DOI: 10.11883/bzycj-2017-0090
文章编号: 1001-1455(2018)05-0966-11

液化天然气储罐混凝土穹顶的冲击破坏模式与机理*

翟希梅[1,2],赵新宇[1,2]
(1.哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090;
2.哈尔滨工业大学土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为获得大型全容式 LNG 储罐混凝土穹顶结构在圆柱形刚体冲击作用下的动力响应、失效模式以及失效机理,基于 160 000 m³ 的 LNG 储罐,应用 ANSYS/LS-DYNA 建立 LNG 储罐精细化有限元数值模型,并通过对弹丸冲击混凝土靶板实验的数值模拟,验证了有限元模拟方法及材料模型的适用性。通过分析圆柱体冲击物撞击下 LNG 储罐的动力响应,提出储罐穹顶结构的 3 种失效模式即局部凹陷、混凝土剥落、击穿破坏,并根据冲击过程中能量的传递特征揭示了每类失效模式对应的失效机理。最后通过大量参数分析获得不同冲击物直径、冲击位置、冲击角度对 LNG 储罐结构的最大冲击响应及失效模式的影响规律。结果表明,冲击角度、冲击物直径对 LNG 储罐混凝土外罐穹顶的失效模式影响较大,冲击位置对储罐穹顶失效模式的影响较小,可以忽略。

关键词: LNG 储罐;混凝土穹顶;破坏模式;失效机理
中图分类号: O346 **国标学科代码**: 1301540 **文献标志码**: A

近年来,对清洁能源的需求逐年激增,天然气(liquefied natural gas, LNG)由于绿色环保、经济实惠、安全可靠等优点逐渐成为 21 世纪最重要的能源,LNG 储罐结构也得到更多的应用。由于有针对性的恐怖袭击事件频发,鉴于 LNG 储罐结构的重要性与特殊性,储罐结构冲击失效及其次生爆炸灾害必将带来生命和财产的重大损失。因此,对该类结构提出合理的抗冲击性能评估以及冲击防御设计理论与方法,确保 LNG 储罐结构在重大灾害中的安全、减少灾后损失,具有重要的研究意义。

目前,针对核电站安全壳、大坝等大体积钢筋混凝土结构及网壳等大跨空间结构的抗冲击性能已经取得相对丰富的研究成果[1-6],而对大型 LNG 储罐混凝土外罐抗冲击性能的研究较少。张云峰等[7]运用 LS-DYNA 软件,模拟质量块撞击储罐的不同位置,分析 LNG 储罐外罐在冲击荷载作用下的动力性能和储罐的破坏情况。苏娟等[8]借助 ANSYS 有限元软件,考虑了储罐空罐和满罐两种工况,对冲击荷载作用下 LNG 混凝土储罐的动态响应进行分析,得到了储罐各控制点的内力时程曲线。崔利富等[9]基于 LS-DYNA 软件,对 160 000 m³ 的 LNG 储罐进行冲击模拟,结果表明:战斧巡航导弹冲击 LNG 储罐影响范围有限,仅产生局部破坏;预应力筋具有一定的阻抗冲击作用的能力。各类规范中,针对 LNG 储罐结构抗冲击的设计条款极少,仅英国标准 BS 7777-1[10]中提到,储罐应具有抵抗飞行物冲击的能力,并给出了推荐的冲击参数:质量 50 kg 的刚体以 45 m/s 的速度进行撞击。由此可见,针对 LNG 储罐抗冲击性能的研究主要集中在冲击后储罐结构的动力响应及破坏特点,而冲击荷载作用下 LNG 储罐混凝土外罐的失效模式及失效机理研究较少。

本文中,基于全容式 160 000 m³ 的 LNG 储罐,应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立 LNG 储罐混凝土外罐精细化有限元数值模型,通过模拟分析冲击物撞击下 LNG 储罐穹顶结构的动力响应及其规律,提出混凝土穹顶的失效模式,并根据冲击过程中能量的传递特点揭示其失效机理。最后,研究不同冲击物直径、冲击位置、冲击角度(冲击物速度方向与被冲击面法线的夹角)对混凝土穹顶最大响应及失效模式的影响规律。

* **收稿日期**: 2017-03-23; **修回日期**: 2017-05-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51378151)
第一作者: 翟希梅(1971—),女,教授,博士生导师,xmzhai@hit.edu.cn。

1　冲击模拟方法验证

为验证本文中有限元建模及分析方法和混凝土本构模型的适用性，对文献[11]中弹丸冲击混凝土靶板实验进行数值模拟。弹丸质量 588～597 g，弹长 150 mm。靶板分素混凝土和钢筋混凝土两种：素混凝土靶板为圆形，直径为 1 200 mm，由豆石（粒径小于 10 mm）、水泥砂浆浇注；钢筋混凝土靶板的钢筋采用冷拔低碳钢丝，直径 4 mm，间距 40 mm，抗拉强度平均值为 706.2 MPa，弹性模量为 205 GPa。实验中测量了弹丸到达靶板时的入射速度以及穿出靶板后的残余速度。运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对弹丸冲击靶板进行数值模拟。混凝土靶板及子弹均采用实体单元 Solid 164 模拟，钢筋采用杆单元 Link 160 模拟，钢筋与混凝土之间连接采用约束方程法实现。计算中假定：(1)冲击物是刚性体；(2)冲击作用下只考虑动能和应变能的变化，不计热能的损失；(3)冲击过程中忽略摩擦作用。有限元模型如图 1 所示。

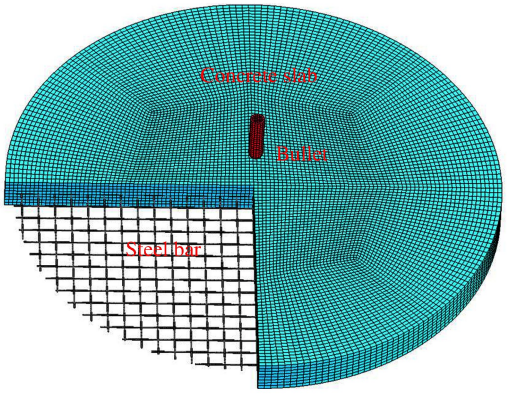


图 1　弹丸靶板有限元模型

Fig. 1　FE model

钢筋材料选用随动塑性强化模型[12]，材料参数分别为[12]：$\rho=7\ 950\ \mathrm{kg/m^3}$，$E=205\ \mathrm{GPa}$，$r_P=0.28$，$Y_{sig}=706.2\ \mathrm{MPa}$，$E_{tan}=500\ \mathrm{MPa}$，$\beta=0$，$S_{RC}=0$，$S_{RP}=0$，$\varepsilon_f=0.25$。混凝土材料模型初步确定 HJC (Johnson-Holmoguist concrete)[12] 和 CSCM 两种形式，本文中通过对比，希望从中选择最佳的本构模型用于 LNG 储罐有限元冲击数值分析。HJC 模型是常用的混凝土模型，虽然能够描述混凝土在大应变、高应变速率和高压下材料的动态响应，但对混凝土材性指标参数要求繁琐；HJC 模型参数分别为[12]：$\rho=2\ 500\ \mathrm{kg/m^3}$，$G=14.86\ \mathrm{GPa}$，$A=0.79$，$B=1.60$，$C=0.007$，$S_{f,max}=7$，$\varepsilon_{f,min}=0.01$，$N=0.61$，$T=4\ \mathrm{MPa}$，$D_1=0.04$，$D_2=1.0$，$K_1=85\ \mathrm{GPa}$，$K_2=-171\ \mathrm{GPa}$，$K_3=208\ \mathrm{GPa}$。而 CSCM 模型用来模拟道路两边钢筋混凝土防护结构与车辆碰撞的动态性能[13]，由于所需要输入的参数较少，仅获得混凝土的强度、骨料粒径等参数即可，因此应用相对便利；CSCM 模型参数分别为[12]：$\rho=2\ 500\ \mathrm{kg/m^3}$，INCRE 为 0，IRATE 为 1，ERODE 为 1.1，RECOV 为 10，PRED 为 0.4。

通过对文献[11]中 12 种工况进行数值模拟，得到贯穿靶板后子弹的残余速度，图 2 是子弹贯穿后混凝土靶板破坏的实验及模拟结果。当子弹与靶板接触时，击中点附近混凝土单元瞬间失效删除，同时靶板内产生与子弹速度方向相同的球面应力波，当应力波到达靶板背面时形成反射拉伸波，靶板背面混凝土单元产生拉伸破坏，单元被删除。随后子弹继续贯穿靶板，最终混凝土靶板被击穿，击穿孔洞直径大于子弹直径，整个孔洞呈漏斗状。通过比较可得，数值模拟所得到的靶板破坏结果与实验现象基本一致。实验结果与有限元模拟得到的子弹残余速度对比见表 1，通过对比两种材料模型的误差，CSCM 模型精确度更高，因此我们将采用该模型进行模拟。

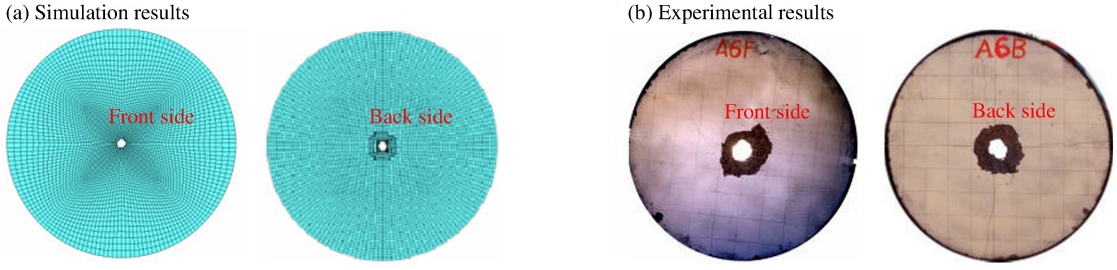


图 2　靶板破坏现象

Fig. 2　Impact perforation

表 1 实验与有限元模拟结果对比

Table 1 Comparison of simulation results and experimental results

类别	试件	v_i/(m·s^{-1})	$v_{r,exp}$/(m·s^{-1})	$v_{r,CSCM}$/(m·s^{-1})	$v_{r,HJC}$/(m·s^{-1})	$v_{r,CSCM}/v_{r,exp}$	$v_{r,HJC}/v_{r,exp}$
素混凝土	A1	218	166	160	148	0.964	0.892
	A2	250	199	197	191	0.990	0.960
	A3	376	280	277	323	0.989	1.154
	A4	620	529	540	553	1.021	1.045
	B1	501	301	332	326	1.103	1.083
	B2	753	554	551	566	0.995	1.022
钢筋混凝土	C1	193	131	120	96	0.916	0.732
	C2	268	195	195	191	1.000	0.979
	C3	361	300	290	283	0.967	0.943
	C4	608	528	512	519	0.958	0.982
	C5	812	701	704	735	1.004	1.049
	C6	1 246	1 111	1 170	1 220	1.053	1.098

2 LNG 储罐工程概况及有限元模型

160 000m^{3}大型全容式 LNG 储罐，由预应力混凝土外罐和 9%镍钢内罐两部分组成。外罐由混凝土圆柱壳、球面穹顶、底板和桩基构成，各部分参数如下：混凝土外罐内直径为 82 m，高度为 38.55 m，壁厚为 0.8 m，扶壁柱截面尺寸为 4.22 m×1.40 m，环梁截面尺寸为 1.05 m×1.56 m，穹顶的曲率半径为 82 m，矢高为 10.975 m。穹顶中心处混凝土厚度为 0.6 m，边缘处厚度为 0.8 m。底板的厚度为 0.9 m，直径为 88 m，采用桩基础。混凝土等级为 C50，剖面图如图 3 所示。

运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件，建立 LNG 储罐混凝土外罐的计算模型，混凝土外罐及冲击物均采用 Solid 164 实体单元。其中冲击物为圆柱体，高度为 4 m，直径为 1 m，材料模型采用刚性体模型。混凝土采用 CSCM 模型，通过侵蚀失效准则来模拟混凝土单元的失效，当混凝土的有效塑性应变达到 0.1 时，单元在后续的有限元计算中即被删除。混凝土与冲击物之间采用面面侵蚀接触(ES-TS)，在侵蚀接触下，若模型受冲击部分的单元失效则该单元被删除，但剩余部分的单元仍能继续考虑接触。LNG 储罐混凝土外罐有限元模型，如图 4 所示。为了提高计算效率，节约时间，通过试算，将穹顶动力响应相对较大的区域定义为冲击区，在冲击区域局部进行加密，加密区与非加密区交界处采用点面固连接触，将加密区边界节点约束、限定在非加密区的主面上，从而实现两者的连接。另外，本文中主要针对穹顶大体积混凝土结构抗冲击性能及其破坏机理，因此建模时忽略穹顶内部钢衬板在冲击过程中的有利作用，涉及相关带钢衬板穹顶的 LNG 储罐的冲击响应分析将是我们的后续研究方向。

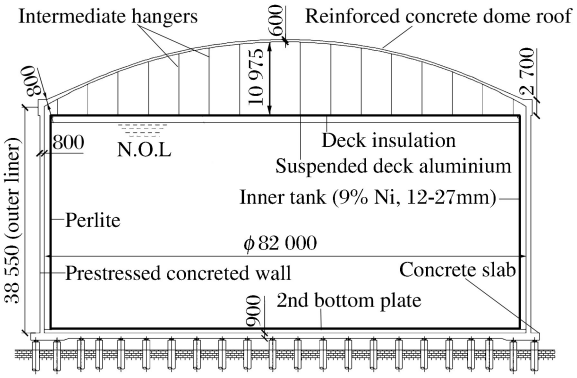


图 3 LNG 储罐剖面图

Fig. 3 Profile map of LNG tank

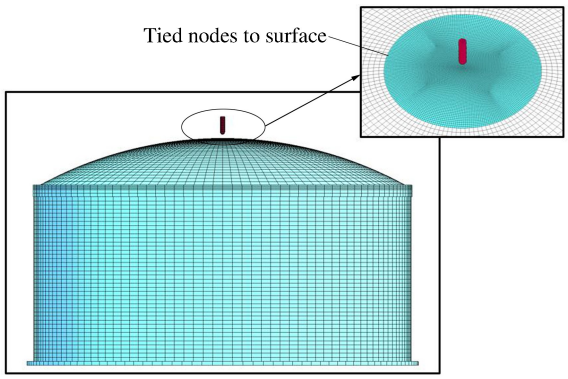


图 4 LNG 储罐有限元模型

Fig. 4 FE model of LNG outer tank

3　LNG 储罐外罐穹顶结构失效模式

以冲击 LNG 储罐混凝土外罐穹顶为例，通过改变冲击物的直径（D=1，4 m）、冲击角度（0°、45°）、冲击位置见图 5 中 A、B 两点，A、B 水平距离为 20.5 m，进行大规模参数分析，得到穹顶结构在冲击荷载作用下的失效模式。

储罐与冲击物的有限元模型如上所述，保持冲击物形状不变，改变冲击物的质量和初始冲击速度对储罐穹顶进行冲击。通过试算，选取最小的冲击荷载和冲击速度为 250 kg 和 10 m/s，当冲击荷载继续减小时储罐结构产生的动力响应不再明显，没有研究价值。最大的冲击荷载和冲击速度取为 10 t 和 200 m/s，在此基础上，即使继续增大冲击质量或速度，储罐结构的失效模式也不会改变。冲击物质量分别取为 0.25、0.5、1、5、10 t，冲击速度分别取为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、150、200 m/s。

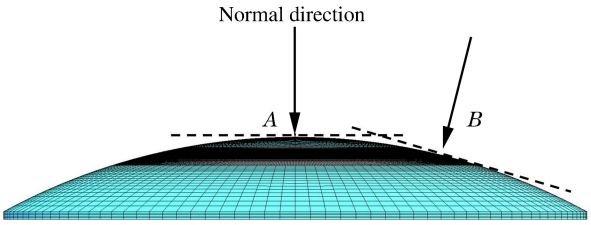


图 5　冲击位置示意图

Fig. 5　Locations A and B at dome

通过对上述 240 种工况进行模拟分析，得到冲击荷载作用下 LNG 储罐混凝土外罐穹顶结构的失效模式主要有 3 种，分别为局部凹陷、混凝土剥落、击穿破坏。

当冲击物初始能量较小时，穹顶在冲击位置处产生凹陷和裂纹，与冲击物直接接触区域的单元进入塑性，但并未有单元失效破坏，储罐仍处于安全状态，将这种失效模式称为局部凹陷。

在穹顶发生局部凹陷的失效模式之后，继续增加冲击物的初始能量，在更大的冲击能量作用下，穹顶内侧混凝土先出现剥落现象，未剥落的混凝土伴随有一定程度的凹陷，但穹顶并未被穿透，对 LNG 内部钢罐仍具有一定的保护作用，将这种失效模式称为混凝土剥落。

当初始冲击能量继续增大，继混凝土发生剥落破坏之后，穹顶中心混凝土被击穿，与冲击物直接接触的单元全部失效破坏，混凝土外罐发生损坏，不再对内罐起到保护作用，将这种失效模式称为混凝土击穿破坏。

根据各工况穹顶的破坏情况绘制出 3 种失效模式的分布，如图 6 所示。

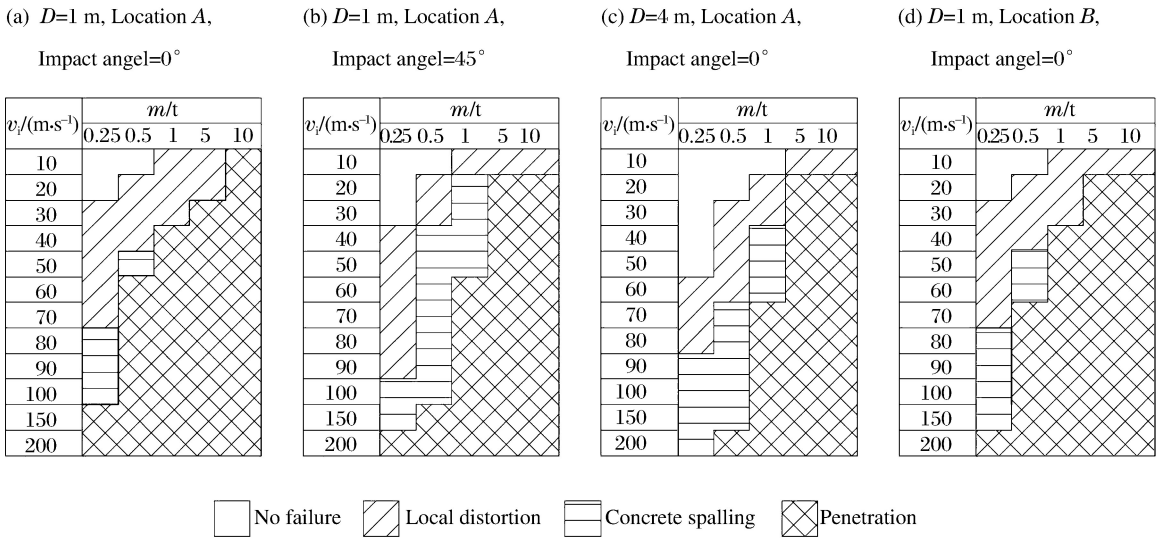


图 6　失效模式分布图

Fig. 6　Distribution of failure modes

4 LNG 储罐外罐穹顶结构失效规律

4.1 冲击角度对失效模式的影响

在冲击过程中,冲击物的冲击方向是不确定的,因此需要考虑冲击角度对储罐穹顶结构的影响。为研究冲击角度对 LNG 储罐失效模式的影响规律,选择 0°、45°两种角度对 LNG 储罐穹顶中心位置进行冲击模拟。

通过分析失效模式分布(见图 6(a)~(b))可知,冲击角度对失效模式的影响不可忽略。冲击物以 45°冲击时击穿破坏所占的面积小于 0°冲击时所占面积,并且达到每一种失效模式所需初始能量均上升,这表明当冲击角度较大时,在初始冲击能量相同的情况下,LNG 储罐结构破坏程度更轻。这也同样说明,冲击角度较大时需要更多的能量才能使储罐产生严重的破坏,因此最不利冲击角度为 0°。

以 0°、45°两种冲击角度下的两个典型算例(m=1.0 t,v=50 m/s)分析冲击角度对破坏模式的影响规律,并从冲击荷载、冲击物速度、储罐应变能 3 个角度揭示其原因。

(1)图 7 为两种工况下冲击力曲线。当冲击角度为 45°时,冲击物与穹顶有 2 次撞击过程,当冲击物顶部与穹顶接触碰撞之后,冲击力在冲击瞬间达到峰值 12.8 MN,持续 7ms 后下降为零。冲击物与穹顶碰撞后速度方向发生改变,绕长度方向发生旋转,冲击物尾部与穹顶再次发生碰撞,冲击力第 2 次达到峰值 27.8 MN,持续 4 ms 后下降为零。当冲击角度为 0°时,冲击力在冲击瞬间达到峰值 22.8 MN 后不断衰减,0.06 s 后整个冲击过程结束。2 次碰撞的冲击力峰值虽然相近,但由于 45°冲击时冲击力持续时间过短,穹顶结构变形并不完全,因此仅发生混凝土剥落,并未发生穿透现象。

(2)图 8 为两种工况下冲击物的速度曲线。当冲击物以 45°冲击穹顶时,在第 1 次碰撞后冲击物速度由 50 m/s 下降为 34.8 m/s,当冲击物尾部 2 次撞击后速度短暂下降为 31.5 m/s,后逐渐恢复为 34.8 m/s 后保持稳定。而 0°撞击时,速度瞬间下降为 1.56 m/s,可见 45°冲击后冲击物仍剩余大量动能,能量并未完全传递给穹顶,转化为穹顶的应变能。而当冲击物以 0°冲击穹顶时,冲击物将绝大部分动能传递给穹顶,穹顶吸收和转化的能量远大于 45°的,因此冲击角度为 0°时穹顶破坏更严重,混凝土被击穿。

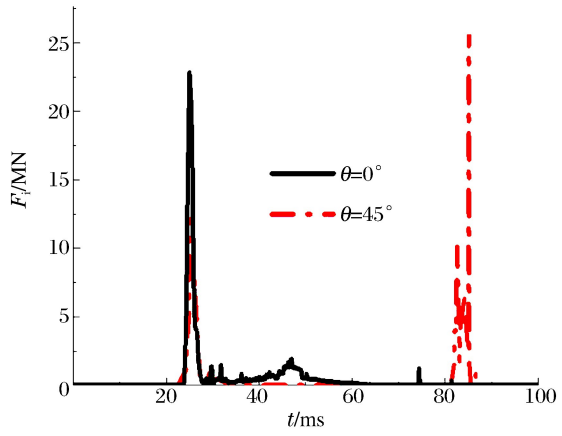


图 7 冲击力

Fig. 7 Impact force

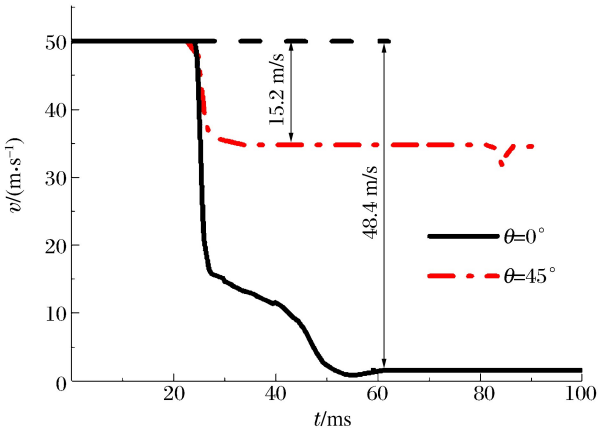


图 8 冲击物速度

Fig. 8 Velocity of impactor

(3)从能量的角度也可以解释发生两种不同失效模式的原因。图 9(a)为 45°冲击时穹顶应变能曲线,穹顶应变能有 2 次跃升,分别对应冲击物首尾 2 次撞击穹顶。第 1 次撞击后穹顶破坏较小,应变能损失较少,仅为 40.4 kJ,而第 2 次碰撞损失能量为 150 kJ,由此可见第 2 次碰撞后穹顶结构损坏更严重。冲击角度为 0°的工况下穹顶应变能曲线如图 9(b)所示,在冲击瞬间穹顶应变能迅速增加,达到峰值 552 kJ,之后随着穹顶混凝土破坏程度加深,失效的混凝土单元带走大部分能量,最终穹顶应变能保持在较低水平。

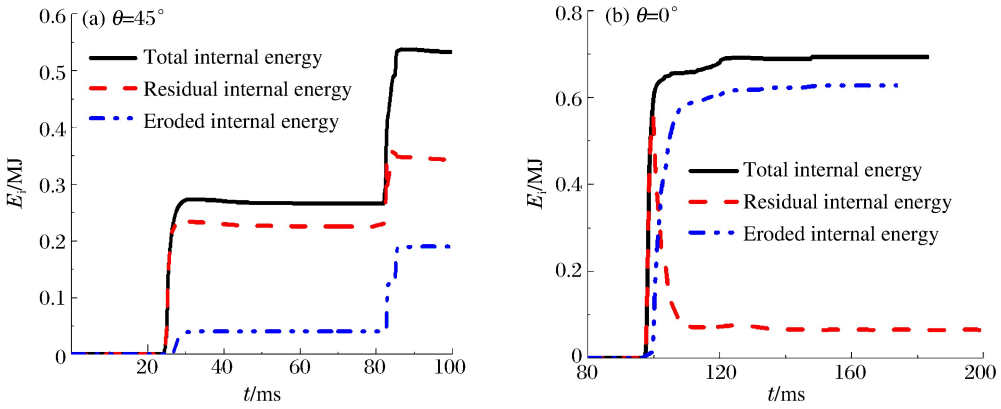


图 9　穹顶应变能

Fig. 9　Internal energy of dome

通过以上研究分析可以得到，当冲击物以不同冲击角度冲击 LNG 储罐穹顶时，储罐的失效模式随冲击角度的改变而变化明显，冲击角度为 0°时储罐结构失效模式最为严重。其原因主要是，由于冲击角度减小时冲击物撞击穹顶后反弹程度降低，这就使得冲击物自身动能下降更多，从而对储罐穹顶做功更多，因此穹顶的破坏就更加严重。但是当冲击角度增大时，冲击物撞击穹顶后冲击速度方向发生改变，可能会对穹顶发生 2 次碰撞，这也会对穹顶造成一定程度的损伤，这部分的损伤也较大，不可忽略。

4.2　冲击物尺寸对失效模式的影响

为研究冲击物尺寸对 LNG 储罐失效模式的影响，采用直径为 1、4 m，高度均为 4 m 的两种圆柱体冲击物竖直向下冲击穹顶中心。通过分析失效模式分布（见图 6(a)、(c)）可得，当冲击物直径增大时，未破坏和局部凹陷这两种破坏程度轻微的失效模式所占据的面积扩大，而击穿破坏的范围缩小很多，取而代之的是混凝土剥落的失效模式。总体来说，当初始冲击能量相同时，随着冲击物直径的增大，储罐的破坏程度降低。但是增大冲击物直径时，冲击区范围增大，穹顶结构的动力响应有一定程度的增加。

以直径为 1、4 m 两种冲击物的两个典型算例（m=1.0 t，v=50 m/s）分析冲击物直径对破坏模式的影响规律，图 10 为节点位置示意图。

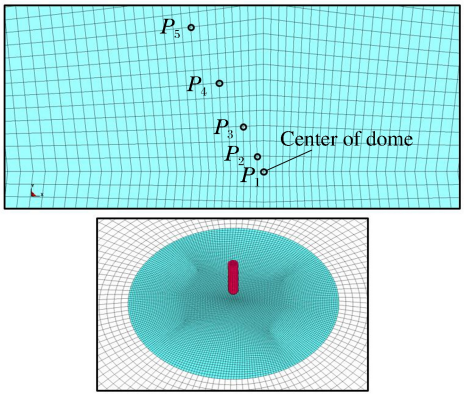


图 10　节点位置示意图

Fig. 10　Designation of points

图 11 为两种工况的位移曲线，由图可见，两组曲线差异较大。当 D=1 m 时，在发生碰撞后点 1 位移在短时间内达到峰值 0.12 m 后单元失效，位移时程曲线中断。由于失效单元带走了大部分能量，并且碰撞持续时间太短，单元删除前能量传递尚未完成，因此除点 1 外其余各点最终位移均较小。当 D=4 m 时，点 1 位移峰值为 0.077 m，达到峰值后混凝土一部分变形发生恢复，最终位移稳定在 0.058 m，点 2 最终位移稳定在 0.03 m，其余 3 点最终位移稳定在 0.01 m。由此可见，在冲击物的质量和初始速度相同的情况下，当冲击物直径较大时，穹顶破坏程度减轻，但受冲击影响的范围增大。

穹顶应变能变化曲线可以更直观地反映，整个冲击过程穹顶的变形发展与单元的失效过程。当 D=1 m 时，穹顶应变能曲线如图 12(a)所示，冲击开始时总应变能曲线与未破坏单元应变能曲线保持重合，达到峰值 552 kJ 后两条曲线逐渐分离，失效破坏的混凝土单元带走能量 628 kJ，剩余单元应变能急剧下降至 64.7 kJ。当 D=4 m 时，穹顶应变能曲线如图 12(b)所示，在冲击瞬间穹顶应变能迅速增加，达到峰值后随着混凝土发生回弹及部分混凝土失效，应变能有略微下降，最终应变能保持在 521 kJ，穹顶内侧破坏的混凝土单元带走能量 182 kJ。通过比较两种工况下应变能曲线，可以很明显看出，冲击结束后 D=1 m 工况穹顶残余变形较小，破坏的混凝土单元更多，穹顶破坏更严重。

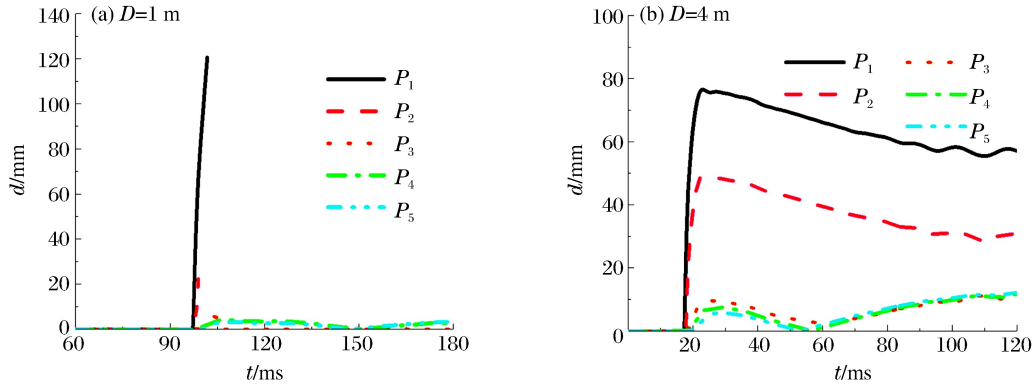


图 11 节点位移

Fig. 11 Displacement of point

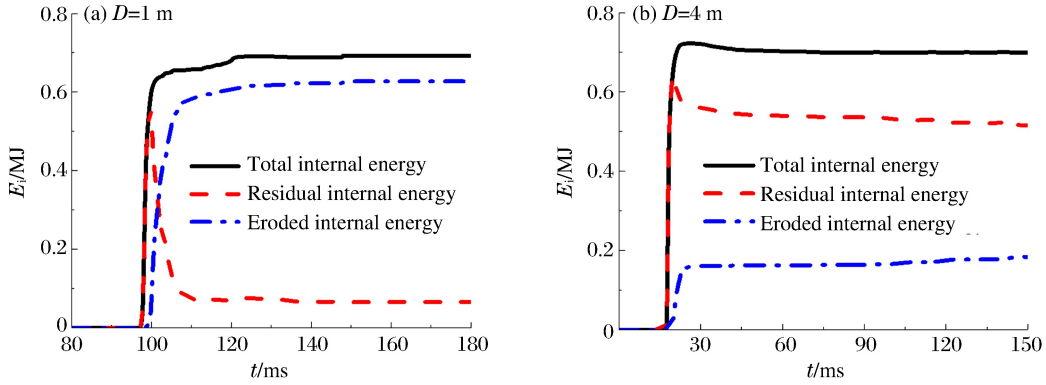


图 12 穹顶应变能

Fig. 12 Internal energy of dome

由此可得,在冲击物的质量和初始速度相同的情况下,减小冲击物的直径会使得储罐的动力响应更大。但是一旦储罐发生破坏,由于与储罐直接接触的面积增大,冲击物传递到储罐结构的能量更多,大直径的冲击物反而会对储罐造成更严重的破坏。

4.3 冲击位置对失效模式的影响

除冲击物直径、冲击角度,由于穹顶混凝土厚度不均,因此冲击位置对失效模式的影响同样值得关注。为研究冲击位置对 LNG 储罐失效模式的影响,选择穹顶上 A、B 两处进行冲击,冲击角度均为 0°。A、B 两点位置如图 5 所示。通过分析失效模式分布(见图 6(a)、(d))可得,两种工况下失效模式的分布较为相似,结构无破坏和局部凹陷两种轻微失效模式的分布范围相同,当冲击物冲击 B 点时,击穿破坏所占据的面积略有减小。这说明,改变冲击物冲击穹顶的位置对穹顶破坏模式的影响较小,但是由于穹顶混凝土厚度不均,中央位置处混凝土厚度最小,因此冲击此处时破坏程度略有加重,发生击穿破坏的可能性更大,由此可知穹顶中央位置为冲击的最不利位置。

以两个不同冲击位置的典型算例(m=1.0 t,v=50 m/s)来分析冲击位置对破坏模式的影响规律。

从能量角度对比分析两种工况下穹顶的动力响应。当冲击穹顶中心时,穹顶应变能如图 13(a)所示,未破坏单元应变能峰值为 552 kJ,后下降至 64.7 kJ 保持稳定,破坏失效单元损失能量为 628 kJ,整个过程中冲击物传递给穹顶的总应变能为 692 kJ。当冲击 B 点时,穹顶应变能曲线如图 13(b)所示,两组曲线变化趋势近乎相同,仅在数值大小上略有差异。通过对两种工况下应变能大小的比较可以看出,冲击 A 点时冲击物传递到穹顶的应变能相对比冲击 B 点较小,破坏损失的能量也较少。其原因主要是,由于穹顶的混凝土厚度不均,穹顶中心处混凝土厚度最小为 0.6 m,而穹顶边缘处混凝土厚度达到 0.8 m,因此冲击穹顶不同位置时虽然穹顶的失效模式相同,但是冲击过程中穹顶所吸收的能量大小及动力响应存在一定差异。

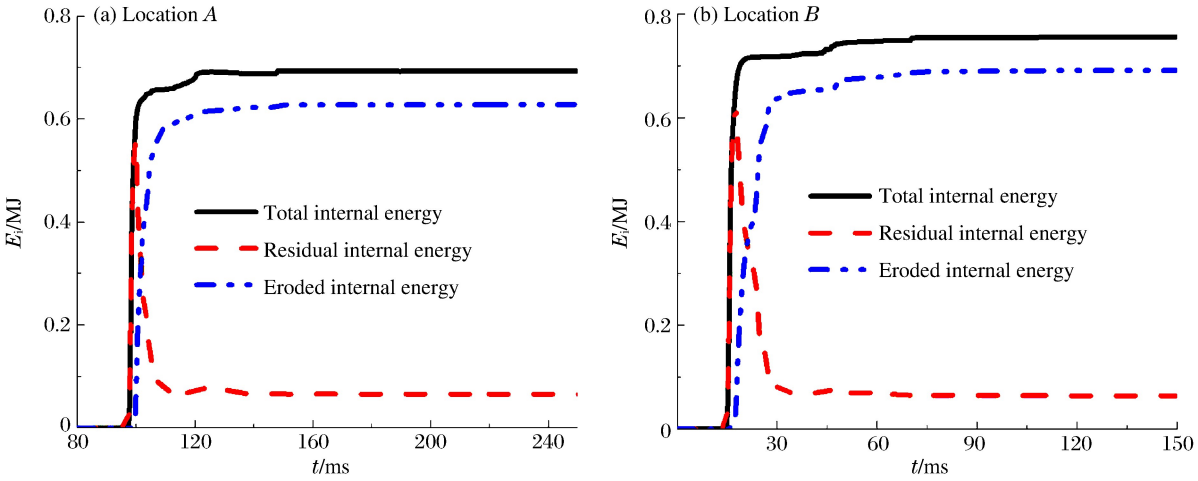


图 13　穹顶应变能

Fig. 13　Internal energy of dome

通过对两种工况的分析可得，当冲击物沿穹顶法线的方向冲击时，冲击位置对穹顶失效模式的影响不大，冲击作用下穹顶的动力响应略有不同，但各个响应的变化趋势以及最终状态差别较小，可以忽略。

5　冲击失效机理

从能量的角度来研究一下储罐的失效机理。以能量为研究对象，产生 3 种不同失效模式的原因主要是：由于冲击物的初始能量不同，初始能量较小时，储罐结构在冲击物作用下产生局部凹陷，随着冲击能量的增加，逐渐出现混凝土剥落及冲切破坏的失效模式。从能量的角度出发，整个冲击过程总共可分为 3 个阶段：冲量施加，能量传递，能量转换与消耗。这 3 个过程并没有严格的界限区分，冲量施加的过程中能量传递也同时在进行，能量传递过程也伴随着转化和消耗，但是其中一个过程起主导作用。以下将通过具体的情况来说明各种失效模式的失效机理。

5.1　局部凹陷失效机理

以局部凹陷(m=1.0 t，v=25 m/s)为例，具体分析局部凹陷的失效机理。将冲击力达到峰值定义为关键时刻 t_1、冲击物与储罐分离定义为关键时刻 t_2。由图 14 可见，冲击力曲线被上述两个关键时刻划分为 3 部分，分别对应 3 个阶段。整个冲击过程中 LNG 储罐混凝土外罐各部分应变能随时间变化曲线，如图 15 所示。

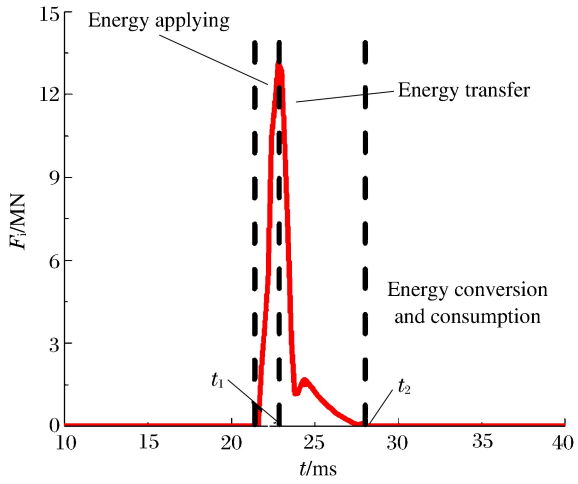


图 14　局部凹陷全过程划分示意图

Fig. 14　Partition of failure process for local distortion

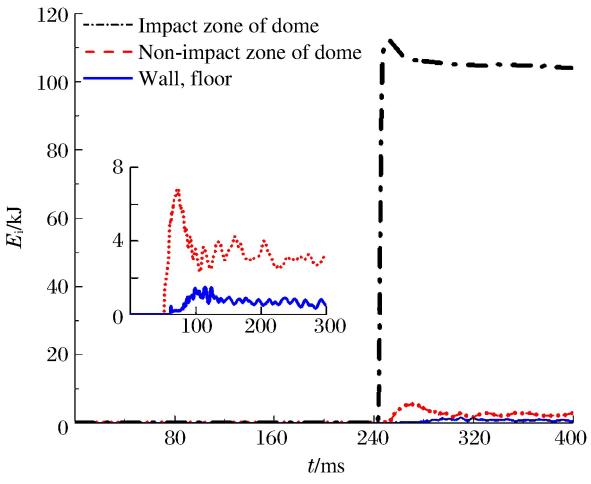


图 15　穹顶应变能

Fig. 15　Internal energy of dome

冲量施加阶段指的是冲击物与穹顶接触碰撞的阶段，在此阶段中，冲击物将自身动能施加给穹顶，穹顶与冲击物直接接触的区域获得了较大的能量，产生了局部凹陷，由于冲击持续时间极短，非冲击区的动力响应并不明显。能量的传递阶段指的是冲击区将得到的能量向非冲击区域传递的阶段，在这个过程中，冲击物与储罐穹顶不再接触，应力呈环状由穹顶中心向外传播，非冲击区得到能量后动力响应增大，但是由于冲击物初始能量较小，能量传递的范围也较小，非冲击区产生的变形有限。

能量的转换与消耗阶段指的是冲击物与穹顶分离后的阶段，在此阶段中，由于反弹作用冲击物逐渐飞离穹顶，穹顶冲击区域节点的速度减小至零后反向增加，节点位移略有减小，穹顶恢复一部分变形。随着时间发展，冲击区混凝土单元的振动逐渐停止，穹顶结构的动能完全消失，应变能稳定不变，整个冲击过程结束。

5.2 混凝土剥落与击穿破坏失效机理

图 16～17 为混凝土剥落(m=0.25 t，v=100 m/s)、击穿破坏(m=1.0 t，v=100 m/s)两种失效模式典型算例所对应的冲击全过程划分示意图及穹顶应变能变化曲线。通过两组曲线可以看出，尽管两种失效模式下结构破坏过程不同，但两者能量曲线的变化趋势相近，因此将两种失效模式作对照共同分析其失效机理。

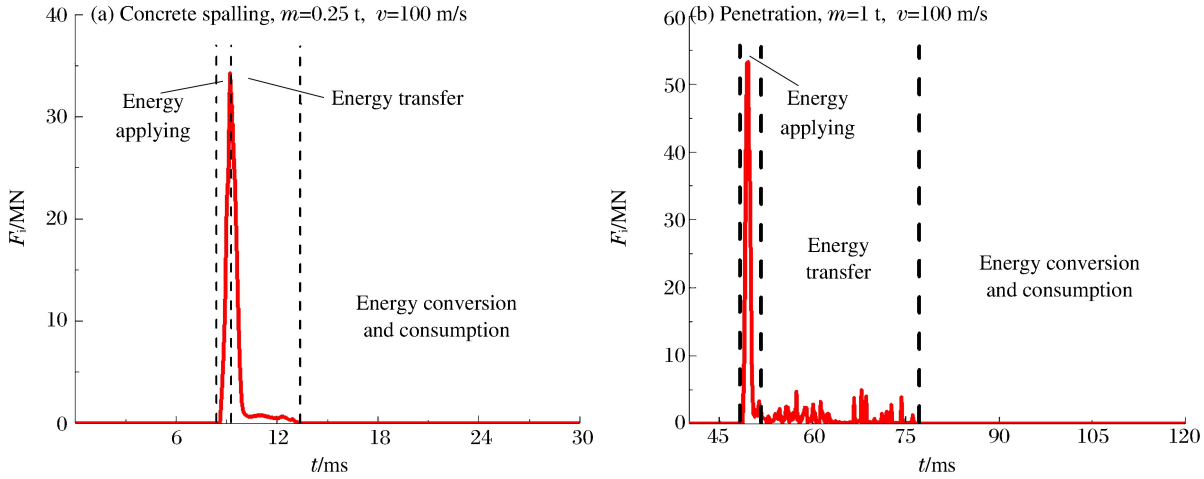


图 16 冲击全过程划分示意图

Fig. 16 Partitions of failure process for impact

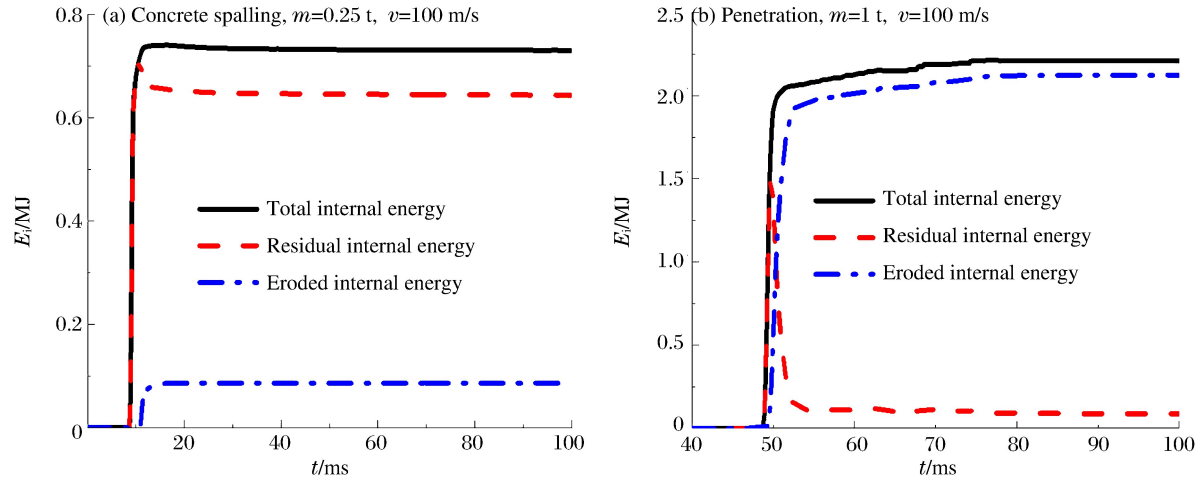


图 17 穹顶应变能

Fig. 17 Internal energy of dome

通过两组曲线可以看出，冲击力在撞击瞬间达到峰值后迅速下降，从冲击物与穹顶接触开始到冲击力急剧下降结束，整个过程为冲量施加阶段。在此阶段中，冲击物将能量传递到穹顶，穹顶吸收足够的能量后混凝土发生破坏，被冲击物击穿。由于混凝土破坏后带走了大部分能量，导致穹顶剩余部分动力响应相对较小。当出现混凝土剥落的失效模式时，穹顶内侧混凝土先破坏，其原因是：冲击物与穹顶接触后，应力波从撞击位置处向穹顶内侧传播，当应力波传播至穹顶内侧表面时形成反射拉伸波，由于采用了侵蚀失效准则中主应变失效方式来模拟混凝土单元的失效，当混凝土单元的主应变达到所设置的阀值(0.1)时，此单元即判定为失效并被删除，因此穹顶冲击区内侧混凝土因发生拉伸而首先破坏。与混凝土剥落模式中由于应力波传播而导致穹顶内部混凝土先破坏的情况不同，当发生击穿失效模式时，与冲击物直接接触部位的混凝土在撞击瞬间即发生冲切破坏，冲击物击穿穹顶进入储罐内部。

从冲击力在低水平范围内波动到混凝土单元失效剥落完成，为能量的传递阶段。在与穹顶持续接触的过程中，冲击物将剩余能量继续传递给穹顶，穹顶将获得的能量呈环形向外传递扩散，冲击区与非冲击区的应力与变形水平均上升。当冲击物击穿混凝土完全进入穹顶内部后，冲击力彻底下降为零，混凝土单元失效删除结束，穹顶剩余部分的能量不再减少。洞口附近混凝土由于惯性继续振动，动能与应变能相互转化，最终穹顶应变能曲线保持稳定，结构达到平衡状态。

6　结　论

运用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立大型全容式 LNG 储罐混凝土外罐精细化有限元模型，分析在圆柱体冲击物撞击下 LNG 储罐穹顶结构的动力响应，提出 3 种失效模式，并分析了对应的失效机理。考虑了不同冲击物直径、冲击位置、冲击角度对 LNG 储罐穹顶结构失效模式的影响规律，得出以下结论。

(1)通过分析冲击物撞击作用下 LNG 储罐混凝土外罐穹顶结构的动力响应以及破坏程度，获得局部凹陷、混凝土剥落、击穿破坏 3 种失效模式。

(2)冲击角度、冲击物直径对 LNG 储罐混凝土外罐穹顶的失效模式影响较大，0°为冲击的最不利冲击角度；随着冲击物直径增大，穹顶的破坏程度减小。

(3)冲击位置对储罐穹顶失效模式的影响较小，可以忽略。

(4)从能量角度出发，整个冲击过程可以分为冲量施加、能量传递、能量转换与消耗 3 个阶段，不同失效模式下各阶段的荷载作用特点与能量变化规律差异较大。

参考文献：

[1] IQBAL M A, RAI S, SADIQUE M R, et al. Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,243:321-335.

[2] SADIQUE M R, IQBAL M A, BHARGAVA P. Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,260:30-46.

[3] MOHAMMED R K, MICHELLE S H F. Impact of the Boeing 767 Aircraft into the World Trade Center[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,131:1066-1072.

[4] FAN F, WANG D Z, ZHI X D, et al. Failure modes of reticulated domes subjected to impact and the judgment [J]. Thin-Walled Structures, 2010,48(2):143-149.

[5] FAN F, WANG D Z, ZHI X D, et al. Failure modes for single-layer reticulated domes under impact loads[J]. Transactions of Tianjin University, 2008,14(suppl):545-550.

[6] WANG D Z, ZHI X D, FAN F, et al. Failure process and energy transmission for single-layer reticulated domes under impact loads[J]. Transactions of Tianjin University, 2008,14(suppl):551-557.

[7] 张云峰，张钊，薛景宏，等. LNG 储罐外罐壁在冲击荷载作用下的受力分析[J]. 大庆石油学院学报，2011,35(6):93-96.
ZHANG Yunfeng, ZHANG Zhao, XUE Jinghong, et al. Stress analysis of the outer wall of LNG storage tank under impact loading[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011,35(6):93-96.

[8] 苏娟,刘玉玺,荆潇,等.冲击荷载作用下 LNG 混凝土储罐力学性能分析[J].中国造船,2012,53(增刊 2):241-248.
SU Juan, LIU Yuxi, JING Xiao, et al. Mechanical analysis of LNG prestressed concrete tank for blast loading[J]. Shipbuilding of China, 2012,53(suppl 2):241-248.

[9] 崔利富,孙建刚,周国发,等.冲击荷载作用下 LNG 储罐外罐力学性能数值仿真分析[J].自然灾害学报,2016,25(4):167-175.
CUI Lifu, SUN Jiangang, ZHOU Guofa, et al. Numerical simulation analysis of LNG outer tank of mechanical properties under impact load[J]. Journal of Natural Disasters, 2016,25(4):167-175.

[10] BS 7777-1:1993 Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service[S].

[11] 董军,邓国强,杨科之,等.弹丸对混凝土薄板的冲击破坏效应[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):713-720.
DONG Jun, DENG Guoqiang, YANG Kezhi, et al. Damage effect of thin concrete slabs subjected to projectile impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(4):713-720.

[12] ANSYS/LS-DYNA 使用指南[Z].北京:安世亚太,1999:57-58.

[13] MURRAY Y D. Users manual for LS-DYNA concrete material model 159[Z]. Mc Lean, VA: Federal Highway Administration, 2007.

Damage modes and failure mechanism of concrete dome of LNG storage tank

ZHAI Ximei[1,2], ZHAO Xinyu[1,2]

(1. *Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *Heilongjiang, China*;
2. *Key Laboratory of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In order to investigate the damage modes and failure mechanism of the concrete dome of the liquefied natural gas (LNG) storage tank subjected to impact by a rigid circular cylinder, the finite element (FE) model of the outer concrete tank of the 160 000 m^3 LNG storage tank for an actual LNG project and a cylindrical impactor is established based on ANSYS/LS-DYNAFE analysis software platform. The accuracy of the numerical simulation method and the material model employed has been verified by simulating the impact perforation of reinforced concrete slabs subjected to projectile with high speed. The dynamic response of structures under impacting with variable speed, angle, location, and diameter are studied. Based on the dynamic response of the outer concrete tank of the LNG storage tank subjected to impact loading, three damage modes are defined and the failure mechanism of each mode is revealed from the point view of energy. The response characteristics and rules with the change of the impact parameters are obtained. The results show that the impact angle and the diameter of the impactor affect significantly on the failure modes of dome, and the impact position at the dome has a negligible effect on the failure modes.

Keywords: LNG storage tank; concrete dome; damage mode; failure mechanism

(责任编辑 丁 峰)