

GB/T 4732-2024《压力容器分析设计》中疲劳免除准则一的证明与应用

肖 怡, 沈 鋈, 粟雨平, 詹 圆

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年5月10日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月11日

摘 要

疲劳是压力容器中的重要失效模式之一, 特别是针对复杂的工况条件, 实施起来费时又费力。实际上, 针对一些循环次数较少或者载荷应力水平不高的压力容器来说, 在一定条件下, 疲劳分析是可以免除的。我国新版压力容器分析设计GB/T 4732.4-2024中提供了三种疲劳评定免除准则。其中, 疲劳评定免除准则一相比于JB 4732-1995在内容和表述上做了较大的修订, 一方面扩大了疲劳免除准则的适用范围, 另一方面根据循环次数的不同调整了相应的压力波动范围限值。本文对其修订背后的原理进行了详细的解读和分析, 阐述了各个情况下压力波动百分比限值的来源, 并通过应用举例阐述了其实施步骤和计算方法, 旨在为工程设计人员更好地理解 and 运用新标准提供参考。

关键词

GB/T 4732-2024, 疲劳免除准则, 分析设计

Interpretation and Application of Screening Criteria One for Fatigue in GB/T 4732-2024 “Pressure Vessels Design by Analysis”

Yi Xiao, Jun Shen, Yuping Su, Yuan Zhan

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 10th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

Fatigue is one of the important failure modes in pressure vessels, which is time-consuming and

文章引用: 肖怡, 沈鋈, 粟雨平, 詹圆. GB/T 4732-2024《压力容器分析设计》中疲劳免除准则一的证明与应用[J]. 建模与仿真, 2025, 14(6): 24-32. DOI: 10.12677/mos.2025.146472

laborious to implement for complex loading conditions. In fact, the fatigue analysis can be screened for some pressure vessels with a low number of cycles or a low load stress level under certain conditions. Three fatigue assessment screening criteria are provided in the newly revised standard GB/T 4732-2024 "Pressure Vessels Design by Analysis". The contents and expressions of screening criteria one are revised significantly in GB/T 4732-2024 comparing with JB 4732. On the one hand, the application range of fatigue assessment screening criteria is expanded, on the other hand, the corresponding pressure fluctuation range limit value are adjusted according to the different number of cycles. In this paper, the principles behind the revision are interpreted and analyzed in detail, and the source of the pressure fluctuation percentage limits in each case are described. The implementation steps and calculation methods are described through the application example with a view to providing useful reference for engineering designers to better understand and apply the new standard.

Keywords

GB/T 4732-2024, Fatigue Assessment Screening Criteria, Design by Analysis

Copyright © 2025 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

疲劳是我国新版压力容器分析设计 GB/T 4732-2024 [1]中的四大失效模式之一。容器常常会受到温度、压力的波动及流体振动等各种形式的疲劳载荷作用，疲劳破坏是威胁设备安全的重要因素，各国标准规范[2][3]都提供了完整的疲劳分析方法。但在实际的实施过程中，对承压设备进行疲劳分析是比较耗时且费力的。实际上，并不是所有的设备都要进行疲劳分析，当载荷的循环次数较少或交变载荷下导致的应力水平不高时，满足一定条件的情况下，疲劳评定是可以免除的[4]。

为了减少疲劳评定的时间成本，对某些设备可以避免进行详细的交变载荷应力和交变温差应力的冗长计算[5]。GB/T 4732.4-2024 中给出了三种疲劳评定免除准则，用于判定是否需要进行疲劳分析。第一种是基于使用经验的疲劳评定免除准则，即根据其经验能够证明不需要做疲劳分析，可免除疲劳评定。第二种是根据疲劳评定免除准则一，标准中将总的循环次数分成了 $N \leq 10^5$ 、 $10^5 < N \leq 10^6$ 、 $10^6 < N \leq 10^7$ 三种情况，针对这三种情况分别设置了不同的疲劳评定免除准则，若各种载荷的有效循环次数总和满足一定限值，即可免除疲劳分析。第三种是根据疲劳评定免除准则二，该免除准则是以各种载荷的波动范围是否超过疲劳设计曲线许用范围为依据进行判断。疲劳评定免除准则一和二都是基于光滑杆件试验得出的疲劳曲线为基础的[6]，又细分为整体结构和非整体结构，针对成形封头过渡区的连接部件和接管及其他部件需满足不同的免除准则。

相比于 JB 4732-1995 [7]，GB/T 4732-2024 对疲劳评定免除准则一做了较大的修订，修订的背景主要源于文献[8]。由于新版压力容器分析设计标准刚颁布不久，工程师们对其中改动的内容难免产生疑惑。本文基于疲劳评定免除准则一，一方面将其与 JB 4732-1995 中的对应条款进行了对比；另一方面，对其修订背后的原理进行了解读。通过实例应用详细阐述了该准则的具体实施步骤和计算方法。

2. 概述与对比

GB/T 4732.4-2024 中疲劳评定免除准则一指出，对于抗拉强度下限值 R_m 小于等于 540 MPa 的钢材，

当循环次数不大于 10^5 时, 免除准则见 6.5.3.2; 当循环次数大于 10^5 且不大于 10^6 时, 免除准则见 6.5.3.3; 当循环次数大于 10^6 且不大于 10^7 时, 免除准则见 6.5.3.4。此外, 对于循环次数大于 10^7 , 如果扣除压力波动范围小于 6% 设计压力的循环次数后不大于 10^7 , 可再根据疲劳免除准则一或二进行判定。相比于 JB 4732-1995, GB/T 4732-2024 关于疲劳评定免除准则部分的内容做了较大改动。主要有以下四个方面。

- (1) 扩大了疲劳评定免除准则的适用范围, 给出了循环次数大于 10^7 时的疲劳评定免除条件。
- (2) GB/T 4732.4-2024 中抗拉强度下限值由 550 MPa 调整为 540 MPa, 这是根据新标准材料篇中相应规定变动的, 与 GB 150 相对应, 540 MPa 是高强钢的标准, 应用环境比较苛刻, 要求更高。
- (3) JB 4732-1995 中针对整体结构而言, 无论总的循环次数是多少, 只要启动和停车在内的全范围压力循环的次数、压力波动范围超过 20% 设计压力的工作压力循环次数、金属波动温差的有效次数和线膨胀系数不同时的温差波动循环次数之和小于等于 1000 次, 则可以免除疲劳的评定, 对于非整体结构, 总和则需要小于等于 400 次。而 GB/T 4732.4-2024 中首先是将许用循环次数上限从 10^6 增加到 10^7 , 这是根据第 6.6.6 节设计疲劳曲线的许用循环次数上限扩大而进行的调整。其次, 将总的循环次数分成了三种情况, $N \leq 10^5$ 、 $10^5 < N \leq 10^6$ 、 $10^6 < N \leq 10^7$, 并针对这三种情况分别设置了不同的免除准则。目的是确保设计循环次数在不同的量级范围内, 都能保证有足够的设计循环安全裕度, 尤其在设计循环次数大于 10^6 的高周疲劳场合。

在三种情况中, 对于启动和停车在内的全范围压力循环的次数判定, 金属温差波动的有效次数的判定, 热膨胀系数不同导致的温度波动循环次数的判定是一致的, 且与 JB 4732-1995 中判定要求相同。不同的是, 对于超过设计压力的工作压力波动循环次数的判定做了更为精细的区分, 具体如表 1 所示。本文在第二节对每种情况波动百分比的来源进行了推导和分析。

Table 1. Different percentages of pressure fluctuation in the fatigue assessment exemption criteria
表 1. 疲劳评定免除准则中不同压力波动百分比

设计循环次数	$N \leq 10^5$	$10^5 < N \leq 10^6$	$10^6 < N \leq 10^7$
整体结构	20%	12.5%	11%
非整体结构	15%	9%	8%

(4) 对于各项循环次数总和的限值, JB 4732-1995 中仅区分了整体与非整体结构, 而在 GB/T 4732-2024 中, 疲劳评定免除准则在整体与非整体结构中再次细分了成形封头过渡区的连接件和接管以及其他部件。根据不同规格成形封头进行参数化疲劳分析后, 对疲劳寿命的计算结果最小值进行取整, 得到整体结构的各项循环次数总和为 350, 非整体结构的各项循环次数总和为 60。各项循环次数总和限值的对比可见表 2。

Table 2. Comparison of the total limit values of the number of cycles for each item
表 2. 各项循环次数总和限值的对比

结构型式	容器部件	各项循环次数总和的限值	
		GB/T 4732-2024	JB 4732-1995
整体结构	成形封头过渡区的连接件和接管	≤ 350	≤ 1000
	其他部件	≤ 1000	
非整体结构	成形封头过渡区的连接件和接管	≤ 60	≤ 400
	其他部件	≤ 400	

3. 修订原理

针对 $N \leq 10^5$ 、 $10^5 < N \leq 10^6$ 、 $10^6 < N \leq 10^7$ 三种情况, GB/T 4732.4-2024 分别提出了不同的设计压力临界波动百分比, 如表 1 所示。接下来, 本文对其修订背后的原理逐步进行推导以及合理性进行分析。

3.1. 基本假设

疲劳分析免除成立是有前提条件的, 不能忽略相关的辅助要求。在制定疲劳免除准则时, 通常作以下基本假设:

(1) 结构需满足安定的条件, 即 $P_m(P_L) + P_b + Q \leq 3S$ 。当循环次数较少时, 承压结构的一次加二次应力满足 $P_m(P_L) + P_b + Q \leq 3S$ 就可保证结构的抗疲劳性能, 可以不考虑峰值应力, 该式成立的前提条件是 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 都已经通过相应的应力强度限值条件。

(2) 在 $P_m(P_L) + P_b + Q = 3S$ 处, 应力集中系数应小于等于 2.0。最大应力集中系数取 2.0, 其目的在于有效控制因几何不连续而产生的峰值应力[9], 避免其过大导致容器遭到破坏。同时容器设计满足分析设计规范对结构和制造的一系列要求。

(3) 将所有交变当量应力幅超过材料持久极限的循环均视为有效循环, 计入免除所考虑的循环。

(4) 显著的压力循环和温度循环所导致的最大应力不会在同一时刻出现。

(5) 由两点间的温差 ΔT 产生的热应力不超过 $2E\alpha\Delta T$ 。

此外, 疲劳评定免除准则的成立是以采用韧性良好的钢材作为前提条件的, 对于韧性较差的材料并不适用。

实际上, 这些前提条件和疲劳评定免除在思想上基本是一致的, 假设(1)的要求保证了承压结构在静载荷下是安全的, 在交变载荷下是安定的; 假设(2)、(4)、(5)是确保承压结构内的应力不能太大; 假设(3)则是直接限制了交变载荷的循环次数。

3.2. 理论公式推导

材料在室温下的抗拉强度表示为 R_m , 抗拉强度系数表示为 n , 安定极限为 $3S_m$, 且 $S_m = (R_m/n)$ 。应力集中系数表示为 K , 则安定极限对应的最大应力幅为:

$$S_{alt} = \frac{1}{2} K \times 3S_m = \frac{3KR_m}{2n} \quad (1)$$

根据压力波动的次数由疲劳设计曲线查得的许用应力幅值表示为 S_a , 则压力波动百分比 x 可表示为

$$x = \frac{S_a}{S_{alt}} = \frac{2S_a n}{3KR_m} \quad (2)$$

若已知 x 和 n , 则可以根据式(2)反求对应的应力幅 $S_a^{n,x}$:

$$S_a^{n,x} = \frac{3KR_m x}{2n} \quad (3)$$

指定的循环次数为 N (如 10^5 、 10^6 、 10^7), 可根据疲劳曲线查的相应的许用应力幅为 $S_{a,N}$, 结合式(3)可求得应力设计系数为:

$$sf_N^{n,x} = 2 \frac{S_{a,N}}{S_a^{x,n}} = \frac{4S_{a,N} n}{3KR_m x} \quad (4)$$

根据式(4)可将压力波动百分比改写为:

$$x = \frac{4S_{a,n}n}{3KR_m sf_N^{n,x}} \quad (5)$$

如果应力幅 $S_a^{n,x}$ 已知，可根据疲劳设计曲线求得许用的循环次数 $N_a^{n,x}$ ，则循环次数的设计系数可表示为：

$$nf_N^{n,x} = 20 \times \frac{N_a^{n,x}}{N} \quad (6)$$

3.3. 压力波动百分比限值的来源

若只考虑压力波动的情况，由设计压力引起的一次加二次应力表示为 S_{P+Q} ，且仅包含薄膜加弯曲部分，不包含应力集中。应力集中系数为 K ，通常取为 2.0。压力波动百分比为 x ，则在压力波动点处引起的应力幅为：

$$S_{alt} = \frac{1}{2}KS_{P+Q}x \quad (7)$$

只要根据疲劳曲线查得的许用应力幅 S_a 大于最大应力幅 S_{alt} ，疲劳评定就能合格[10]。此外，一次加二次应力 S_{P+Q} 还需要满足 3S 准则，即 $S_{P+Q} \leq 3S_m$ 。综上可知，只要设计压力的波动百分比满足式(8)，则可以免除疲劳的分析。

$$x \leq \frac{S_a}{3S_m} \quad (8)$$

GB/T 4732-2024 中抗拉强度取为 540 MPa，抗拉强度系数为 2.4，则 $3S_m = 675$ MPa。当总的循环次数为 10^5 、 10^6 、 10^7 时可查疲劳设计曲线获得相应的许用应力幅值，如图 1 所示，分别对应 138 MPa、86.2 MPa 和 76.6 MPa。再分别计算相应的压力波动百分比，结果如表 3 所示。

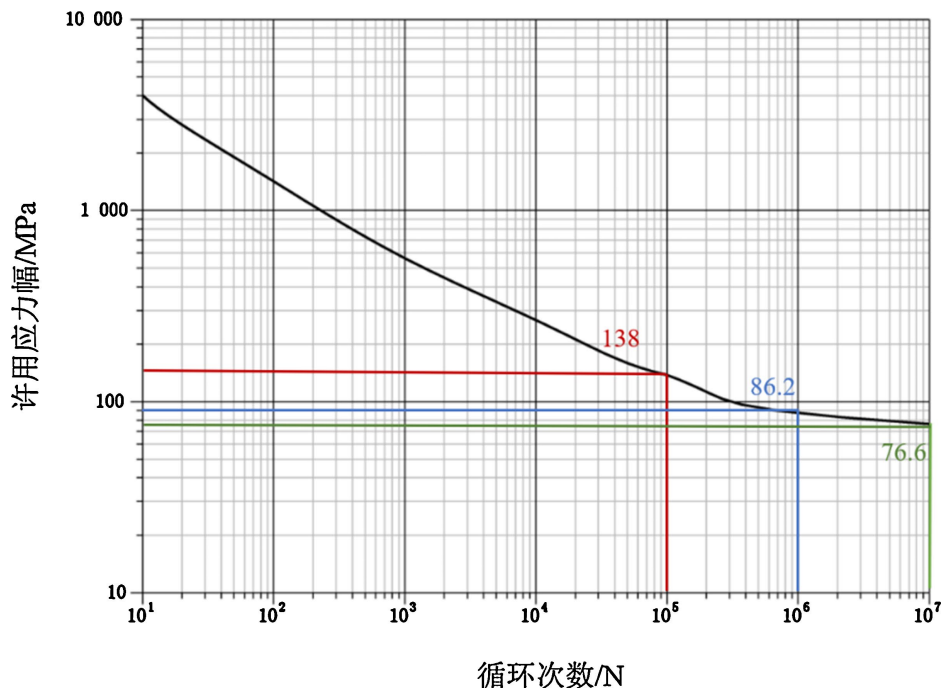


Figure 1. The corresponding relationship between specific number of cycles and stress amplitude in the design fatigue curve
图 1. 设计疲劳曲线中特定的循环次数与应力幅值的对应关系

Table 3. Pressure fluctuation ratios under different numbers of cycles**表 3.** 不同循环次数下的压力波动比

总循环次数 N	10^5	10^6	10^7
许用应力幅 S_a	138	86.2	76.6
压力波动百分比 x	20.44%	12.77%	11.35%

将得到的最后一行压力波动百分比向下取整, 就是 GB/T 4732-2024 中针对整体结构而言所得的三种压力波动百分比的限值, 分别为 20%、12.5% 和 11%。对于非整体结构, 则取了比整体结构小些的数值。

同上述原理相同, GB/T 4732.4-2024 条款 6.5.1 中关于 6% 的取值同样可由公式(8)求得。ASME VIII-2 中疲劳设计曲线的适用范围最大为 10^{11} , 当许用循环次数为 10^{11} 时, 可认为对设备的危害性极小, 可免除分析。因此, 由 10^{11} 查 ASME VIII-2 中对应的疲劳曲线可得应力幅为 48 MPa, 抗拉强度按 ASME VIII-2 取为 552 MPa, 抗拉强度系数为 2.4, 代入公式(8)求得压力波动百分比为 6.96%, 向下圆整后保守的取为 6%, 即对于循环次数大于 10^7 的情况, 压力波动范围小于 6% 的循环次数可扣除。

3.4. 应力设计系数的分析

对不同循环次数下的应力设计系数进行分析。以总循环次数为 10^5 为例, 由图 1 可知, 相应的许用应力幅 $S_{a,N}$ 为 138 MPa。根据 GB/T 4732-2024 将应力集中系数 K 取 2.0, R_m 取为 540 MPa; 抗拉强度系数 n 取 2.4。压力波动百分比 x 取为 20%, 将以上数值代入式(4)可求得对应的应力设计系数为 2.044。其他参数不变, 按照同样的方法计算不同循环次数下的应力设计系数, 结果如表 4 所示。

Table 4. $sf_N^{n,x}$ corresponding to different numbers of cycles when $x = 20\%$ **表 4.** $x = 20\%$ 时不同循环次数对应的 $sf_N^{n,x}$

n	$N \leq 10^5$		$10^5 < N \leq 10^6$		$10^6 < N \leq 10^7$	
	$S_{a,N}$ (MPa)	$sf_N^{n,x}$	$S_{a,N}$ (MPa)	$sf_N^{n,x}$	$S_{a,N}$ (MPa)	$sf_N^{n,x}$
2.4	138	2.044	86.2	1.277	76.6	1.135

由表 4 的计算结果可知, 当 $n = 2.4, N = 10^5$ 时, 计算的应力设计系数约等于 2.0。但当循环次数为 10^6 和 10^7 时, 应力设计系数分别为 1.277 和 1.135, 此时并不保守, 会导致疲劳寿命余量不足。若压力波动百分比还是单一的取为 20%, 则无法满足应力设计系数还为 2.0 的基本原则。

同理, 应力设计系数恒为 2.0 时, 根据式(5)计算不同循环次数下的压力波动百分比, 结果如表 5 所示。因此, 若应力设计系数要满足 2.0, 则不同的循环次数对应的压力波动百分比分别为 20.44%、12.77% 和 11.35%, 与 2.3 节中表 3 的结果一致。

Table 5. x values corresponding to different numbers of cycles when $sf_N^{n,x} = 2.0$ **表 5.** $sf_N^{n,x} = 2.0$ 时不同循环次数对应的 x 值

n	$N \leq 10^5$		$10^5 < N \leq 10^6$		$10^6 < N \leq 10^7$	
	$S_{a,N}$ (MPa)	x	$S_{a,N}$ (MPa)	x	$S_{a,N}$ (MPa)	x
2.4	138	20.44%	86.2	12.77%	76.6	11.35%

3.5. 循环设计系数的分析

接下来, 对不同循环次数下的循环设计系数进行分析。同样以循环次数为 $N=10^5$ 为例, 将压力波动百分比 $x=20.44\%$, $n=2.4$ 代入式(3)求得相应的应力幅 $S_a^{n,x}=138\text{ MPa}$ 。再根据疲劳设计曲线反求循环次数 $N_a^{n,x}$ 为 10^5 , 代入式(6)可求得循环设计系数。同样的方法计算 $N=10^6, N=10^7$ 的循环设计系数。结果如表 6 所示。

Table 6. The relationship between x and $nf_N^{n,x}$ under different numbers of cycles when $n=2.4$

表 6. 当 $n=2.4$ 时, 在不同循环次数下 x 与 $nf_N^{n,x}$ 的关系

n	N	x	$S_a^{n,x}$ (MPa)	$N_a^{n,x}$	$nf_N^{n,x}$
2.4	10^5	20.44%	138	10^5	20
	10^6	12.77%	86.2	10^6	20
	10^7	11.35%	76.6	10^7	20

由表 6 可知, 以应力设计系数 $sf_N^{n,x}=2.0$ 为前提, 循环次数为 $10^5, 10^6, 10^7$ 时的压力波动百分比分别取为 20.44%、12.77%和 11.35%, 得到的循环设计系数都为 20, 可确保循环次数的安全裕度。再次验证了 GB/T 4732.4-2024 中疲劳免除准则一修订的合理性。

4. 应用实例

以下根据某承压设备的设计参数, 以非成形封头过渡区的连接件和接管的整体结构为例, 介绍 GB/T 4732.4-2024 中疲劳评定免除准则一的具体实施步骤和计算方法。

某承压设备的设计压力为 3 MPa, 设计温度为 300℃。开停车的压力波动为 2.6 MPa, 循环次数为 100 次; 操作工况 A 下的压力波动范围为 2 MPa~2.2 MPa; 循环次数为 2×10^6 ; 操作工况 B 下的压力波动范围为 3.1 MPa~3.6 MPa, 循环次数为 200 次; 假设任意相邻两点之间的金属温差波动范围在 51℃~100℃ 之间, 循环次数为 200 次; 操作温度波动从 220℃ 到 300℃, 循环次数为 150 次。

(1) 确定启动和停车在内的全范围压力循环的预计次数, $N_{\text{AFP}}=100$ 。

(2) 本例中的循环次数为 2×10^6 , 应按照循环次数大于 10^6 且不大于 10^7 的疲劳评定免除准则进行判定。对于整体结构, 需确定压力波动范围超过 11%设计压力的工作压力循环的设计次数。操作工况 A 压力波动范围为 0.2MPa, 与设计压力的比值为 6.66%, 该数值小于 11%, 因此操作工况 A 的循环次数不计入设计循环次数, $N_{\text{APO}}=0$; 操作工况 B 压力波动范围为 0.5 MPa, 与设计压力的比值为 16.66%, 该数值大于 11%, 因此操作工 B 况的循环次数计入设计循环次数, $N_{\text{APO}}=200$ 。

(3) 确定任意相邻两点之间金属温差波动 ΔT_e 的有效次数。任意相邻两点之间的金属温差波动范围在 51℃~100℃, 查 GB/T 4732.4-2024 表 5 可得金属温差的波动系数为 2, 即 $N_{\text{ATE}}=150\times 2=300$ 。

(4) 该容器采用同种材料, 因此, 由线膨胀系数不同导致的温差波动循环次数 $N_{\text{ATA}}=0$ 。

(5) 上述第(1)步至第(4)步的循环次数加起来为 600, 小于 GB/T 4732.4-2024 表 7 中整体结构其他部件的疲劳免除准则限值要求 1000, 即可以免除疲劳分析。

综上, 可将计算结果汇总, 如表 7 所示。

5. 分析讨论

GB/T 4732.4-2024 中的疲劳评定免除准则一对应于 ASME VIII-2 中的方法 A, 简单直观, 便于工程应用, 且无需查看疲劳设计曲线, 但都存在一定的适用范围。ASME VIII-2 中的方法 A 适用于抗拉强度

Table 7. Calculation example of Fatigue Exemption Criterion 1
表 7.疲劳免除准则一的计算示例

工况	实际 循环 次数	设计 压力 /MPa	压力 波动 范围	波动压力和 设计压力百 分比	疲劳免除直接准则一		
					类别	是否 计入	计入疲劳免除 的循环次数
1	100	3	/	/	开停车循环次数 N_{AFP}	是	100
2	2×10^6	3	0.2	6.66%	压力波动范围超过 11%的循环次数	否	0
3	200	3	0.5	16.66%	压力波动范围超过 11%的循环次数	是	200
4	150	3	/	/	金属温差波动的有效次数	是	300
5	150	3	/	/	因膨胀系数不同导致的温差波动循环 次数	否	0
					合计		600
					限值		1000
					结果	可以免除疲劳评定	

强度小于等于 552 MPa 的钢材，GB/T 4732.4-2024 则是 540 MPa。此外，ASME VIII-2 关于显著压力波动范围的限值只是单一的循环次数 10^6 ，若循环次数大于 10^6 ，则需进行疲劳分析。一方面，在有些情况下，对循环次数的单一设置会存在一定的局限性；另一方面，对于循环次数小于 10^5 的低周疲劳而言会显得过于保守，对于循环次数大于 10^6 的高周疲劳而言又不够安全。因此，GB/T 4732-2024 修正了对有效压力波动的限制条件，将总的循环次数限制条件提高到了 10^7 ，且对其进行了细分，以适应不同工程情况的应用。

疲劳分析满足一定条件可以免除，但并不意味着可以免除分析设计。免除疲劳评定的部件需要进行规则设计还是分析设计需根据其功能、重要性以及材料、制造和检验等情况确定。

许用循环次数和材料的最小拉伸强度是相关联的，材料的安全系数和设计疲劳曲线的变化会影响到免除准则中压力波动范围的限制条件。必要时。可以降低其中一个或两个参数来确保结果的安全性和可靠性。

6. 结语

应力设计系数会随着抗拉强度系数、设计压力的波动百分比和特定的循环次数变化而变化的，单一的设计压力波动百分比限值无法满足不同循环次数下应力设计系数的安全性要求。

与 JB 4732-1995 相比，GB/T4732-2024 区分了更细致的载荷次数，针对循环次数为 $N \leq 10^5$ 、 $10^5 < N \leq 10^6$ 、 $10^6 < N \leq 10^7$ 的三种情况分别给出了各自的疲劳免除准则，并扩大了疲劳准则的适用范围；增加了接管等部位的疲劳免除评定；同时调整了材料抗拉强度下限值，进一步明确了材料强度限值。

GB/T 4732.4-2024 中为了适用于高周循环的场合将疲劳免除准则的循环次数由 10^6 提高到了 10^7 ，同时对不同的循环次数设置了不同的临界压力波动百分比以保证特定的循环次数下有足够的设计余量。

从应力设计系数和循环设计系数两方面进行分析，证明了修订后疲劳免除评定准则一的合理性及优势所在。

参考文献

[1] 中国标准出版社. GB/T 4732-2024 压力容器分析设计[S]. 北京: 中国计量出版社, 2024.

-
- [2] (2023) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, VIII Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels. ASME, New York, 2023.
 - [3] (2021) EN 13445-3, Unfired Pressure Vessels—Part 3: Design. CEN, Belgium, 2021.
 - [4] 李建国. 压力容器设计的力学基础及标准应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
 - [5] 丁伯民. 免除疲劳分析的条件——对《钢制压力容器——分析设计标准》的分析之二[J]. 化工设备设计, 1996(3): 1-7.
 - [6] 沈鋈. 循环载荷作用下承压结构安全评定方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2021.
 - [7] 全国压力容器标准化技术委员会. JB 4732-1995(2005 确认)钢制压力容器——分析设计标准[S]. 北京: 中国机械工业出版社, 1995.
 - [8] Shen, J., Lu, M., Wang, Z., *et al.* (2020) Modification and Extension of Screening Criteria for Fatigue Analysis. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **142**, Article ID: 011304. <https://doi.org/10.1115/1.4045393>
 - [9] 沈鋈, 刘应华. 压力容器分析设计方法与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
 - [10] 陆明万, 沈鋈, 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.