

基于ASCE7-16标准的大型低温储槽管道地震工况应力分析

陈现征 闻 涛

杭州杭氧低温容器有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要: 基于ASCE7-16标准可以确定大型低温储槽管道地震工况的载荷,在此基础上利用CAESAR II软件能够通过工况的组合对大型低温储槽管道地震工况的应力进行分析。通过具体项目地震工况的应力分析和优化过程,来说明大型低温储槽管道地震工况应力分析的方法和降低地震工况应力的措施。

关键词: ASCE7-16; 大型低温储槽管道; CAESAR II软件; 地震工况; 应力分析

引言

ASCE7-16是美国土木工程师学会发布的《建筑物和其它结构的最小设计载荷》标准,用于规定建筑物结构设计中的最小设计载荷要求和其它相关要求。它本身是载荷标准,包括风载、雪载的计算,也包括龙卷风、海啸、地震等作用的确定,集载荷与作用于一体。同时ASCE7-16也包括了一些与载荷特别是与抗震有关的具体规定,它不仅适用于建筑物,也适用于除核设施、桥梁、水工等少数行业外的大多数构筑物的设计^[1]。

CAESAR II软件是美国COADE公司研发的压力管道应力分析专业软件,是一种功能强大且被国际广泛认可的管道应力分析工具。相比于其它众多的有限元分析软件,CAESAR II专门针对管道系统,以梁单元为模型基础模拟管道,通过节点参数输入的方式来创建模型,建模简单而且能够快速准确地提取管道在节点处的变形、应力和反作用力作为设计参考依据。低温贮槽管道所处的各种复杂工况都能够在CAESAR II软件中进行组合分析。CAESAR II有专门的地震输入模块,并且引用了ASCE7-16标准规范,我们只需要根据标准将设备使用地的参数输入就可以将地震载荷施加到低温储槽管道上,然后在工况编辑界面根据需要进行工况的组合就可以得到需要的地震工况应力情况。

1 地震等效静力载荷的确定

严格地说,地震载荷属于动载荷,应该应用动力学方法进行分析,由于动力学分析方法过于复杂,难于应用于工程实际。所以在计算地震载荷时,采用等效静力法将地震载荷的作用转化为等效静力载荷来计算。地震动载荷通过罐体传导到管道上,在管道的约束点设置地震载荷。

ASCE7-16将不同风险的建筑物划分为 I、II、

III、IV四个级别,对应不同的风险级别具有不同的重要性系数,I、II级结构对应的重要性系数是1.0,III级对应的重要性系数是1.25,IV级对应的重要性系数是1.5。除了根据不同风险等级将建筑物分类外,ASCE7-16还根据建筑物的风险等级、地震动参数值和场地类别将建筑物赋予一个抗震设计类别,抗震设计类别是非常重要的一个分类,它与结构抗震体系的选择、地震力的计算、抗震构造等都有关系,抗震设计类别分为A、B、C、D、E、F六个级别,由低到高,抗震要求越来越高。基于风险为目标考虑的最大地震(MCE_R)反应谱所采用的加速度S_s、S₁可根据建筑物所在位置、风险等级、和场地类别从美国国家地质局网站地震数据库中查到。ASCE7-16中的MCE_R采用的是重现期为2475年的地震(50年超越概率2%),不同于国标采用的是重现期为475年的地震(50年超越概率10%)。综合考虑结构延性、材料超强、阻尼变化等因素,ASCE7-16根据不同的结构给出了减小地震作用的系数即地震作用调整系数R和放大系数a_p。

根据ASCE7-16中13.3.1的规定,水平地震设计作用力应该由以下公式确定:

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right)$$

但水平地震作用力不需要大于 $F_p = 1.6S_{DS} I_p W_p$

并不得小于 $F_p = 0.3S_{DS} I_p W_p$

F_p : 水平地震设计作用力

S_{DS} : 短周期反应谱加速度, $S_{DS} = \frac{2}{3} S_{Ms} = \frac{2}{3} F_a S_s$ (F_a 为和抗震设计类别和 S_s 有关的系数, S_s 为0.2S谱响应加速度)

a_p : 放大系数

I_p : 重要性系数

W_p : 操作重量

R_p : 地震作用调整系数

z : 建筑相对于基础的高度

h : 建筑物顶部相对于基础的高度, $\frac{z}{h} \leq 1$ 。

在考虑水平地震作用力的同时, 应赋予一个竖直地震作用力 $\pm 0.2S_{DS}W_p$ 。

2 大型低温储槽管道地震工况的应力分析及优化过程

大型低温储槽管道位于内筒与外筒之间的夹层空间, 其一端与内筒焊接连接, 一端与外筒焊接连接, 通过固定在内筒上的支架对管道进行支撑。在进行低温储槽管道应力分析时, 主要考虑四种工况下的管道应力情况, 分别是持续工况、操作工况、热胀工况和偶然工况。这里我们着重讨论偶然工况的应力情况。由于低温储槽管道封闭在低温储槽内筒与外筒之间的夹层空间内, 外部的风载荷等偶然载荷由于外筒的阻碍不会对其形成有效的作用, 只有地震载荷是需要着重考虑的偶然载荷。对于地震设防要求较高的地区, 合理地布置低温储槽管道并设置支撑, 防止地震载荷对低温储槽管道的破坏显得尤为重要。

以台湾某项目大型低温储槽的某根管道为例, 来说明低温储槽管道地震工况应力分析及优化的过程。项目给出的设计地震条件为 $S_D = 1.2g$, 抗震设计类别为D级。首先, 在CAESAR II中以节点参数输入的方式构建管道模型, 将内罐体模拟为刚性杆件并通过Cnode方式与管道相应节点连接, 在管道的相应支架和焊接点处设置对应的约束。并对相应的管道和刚性件设置对应的材料、温度和压力等参数。20节点为管道与外筒体的焊接连接点, 130节点处有一个承重支架, 160节点为管道与内筒体的焊接连接点, 1000节点为内筒底板固定点。在构建管道模型的同时将对应的地震参数输入模型, 模型构建好以后进行错误检查进入工况编辑界面, 在工况编辑界面, 可以根据设置的参数对管道的各种工况进行编辑组合。对于地震工况, 主要考虑水平方向的加速度和竖直方向的加速度的组合, 水平方向的两个加速度为U1和U3, 竖直方向的加速度为U2。由于水平方向的两个加速度不会同时出现, 将各种可能同时出现的地震加速度进行组合并与正常操作工况进行叠加, 得到含有地震的操作工况L5-L12, 将得到的带有地震的操作工况与正常操作工况相减, 就得到了单纯的地震工况L13-L20, 然后再与持续工况叠加, 得到用于应力评判的持续+地震工况L21-L28, 如图1所示。

	Exclude	Definition	Name	Stress Type
L1	<input type="checkbox"/>	W+T1+P1	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L2	<input type="checkbox"/>	W+T2+P1	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L3	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L4	<input type="checkbox"/>	W+P1	OPERATING CASE CONDITI	SUS
L5	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1+U1-U2	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L6	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1-U1-U2	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L7	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1+U1+U2	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L8	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1-U1+U2	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L9	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1-U2+U3	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L10	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1-U2-U3	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L11	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1+U2+U3	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L12	<input type="checkbox"/>	W+T3+P1+U2-U3	OPERATING CASE CONDITI	OPE
L13	<input type="checkbox"/>	L5-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L14	<input type="checkbox"/>	L6-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L15	<input type="checkbox"/>	L7-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L16	<input type="checkbox"/>	L8-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L17	<input type="checkbox"/>	L9-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L18	<input type="checkbox"/>	L10-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L19	<input type="checkbox"/>	L11-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L20	<input type="checkbox"/>	L12-L3	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L21	<input type="checkbox"/>	L4+L13	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L22	<input type="checkbox"/>	L4+L14	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L23	<input type="checkbox"/>	L4+L15	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L24	<input type="checkbox"/>	L4+L16	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L25	<input type="checkbox"/>	L4+L17	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L26	<input type="checkbox"/>	L4+L18	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L27	<input type="checkbox"/>	L4+L19	OPERATING CASE CONDITI	OCC
L28	<input type="checkbox"/>	L4+L20	OPERATING CASE CONDITI	OCC

图1

根据ASMEB31.3-2020的规定, 由于压力、重量和其他持续性荷载产生的纵向应力以及诸如风或地震等临时荷载所产生的应力之总和, 可以是许用应力的1.33倍^[2]。CAESAR II自动引用了ASMEB31.3-2020标准, 将OCC工况的许用应力设置为材料许用应力的1.33倍。查看L21工况的应力云图, 如图2所示。

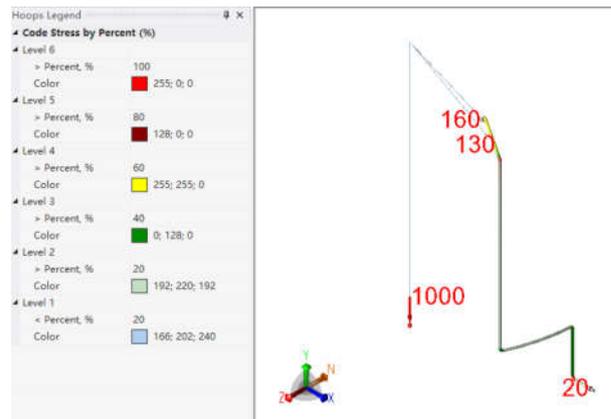


图2

可以看到竖直管顶部弯头处应力超标。仔细观察模型会发现, 管道的竖直管段缺少支架支撑, 这样在地震载荷作用的情况下就会出现竖直管段产生过量变形导致相应管道应力超标。为降低竖直管段在地震载荷作用下产生的过量变形和超应力, 在竖直管段添加两个导向支架, 并再一次查看L21工况的应力云图, 如图3所示。

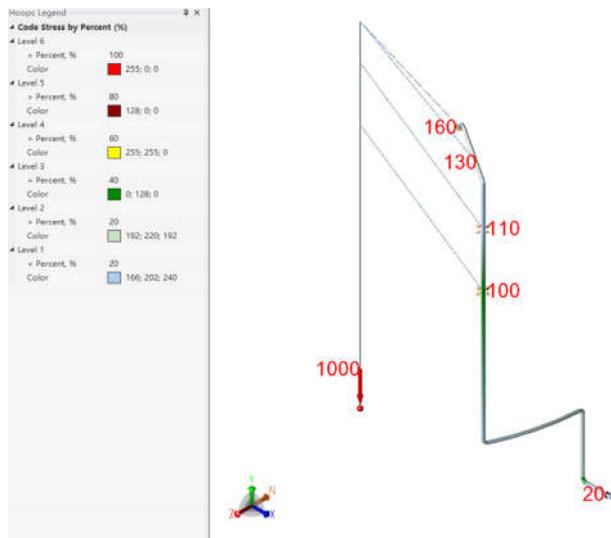


图3

可以看到，竖直管顶部弯头处的应力明显减小，这是因为支架的存在限制了地震时管道的变形，进而使得地震时管道的应力变小。说明竖直管段添加的两个导向支架明显改善管道地震工况的应力情况，起到了很好的优化作用。

3 管道应力的组成

管道应力分量主要包括压力引起的纵向应力和环向应力、轴向力引起的轴向应力、弯曲应力和扭转应力^[3]。

压力引起的纵向应力和环向应力可以根据内压作用下薄壁圆筒的应力计算公式确定：

$$\sigma_L = \frac{PD}{4S_0}$$

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2S_0}$$

σ_L : 纵向应力；

σ_θ : 环向应力；

P : 管道内压力，MPa；

D : 平均直径，等于 $(D_0 + D_i) / 2$ ，mm；

S_0 : 壁厚，mm；

D_0 : 管道外直径；

D_i : 管道内直径。

轴向应力由以下公式确定：

$$\sigma_A = \frac{F}{A}$$

σ_A : 轴向应力；

F : 轴向拉力或压力；

A : 管道截面积。

弯曲应力 S_b 应使用力矩公式计算：

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z}$$

式中： S_b -合成弯曲应力；

i_i -平面内应力增强系数；

i_o -平面外应力增强系数；

M_i -平面内的弯矩；

M_o -平面外的弯矩；

Z -管道的截面模数。

扭转应力应由以下公式确定：

$$S_t = M_t / 2Z$$

S_t : 扭转应力；

M_t -扭转力矩；

Z : 管道的截面模数。

将这些应力分量计算出来之后按照强度理论进行整合就可以得到不同形式的节点总应力。对于特殊管段如存在管件的地方还需要考虑应力增强系数对管道应力的影响。

结束语

CAESAR II 软件利用有限元方法有效简化了大型低温储槽管道应力的计算，提高了管道应力分析的效率。ASCE7-16对大型低温储槽管道地震载荷有明确的规定。两者结合能够对大型低温储槽管道的地震工况进行比较精确的分析。

在地震设防烈度较高的地区，为了增强大型低温储槽管道的抗震能力，除了合理设置支架外，也可以通过增加管道壁厚，减小管道的震动变形，进而减小地震时管道的应力。另外，应优先采用焊接的管道连接方式，避免螺纹等管道连接方式。在选用管道材料时，应优先选择弹塑性较好的材料，避免采用脆性材料。通过管道地震工况应力分析，可以预测管道在地震时的失效形式并根据需要对管道系统进行优化，有效预防地震载荷对管道系统的破坏。

参考文献

- [1]. ASCE7-16 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [S].2016
- [2].ASME Code for Pressure Piping B31.3, Pressure Piping [S].2020.
- [3].唐永进. 压力管道应力分析[M].北京:中国石化出版社2003.