

基于ADINA自动进行应力分类的核一级部件校核方法

王广福^{1,2}, 刘沛宇^{1,3}, 盛选禹^{1,3*}

¹季华实验室, 广东 佛山

²中国煤炭科学研究院矿山人工智能研究所, 北京

³清华大学机械工程系, 北京

收稿日期: 2025年12月14日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月14日

摘要

根据ASME规范对核级设备强度校核的要求, 需要对计算出的应力分布根据具体情况进行应力分类。本文先对核一级设备的相关要求进行了介绍。ADINA软件可以针对应力计算结果沿着指定的路径进行分类。本文介绍了该软件应力分类的数学和物理依据, 最后用一个实例, 计算了结构的应力分布, 并根据软件的应力分类, 对结构强度进行了校核。证明ADINA软件可以完成自动应力分类, 并提供相关分析结果用于强度校核计算。

关键词

核一级设备, 强度校核, 有限元分析, 应力分类

Automatic Stress Classification Method for Verification of Nuclear Class 1 Components Based on ADINA

Guangfu Wang^{1,2}, Peiyu Liu^{1,3}, Xuanyu Sheng^{1,3*}

¹Ji Hua Laboratory, Foshan Guangdong

²Research Institute of Mine Artificial Intelligence, Chinese Institute of Coal Science, Beijing

³Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: December 14, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 14, 2026

Abstract

According to the requirements of the ASME specification for the strength verification of nuclear-

*通讯作者。

文章引用: 王广福, 刘沛宇, 盛选禹. 基于 ADINA 自动进行应力分类的核一级部件校核方法[J]. 建模与仿真, 2026, 15(1): 222-232. DOI: 10.12677/mos.2026.151021

grade equipment, it is necessary to classify the calculated stress distribution according to specific circumstances. This paper first introduces the relevant requirements for nuclear Class 1 facilities. The ADINA software can classify the stress calculation results along a specified path. This paper introduces the mathematical and physical basis for stress classification in the software, and finally it calculates the stress distribution of an example structure and verifies the structural strength according to the software's stress classification. It proves that the ADINA software can complete stress classification automatically and provide relevant analysis results for strength verification.

Keywords

Nuclear Class 1 Facilities, Strength Verification, Finite Element Analysis, Stress Classification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

反应堆压力容器设计规范的提出是为了核设施在设计时有统一的设计评定规则。目前国内核设备主要依据 ASME 规范设计, 或使用法国的标准 RCC-M, 研究堆和新型反应堆更多的是采用 ASME 标准。ASME 标准在弹性力学分析中提出了应力分类的方法, 在不同运行环境下还有更具体的设计规则, 如 ASME-III 卷-5 分卷[1]提出了高温环境下的运行情况, 讨论了蠕变、热老化等机制, 给出了高温部件的设计准则。同时还有许多国家因不同关注点, 发布更具针对性的设计规范, 如英国的 R5 规程[2], 法国的 RCC-MRx 规范[3]。

随着当下计算机硬件的发展, 带动计算方法及计算资源的快速发展, 如采用有限元方法对各种复杂结构进行非弹性或高温问题的计算是一种非常有效的方式, 这在过去计算机硬件容量和速度低的情况下, 是无法想象的。随之而来的, 相应的 ASME 规范所采用的方法评价则由于其通用性而设置的参数值较为保守, 导致设计经济性不够。当设计结构非常复杂时, 根据规范所指出的方式, 难以进行应力分类[4], 其潜台词就是, 对于复杂的结构, 无法按照 ASME 的规范中的应力分类方法进行校核计算, 也就是在实际工程的操作中, 无法执行 ASME 的规范。需要有一些自动的手段辅助操作人员进行应力分类, 才能按照 ASME 的应力分类标准执行。

ADINA 是一款基于有限元的大型分析软件, 最早由麻省理工学院的教授 K. J. Bathe [5]开发, 在视频网站上, 还有 K. J. Bathe 教授的 ADINA 编程理论和原理。ADINA 软件不仅仅可以计算固体有限元分析、流体有限元分析、电磁场分析, 处理多物理场耦合分析方面也非常优秀, 包括流体结构耦合分析模块、热-力耦合模块等, 通过 ADINA 软件可以使用通用求解算法针对性计算各种场景下的复杂问题, 包括复杂结构、高温、流固耦合等。本文中介绍的针对核一级设备进行的分析, 如果能够自动对应力进行分类, 将使设计人员节省大量的时间, 且分类方法遵守 ASME 规范的要求。针对性设计相比规范中的一般性, 能获得在符合设计要求下更具经济性的结果。

2. ASME 规范中的应力规定

根据 ASME 规范第 III 卷的要求, 反应堆上的核级部件可分为核 I、II、III 级, 针对不同的安全等级, 有针对的分卷对应相应的核级部件的要求。不同的核级部件, 在设计时要满足一定的强度限制要求。同时, 对于不同的工况, 要根据具体情况, 对应力进行分类, 并根据应力分类情况, 根据不同的应力限值,

进行强度验证。我们以核一级部件以及对应 ASME 规范第 III 卷第 NB 分卷的相关规范,说明应力分类和强度限制的要求。

按照 ASME NB-3200 进行应力线性化理论[6]。下面简单列举出于与应力强度校核和应力线性化有关的一些 NB 分卷条款。核一级部件的强度校核应按照下面的条款执行。

NB-3213.5 剪应力: 剪应力是与参考平面相切的应力分量。

NB-3213.6 薄膜应力: 薄膜应力是均匀分布的法向应力分量,其值等于沿所考虑截面厚度方向应力的平均值。

NB-3213.7 弯曲应力: 弯曲应力是 NB-3213.4 中所述法向应力的变化分量。沿厚度方向的变化可以是线性的,也可以不是线性的。

NB-3213.8 一次应力: 一次应力是所施加载荷产生的任何法向应力或剪应力,它是为了满足外力或内力以及力矩的平衡规律所必需的。一次应力的基本特性是非自限的,当一次应力大大超过屈服强度时,它会引失效或至少会引起总体变形。热应力不按一次应力分类。一次薄膜应力在结构中是这样分布的一种应力:由于发生屈服时不会引起载荷的重新分配。一次应力的例子有:

- 1) 由于内压或其他分布载荷在圆柱形壳体或球形壳体中引起的总体薄膜应力;
- 2) 由于压力的作用,在平封头中央部分引起的弯曲应力。

NB-3213.9 二次应力: 二次应力是由于相邻材料的约束后者由于结构本身的约束而引起的法向应力或剪应力。二次应力的基本特性是自限的,局部屈服和微小变形能满足成为引起应力的条件,这种应力的一次作用不会产生预计的失效。二次应力的例子有:

- 1) 总体热应力【NB-3213.3(a)】;
- 2) 总体结构不连续处的弯曲应力。

2.1. NB-3215 应力强度的推导

设计合规性(见 NB-3210 和上面的列举的详细条款)要求之一是计算所得的应力强度不应超过规定的各种应力许用限制。许用限制随应力分类不同(一次应力、二次应力等)而不同。条款叙述了计算应力强度的规程,该应力强度要服从规定的限制。该规程的计算步骤如下面(a)至于(e)的规定:

1) 在所考虑部件的点处,选取一个直角坐标系,如切向、轴向和径向,并分别以脚注 t 、 l 和 r 表示三个方向。在这些方向的应力分量则用 σ_t 、 σ_l 和 σ_r 表示正应力,用 τ_{tl} 、 τ_{lr} 和 τ_{rt} 表示剪应力。

2) 计算该部件所受每种载荷类型的应力分量,将每组应力值归入如下的一类或一组, NB-3217 提供了对此步骤的指导。

- a) 总体一次薄膜应力, P_m (见 NB-3213.8);
- b) 局部一次薄膜应力, P_L (见 NB-3213.10);
- c) 一次弯曲应力, P_b (见 NB-3213.7 和 NB-3213.8);
- d) 膨胀应力, P_e (见 NB-3213.19);
- e) 二次应力, Q (见 NB-3213.9);
- f) 峰值应力, F (见 NB-3213.11)。

3) 对每一类应力,计算出由不同类型载荷引起 σ_i 的代数和。对其余五种应力分量也进行同样的计算。这些应力分类的某些组合也应考虑。

4) 把 t 、 l 、 r 方向应力分量转换为主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 。在许多承压部件的计算中可适当选择 t 、 l 、 r 的方向使剪应力为零,并使三个方向的主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 等于 σ_t 、 σ_l 和 σ_r 。

5) 用下列关系式计算应力差 S_{12} 、 S_{23} 和 S_{31} :

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

应力强度 S 与 S_{12} , S_{23} 和 S_{31} 中绝对值最大者进行比较。

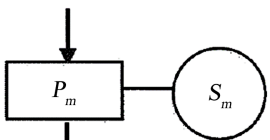
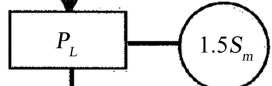
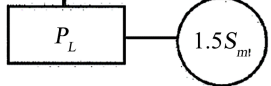
薄膜应力强度由通过截面厚度上平均的应力分量推导而得, 求平均值时应以上述步骤(b)或(c)中的应力分量为准。

2.2. NB-3222 A 级使用限制

在设计技术规格书中所指定的对于使用工况[NCA-2142.2(b) (1)]的 A 级使用限制, 必须满足本条款中的四种应力限制和 NB-3227 的特殊应力限制。如果应用塑性分析方法, 则 NB-3228 的规定对这些限制作了一定程度的放宽。NB-3229 给出了设计应力强度值 S_m 。ASME 规范中表 NB-3222-1 归纳了这些应力限制, 见表 1 所示。

Table 1. NB-3221-1 design condition stress classification and stress intensity limits

表 1. NB-3221-1 设计工况下的应力分类和应力强度限制

应力分类	一次应力		
	总体薄膜应力	局部薄膜应力	弯曲应力
说明 (示例见表 NB-3217-1)	沿实心截面的平均一次应力, 不包括不连续和应力集中, 仅由机械载荷产生。	沿任意实心截面的平均应力, 考虑不连续但不计及应力集中, 仅由机械载荷产生。	同实心截面矩心的距离成正比的一次应力分量, 不包括不连续和应力集中, 仅由机械载荷产生。
符号	P_m	P_L	P_b
应力分量组合和 应力强度的许用限制		 	

3. 有限元软件 ADINA 中的应力线性化和分类方法

3.1. 有限元软件 ADINA 中的应力线性化

在 ADINA 软件中, 应力线性化是在 SCL 线上进行的。SCL 线是一条直线, 其采样点间距相等, 如图 1 所示。ADINA 软件中的命令 SCLLINE 用于定义 SCL 线[7]。

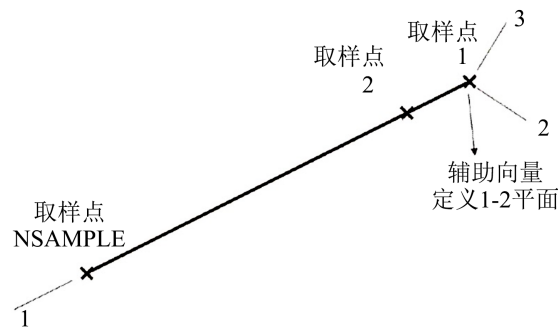


Figure 1. SCL line definition method

图 1. SCL 线的定义方法

SCL 线具有局部坐标系，其中 1 方向是沿着 SCL 线从第一个采样点到最后一个采样点的方向，2 和 3 方向垂直于 1 方向。1~2 平面由辅助向量指定，见图 1。

沿 SCL 线确定薄膜应力和弯曲应力的过程称为应力线性化。在 ADINA 中，用命令 SCLSHOW 执行应力线性化，具体过程如下。

令 τ_{11} , τ_{22} , τ_{23} , ……为 SCL 线上某一采样点的应力分量。下标 11、22、……表示 SCL 线的局部坐标系。在计算中，应力分量均在局部坐标系中给出。

3.2. 有限元软件 ADINA 中的应力分类方法

应力强度定义为

$$\sigma_{intensity} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (1)$$

其中 σ_1 为最大主应力， σ_3 为最小主应力。

假设这些单元是三维单元。这意味着在计算力和力矩时，SCL 线具有单位宽度和深度。

每个应力分量对应的轴向力为

$$P_{ij} = \int_0^L \tau_{ij} dl, \quad (2)$$

其中积分沿 SCL 线进行，SCL 线长度为 L 。

每个应力分量对应的薄膜应力为

$$\tau_{ij}^m = P_{ij} / L. \quad (3)$$

该薄膜应力沿线长度方向恒定。

每个应力分量对应的力矩为

$$M_{ij} = \int_0^L \tau_{ij} \left(l - \frac{L}{2} \right) dl. \quad (4)$$

我们再次假设 SCL 线具有单位宽度和深度，以便将中性轴设置为 $L/2$ 。薄膜应力 τ_{ij}^m 对力矩没有贡献，因为

$$\int_0^L \tau_{ij} \left(l - \frac{L}{2} \right) dl = 0. \quad (5)$$

每个应力分量对应的弯曲应力为

$$\tau_j^b = 12M_{ij} (l - L/2) / L^3. \quad (6)$$

$l = L$ 处的弯曲应力为

$$\tau_{ij|L}^b = 6M_{ij}/L^2, \quad (7)$$

与预期一致。

峰值应力定义为总应力减去薄膜应力和弯曲应力之和：

$$\tau_{ij}^P = \tau_{ij} - (\tau_{ij}^m + \tau_{ij}^b)。 \quad (8)$$

根据 ASME 规范，还需要计算每种应力类型的应力强度：

薄膜应力：

$$\sigma_{intensity}^m = \sigma_1^m - \sigma_3^m, \quad (9)$$

其中 σ_1^m 和 σ_3^m 是根据 τ_{ij}^m 计算的主应力。

弯曲应力：

$$\sigma_{intensity}^b = \sigma_1^b - \sigma_3^b, \quad (10)$$

其中 σ_1^b 和 σ_3^b 是根据 τ_{ij}^b 计算得出的主应力。

薄膜应力 + 弯曲应力：

$$\sigma_{intensity}^{mb} = \sigma_1^{mb} - \sigma_3^{mb}, \quad (11)$$

其中 σ_1^{mb} 和 σ_3^{mb} 是根据 $\tau_{ij}^m + \tau_{ij}^b$ 计算出的主应力。

峰值应力：

$$\sigma_{intensity}^P = \sigma_1^P - \sigma_3^P, \quad (12)$$

其中 σ_1^P 和 σ_3^P 是根据 τ_{ij}^P 计算出的主应力。

这些计算将在每个采样点进行一遍计算。

上述所有积分均采用辛普森数值积分规则进行(梯形规则在评估线性应力分布的力矩时会导致数值误差)。因此，SCL 线中的采样点数必须是奇数。

4. ADINA 计算实例

4.1. 计算模型

采用计算的几何结构是直径为 $\Phi 100$ mm，长度为 400 mm，结构中间有一个颈缩，截面的半径为 R25 mm。结构一端固支，一端承受方向向下的 200 N 的集中力载荷[8]。结构模型尺寸和载荷如图 2 所示。

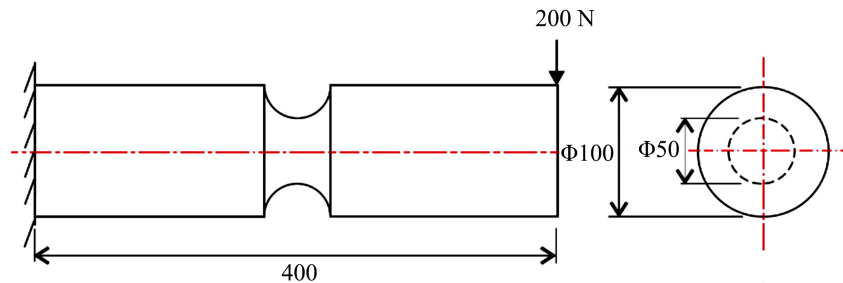


Figure 2. Geometric model parameters of an example
图 2. 实例的几何模型参数

结构材料按照碳钢进行计算，材料弹性模量 E 为 $2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，泊松比 ν 为 0.29。

4.2. 线性化具体操作

计算完成后，可以定义 SCL 线，在此线上把计算的应力结果进行线性化处理。

在 ADINA 主菜单中选择【Definitions】→【Model Line】→【Stress Classification Line】，如图 3 所示。然后在模型上定义 SCL 线的起点和终点，生成有 1 条直线。需要注意的是，生成的线上的点数量一定是奇数，不能是偶数。最终在本文的例题中生成的 SCL 线如图 4 所示。后面将在此 SCL 线上对应力计算结果进行自动线性化处理，并自动获得应力线性化的结果。用户可以直接应用应力线性化后的结果直接与许用强度进行比较，并确定设计的零件的应力分布是否满足 ASME 的相关条款要求，也就是本文第二部分列出的条款要求。

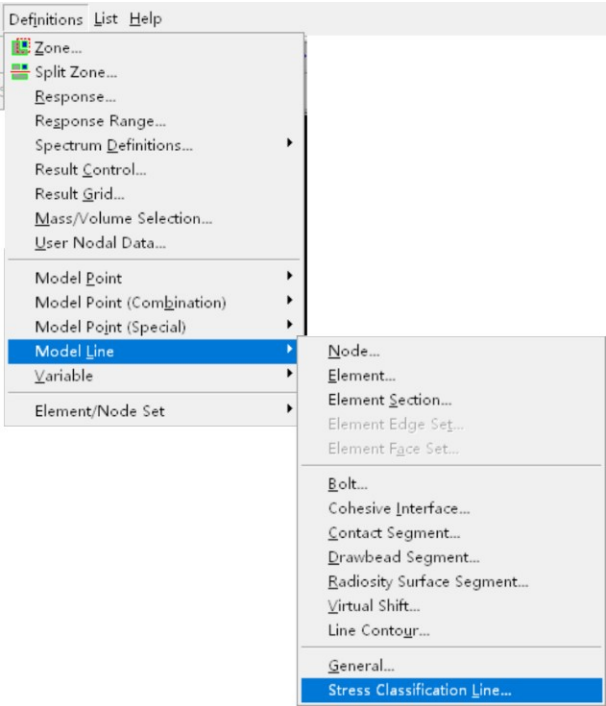


Figure 3. Define the command operation interface for SCL lines
图 3. 定义 SCL 线的命令操作界面

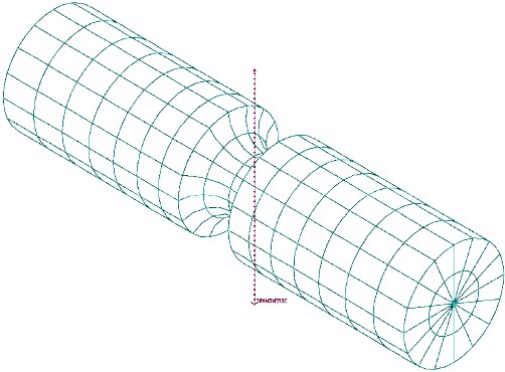


Figure 4. SCL lines generated on a finite element mesh model
图 4. 在有限元网格模型上生成的 SCL 线

4.3. 计算结果

计算完成后，可以显示出模型上的应力值。图 5 显示的是应力分量 σ_{zz} ，在软件中的应力名称为 STRESS-ZZ。从图 5 可以看到，模型应力最大的位置在颈缩处，位于截面最小的平面，在最顶部的应力最大。这从力学上很容易理解，此处截面积最小，在接受弯矩载荷作用下，该位置的应力和应变都应该最大的。这也是为什么在 3.2 节中从这个位置生成 SCL 线的原因。

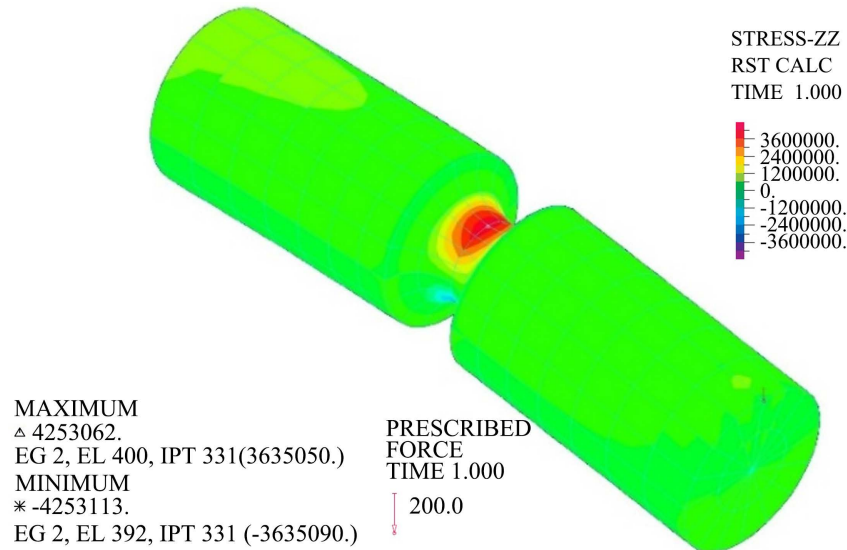


Figure 5. Displayed stress σ_{zz}
图 5. 显示的应力 σ_{zz}

图 6 是沿 SCL 线上应力分量 σ_{zz} (stress-zz) 分布，其中横坐标是几何图形上沿轴线方向的坐标。纵坐标是应力分量 σ_{zz} (stress-zz)，即 zz 方向的应力值。

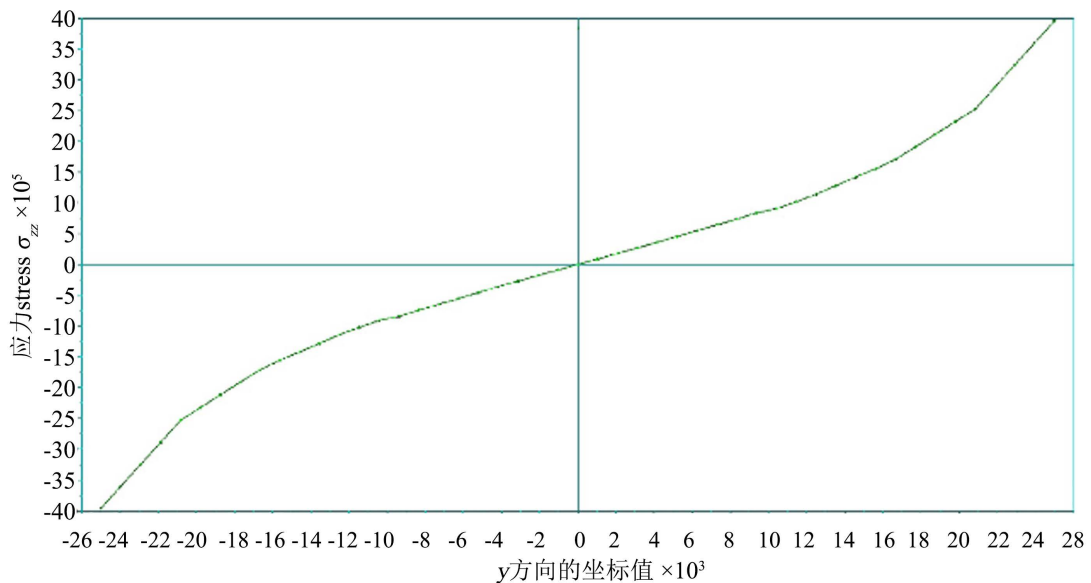


Figure 6. Distribution of σ_{zz} along the SCL line
图 6. 沿 SCL 线上应力 σ_{zz} 分布

图 7 是横坐标是几何图形上沿轴线方向的坐标。其中纵坐标是 z 方向的位移。

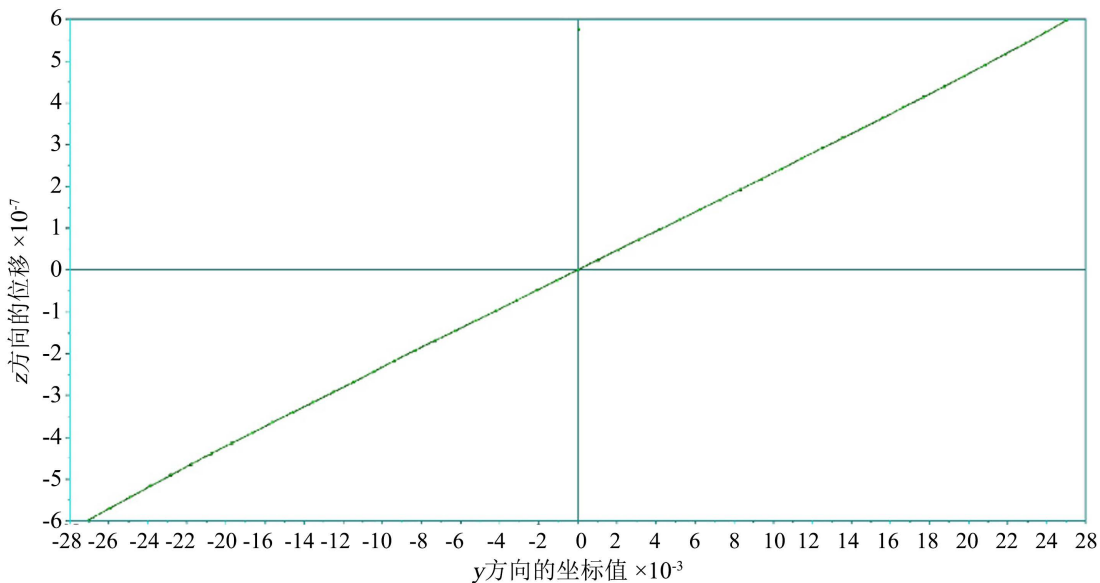


Figure 7. Distribution of displacement in the z -direction along the SCL line
图 7. 沿 SCL 线上 z 方向位移分布

图 8 是应力分类后沿 SCL 线上的应力强度，分别给出了薄膜应力、薄膜应力 + 弯曲应力、总应力。

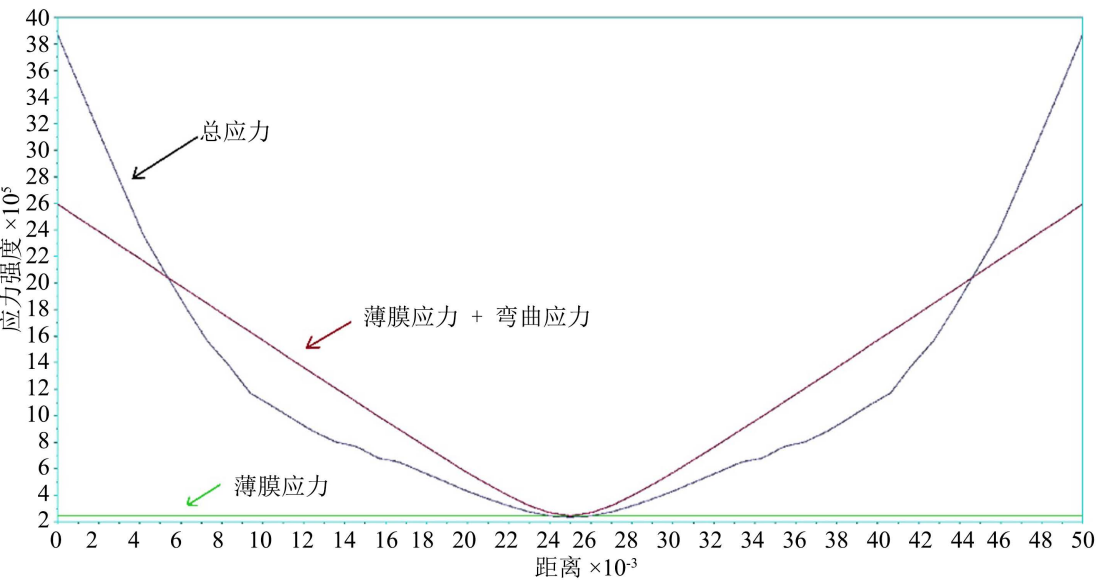


Figure 8. Stress intensity along the SCL line after stress classification
图 8. 应力分类后沿 SCL 线上的应力强度

如果我们考虑的材料是 Q235-A 钢材料，许用强度 $[S]$ 为 105 MPa。根据 ASME III 卷，强制性附录 I，图 I-9.1 碳钢、低合金钢及高强度钢在金属温度不超过 700°F 时的设计疲劳曲线[1]，选择横坐标循环次数为 10^6 次，则图表得到 S_a 的值为 12 ksi = 6.9 MPa。

根据 ASME 规范要求，薄膜应力 $P_m < [S]$ ， $P_m = 2.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $[S] = 105 \text{ MPa}$ 。

从图 8 中可以看到：薄膜应力与弯曲应力分别为：

$$P_L + P_m = 26 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1.5[S] = 157.5 \text{ MPa}$$

$$P_L + P_m < 1.5[S]$$

零件的应力满足 ASME 规范的要求。

如果考虑更保守的估计，可以用全部总应力与许用应力的 1.5 倍即 $1.5[S]$ 进行比较，也就是 $P_{total} < 1.5[S]$ 。

从图 8 中可以看到，总应力为：

$$P_{total} = P_L + P_b + P_e + Q + F = 3.86 \text{ MPa}$$

$$S_a = 6.9 \text{ MPa}$$

$$P_{total} < S_a$$

也就是说，按照包含峰值应力的总应力和进行强度验证，结构应力也满足 ASME 规范中针对核一级设备的强度要求。

5. 结论及讨论

通过算例证明，ADINA 软件采用应力分类，可以把整体薄膜应力、薄膜应力 + 弯曲应力、整体应力都给出来。可以根据 ASME 规范中对 NB 级(核一级设备)的要求，对设备强度进行验证。对于其他 NB 级设备进行验证，完全可以按照本论文中的方法进行。对于核 I 级的压力容器和蒸汽发生器，特别是压力容器封头上，由于存在多个贯穿件的开孔，形状非常不规则，采用本文中的方法，能够快速进行应力分类和验证。

对于 NC 级和 ND 级装备，设备强度验证也有相关的要求，可以在 ADINA 软件中进行相关应力分类分析，确保设备满足规范的要求。在能够进行自动应力线性化分类前，都是手动进行应力分类。这样有很大的随机性，不能确保分类的准确性和正确性。如果线性化的区域未包括有应力最大值位置，则强度验证的结果不准确。

对于承受温度载荷或者局部大变形导致自由端约束产生的应力(称为膨胀应力 P_e)，在结构不连续处满足结构连续所需的自平衡应力(称为薄膜完全应力 Q)，都属于二次应力。在 ADINA 软件中，并没有区分一次应力和二次应力。对于二次应力 P_e ，要求 $P_e < 3S$ 。对于模型中存在二次应力的情况，仍然需要人工操作计算出 P_e 。

在本实例中，由于没有疲劳载荷，不存在可以引起疲劳但不引起变形的热应力。峰值应力只包含了应力集中附加的应力增量。如果要单独计算峰值应力，可以利用图 8 中总应力的值与薄膜应力 + 弯曲应力曲线的差计算出来。

总之，利用 ADINA 软件中的应力线性化和应力分类，可以计算出各个应力分类的值，并验证设备和零件是否满足 ASME 规范中的强度要求。

基金项目

季华实验室科研项目(X220011TN220)。

参考文献

- [1] American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2021) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2021 Edition,

Section III, Division 5: High Temperature Reactors. ASME.

- [2] EDF Energy (2014) R5 2014 Edition Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures. EDF Energy.
- [3] French Association for Design, Construction and Inservice Inspection Rules for Nuclear Island Components (AFCEN) (2015) RCC-MRx Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations: High Temperature, Research and Fusion Reactors. AFCEN.
- [4] 刘正奇, 高付海. ASME-III-5 高温 1 级部件分析设计方法的改进方向探讨[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(4): 848-855.
- [5] Bathe, K.J. (2006) Finite Element Procedures. Klaus-Jurgen Bathe.
- [6] ASME. ASME 核电规范与标准-BPVC-III 核设施部件建造规则第 1 册 NC 分卷: ASME BPVC-III NC [M]. 上海发电设备成套设计研究院, 上海核工程研究设计院, 译. 上海: 科学技术文献出版社, 2004: 4-10.
- [7] Adina, R.D.I. (2017) Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA Solids & Structures. ADINA R & D, Inc.
- [8] 盛选禹. ADINA 有限元分实例教程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2021.