

# 在用球罐凹坑缺陷尺寸安全评价

段 瑞, 周世杰, 苏 哲

天津市特种设备监督检验技术研究院, 国家市场监管重点实验室(特种设备数字孪生共性技术), 天津

收稿日期: 2022年2月10日; 录用日期: 2022年3月10日; 发布日期: 2022年3月17日

## 摘 要

球罐是一种在石油化工企业中广泛应用的压力容器, 对在用球罐表面缺陷打磨处理后的凹坑尺寸评价直接影响设备能否安全运行。本文以某企业一台球罐为例, 比较了《固定式压力容器安全技术监察规程》中无量纲参数法和《在用含缺陷压力容器安全评定》标准对凹坑允许尺寸的要求及相关参数影响规律, 使用《在用含缺陷压力容器安全评定》标准能获得更大的凹坑允许尺寸参数范围, 为凹坑缺陷安全性评价提供一定的参考。

## 关键词

凹坑缺陷, 压力容器, 安全评定

# Safety Assessment of In-Service Spherical Storage Tank with Pit Defects

Rui Duan, Shijie Zhou, Zhe Su

Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Key Laboratory of Digital Twin Generic Technology in Special Equipment for State Market Regulation, Tianjin

Received: Feb. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 10<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 17<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Spherical Storage Tank is a kind of pressure vessel widely used in petrochemical industry. The assessment result of the pits size after grinding the surface defects of the Spherical Storage Tank directly affects whether the equipment can be operated safely. Taking a Spherical Storage Tank in an enterprise as an example, this paper compares the difference in the allowable size of pits and the influence of relevant parameters in the two standards of *Supervision Regulation on Safety Technology Stationary Pressure Vessel* and *Safety Assessment of In-Service Pressure Vessels Containing Defects*. Using the standard of *Safety Assessment of In-Service Pressure Vessels Containing*

**Defects can obtain a larger range of allowable size parameters for pits. This paper can provide some references for the safety assessment of Spherical Storage Tank containing pits.**

## Keywords

Pit Defect, Pressure Vessel, Safety Assessment

Copyright © 2022 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

球罐作为一种用于贮存气态、液态物料的压力容器而广泛应用在大型石油化工企业中,在其使用过程中不可避免地存在着不同程度的缺陷,特别是表面裂纹等缺陷[1]。根据国家特种设备安全技术规范《固定式压力容器安全技术监察规程》[2] (以下简称《固容规》)的要求,压力容器内、外表面不允许有裂纹,故在球罐的定期检验过程中一旦发现表面裂纹,应当将裂纹打磨消除并对打磨所形成的凹坑进行安全性评价,或进行补焊返修。而采取补焊返修方式其周期往往较长,严重时会影响到企业的正常生产运行,造成一定的经济损失。

目前对于打磨所形成的凹坑尺寸安全性评价可采用《固容规》8.5.4 条款中计算无量纲参数  $G_0$  的评价方法,或采用应力分析法,也可基于合于使用原则参照《GB/T 19624-2019 在用含缺陷压力容器安全评定》[3] 5.8 节凹坑缺陷的安全评定中的要求进行评价。根据笔者总结检验中发现的一定数量凹坑缺陷数据,对于压力容器中单独存在的较短表面缺陷,其凹坑尺寸进行规则化后,采用无量纲参数  $G_0$  评价法,其凹坑尺寸一般都在《固容规》的允许范围内。而对于出现的较长表面缺陷,或多处连续且距离较接近的表面缺陷(此时须考虑将多个凹坑合并评定),其打磨后凹坑尺寸规则化后,有时会超过《固容规》的凹坑允许尺寸范围。采用应力分析法往往需要一定的理论基础和计算软件使用基础,对于评定人员往往存在一定难度,因此必要时采用《在用含缺陷压力容器安全评定》标准进行安全评定[4],只对那些影响压力容器安全运行的危险性凹坑缺陷进行补焊返修,对于压力容器的检验有着重要的意义。

本文以某企业一台 1000 m<sup>3</sup> 氮气球罐数据参数为例,比较了采用《固定式压力容器安全技术监察规程》无量纲参数法和《在用含缺陷压力容器安全评定》标准中“最高容许工作压力”安全性评价法两种不同方法下允许存在的凹坑缺陷尺寸大小差异及相关参数影响规律,为凹坑缺陷安全性评价的提供一定的参考。

## 2. 评定限定条件

《固容规》及《在用含缺陷压力容器安全评定》对于评定的限定条件较为一致,适用的压力容器、凹坑应满足以下要求:

- 1) 压力容器不承受外压或疲劳载荷;
- 2)  $B_0/R < 0.18$  的薄壁圆筒壳或  $B_0/R < 0.10$  的薄壁球壳;
- 3) 材料满足压力容器设计规定,未发现劣化;
- 4) 凹坑不靠近几何不连续或存在尖锐棱角的区域;
- 5) 凹坑表面光滑、过渡平缓,并确认凹坑及其周围无其他表面缺陷或埋藏缺陷;

- 6) 凹坑深度  $Z$  小于计算厚度  $B$  的  $1/3$  并且小于  $12\text{ mm}$ , 且坑底最小厚度  $(B - Z)$  不小于  $3\text{ mm}$ ;  
 7) 凹坑长度  $2X \leq 2.8\sqrt{RB}$ ;  
 8) 凹坑宽度  $2Y$  不小于凹坑深度  $Z$  的  $6$  倍(容许打磨至满足本要求)。

其中  $B_0$  为缺陷附近实测容器壳体壁厚;  $B$  为评定用壳体计算厚度, 即扣除一个评定周期的内、外壁腐蚀量后的缺陷附近容器壳体壁厚;  $R$  为容器平均半径;  $X$  为规则化后椭球形凹坑在壳壁表面的椭圆长轴尺寸的一半,  $Y$  为规则化后椭球形凹坑在壳壁表面的椭圆短轴尺寸的一半,  $Z$  为规则化后椭球形凹坑的深度。

### 3. 球罐凹坑缺陷的安全性评价

#### 3.1. 球罐的基本情况

该球罐有关凹坑缺陷安全性评价的主要参数见表 1, 未见该球罐发生材质劣化现象, 故评定中材料性能数据选取相应材料标准中有关拉伸性能的指标。该设备运行工况和表面裂纹打磨所形成的凹坑均满足第 1 节所列评定限定条件, 可以根据《固容规》和《在用含缺陷压力容器安全评定》进行评定。

Table 1. Main parameters of spherical tank

表 1. 球罐的主要参数

	项目	参数
容器	平均半径 $R$ (mm)	6150
	缺陷附近实测壳体壁厚 $B_0$ (mm)	45
	评定周期内腐蚀量 $C$ (mm)	1
	评定用壳体计算厚度 $B$ (mm)	44
操作参数	设计压力(MPa)	1.77
	设计温度( $^{\circ}\text{C}$ )	60
	容器最高工作压力(MPa)	1.4
	工作温度( $^{\circ}\text{C}$ )	40
	工作介质	氮气
材料参数	材质	Q345R
	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	490
	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	315
	流变应力 $\bar{\sigma}' = 0.5(\sigma_s + \sigma_b)$ (MPa)	402.5

#### 3.2. 凹坑尺寸的允许范围

将该球罐的主要参数代入到下述标准规定公式并根据《固容规》中无量纲参数  $G_0 < 0.1$  (以下简称“ $G_0$ 法”)和《在用含缺陷压力容器安全评定》标准中  $p \leq p_{\max}$  (以下简称“容许压力法”)进行评价, 可得出图 1、图 2 的计算结果。

无量纲参数  $G_0$ :

$$G_0 = \frac{Z}{B} \frac{X}{\sqrt{RB}} \quad (1)$$

无凹坑缺陷球形容器壳体塑性极限载荷  $p_{L0}$  :

$$p_{L0} = 2\bar{\sigma}' \ln \left( \frac{R+B/2}{R-B/2} \right) \quad (2)$$

带凹坑缺陷球形容器极限载荷  $p_L$  :

$$p_L = (1 - 0.6G_0) p_{L0} \quad (3)$$

带凹坑缺陷最高容许工作压力  $p_{\max}$  :

$$p_{\max} = \frac{p_L}{1.8} \quad (4)$$

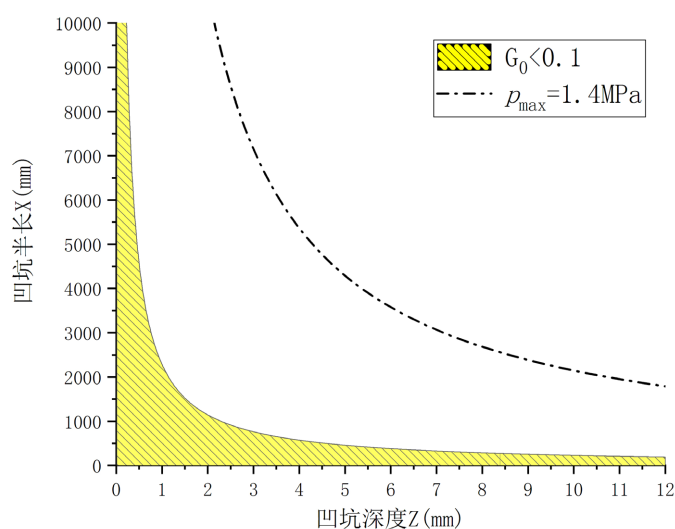


Figure 1. The allowable range of the pit size of the spherical tank  
图 1. 球罐凹坑尺寸允许范围

由图 1 可知采用容许压力法进行评价, 其凹坑尺寸允许范围比采用  $G_0$  法要大得多。例如采用  $G_0$  法当凹坑深度  $Z$  达到 2 mm 时, 其允许的凹坑半长  $X$  上限为 1144.4 mm, 而采用容许压力法评价, 相同深度的凹坑其允许的凹坑半长  $X$  仍在 10,000 mm 以上, 而且即便凹坑深度  $Z$  达到评定限定条件规定的最大值 12 mm 时, 其凹坑允许半长  $X$  为 1788.0 mm, 仍比  $G_0$  法凹坑深度  $Z$  为 2 mm 时大, 故凹坑尺寸采用  $G_0$  法计算无法通过评定时, 采用容许压力法可大大增加凹坑尺寸的允许范围。

图 2 为不同最高容许工作压力下采用容许压力法评定得到的凹坑最大允许尺寸范围。随着容许工作压力的增大, 凹坑容许范围逐渐变小。其中红色区域为  $p_{\max} \leq 1.4$  MPa, 红蓝区域分界线即为图 1 中  $p_{\max} = 1.4$  Mpa 点划线, 蓝色区域上边界为将评定用壳体计算厚度  $B$  代入《压力容器 GB/T 150.3》[5] 3.4 节得出的最大允许工作压力( $p_{\max} = 2.58$  MPa), 已大于球罐的设计压力 1.77 Mpa, 因此蓝色以上的区域在实际应用中一般无需考虑。

#### 4. 相关参数对凹坑尺寸允许范围的影响

根据上述第 3 节中公式可知凹坑尺寸是否在允许范围内, 取决于凹坑深度  $Z$  与凹坑半长  $X$  的乘积 ( $Z \cdot X$ )。根据上式(2)~(4)可得采用容许压力法进行凹坑最大允许尺寸计算时,  $G_0$  的计算结果  $G'$  可由式(5)表示:

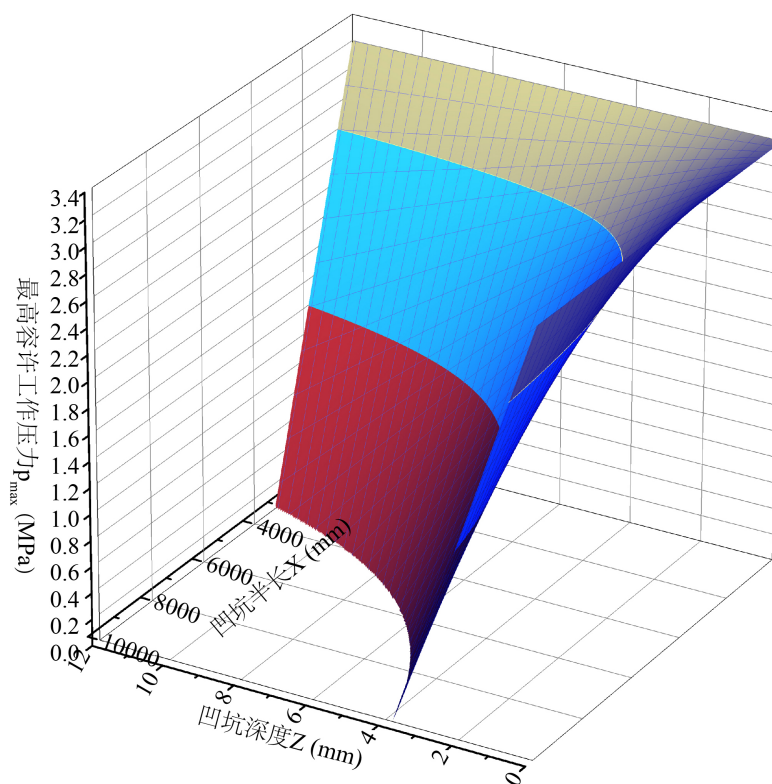


Figure 2. Relationship between maximum allowable pressure and pit size  
图 2. 最高容许压力与凹坑尺寸关系

$$G' = \frac{5}{3} - \frac{3p_{\max}}{2\bar{\sigma}' \ln\left(\frac{R+B/2}{R-B/2}\right)} \quad (5)$$

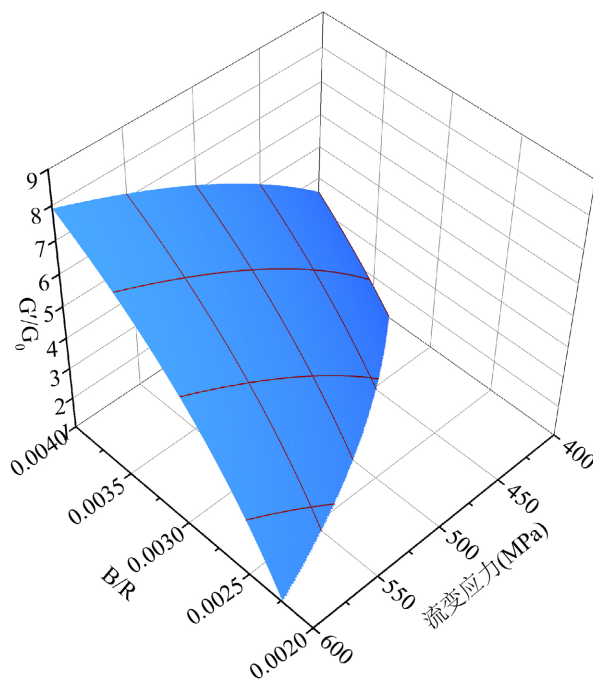
因此当检验中某球罐的平均半径  $R$  和评定用壳体计算厚度  $B$  为确定值时,我们只需计算  $G'$  与  $G_0 = 0.1$  的比值结果,即可求出两种评价方法允许的凹坑尺寸差距情况。由式(5)可知  $R$  和  $B$  的自身大小并不直接影响  $G'$ , 而  $B/R$  的比值会影响  $G'$ , 故本节将会对最高容许工作压力  $p_{\max}$ 、流变应力  $\bar{\sigma}'$  和  $B/R$  的比值三个参数来分析其对凹坑尺寸允许范围的影响。

#### 4.1. 流变应力和 $B/R$ 对评价结果的影响

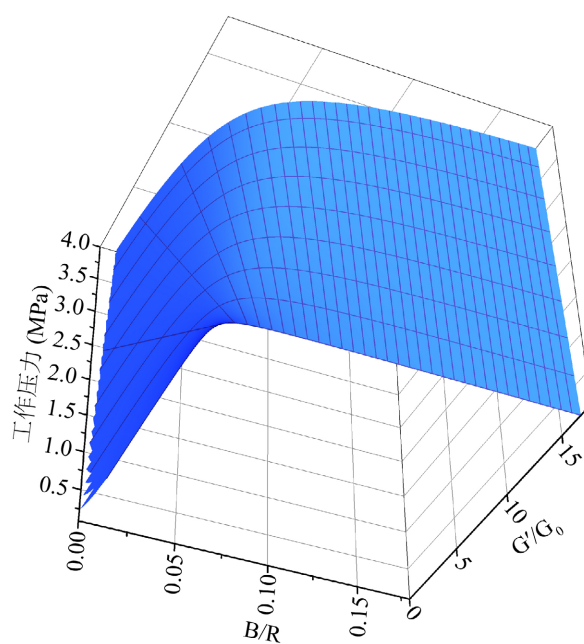
将表 1 中容器最高工作压力  $p_{\max} = 1.4 \text{ Mpa}$  带入式(5),可得出图 3。在最高工作压力一定时,对于相同流变应力的材料,其  $B/R$  的增大会使  $G'/G_0$  增大;对于  $B/R$  相同的设备,其流变应力越大,  $G'/G_0$  值越大。即容器最高工作压力确定后,  $B/R$  值越大,流变应力越大,采用容许压力法比  $G_0$  法得到的凹坑允许尺寸范围大的越多。

#### 4.2. 最高容许工作压力和 $B/R$ 对评价结果的影响

将表 1 中流变应力  $\bar{\sigma}'$  带入式(5)计算,可得出图 4。由图 4 可知对于流变应力相同的材料,工作压力一定时,当  $B/R$  较小时(如  $B/R < 0.05$  时),随着  $B/R$  的增大  $G'/G_0$  增长较快;当  $B/R$  较大时(如  $B/R$  在  $0.05 \sim 0.18$  范围内),  $B/R$  的增大对  $G'/G_0$  的影响较小(此时  $G'/G_0$  值已达到 15 以上,基本不再有较明显的增长)。当  $B/R$  一定时,工作压力越小时,  $G'/G_0$  的值越大。



**Figure 3.** Influence of flow stress and B/R  
**图 3.** 流变应力和 B/R 的影响



**Figure 4.** Influence of maximum allowable working pressure and B/R  
**图 4.** 最高容许工作压力和 B/R 的影响

## 5. 结论

综合上述分析，对于球罐中出现凹坑缺陷进行允许尺寸评定时，采用《在用含缺陷压力容器安全评

定》标准能够获得更大的凹坑允许尺寸，部分超过《固容规》尺寸要求的凹坑如采用容许压力法评定是有可能满足凹坑允许尺寸安全要求的，这样便可以减少球罐不必要的返修或判废，在满足法规标准安全要求的前提下，为使用单位减少不必要的经济损失。

### 参考文献

- [1] 孙建平. 在用球罐球壳板表面裂纹的处理[J]. 中国化工装备, 2017, 19(6): 32-35.
- [2] TSG 21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 北京: 新华出版社, 2016.
- [3] GB/T 19624-2019 在用含缺陷压力容器安全评定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [4] 任国栋, 周吉军. 在用含凹坑缺陷的压力容器合于使用评价[J]. 化学工程与装备, 2016(7): 148-150.
- [5] GB/T 150-2011 《压力容器》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.