

文章编号: 1000-8241(2015)09-0993-04

# 大型储罐底圈罐壁轴向应力的计算

吴龙平<sup>1</sup> 王成<sup>1</sup> 杜亮坡<sup>1</sup> 明斐卿<sup>2</sup> 梁奋飞<sup>1</sup> 李凯楠<sup>1</sup>

1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000; 2. 河北石油职业技术学院, 河北廊坊 065000

**摘要:** 为了便于钢制焊接储罐设计人员合理地选取设计规范进行储罐罐壁抗震计算, 简要介绍了储罐设计规范 GB 50341-2003、API 650-2013 中底圈罐壁最大轴向应力和底圈罐壁许用临界应力的计算方法。分别对  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  双盘式浮顶油罐进行了底圈罐壁最大轴向应力、底圈罐壁许用临界应力的计算, 结果表明: 在计算底圈罐壁最大轴向应力时, GB 50341-2003 与 API 650-2013 的计算结果相同; GB 50341-2003 与 API 650-2013 在计算底圈罐壁许用临界应力方面都是安全的, 但 GB 50341-2003 在确定罐壁许用临界应力方面相对保守。GB 50341-2003 与 API 650-2013 中罐壁许用临界应力的计算公式可用一个公式来代替, 当底圈罐壁最大轴向应力不大于底圈罐壁许用临界应力时, 储罐底圈罐壁在地震作用下是安全的。(表 3, 参 10)

**关键词:** 油罐; 底圈罐壁; 最大轴向应力; 罐壁许用临界应力

中图分类号: TE821

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.09.015

## Calculation of axial stress for the bottom shell of large-scale storage tank

WU Longping<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, DU Liangpo<sup>1</sup>, MING Feiqing<sup>2</sup>, LIANG Fenfei<sup>1</sup>, LI Kainan<sup>1</sup>

1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei, 065000;

2. Hebei Technical College of Petroleum Profession, Langfang, Hebei, 065000

**Abstract:** In order to facilitate the designers of welded steel tanks to calculate the seismic performance of tank wall through choosing appropriate design codes, this paper presents the calculation methods of maximum axial stress and allowable critical stress of bottom shell under GB 50341-2003 and API 650-2013. Taking the  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  and  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  dual-disc floating roof tanks as an examples, the maximum axial stress and allowable critical stress of bottom shell are respectively calculated. The results show that the maximum axial stress calculated by the method mentioned in GB 50341-2003 is the same as that of API 650-2013; both GB 50341-2003 and API 650-2013 are applicable for allowable critical stresses, but GB 50341-2003 is conservative in the calculation. The formulas for allowable critical stresses in GB 50341-2003 and API 650-2013 can be replaced by one formula. When the maximum axial stress is not greater than the allowable critical stress, the bottom shell of tank is safe under the earthquake. (3 Tables, 10 References)

**Key words:** oil tank, bottom shell, maximum axial stress, allowable critical stress of shell

大型储罐是石油和天然气资源开发的基础性设施, 是能源利用、再生产和供给的重要设施<sup>[1]</sup>。近年来, 大型立式储罐以其不可替代的优势成为储罐发展的重要方向, 但是储罐尤其大型储罐是石油化工设备中震害相对较大的设备之一, 历史上每次强震过后, 都有不少储罐遭受破坏<sup>[2]</sup>。为了保证大型储罐在地震作用下安全运行, 孙建刚等<sup>[3-5]</sup>对大型储罐进行了卓有成效的抗震研究, 取得了一系列研究成果。近年来, 关于 GB 50341-2003<sup>[6]</sup>储罐底圈罐壁的轴向应力和许用应力

是否合理的争论越来越多。目前, 涉及储罐底圈罐壁轴向应力计算的设计规范主要有 GB 50341-2003 和 API 650-2013<sup>[7]</sup>。对处于同一地区的石油储罐而言, 采用不同的石油储罐设计规范对底圈罐壁厚度进行抗震计算校核, 可能会得到不同的计算结论。为此, 有必要对国内外储罐设计规范在底圈罐壁轴向应力计算方面的差异进行对比分析, 以便选取更为合理的储罐设计规范进行底圈罐壁轴向应力的抗震计算校核, 以保障能源储存安全<sup>[8]</sup>。

## 1 GB 50341—2003

GB 50341—2003 附录 D 规定:地震作用下罐壁底部产生的最大轴向应力应按式(1)、式(2)进行计算:

$$\sigma_c = \frac{C_V N_1}{A} + \frac{C_L M}{Z_1} \quad (1)$$

$$M = 0.18 \alpha m_1 F_r g H \quad (2)$$

式中:  $\sigma_c$  为底圈罐壁最大轴向压应力, MPa;  $C_V$  为竖向地震影响系数(7度及8度地震区  $C_V=1.0$ , 9度地震区  $C_V=1.45$ );  $N_1$  为罐壁底部垂直载荷, MN;  $A$  为按底圈壁板有效厚度计算的罐壁截面面积,  $m^2$ ;  $Z_1$  为按底圈罐壁有效厚度计算的断面系数,  $Z_1=0.785 D^2 t$ ,  $m^3$ ;  $C_L$  为翘离影响系数, 取  $C_L=1.4$ ;  $M$  为地震弯矩, N·m;  $\alpha$  为地震影响系数, 根据 GB 50341—2003 附录 D 确定;  $m_1$  为储罐储液质量, kg;  $F_r$  为动液系数, 根据 GB 50341—2003 确定;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $H$  为储罐设计液位高度, m。

罐壁许用临界应力按式(3)计算:

$$[\sigma_{cr}] = 0.000 15 E \frac{t}{D} \quad (3)$$

式中:  $[\sigma_{cr}]$  为罐壁许用临界应力, MPa;  $E$  为设计温度下底圈罐壁材料的弹性模量, MPa;  $t$  为底圈罐壁有效厚度, mm;  $D$  为储罐内径, m。

当  $\sigma_c \leq [\sigma_{cr}]$  时, 底圈罐壁在地震作用下是安全的。

## 2 API 650-2013

API 650-2013 附录 E 规定:在地震作用下, 底圈罐壁产生的最大轴向应力应按式(4)~式(20)计算:

当  $J \leq 0.785$  时,

$$\sigma_c = \left[ w_t (1 + 0.4 A_v) + \frac{1.273 M}{D^2} \right] / (1000 t) \quad (4)$$

当  $0.785 < J \leq 1.54$  时,

$$\sigma_c = \left[ \frac{w_t (1 + 0.4 A_v) + w_a}{0.607 - 0.186 67 J^{2.3}} - w_a \right] / (1000 t) \quad (5)$$

当  $J > 1.54$  时,

$$\sigma_c = \left[ w_t (1 + 0.4 A_v) + \frac{1.273 M}{D^2} \right] / (1000 t) \quad (6)$$

$$M = \sqrt{[A_i (W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + A_c (W_c X_c)^2} \quad (7)$$

$$J = \frac{M}{D^2 [w_t (1 - 0.4 A_v) + w_a]} \quad (8)$$

$$w_a = 99 t_a \sqrt{F_y H G_c} \quad (9)$$

$$w_t = \frac{W_s}{\pi D} + w_{rs} \quad (10)$$

$$A_v = 1.175 F_a S_p \quad (11)$$

$$G_c = G (1 - 0.4 A_v) \quad (12)$$

$$A_i = 2.5 F_a S_p \left( \frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (13)$$

$$A_c = 3.75 F_a S_p \left( \frac{4 T_s}{T_c^2} \right) \left( \frac{I}{R_{wc}} \right) \quad (14)$$

$$T_c = 1.040 4 \sqrt{\frac{D}{\tanh\left(\frac{3.68 H}{D}\right)}} \quad (15)$$

$$T_s = \frac{F_v}{2 F_a} \quad (16)$$

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{H}\right)}{0.866 \frac{D}{H}} W_p \quad (17)$$

$$W_c = 0.23 \frac{D}{H} W_p \tanh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) \quad (18)$$

$$X_i = 0.375 H \quad (19)$$

$$X_c = \left[ 1.0 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 H}{D}\right) - 1.0}{\frac{3.67 H}{D} \sinh\left(\frac{3.67 H}{D}\right)} \right] H \quad (20)$$

式中:  $w_t$  为罐壁罐顶重力作用于底圈罐壁单位长度上的压力, N/m;  $A_v$  为垂直地震加速度参数,  $m/s^2$ ;  $t_a$  为罐底边缘板有效厚度, mm;  $w_a$  为底圈罐壁单位长度上的提高反抗力, N/m;  $w_{rs}$  为作用于罐壁的单位罐顶质量, N/m;  $M$  为地震弯矩, N·m;  $J$  为锚固系数;  $I$  为地震分组重要因子系数, 一般取 1.25;  $A_i$  为脉动设计响应谱加速度系数,  $m/s^2$ ;  $A_c$  为传动设计响应谱加速度参数,  $m/s^2$ ;  $W_i$  为有效储液脉动质量, N;  $W_s$  为罐壁及罐壁附件质量, N;  $W_r$  为罐顶及罐顶附件质量, N;  $W_c$  为有效储液传动质量, N;  $W_p$  为储液总质量, N;  $X_i$  为从罐壁底部到与横向地震相关的脉动作用中心的高度, m;  $X_s$  为从罐壁底部到罐壁重心的高度, m;  $X_r$  为从罐壁底部到罐顶及罐顶附件重心的高度, m;  $X_c$  为从罐壁底部到与横向地震相关的传动作用中心的高度, m;  $F_y$  为罐底边缘板材料的屈服强度, MPa;  $G_c$  为地震作用下的储液有效相对密度;  $G$  为储液相对密度;  $F_a$ 、 $F_v$  为场地系数;  $T_c$  为储液耦连振动基本周期, s;  $R_{wi}$ 、 $R_{wc}$  分别为采

用许用应力设计法的脉动力缩放系数和传动力缩放系数(表1)。

表1 许用应力设计法缩放系数

| 锚固型式 | $R_{wi}$ | $R_{wc}$ |
|------|----------|----------|
| 非锚固  | 3.5      | 2.0      |
| 机械锚固 | 4.0      | 2.0      |

罐壁许用临界应力应该按照式(21)、式(22)进行计算:

当  $GHD^2/t^2 \geq 44$  时,

$$[\sigma_{cr}] = \frac{83 t}{D} \quad (21)$$

当  $GHD^2/t^2 < 44$  时,

$$[\sigma_{cr}] = \frac{83 t}{2.5 D} + 7.5\sqrt{GH} \quad (22)$$

### 3 底圈罐壁轴向应力计算

以  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  双盘式浮顶油罐、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  双盘式浮顶油罐为例,进行底圈罐壁轴向应力计算和校核。

#### 3.1 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 双盘式浮顶油罐

已知:直径  $D=96 \text{ m}$ ,  $H=21.22 \text{ m}$ ,  $t=38 \text{ mm}$ ,  $t_a=21 \text{ mm}$ ;设计地震分组为第2组,场地类别为II,地震区为7度,设计基本地震加速度为  $0.15 \text{ g}$ ,特征周期  $t_g=0.40 \text{ s}$ ,  $\alpha_{\max}=0.345$ ,  $R_{wi}=3.5$ ,  $R_{wc}=2.0$ ,  $W_s=N_1=13.7 \text{ MN}$ ,  $W_p=15.009 \times 10^8 \text{ N}$ ,  $W_r=0$ ,  $W_{rs}=0$ ,  $X_r=0$ ,  $X_s=8.23 \text{ m}$ ,  $A=11.46 \text{ m}^2$ ,  $G=1.0$ ,  $Z_1=274.91 \text{ m}^3$ ,  $m_1=1.53 \times 10^8 \text{ kg}$ ,  $\alpha=0.251$ ,  $F_r=0.252$ ,  $I=1.25$ ,  $F_y=490 \text{ MPa}$ 。

按 GB 50341-2003 的计算方法计算底圈罐壁轴向应力。由已知参数可得:  $\sigma_c=3.05 \text{ MPa}$ ;  $[\sigma_{cr}]=12.23 \text{ MPa}$ ; 由于  $\sigma_c=3.05 < [\sigma_{cr}]=12.23$ , 因此储罐底圈罐壁是安全的。按 API 650-2013 的计算方法计算底圈罐壁轴向应力。根据设计地震分组为第2组,场地类别为II,设计基本地震加速度为  $0.15 \text{ g}$ ,可确定以下参数:  $S_p=0.15$ ,  $F_a=1.2$ ,  $F_v=1.6$ ,  $I=1.25$ , 由此可得,  $J=0.229$ 。因为  $J=0.229 < 0.785$ , 所以储罐为非锚固储罐,应按式(4)计算储罐底圈罐壁产生的最大轴向应力,  $\sigma_c=3.17 \text{ MPa}$ 。因为  $GHD^2/t^2=135 > 44$ , 所以应按式(21)计算罐壁许用临界应力,  $[\sigma_{cr}]=32.85 \text{ MPa}$ 。由于  $\sigma_c=3.17 < [\sigma_{cr}]=32.85$ , 因此储罐底圈罐壁是安

全的。可见,按照 GB 50341-2003 和 API 650-2013 进行罐壁抗震计算校核都是安全的。

#### 3.2 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 双盘式浮顶油罐

已知:直径  $D=80 \text{ m}$ ,  $H=20.2 \text{ m}$ ,  $t=30 \text{ mm}$ ,  $t_a=19 \text{ mm}$ ;设计地震分组为第2组,场地类别为II,地震区为7度,设计基本地震加速度为  $0.15 \text{ g}$ ,特征周期  $T_g=0.40 \text{ s}$ ,  $\alpha=0.345$ ,  $R_{wi}=3.5$ ,  $R_{wc}=2.0$ ,  $W_s=N_1=8.9 \text{ MN}$ ,  $W_p=9.908 \times 10^8 \text{ N}$ ,  $W_r=0$ ,  $W_{rs}=0$ ,  $X_r=0$ ,  $X_s=8.15 \text{ m}$ ,  $A=7.54 \text{ m}^2$ ,  $G=1.0$ ,  $Z_1=150.72 \text{ m}^3$ ,  $m_1=1.01 \times 10^8 \text{ kg}$ ,  $\alpha=0.272$ ,  $F_r=0.285$ ,  $I=1.25$ ,  $F_y=490 \text{ MPa}$ 。

按 GB 50341-2003 的计算方法计算底圈罐壁轴向应力。由已知参数可得:  $\sigma_c=3.77 \text{ MPa}$ ;  $[\sigma_{cr}]=11.59 \text{ MPa}$ ; 由于  $\sigma_c=3.77 < [\sigma_{cr}]=11.59$ , 因此储罐罐壁是安全的。按 API 650-2013 的计算方法计算底圈罐壁轴向应力。根据设计地震分组为第2组,场地类别为II,设计基本地震加速度为  $0.15 \text{ g}$ ,可确定以下参数:  $S_p=0.15$ ,  $F_a=1.2$ ,  $F_v=1.6$ ,  $I=1.25$ , 由此可得,  $J=0.272$ 。因为  $J=0.272 < 0.785$ , 所以储罐为非锚固储罐,应按式(4)计算储罐罐壁底部产生的最大轴向压应力,  $\sigma_c=3.73 \text{ MPa}$ 。因为  $GHD^2/t^2=143.6 > 44$ , 所以应按式(21)计算罐壁许用临界应力,  $[\sigma_{cr}]=31.13 \text{ MPa}$ 。由于  $\sigma_c=3.73 < [\sigma_{cr}]=31.13$ , 因此储罐底圈罐壁是安全的。可见,按照 GB 50341-2003 和 API 650-2013 进行罐壁抗震计算校核都是安全的。

## 4 结果讨论

#### 4.1 地震作用下的底圈罐壁最大轴向应力

根据  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  双盘式浮顶油罐的底圈罐壁最大轴向应力计算结果(表2),在计算底圈罐壁最大轴向应力时,GB 50341-2003 与 API 650-2013 虽然在计算公式及参数选取方面差别较大,但计算结果一致,因此,可以按照 GB 50341-2003 或 API 650-2013 进行底圈罐壁最大轴向应力计算,而选取另一标准规范计算校核,以保证计算结果的正确性<sup>[9-10]</sup>。

表2 底圈罐壁最大轴向应力计算结果

| 油罐容积/( $10^4 \text{ m}^3$ ) | 最大轴向应力/MPa    |              |
|-----------------------------|---------------|--------------|
|                             | GB 50341-2003 | API 650-2013 |
| 15                          | 3.05          | 3.17         |
| 10                          | 3.77          | 3.73         |

## 4.2 罐壁许用临界应力

根据  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$  双盘式浮顶油罐的底圈罐壁许用临界应力计算结果(表3),在计算底圈罐壁许用临界应力时,按 API 650-2013 计算所得的底圈罐壁许用临界应力约为按 GB 50341-2003 计算结果的 2.7 倍。由  $[\sigma_{cr}] = 83 t/D$  及  $E = 206\,000 \text{ MPa}$  可得:

$$[\sigma_{cr}] = 0.000\,4 E \frac{t}{D} \quad (23)$$

表3 底圈罐壁许用临界应力计算结果

| 油罐容积/( $10^4 \text{ m}^3$ ) | 许用临界应力/MPa    |              |
|-----------------------------|---------------|--------------|
|                             | GB 50341-2003 | API 650-2013 |
| 15                          | 12.23         | 32.85        |
| 10                          | 11.59         | 31.13        |

多年来,按 API 650-2013 和 GB 50341-2003 进行抗震计算校核的储罐,在工程中未出现任何问题,因此按照 API 650-2013 和 GB 50341-2003 进行抗震计算都是安全的。对式(3)及式(23)进行分析可知,GB 50341-2003 在确定罐壁许用临界应力方面相对保守。令  $[\sigma_{cr}] = K_1 E t/D$ ,  $K_1 \in (0.000\,15, 0.000\,4)$ , 当满足  $\sigma_c \leq [\sigma_{cr}]$  时,储罐罐壁在地震作用下是安全的。而从经济性考虑, $K_1$  的取值越大,工程投资节省越多。

## 5 结论及建议

(1) 在计算底圈罐壁最大轴向应力时,GB 50341-2003 与 API 650-2013 虽然在计算公式及参数选取方面差别较大,但计算结果一致。

(2) GB 50341-2003 与 API 650-2013 在计算底圈罐壁许用临界应力方面都是安全的,但 GB 50341-2003 在确定罐壁许用临界应力方面相对保守。

(3) GB 50341-2003 与 API 650-2013 中罐壁许用临界应力的计算公式可用  $[\sigma_{cr}] = K_1 E t/D$  代替,  $K_1 \in (0.000\,15, 0.000\,4)$ , 当满足  $\sigma_c \leq [\sigma_{cr}]$  时,储罐罐壁在地震作用下都是安全的。

## 参考文献:

- [1] 陈世一,蔡强康. 锚固式圆柱形储液罐抗震研究的回顾和展望(1)——刚性基础上储液罐动力特性及地震反应研究的回顾[J]. 抚顺石油学院学报, 1996, 16(4): 38-43.
  - [2] 李扬,李自力,张艳. 中美欧储液罐抗震规范中地震作用的比较研究[J]. 世界地震工程, 2009, 25(1): 122-130.
  - [3] 孙建刚,郝进峰,袁朝庆,等. 储液罐地震响应耗能减震研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(6): 763-768.
  - [4] 孙建刚,周丽,袁朝庆,等. 立式钢制圆柱储液罐动提高控制[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 25(3): 102-105.
  - [5] 孟振虎,蔡强康. 储液罐的地震反应分析[J]. 油气储运, 1983, 2(5): 28-42.
  - [6] 中国石油天然气管道工程有限公司. GB 50341-2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
  - [7] American Petroleum Institute. API 650-2013 Welded tanks for oil storage[S]. Washington DC: API, 2013.
  - [8] 刘佳,袁玲,唐悦影,等. 中美大型储罐设计标准抗震计算对比[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 421-425.
  - [9] 孙建刚,王凯,蒋峰,等. 大型原油储罐的静力数值分析[J]. 油气储运, 2009, 28(8): 20-26.
  - [10] 陈志平,曾明,余雏麟,等. 大型油罐应力分析与屈曲稳定性研究[J]. 油气储运, 2008, 27(12): 7-12.
- (收稿日期:2014-06-30; 修回日期:2015-09-03; 编辑:潘红丽)



**作者简介:** 吴龙平,高级工程师,1979年生,2005年硕士毕业于中国石油大学(华东)化工过程机械专业,现主要从事大型储罐的设计工作。

WU Longping, MS.D, senior engineer, born in 1979, graduated from China University of Petroleum (Huadong), chemical process

machinery, in 2005, engaged in the design of large-scale tanks.

Tel: 13473165296, Email: wulongping@cnpc.com.cn