

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.007

某型装备特种底盘储气罐安全性能分析

汪育, 谷满意, 刘明, 宁兴兴, 李健健

(中国人民解放军 63981 部队, 武汉 430311)

摘要: 针对某型装备特种底盘储气罐在高压、高温、高湿、常振和腐蚀等恶劣环境下的安全性能问题, 对某型装备特种底盘储气罐安全性能进行分析。通过把储气罐排气阀的崩裂冲击问题转化为压力容器爆炸破片冲击问题进行等效分析、计算, 获得了可能出现安全危险的有关数据与损伤模式, 进而提出安全使用与维护措施建议。分析结果表明: 超压情况下的排气阀崩裂冲击对人体及车内非金属类部件具有一定的杀伤破坏效能。该研究为装备的安全使用与维护提供了科学依据, 具有较好的参考价值。

关键词: 储气罐; 安全性能; 等效分析; 破片毁伤; 安全防范

中图分类号: TJ01 **文献标志码:** A

Analysis on the Safety Performance of Special Chassis Gas Storage Tank for a Certain Type of Equipment

Wang Yu, Gu Manyi, Liu Ming, Ning Xingxing, Li Jianjian

(No. 63981 Unit of PLA, Wuhan 430311, China)

Abstract: The safety performance of a special chassis gas storage tank for a certain type of equipment is analyzed in view of the safety performance under the harsh environment of high pressure, high temperature, high humidity, constant vibration and corrosion. Through the equivalent analysis and calculation of the avulsion impact problem of the gas tank exhaust valve into the explosion fragment impact problem of the pressure vessel, the relevant data and damage mode of possible safety hazards are obtained, and then the recommendations of safety use and maintenance measures are put forward. The results show that the shock of avulsion of the exhaust valve in the case of overpressure has a certain killing and destruction effect on the human body and non-metal parts inside the vehicle. The study provides a scientific basis for the safe use and maintenance of equipment and has a good reference value.

Keywords: air tanks; safety performance; equivalent analysis; broken piece of damage; safety

0 引言

特种底盘气动系统主要是为车辆制动系统、中央充放气系统、波导充气系统提供干净、稳定的使用或控制气源。其工作状态不仅影响装备机动性能的稳定性和安全性, 更影响了装备作战时的雷达搜索精度; 然而, 装备在部队的日常训练和演习中却常常处于高压、高温、高湿、连续振动和长时间工作等恶劣环境和工况下, 从而造成气动阀件的卡滞、锈蚀、失效甚至爆裂。

气动系统储气罐中的排气阀主要用作系统安全阀和排水, 该阀体长期在水中浸泡加上储气罐内锈蚀, 极易因金属屑的堆积和锈蚀而堵塞, 在空压机作用下, 排气阀堵塞后, 储气罐内压力逐渐升高直至系统用气或排气阀失效崩裂。失效破裂的排气阀将会在高压气体的作用下高速飞出, 对操作人员及车内设备造成严重损害; 因此, 需通过理论分析, 对车内储气罐安全性能进行综合分析和评估。

1 特种底盘气动系统储气罐结构分析

特种底盘气动系统部分结构原理见图 1。气体由空压机提供, 通过管路到达空气干燥器, 压缩气体经空气干燥器处理后输出清洁气体到达气路四回路保护阀, 压缩气体经四回路从 4 个出口向装备储气罐及其他辅助气路供气。储气罐主要参数为: 1) 最大超压: 1.2 MPa; 2) 储气罐尺寸: 600 m×300 m, 容积 0.17 m³; 3) 钢板厚度 2 mm, 最大质量为 25 kg。

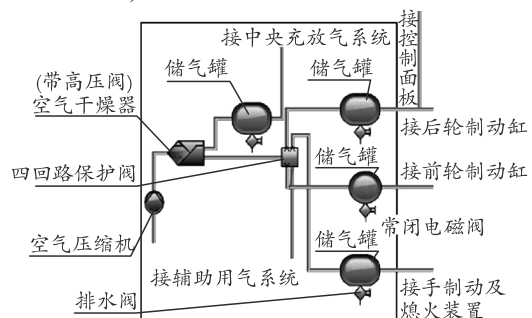


图 1 装备储气罐原理

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-22

作者简介: 汪育(1987—), 男, 广东人, 硕士, 工程师, 从事装备保障和复合材料加工研究。

2 储气罐超压数值等效分析

当充满气体的压力容器发生爆炸时，会在周围的空气中产生冲击波。此冲击波从容器表面向四周传播，以压缩波的形式作用在周围的物体上，使周围承受冲击波荷载作用，从而引起设备破坏或人员伤害。该压力容器爆炸时可能产生一定数量的抛掷物，抛掷物速度通常比炸药爆轰形成的破片速度低很多，对于人体或易损设备仍具有一定危险性。为研究装备储气罐排气阀崩裂冲击的安全问题，笔者采用数值模拟等效计算方法对储气罐安全性进行分析^[1]。

封闭容器爆炸产生的超压冲击对距离的关系，与封闭容器内空气的环境温度、压力以及比热容都有强烈的依赖关系。对于封闭容器外的周围气体来讲，容器内气体爆炸可视为高压高温；因此，封闭容器气体爆炸的超压可等效为炸药爆炸产生的冲击波超压。

2.1 封闭容器气体爆炸初始冲击波超压计算

理想球状气体发生“膨胀爆炸”，气体冲击波波阵面上的最大压力就是球状内部气体与周围气体之间相接处最大的超压值。由于流动气体的运动是 1 维的；因此，可用激波管模型的爆炸后压力比和冲击压力的关系式，计算出时间 $t=+0$ 时的空气冲击波压力。Liepman 和 Roshko 提出如下关系式：

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{p_{so}}{p_0} \left[1 - \frac{(\gamma_1 - 1) \left(\frac{a_0}{a_1} \right) \left(\frac{p_{so}}{p_0} - 1 \right)}{\sqrt{(2\gamma_0) \left[2\gamma_0 + (\gamma_0 + 1) \left(\frac{p_{so}}{p_0} - 1 \right) \right]}} \right]^{\frac{-2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \quad (1)$$

式中： p_0 和 p_1 分别为大气压力和容器里气体压力； p_{so} 为爆炸瞬间产生的空气冲击波压力； a_0 和 a_1 分别为大气中声速和容器内气体声速； γ_0 和 γ_1 分别为大气中比热容和容器内气体比热容。

由于储气罐中的压缩空气无明显变化，因此可以假定：

$$\gamma_0 = \gamma_1 = 1.4; \quad (2)$$

$$\frac{a_0}{a_1} = 1. \quad (3)$$

另外，由特种底盘储气罐计算初始条件可得：

$$p_1 = 12 \times 10^5 \text{ Pa}. \quad (4)$$

将式(2)–(4)代入式(1)可得：

$$p_{so} = 2.35 p_0. \quad (5)$$

所以： $p_{so} = 2.37 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

因此可得，装备储气罐爆炸而产生的气体冲击波的初始峰值超压约 $1.36 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

2.2 等效 TNT 药量计算

根据冲击波爆炸输出理论，作为低能量密度、低功率的压力容器爆炸冲击爆源，压力容器爆炸可等效为相应的 TNT 药量，而相等距离上造成同样破坏程度所需的 TNT 药量为等效药量。根据装备储气罐计算初始条件，储气罐外形近为长度和直径分别为 600、300 mm 的圆柱形，并以距爆心 0.15 m 远处的冲击波超压峰值 $1.36 \times 10^5 \text{ Pa}$ 作为 TNT 等效药量计算的等效条件。

根据气体冲击波超压峰值关系式：

$$\Delta p_m = 0.084 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right) + 0.27 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{C^{1/3}}{r} \right)^3. \quad (6)$$

式中： Δp_m 为在无限空间中爆炸时所产生的冲击波的峰值压力 (10^6 Pa)； C 为 TNT 的装药质量，kg； r 为距爆心的距离，m。

将 $r=0.15 \text{ m}$ 和 $\Delta p_m=0.136 \times 10^6 \text{ Pa}$ 代入式(6)中，可得：

$$C = 0.000 52 \text{ kg},$$

$$V = C/\rho = 0.000 52 / 1 600 = 3.25 \times 10^{-7} \text{ m}^3.$$

根据储气罐形状对爆轰波传播过程的影响情况，笔者假定 TNT 为半径 0.002 m 球体。

3 爆炸抛掷物的数值模拟计算

密闭空间气体容器发生爆炸不仅会产生冲击波的危害，而且容器在爆炸过程中将产生抛掷物和破片，这些抛掷物和破片会对周围的人和物造成一定伤害。高压气体使容器爆裂所产生的抛掷物，其形状和大小是随机出现的，这是由压力容器的材料、金相组织、物理性质(有无裂纹、弯曲、沟槽或内部裂缝等)，以及结构界面的结合状态等因素决定的^[2]。

3.1 抛掷物初始速度计算

为计算气体压力容器因爆炸产生抛掷物的初始速度，考虑到其非确定性，可假设：气体压力容器因压力过大爆裂为 n 个相同的正形状破片。在上述假设前提下，根据 Taylor 和 Price 在 1971 年提出，Baker 等在 1975 年修正的气体压力容器因爆裂而产生的破片速度计算方法，可得到气体压力容器在爆炸时抛掷物的初始初度^[3]。

密闭气压容器无量纲压力项：

$$\frac{(p-p_0)V_0}{m_c\gamma R_m\theta_0} = \frac{(2.37-1.013)\times 10^5 \times 0.17}{20 \times 1.4 \times 287 \times 293} = 0.0098. \quad (7)$$

式中： p 为容器内压力； p_0 为大气压力； V_0 为气体容器容积； m_c 为容器质量； γ 为比热比； R_m 为校正后的理想气体常数； θ_0 为爆炸时气体绝对温度。

根据比例无量纲破片速度与比例无量纲压力的关系(如图 2)，可得到气体压力容器无量纲破片速度。

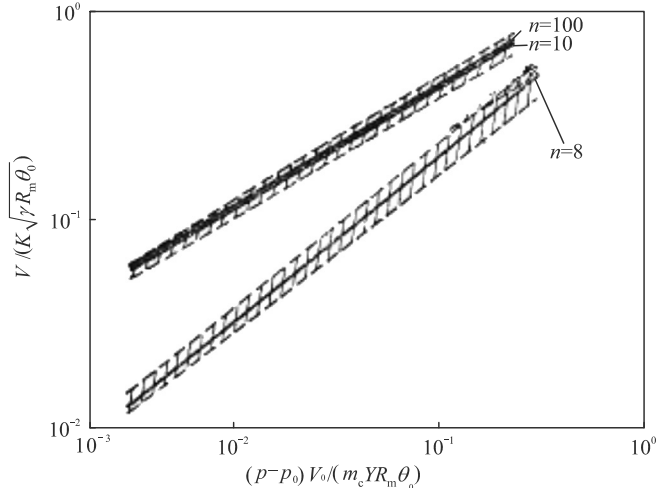


图 2 比例无量纲破片速度与比例无量纲压力关系

当 $n \geq 10$ 时，

$$\frac{u}{(\gamma R_m \theta_0)^{1/2}} \approx 0.35,$$

$$u = 0.35 \times (1.4 \times 287 \times 293)^{1/2} = 120.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (8)$$

3.2 抛掷物冲击能量计算

为研究压力容器爆炸抛掷物对装备设备、人员等破坏影响，考虑到比动能是影响抛掷物撞击钢板效果的最主要因素，笔者对装备储气罐等效爆炸抛掷物的比动能进行计算。

装备储气罐排气阀等效爆炸抛掷物的动能为：

$$W = \frac{1}{2} \frac{m_c}{n} u^2 = 721.2 \text{ J}, \quad (9)$$

因此装备储气罐排气阀等效爆炸抛掷物的比动能为：

$$e = \frac{W}{2s/n} = \frac{1}{2} \frac{m_c}{n} u^2 \frac{n}{2s} = \frac{m_c u^2}{4s}, \quad (10)$$

$$e = 0.4 \times 10^6 \text{ J/m}^2.$$

式中 s 为气体压力容器投影到钢板上的面积。

由比动能的计算公式(10)可知：比动能的大小取决于抛掷物的初始速度，其比动能越大撞击钢板的破坏效果越大。

4 排气阀崩裂撞击破坏效应及防范

4.1 排气阀崩裂破坏效应分析

排气阀崩裂相当于破片的冲击破坏，破片对装备周围人员、部组件、燃料等造成杀伤、穿击和引爆等综合毁伤效应。

破片毁伤准则主要有动能准则、比动能准则、破片质量准则和破片分布密度准则等。破片对目标的毁伤主要是它的击穿作用，主要取决于破片碰撞目标时的动能，通常对有生力量采用能量准则^[4]。多边形的破片在飞行中将是变化、旋转和不稳定的，其碰撞面积是个随机变量；因此，通常对机械损伤使用比动能准则^[5]。动能准则和比动能准则破坏关系见表 1、表 2。

表 1 破片对不同目标毁伤作用与动能的关系 J

杀伤动能	目标性质
78.5~128	杀伤人
186	烧伤马
245~392	土木类(非金属)
981~1 962	飞机(金属)
981	厚度为 10 cm 的砖墙
1 472	厚度为 10 cm 的水泥墙
3 924	钢筋水泥墙
2 158	7 mm 厚装甲板
3 434	10 mm 厚装甲板

表 2 破片对不同目标毁伤作用与比动能的关系 MJ/m²

杀伤比动能	目标
2.45	击毁飞机润滑系统、冷却系统和供给系统，并同时击穿铝制蒙皮
3.9~4.9	破坏飞机发动机、机身
7.85	毁伤飞机大梁、操纵杆、4 mm 钢甲
35	击穿 12 mm 钢甲
1.47	杀伤人

由上述的模拟计算可知，排气阀崩裂冲击时的初始动能为 721.2 J、比动能为 0.4 MJ/m²。根据破片毁伤的动能准则和比动能准则，0.4 MJ/m² 的比动能只能对人体产生一定的伤害，而 721.2 J 的破片动能足以杀伤人体并破坏非金属类物体，但不足击穿金属，当前，国内外一般规定破片动能大于 78 J 作为杀伤破片，低于 78 J 的破片则认为不具备杀伤能力^[6]。综合分析可知：装备储气罐在超压情况下的排气阀崩裂冲击，对操作维护人员以及装备内储气罐周围的油管、气管、传感器和线路等非金属材料具有杀伤破坏效能。

4.2 装备储气罐安全防范措施

装备储气罐排气阀出现崩裂的主要原因是阀芯受到腐蚀老化、金属橡胶屑末堆积；因此，及时有效地维护保养是排除储气罐安全隐患的关键^[7-8]。

Journal of Metals, 2000, 52(5): 28-30.

[4] HOFMEISTER W, GRIFFITH M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing[J]. Journal of Metals, 2001, 53(9): 30-34.

[5] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 36-42.

[6] ARCELLA F G, ABBOTT D, HOUSE M. Titanium alloy structures for airframe application by the laser forming process[C]. Boston, American: Structures, Structure Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, 2013: 71-73.

[7] 邵丹, 胡兵, 郑启光. 激光熔覆技术及应用技术与[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 50-67.

[8] 朱强, 尹二伟, 史慧芳, 等. 金属粉末在线称量及旋压成型工艺装备技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 29-32.

[9] 林胜. 5轴数控机床发展与应用[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 1-5.

[10] DING Y, WARYON J, KOVACEVIC R. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system[J]. Additive Manufacturing, 2016, 10(6): 24-35.

[11] 刘立峰, 杨洗陈, 王菲, 等. 基于机器人的柔性激光再制造系统[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 65-70.

(上接第 34 页)

- 1) 每年更换一次气动系统干燥器, 防止因空气潮湿而造成气路部组件的腐蚀老化。
- 2) 检查气动系统安全阀在 1.3 MPa 时是否正常开启, 预防因安全阀失效而造成气动系统超压。
- 3) 每次装备使用后应及时操作排气阀给储气罐排水, 预防储气罐内水和杂物的堆积腐蚀。
- 4) 每月定期检查储气罐周围是否有液压油等腐蚀性液体, 罐身是否有生锈、裂纹等并做相应油漆防锈等。
- 5) 人员在对气动系统安全阀、排气阀进行操作前应在装备停机后并观察一段时间。

5 结论

通过把装备储气罐排气阀出现超压崩裂转化为压力容器爆炸冲击等效计算分析可知:

- 1) 储气罐在安全阀设定压力 1.2 MPa 下, 其超压所产生空气冲击波的初始峰值约为 1.36×10^5 Pa, 可等效为半径 2 mm 的 TNT 球体的爆炸效应。
- 2) 装备储气罐排气阀锈蚀堵塞崩裂冲击所产生的破片初速度达到 120.1 m/s, 该破片的动能和比动能分别为 721.2 J 和 0.4×10^6 J/m²。
- 3) 对比分析破片毁伤动能准则、比动能准则,

装备储气罐超压情况下, 排气阀崩裂冲击将对人体及装备内非金属类部件产生杀伤破坏。

4) 定时清理排气阀内积水、金属屑末堆积及锈蚀等维护保养, 科学规范操作流程是排除装备储气罐安全隐患的关键。

参考文献:

[1] 史长根, 尤峻, 周祥, 等. 高压容器试验仓安全评估计算方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(4): 32-37.

[2] 杨相礼, 何勇, 何源. 圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 9-12.

[3] 成肇毅. 压力容器爆炸物质的数量估算[J]. 锅炉压力容器安全技术, 2004, 16(1): 19-21.

[4] 金丽, 赵捍东, 曹红松, 等. 预制破片对地面人员目标的杀伤威力分析计算[J]. 导弹与制导学报, 2006, 26(4): 157-159.

[5] TMS-1300. Structure to resist the effect of accidental explosions[S]. US: US Department of the Army, 1990.

[6] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 导弹与制导学报, 2008.

[7] 刘佳, 崔传安, 徐畅. 爆炸波在硬质聚氨酯泡沫中的衰减特性模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017(9): 164-167.

[8] 李爱辉, 赵宸立, 王龙. 基于粒子系统的弹药爆炸可视化[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 53-56.