷(分别对应规范的设计,A、B、C、D 级使用限制)以及试验载荷,载荷类型可分为机械载荷(如自重、内压、外压、地震、流体动力载荷、接管载荷等)、热载荷(如温度引起的热应力)和热-机循环载荷,不同载荷或组合引起不同的失效机制,如机械载荷一般引起载荷控制的一次应力失效

(即载荷控制的应力限制),热载荷一般引起变形控制的二次应力,热-机循环载荷引起变形控制的安定棘轮和疲劳失效(即变形控制限制)。

1.3 ASME-Ⅲ-5 关于失效机制及准则的考虑

在 ASME-Ⅲ-5 设计准则中涉及的失效机制分为单一载荷、循环载荷、蠕变相关的失效,包括:单一载荷下的极限垮塌,单一载荷下的结构不稳定或屈曲;循环载荷下的疲劳失效,棘轮作用导致的渐进坍塌;高温运行下的特定失效包括蠕变断裂、增强蠕变、蠕变屈曲、蠕变疲劳、弹性跟随效应。通过免责声明进行说明的有:单一载荷时的过度变形;稳定载荷下的蠕变产生过度变形;由于腐蚀、传质现象等导致压力边界坍塌或破裂;辐照效应。

ASME-Ⅲ-5 以详细表格的形式总结提供了如何使用设计规范来处理各种失效机制,其中的重点是Ⅲ-5 册不允许对载荷控制的应力限制(即一次应力限制)进行高温非弹性分析,D 级载荷除外。其载荷控制的应力限制分析中采用一种弹性方法来解释高温蠕变引起的一次弯曲应力的重新分布,通过一次膜应力加上考虑或不考虑蠕变影响的主弯曲应力限制,有效形成了一次应力的破坏标准。ASME-Ⅲ-5 附录 T 提供了变形控制的限制,即关于沿厚度方向平均应变、表面平均加弯曲应变和峰值应变的最大累计非弹性应变不能超过 1%、2%和 5%,焊接件中的应变集中则通过将许用应变减少为母材的 1/2 来解决^[1]。上述应变限制是通用的,不考虑给定材料的蠕变延性。ASME-Ⅲ-5 没有提供解决腐蚀、辐照和传质现象的方法。

2 ASME-Ⅲ-5 和其他规范分析方法的比较

2.1 ASME-Ⅲ-5 分析设计

比较从载荷控制的应力限制和变形控制限制两方面进行,每个方面分为时间相关和时间无关领域,进而可以直观看出 ASME 设计规范的弹性分析方法、非弹性分析方法的侧重点和优劣势。ASME-Ⅲ-5 时间无关领域直接引用 ASME 第Ⅲ卷第 1 册 NB 分卷。

1) 载荷控制的应力限制

(1) 时间无关

在弹性分析中忽略蠕变的情况下,ASME

规范关于一次、二次应力以及峰值应力的应力分类的定义在世界压力容器设计领域具有突破性意义,对国际上其他不同设计标准的后续发展和要求都有重大影响。

关于载荷控制的应力限制的计算,ASME 允许使用非弹性方法的极限载荷分析和弹塑性分析。

(2) 时间相关

弹性分析时,ASME 承认随蠕变发生的应力重分布现象,同时其使用应力折减因子 K_t 来反映高温蠕变引起的沿壁厚的外层纤维弯曲应力减小。

此处 ASME 规范不允许在载荷控制的应力限制分析中使用非弹性分析和极限载荷分析^[8]。

目前 ASME 规范使用存在的一项主要困难是面对复杂结构或工况条件下如何进行合理的应力分类,在对应力分类把握不准时,设计师一般采用保守处理方式,这往往可能导致不恰当的设计结果。

2) 变形控制限制

变形控制限制的介绍和对比主要从弹性跟随现象的处理和弹性分析、非弹性分析方法 3 个方面进行。

弹性跟随指的是不同刚度零部件连接在一起且柔性部分处于高应力状态时,柔性部分可能产生很高的应变集中。由于弹性分析方法只是进行了弹性计算,并不能真实反映出结构实际存在的弹性跟随这一重要效应,这是弹性分析方法的一个固有不足,规范必须加以考虑解决。在变形控制限制中,进行安定棘轮分析时 ASME 规范简化非弹性方法中直接将弹性跟随引起的膜应力视为一次应力(即载荷控制的应力)进行保守评估。完全非弹性分析可以对弹性跟随进行更进一步的评估,ASME 规范是允许的,但依赖高温本构模型^[9]。

ASME 规范在变形控制限制中主要采用的弹性分析和简化非弹性分析方法是指使用弹性应力分析和应力分类,其结果应用于弹性、安定和棘轮分析的 Bree 图(适用于理想弹塑性结构和小变形假设,以影响热应力棘轮分析的 3 个无量纲参数为坐标轴的图,用以分析安定棘轮状态),即附录 T 中的 A & B 试验。

ASME 规范附录 T 部分允许对变形控制

限制的计算进行非弹性分析,基于材料的弹黏塑性本构模型和有限元分析软件,在 A、B、C 使用载荷、使用寿命内得到的最大累计非弹性应变应满足:沿厚度方向平均应变、表面平均加弯应变和峰值应变的应变不超过 1%、2% 和 5%。ASME 规范 III-5(2021 版)提供了若干种高温材料的弹塑性、蠕变本构模型,可以据此开展高温结构的基于分离型本构模型的弹性跟随、安定棘轮、蠕变-疲劳分析,但提供的模型参数正确性仍存在一些问题^[10]。高温非弹性本构模型的应用方法在 ASME 规范中只是简要提及,并未深入涉及设计师操作层面的细则规定^[9],由于现今计算机高性能计算技术的巨大进步,这会是 ASME 规范未来进一步细化改进发展的一个方向。

2.2 与 R5 规程评价方法的比较

1) 载荷控制的应力限制

(1) 时间无关

弹性分析方面,R5 直接借鉴了 ASME 对一次应力、二次应力以及峰值应力的定义。

非弹性分析方面,与 ASME 不同,R5 允许并鼓励使用非弹性分析,在第 2/3 卷附录 A12 节中提供了非弹性分析和各种形式本构方程的使用指南。同时 R5 允许并在很大程度上鼓励使用极限载荷方法,此类方法的使用以及与设计标准的结合非常出色,充分体现了 R5 前沿性、学术性更强的技术特点。

(2) 时间相关

弹性分析方面,R5 并不提供一种用弹性方法解释蠕变变形引起的应力重分布^[4],与 ASME 相反,R5 更加依赖极限载荷分析和参考应力方法。极限载荷分析实际上是极限分析的一种类型,极限分析可被视为寻找极端条件的分析,如最大允许载荷或最小不安全负荷;这还包括循环状态,如安定和棘轮极限。极限载荷分析通常通过使用有限元分析来实现,其假定结构由理想塑性材料制成,采用极限分析法来计算结构最大承载能力。R5 规范将极限载荷与参考应力联系起来,以分析一次载荷限制,其中参考应力指给定外载荷条件下复杂构件的稳态蠕变行为可以跟单轴蠕变试验结果建立关联的应力^[11]。1968 年,Sim^[12]在其博士论文中建立了参考应力和极限载荷、所受

外载荷的关联式:

$$\sigma_{\text{ref}} = P_0 / P_u \sigma_y \quad (1)$$

式中: σ_{ref} 为参考应力; P_u 为结构的极限载荷; σ_y 为结构材料的屈服极限; P_0 为结构的外加载荷。

此方法于 1991 年被 R5 规范采纳后用于蠕变强度分析。同时,参考应力法基于结构整体失稳而不是局部破坏的极限载荷,其本质上要求材料必须具有足够的高温蠕变延性才能使用^[11],不过 R5 规范同时提供了蠕变脆性材料的参考应力法。

非弹性分析方面,R5 同样允许并鼓励使用非弹性分析。

与 ASME 规范不同,R5 规范尽管也采用了应力分类的技术路线,但极限载荷分析及其在参考应力方法中的应用是 R5 的时间相关载荷控制的应力限制分析方法的核心。通过限制参考应力小于断裂参考应力判据,保障满足蠕变强度和设计寿命要求^[11],根据蠕变延性/脆性材料有不同的断裂参考应力计算形式。此方法避免了 ASME 规范经常面对的复杂结构如何进行应力分类的问题,提高了方法应用的客观性和设计结果准确度。

2) 变形控制的限制

R5 认识到弹性跟随对结构性能分析的重要性。关于循环载荷,有 3 种方案来解决变形限制问题,分析程度和保守程度各不相同,分别是弹性分析、简化非弹性分析和完全非弹性分析。这里介绍基于简化非弹的弹性跟随因子法。R5 为了量化结构中不连续部位的弹性跟随效应定义了弹性跟随因子,提供了其求取流程^[11]:

$$Z = \frac{\Delta \bar{\epsilon}_{\text{inc}} + \Delta \sigma' / E}{\Delta \sigma' / E} = \frac{\Delta \bar{\epsilon}_{\text{c}}}{\Delta \bar{\epsilon}_{\text{el}}} \quad (2)$$

式中: Z 为弹性跟随因子; $\Delta \bar{\epsilon}_{\text{inc}}$ 为总应变增量; E 为弹性模量; $\Delta \sigma'$ 为应力松弛量; $\Delta \bar{\epsilon}_{\text{c}}$ 为非弹性(蠕变)应变增量; $\Delta \bar{\epsilon}_{\text{el}}$ 为弹性应变变化量。

ASME 没有对弹性跟随进行量化处理。

R5 允许对变形限制进行弹性分析,并将结果应用于蠕变不显著的快速循环,同样也允许考虑增量时间步长使用非弹性分析来分析结构的弹性、塑性和蠕变行为。与载荷控制的限制类似,直接使用非弹性分析方法的计算效率不高。此外 R5 若要在棘轮状态下运行,则必须

进行完全非弹性分析。

相比 ASME 规范使用时间分数法计算蠕变损伤,而 R5 规范更推荐使用延性耗竭法,延性耗竭法基于延性耗竭理论,认为当局部区域累积蠕变应变达到断裂延性值时,损伤达到临界值,即失效^[13]。此方法计算的是蠕变损伤。蠕变延性数据为断裂时蠕变应变,可通过单轴蠕变试样截面收缩率换算或延伸率获取。

R5 还提供了分析安定棘轮边界的直接法,即线性匹配法(Linear Matching Method, LMM),其通过一系列迭代修正弹性模量的线弹性分析来拟合结构的塑性行为^[14],是一种求解材料非线性行为响应的快速直接方法,其不同于 R5 规程中的其他方法以校核为主,该方法计算载荷极限,是真正的设计方法。

2.3 与 RCC-MRx 规范设计方法的比较

RCC-MRx 对失效机制分为 P 型损伤和 S 型损伤两大类,其描述了在两种主要失效机制下 1 级部件的一般设计规则。P 型损伤是由稳定单调增加的载荷或恒定载荷造成的,这包括瞬时过度变形、塑性失稳、时间相关过度变形、塑性、断裂和弹性或弹塑性失稳。S 型损伤是指由于循环往复加载而产生的所有失效机制,如渐进变形(棘轮)和疲劳开裂。在区分 P 型和 S 型损伤后,还区分了蠕变显著/不显著、辐照显著/不显著^[15],再进行后续强度分析。RCC-MRx 关于辐照能否忽略有明确标准,通过结构使用期间接收的最大剂量小于限值和每个时间段中累计剂量小于此时间段内最高温下的允许累计剂量来区分,在辐照不可忽略时许用应力强度加入了辐照项,两者都不可忽略时蠕变使用分数限制降低到考虑蠕变、不考虑辐照的 10%^[9]。而 ASME 规范则完全未考虑辐照的影响。下面的对比为不考虑辐照的情况。

1) 载荷控制的应力限制

(1) 时间无关

弹性分析方面,RCC-MRx 以与 ASME 相同的方式对一次应力、二次应力和峰值应力进行分类。

非弹性分析方面,如极限载荷法,与 ASME 相同,RCC-MRx 允许使用非弹性分析,它提供了描述可以使用的非弹性分析方法和本构材料模型的附录。

(2) 时间相关

RCC-MRx 可以使用弹性分析,与 ASME 相同,RCC-MRx 使用应力折减因子解释蠕变变形引起的应力重新分布。同时 RCC-MRx 使用修正因子修正了弹性分析中弹性跟随对膜应力的影响^[5]。

RCC-MRx 允许对时间相关的应力限制进行非弹性和极限分析(不可与其他方法混用),ASME 规范则不允许。

2) 变形控制的限制

RCC-MRx 同样认识到需要在弹性分析方法中解决弹性跟随问题,但处理不充分,只是提供一个免责声明。

弹性分析方面,RCC-MRx 有完全不同于 ASME 的方法,两者差异较大,该方法仅限于布里管型问题,未对一般结构和复杂载荷的适用性进行说明,其需要定义效率指数和二次比,很难评估是否比 ASME 规范提供的方法更有效。

非弹性分析方面,RCC-MRx 允许使用弹塑性和黏弹塑性类型的非弹性分析。RCC-MRx 提供了该规范所涉及的高温使用结构材料的塑性、蠕变本构模型方程形式和参数。

2.4 与 MONJU 设计方法的比较

MONJU 规范很大程度上基于 ASME 规范,主要区别在于 MONJU 区分了长/短期载荷,尤其是对于日本经常发生的地震载荷,提出了一种与地震载荷相关的新型失效机制,称为棘轮疲劳^[6]。其是一种由渐进循环变形加速疲劳的失效机制,并主要发生在管道中,该机制是短期的,与蠕变不直接相关,因此它在高温或低温下都可能发生。

1) 载荷控制的应力限制

(1) 时间无关

弹性分析方面,应力分类的定义与 ASME 相同,区别是区分了短期和长期应力,限制两者之和小于限制,这反映了日本对地震载荷的特殊关注。

非弹性分析方面与 ASME 相同。

(2) 时间相关

弹性分析方面与 ASME 一致。非弹性分析方面,有新提出类似 R5 的基于参考应力的无应力分类设计,不过无进一步的详细信息,说明其正处于发展之中。

2) 变形控制的限制

MONJU 更多地考虑了弹性跟随现象,与 ASME 规范类似,将热应力视情况分为二次应力或纳入一次应力分析,在低应力、长期运行的情况下简单几何结构的弹性跟随应变计算参照提供的附录。

弹性分析方面,MONJU 有一种处理循环载荷和相关变形极限的简化方法,类似于 ASME 附录 T 的 B 试验。

非弹性分析方面没有详细资料。

2.5 对比总结

总的来说,R5 允许使用各种分析类型,如使用简化非弹性分析以计算载荷控制的应力限制和变形控制极限,但当使用弹性分析时,ASME 采用整体厚度的平均温度,而 R5 则采用所选相关截面的最高温度,R5 相对更保守。参考应力法是其简化非弹性分析的核心。使用参考应力法进行蠕变强度分析可以有效避免 ASME 如何合理进行应力分类的问题,提高了设计准确度,同时弹性跟随因子应用也很好地解决了弹性跟随问题。

RCC-MRx 与 ASME 不同,区分了载荷类型及蠕变是否显著/不显著,考虑了辐照的影响。其允许对 P 型载荷的蠕变强度进行极限分析,提出了修正因子修正弹性跟随对膜应力的影响,也允许对载荷控制的应力限制进行非弹性分析。

MONJU 规范大体上基于 ASME,但它重点区分了长/短期载荷和应力限制,提供了如何判断弹性跟随程度的详细指南,并基于地震强震载荷引起的失效机理新提出了一种失效模式——棘轮疲劳。

3 ASME-Ⅲ-5 分析设计准则的改进讨论

通过上述对比,可知 ASME-Ⅲ-5 对高温环境下载荷控制的应力限制仅允许进行弹性分析,不允许使用非弹性分析和与极限载荷有关的参考应力法,在变形控制限制的弹性分析方面对弹性跟随效应进行简单保守处理,非弹性分析中没有高温非弹性蠕变本构模型使用的细则规定,没有考虑辐照相关失效等。所以本文尝试总结面向损伤模式下各个设计方法的优势和劣势并进行改进讨论。

3.1 关于载荷控制的应力限制

基于 R5 多年实践经验,可以看出在特定情况下蠕变相关的载荷控制的应力限制分析中使用参考应力法替代传统的应力分类法是可行的,传统应力分类方法在面对部分复杂结构的蠕变强度分析过于保守。MONJU 规范中针对地震的短期、长期载荷区分,RCC-MRx 关于辐照限制的影响也值得参考。

3.2 关于变形控制限制

变形控制限制中 R5 提出了弹性跟随因子及其求取流程,在简化非弹性分析中处理了弹性跟随效应,而 ASME 规范处理得不充分。

已被 R5 规范采纳的线性匹配法是一种先进的数值算法,适用于复杂工况下的棘轮极限载荷分析,具有较高的计算效率。

3.3 关于 ASME-III-5 改进方向讨论

1) ASME-III-5 规范主体部分可以不变,对载荷控制的应力限制的分析方法中除了强制性的弹性分析外可以引入非强制的可替代的非弹性分析方法,如参考应力法,并提供配套的更详尽的材料数据,如蠕变延性。参考应力法基于极限分析,避免了应力分类,给蠕变强度分析带来了极大地便利,也更加合理。在一次载荷分析领域中,参考应力法已有了足够的数据支持,在其他国际 ETD 规范和指南中被采纳或拟议采纳,可作为一种可选方法纳入 ASME 规范中。

2) 在载荷控制的应力限制中,可以加入考虑蠕变显著/不显著、辐照显著/不显著的影响以及地震条件下对于长/短期载荷明确采用不同应力限制。

3) 除 ASME 现有的弹性分析、简化非弹性分析和非弹性分析 3 种方法外,可以研究考虑将目前国际上先进的直接法设计方法——线性匹配法纳入,单独作为一种与上述 3 种方法并列的设计师可选的设计方法。

4) 高温非弹性本构模型是高温结构非弹性应力应变响应分析的基础,现有 ASME 规范提供了若干材料的分离型本构模型和参数,但对于循环塑性本构、适用于 9Cr1MoV 材料的统一型非弹性本构模型以及非弹性分析方法的使用细则等内容 ASME 都未明确,有待细化规定。

5) ASME 规范中变形控制限制的弹性分析对弹性跟随处理不充分,可以在可选替代方

案中考虑引入弹性跟随因子及其求取流程,量化考虑弹性跟随效应。

6) ASME 规范中变形控制限制的蠕变疲劳损伤交互作用判据对于蠕变损伤计算采用考虑时间分数法,结果往往过于保守,在一定条件下可以考虑研究引入保守性适度的延性耗竭法作为可选替代方案。

4 结论

ASME 规范历史悠久,是实践了很久且行之有效的 高温设计准则。为了更好地认识和使用规范,本文将 ASME-III-5 与其他国际主流规范或规程对比,探讨改进方向,得出如下主要结论。

1) ASME-III-5 基于应力分类的弹性分析方法思想先进,表现优异,但存在复杂结构应力难以合理分类问题,且在高温使用时不允许对载荷控制的应力限制进行非弹性分析。鉴于以上原因以及现今计算技术的巨大进步,ASME 可以尝试引入非弹性分析法如 R5 规程的参考应力法作为一种替代方法,在保证安全性前提下提高设计方法的经济性。也可以考虑引入线性匹配法作为一种独立的设计方法供设计师选择作为可选方案。

2) ASME-III-5 对于载荷控制的应力限制可以考虑针对服役条件和地震条件进行进一步的明确细化,加入考虑蠕变显著/不显著、辐照显著/不显著的影响以及地震条件下对于长/短期载荷明确采用不同应力限制。

3) 高温非弹性本构模型是高温结构非弹性分析的基础。对于循环塑性本构、适用于 9Cr1MoV 材料的统一型非弹性本构模型以及非弹性分析方法的使用细则等内容 ASME 可以进一步细化规定。

4) ASME 规范中变形控制限制的蠕变疲劳损伤交互作用判据对于蠕变损伤计算方法过于保守,在一定条件下可以研究考虑使用保守性适度的延性耗竭法作为可选的替代方案。

本文对比研究指出了若干项 ASME-III-5 高温 1 级部件规范设计方法准则技术改进的方向,有望通过进一步的技术基础研究正式纳入 ASME,进而提高规范发展使用的先进性、经济性和安全性,同时以上结论对开发构建我国自

主化的核承压高温使用 1 级部件设计规范亦具有重要指导价值。

参考文献:

- [1] American Society of Mechanical Engineers (ASME). ASME boiler and pressure vessel code, 2021 Edition, Section Ⅲ, Division 5: High temperature reactors[S]. New York: ASME, 2021.
- [2] American Society of Mechanical Engineers (ASME). Criteria for design of elevated temperature Class 1 components in Section Ⅲ, Division 1[S]. New York: ASME, 1976
- [3] RAO K R. Companion guide to the ASME boiler & pressure vessel code: Criteria and commentary on select aspects of the boiler & pressure vessel and piping codes, Volume 1; Chapter 12: Sub-section NH—Class 1 components in elevated temperature service [S]. Fourth edition. New York: ASME, 2012.
- [4] EDF Energy. R5 2014 edition assessment procedure for the high temperature response of structures[S]. London: EDF Energy, 2014.
- [5] French Association for Design, Construction and In-service Inspection Rules for Nuclear Island Components (AFCEN). RCC-MRx design and construction rules for mechanical components of nuclear installations: High temperature, research and fusion reactors[S]. Paris: AFCEN, 2015.
- [6] YASUhide A. Japanese activities concerning nuclear codes and standards, Part I [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128(1): 58-62.
- [7] PNC N241 84-08(1) TR Structural design guide for class 1 components of prototype fast reactor for elevated temperature service [S]. [S. l.]: [s. n.], 1984
- [8] LANGER B. Pressure vessels and piping: Design and analysis: A decade of progress[S]//Criteria of the ASME boiler and pressure vessel code for design by analysis in action Ⅲ and Ⅷ, Division 2. USA: ASME, 1970.
- [9] 高付海, 宫建国, 轩福贞. 基于非弹性分析方法的核电高温结构完整性评价框架及应用[J]. 压力容器, 2022, 39(4): 33-41.
- GAO Fuhai, GONG Jianguo, XUAN Fuzhen. Principle and application of structural integrity assessment of nuclear components at elevated temperature based on inelastic analysis routine [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(4): 33-41(in Chinese).
- [10] 李智, 莫亚飞, 高付海, 等. ASME 规范 316H 不锈钢高温蠕变本构方程解析与讨论[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(2): 412-419.
- LI Zhi, MO Yafei, GAO Fuhai, et al. Analysis and discussion of constitutive equation for high temperature creep of 316H stainless steel of ASME code[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(2): 412-419(in Chinese).
- [11] 轩福贞, 宫建国. 基于损伤模式的压力容器设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [12] SIM R G. Creep of structures[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1968.
- [13] 于少博, 戴守通, 王田静, 等. 基于 ASME Ⅲ-5 规范和 R5 规程的高温非弹性蠕变疲劳损伤评价方法研究[J]. 压力容器, 2023, 40(1): 68-74.
- YU Shaobo, DAI Shoutong, WANG Tianjing, et al. Research on evaluation method of high temperature inelastic creep fatigue damage based on ASME Ⅲ-5 code and R5 procedure[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(1): 68-74(in Chinese).
- [14] 沈黎, 彭恒, 陈浩峰, 等. 基于线性匹配法(LMM)的承压部件安定棘轮分析与评定[J]. 压力容器, 2018, 35(6): 24-30.
- SHEN Jun, PENG Heng, CHEN Haofeng, et al. Shakedown and ratcheting analysis and assessment for pressure components based on linear matching method (LMM)[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(6): 24-30(in Chinese).
- [15] 沈黎, 刘应华, 章晓程, 等. 高温设计规范 RCC-MRx 中的分析方法与评定准则[J]. 化工设备与管道, 2018, 55(4): 1-9.
- SHEN Jun, LIU Yinghua, ZHANG Xiaocheng, et al. Analysis methods and evaluation criteria in design code RCC-MRx for elevated temperature condition[J]. Process Equipment & Piping, 2018, 54(4): 1-9(in Chinese).