

ASME VIII-2中弹性及弹塑性屈曲分析简要解析

张 静, 王淑霞, 李照明, 姜潇逸, 吴 龔

中车西安车辆有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月29日

摘 要

23版ASME VIII-2在5.4篇防止屈曲引起的垮塌进行了重写, 对弹性分析法及弹塑性分析法进行了优化, 针对承受外压的球壳、成形封头、圆筒体及锥壳, 规范提出了两种数值分析方法, 法A——基于线弹性理论的“五步弹性分析程序”, 法B——考虑几何缺陷的弹塑性屈曲分析方法。本文通过Ansys有限元软件对23版——法A、法B与21版屈曲分析——类型1、类型3以碟形封头为例进行了差异对比, 阐述了其简要的分析步骤及合格准则, 旨在为工程设计人员理解新标准提供参考。

关键词

五步弹性分析, 屈曲分析, 弹塑性屈曲分析, Ansys, 有限元

Brief Analysis of Elastic and Elastic-Plastic Buckling Analysis in ASME VIII-2

Jing Zhang, Shuxia Wang, Zhaoming Li, Xiaoyi Jiang, Yan Wu

CRRRC Xi'an Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 29, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

The 2023 edition of ASME VIII-2 has rewritten Article 5.4 on preventing buckling-induced collapse, and optimized the elastic analysis method and elastic-plastic analysis method. For shells under external pressure, formed heads, cylinders and cones, the code proposes two numerical analysis methods: Method A—a five-step elastic analysis procedure based on linear elastic theory, and Method B—an elastic-plastic buckling analysis method considering geometric imperfections. This

paper compares the differences between the 2023 Edition (Method A, Method B) and the 2021 Edition (Buckling Analysis—Type 1, Type 3) for dished heads using Ansys finite element software. It outlines the brief analysis procedures and acceptance criteria, aiming to provide references for engineering designers to understand the new standards.

Keywords

Five-Step Elastic Analysis, Buckling Analysis, Elastic-Plastic Buckling Analysis, Ansys, Finite Element

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

压力容器作为化工、轨道交通等领域的核心承压设备，其在外压工况下的稳定性直接决定了结构安全。当外压超过临界值时，壳体结构会突然发生屈曲，失去其以中面变形为主的薄膜应力状态而进入以侧向挠度为主的弯曲应力状态，导致过量变形的出现，发生了失稳[1]。在外压作用下，碟形封头的过渡区会产生较高的环向拉应力，不存在失稳，封头中心的球面部分会产生压缩应力，临界屈曲位置发生在其球面部分，屈曲垮塌以屈曲模态(一般是具有周期性的波形，简称屈曲波)的形状发生。由于实际结构的初始几何形状是非完美的，在加载过程中承压的薄壁(或细长)结构会自动地逐渐形成屈曲波形，并随着载荷增加而发展，最终导致屈曲垮塌[2]。

2. 封头参数

碟形封头采用 SA-516 Gr.70 板材，设计温度为 350℃，设计温度下屈服强度为 193 MPa，抗拉强度为 483 MPa，弹性模量为 179,000 MPa，泊松比 0.3，腐蚀裕量 0 mm，最小成形厚度 t 分别为 20 mm、22 mm、24 mm，封头几何尺寸见图 1。

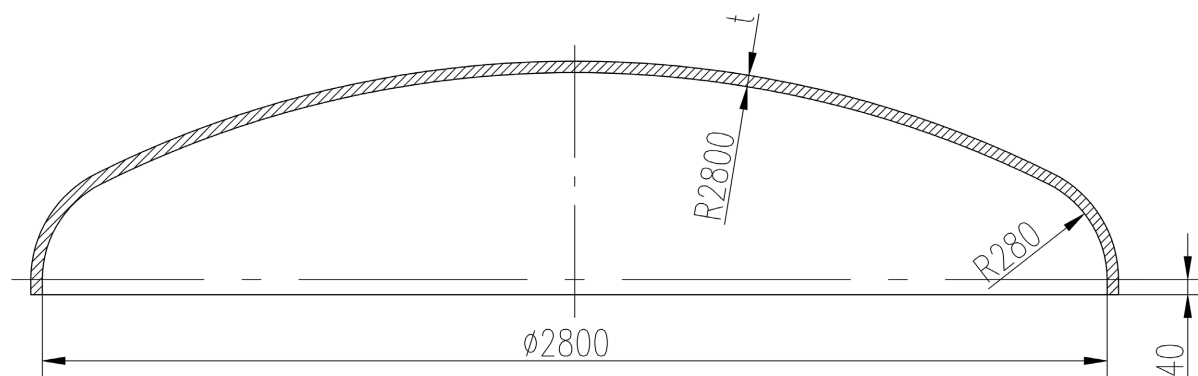


Figure 1. Geometric dimensions of the head

图 1. 封头几何尺寸

3. 公式法计算结果

按 ASME VIII-2 公式法计算封头厚度 t (20 mm、22 mm、24 mm) 时的最大允许外压，计算步骤按规范中 4.4.8 节，计算步骤及结果见表 1。

Table 1. Calculation results using formula method under different thickness
表 1. 各厚度下采用公式法计算结果

封头的最小成形厚度/mm	球冠区外半径/mm	设计温度下的弹性模量/MPa	设计温度下的屈服强度/MPa	计算预期的弹性失稳应力/MPa	弹性周向压缩薄膜失效应力与屈服强度的比值	计算预期的非弹性失稳应力/MPa	设计系数	许用周向压缩薄膜应力/MPa	最大允许外压/MPa
20	2820			95.2	0.49	95.2	2.0	47.6	-0.675
22	2822	179,000	193	104.6	0.54	104.6	2.0	52.3	-0.815
24	2824			114.1	0.59	107.4	1.995	53.8	-0.915

4. 有限元模型及边界条件

采用 Ansys 有限元软件对碟形封头进行整体建模, 网格划分采用壳单元 SHELL181, 壳单元可高效精准的提取屈曲位置的等效薄膜应力, 不断对网格进行细化直至求解的结果基本不变, 封头有限元模型如图 2 所示。

边界条件: 封头外表面施加压力 P_{out} ; 封头底部约束环向位移和轴向位移。

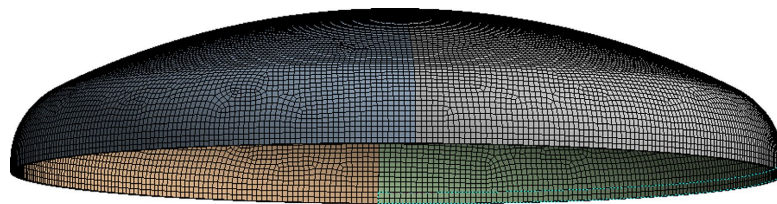


Figure 2. Finite element model of the head
图 2. 封头有限元模型

5. 弹性屈曲分析

5.1. 2021 版屈曲分析——类型 1 及其结果评定

类型 1——采用无几何非线性的弹性应力分析确定元件中的预应力来完成分叉屈曲分析。特征值屈曲分析本质为线性分叉失稳计算, 临界载荷由载荷系数与初始载荷相乘得到, 与初始载荷绝对大小无关。

封头的厚度 $t=(20\text{ mm}、22\text{ mm}、24\text{ mm})$, 其最大允许外压 $P_{MAEP}=(-0.668\text{ MPa}、-0.812\text{ MPa}、-0.967\text{ MPa})$, 计算步骤及结果见表 2。

Table 2. Procedures and calculation results for type 1 at various thicknesses
表 2. 各厚度下采用类型 1 的步骤及计算结果

封头的最小成形厚度/mm	外压 P_{out} /MPa	特征值 λ	设计系数 $2/\beta_c$	最大允许外压 P_{MAEP} /MPa
20		107.81		-0.668
22	-0.1	131.04	16.129	-0.812
24		156.03		-0.967

注: $P_{MAEP}=(P_{out} \times \lambda)/(2/\beta_c)$, 其中 β_c 为封头的承载能力削减系数取值 0.124。

5.2. 2023 版屈曲分析——法 A (五步弹性分析法)及其应力评定

法 A 通过极限外压下屈曲位置的等效薄膜应力、部件的承载能力削减系数及 $0.55S_y$ 三者共同来获得

最大许用薄膜屈曲等效应力进行评定,采用五步弹性分析的步骤及计算结果见表3。载荷组合仅为外压,载荷组合系数 $\beta_b=1$,图3为封头(22 mm)在外压 $P_{out}=-0.77$ MPa时发生的临界屈曲位置、屈曲位置的等效薄膜应力 P_{m1} 及其一阶模态,根据图2可知,临界屈曲位置发生在球面,屈曲位置的等效薄膜应力 $P_{m1}=53.04$ MPa,特征值 $\lambda_1=17.018$ 。

当封头的厚度 $t=(20$ mm、 22 mm、 24 mm)时,对应的计算外压 P_{out} 分别取类型1计算的最大允许外压(-0.668 MPa、 -0.812 MPa、 -0.967 MPa)时,评定结果为(合格+0.05%、不合格-5.5%、不合格-16.1%),对不合格的结果通过调整外压直至满足设计要求;

Table 3. Procedures and calculation results of the five-step elastic analysis method at type1 at various thickness
表 3. 各厚度下采用五步弹性分析法的步骤及计算结果

封头的 最小成 形厚 度/mm	第一步			第二步 载荷 $P_{out} \times$ λ_1 /MPa	第三步		第四步			第五步 $P_{m1} \leq S_C$	最大允 许外压 P_{MAEP} /MPa
	计算 外压 P_{out}	屈曲位 置的等 效薄膜 应 P_{m1} /MPa	特征值 λ_1		屈曲位 置的等 效薄膜 应 P_{m2} /MPa	特征 值 λ_3	封头的 承载力 削减 系数 β_{cr}	$P_{m2} \times$ β_{cr} /MPa	$0.55S_y$ /MPa		
20	-0.668	51.135	16.139	10.78	825.2	1	102.32	51.16	合格 (+0.05%)	-0.668	
22	-0.812	56	16.138	13.1	903.7	1	112.05	53.075	不合格 (-5.5%)	-0.77	
	-0.77	53.04	17.018	13.1	903.7	1	0.124	112.05	106.15		合格 (+0.06%)
24	-0.967	61.6	16.136	15.6	993	1	123.1	53.075	不合格 (-16.1%)	-0.83	
	-0.83	52.8	18.799	15.6	993	1	123.1	53.075	合格 (+0.5%)		

注: 1. 第二步中施加载荷为: $P_{out} \times \lambda_1$; 2. 合格率为: $(S_C - P_{m1})/S_C$ 。

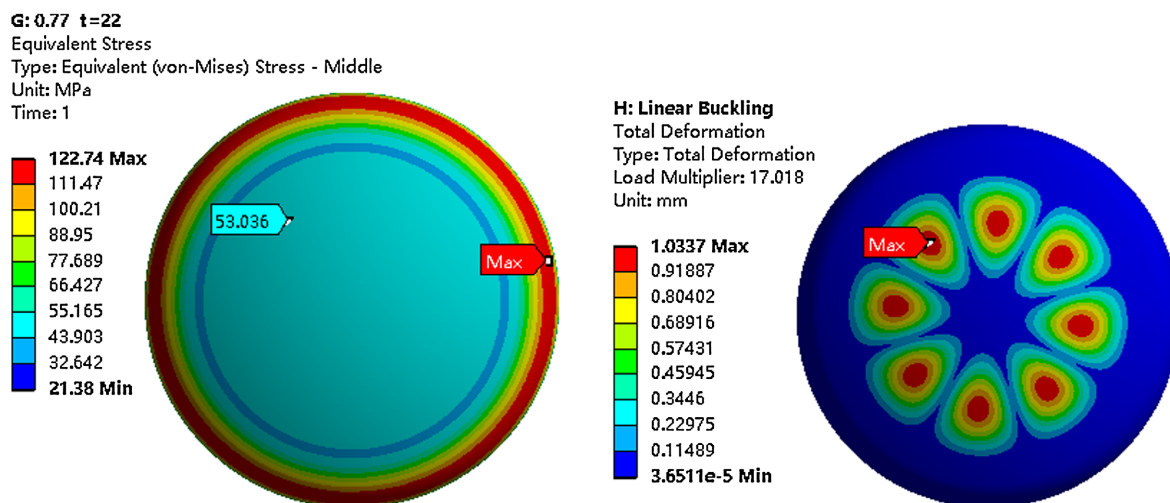


Figure 3. For the head (22 mm thickness), the critical buckling location under external pressure $P_{out} = -0.77$ MPa, the equivalent membrane stress P_{m1} at the buckling location, and its first-order mode eigenvalue

图 3. 封头(22 mm)在外压 $P_{out} = -0.77$ MPa 时发生的临界屈曲位置、屈曲位置的等效薄膜应力 P_{m1} 及其一阶模态特征值

当计算外压 P_{out} 调整为(-0.668 MPa、-0.77 MPa、-0.83 MPa)时,评定结果为(合格+0.05%、合格+0.06%、合格+0.5%), 此时计算外压 P_{out} 则为最大允许外压。

6. 弹塑性分析及其评定

2023 版屈曲分析——法 B (考虑几何缺陷的弹塑性屈曲分析)进行计算, 结果见表 4。

以封头厚度 24 mm 为例进行弹塑性屈曲分析, ASME VIII-2 中附录 3-D.3 给出了弹塑性分析时材料的本构模型, 根据计算可得出材料的真实应力 - 应变曲线见图 4: 软件实施时打开大变形来考虑几何非线性效应, 载荷及载荷步按图 5, 几何模型的初始缺陷具体施加步骤如下:

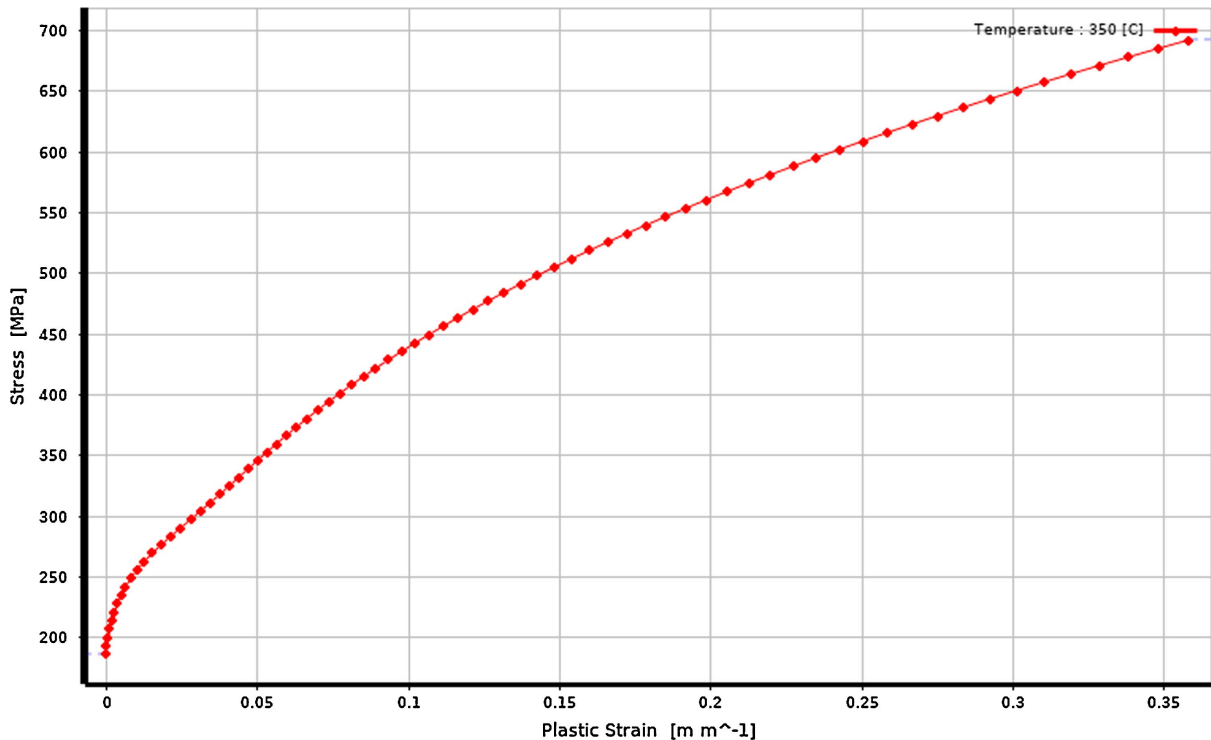


Figure 4. Material true stress-strain curve

图 4. 材料的真实应力 - 应变曲线

	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Pressure [MPa]
1	1	0.	0.
2	1	1.	-1.4
3	2	2.	-1.41
4	3	3.	-1.42
5	4	4.	-1.43
6	5	5.	-1.44

Figure 5. Loads and load steps

图 5. 载荷及载荷步

第一步: 封头外表面施加初始载荷 0.1 MPa 进行特征值屈曲分析, 求得模态振幅为 1.04 mm;

第二步: 根据 ASME VIII-2 中 4.4.4.4 节中的要求, 碟形封头对规定的形状不得有超过 1.25%D 的向

外偏差,又不得有超过 0.625% D 的向内偏差,因屈曲波具有周期向内和向外的特性,则封头的形状偏差应小于等于 1.25% D 和 0.625% D 的最小值,为 17.5 mm,因制造给出的公差为 15.6 mm,则几何模型的初始缺陷取 15.6 mm;

第三步:用第二步得出的几何模型初始缺陷 15.6 mm 除以第一步屈曲模态振幅 1.04 mm,等于 15,以 15 作为放大系数施加第一步的数值模型中;

第四步:以第三步的数值模型为基础进行弹塑性分析。

根据计算当 Time = 4.126 s 时,此时压力 $P = -1.431$ MPa,计算处于无法收敛的临界点,此时 $P = -1.431$ MPa 为极限载荷,设计系数取载荷组合系数 1.67,求得封头的极限屈曲外压为 $P_{MAEP} = -0.856$ MPa。

2021 版屈曲分析——类型 3 (弹塑性分析)进行计算,设计系数取载荷组合系数 2.4,步骤与 2023 版法 B 相同,结果见表 4。

Table 4. Analysis results of method B and type3

表 4. 法 B 与类型 3 分析结果

封头的最小成形 厚度/mm	元件所能承受 的极限外压力 P/MPa	设计系数		最大允许外压 (类型 3) P_{MAEP}/MPa	最大允许外压 (法 B) P_{MAEP}/MPa
		2021 版屈曲分析 ——类型 3	2023 版屈曲分析 ——法 B		
20	-1.073			-0.447	-0.642
22	-1.266	2.4	1.67	-0.527	-0.758
24	-1.431			-0.596	-0.856

7. 方法对比

(1) 表 1 与表 2 进行对比:

2021 版屈曲分析——类型 1 相比于规范 4.4 节公式法,出现不保守结果。

(2) 表 1 与表 3 进行对比:

2023 版屈曲分析——法 A 相比于规范 4.4 节公式法,结果偏保守。

(3) 表 2 与表 3 进行对比:

当 $P_{m2} \times \beta_{cr} \leq 0.55S_y$, 2021 版屈曲分析——类型 1 相比于 2023 版屈曲分析——法 A, 结果接近;

当 $P_{m2} \times \beta_{cr} > 0.55S_y$, 2021 版屈曲分析——类型 1 相比于 2023 版屈曲分析——法 A, 出现不保守结果。

(4) 表 1 与表 4 进行对比:

法 B 相比于类型 3, 结果更接近于公式法。

8. 结语

23 版 ASME VIII-2 [3]提出的“五步弹性分析程序”弥补了类型 1 结果出现冒进的缺陷;法 B 相比于类型 3 在分析步骤无差别,安全系数由 2.4 调整为 1.67,弥补了类型 3 结果过于保守的缺陷。

用法 B 进行弹塑性屈曲分析时,以屈曲模态乘以放大系数来描述初始几何缺陷是可行的,结果与法 A 接近。

GB/T4732.5-2024 [4]关于屈曲的评定引用 2021 版 ASME VIII-2 [5]中三种类型的分析方法,该方法已在 2023 版 ASME VIII-2 中进行了重写,当按 GB/T4732.5 进行屈曲分析时,建议用公式法进行核算,或

参考 2023 版 ASME VIII-2 中屈曲分析方法。

参考文献

- [1] 李建国. 压力容器设计的力学基础及其标准应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [2] 陆明万, 沈璠, 王汉奎. 压力容器分析设计: 理论和释义[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024.
- [3] (2023) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code, Section VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels. The American Society of Mechanical Engineers, New York.
https://pw9h8o.smartapps.cn/pages/index/webview?pcode=30759586847997&_swebfr=1&_swebFromHost=baiduboxapp
- [4] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T 4732.5-2024 压力容器分析设计 第 5 部分: 弹塑性分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [5] (2021) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code, Section VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels. The American Society of Mechanical Engineers, New York.
https://pw9h8o.smartapps.cn/pages/index/webview?pcode=15729462489102&_swebfr=1&_swebFromHost=baiduboxapp