

液化气体安全-1

液化石油气泄漏特性

1. 引言

近日来,6·13 温岭槽罐车液化石油气(LPG)爆炸事故受到了社会各界广泛的关注,截至 6 月 15 日 7 时,事故共造成 20 人死亡,172 人住院治疗。6 月 7 日一辆装载 21 吨液化天然气(LNG)的槽罐车在途经浙江省新昌县时与其他车辆发生碰撞并起火。这两起相隔不久的事故也使得液化气体安全变成了一个行业热点。液化气体除了这两次事故涉及的液化石油气(LPG)和液化天然气(LNG),还包含液氢、液氨、液氯等,都具有较高的危险性。本文将结合 LPG 的性质,对其泄漏的行为特性及泄漏模式等相关信息进行介绍,以期促进相关安全水平的提升。

2. LPG 泄漏的主要特性

液化石油气(LPG)泄漏后会发生瞬间闪蒸,在夏天高温天气下,1/3 左右甚至更多汽化形成蒸汽云团,余下约 2/3 为液体。闪蒸后剩下的 LPG 液体一般可以达到零下 40-50 度的低温,由于地面温度普遍较高,其液体会沿地面流淌的同时继续蒸发。LPG 的气态比重是空气的 1.5~2 倍,另外蒸汽云团的低温也会增加云团的密度。由于比空气重,闪蒸和蒸发的气体会沿地面漂流,或者积存在低洼处,如图 1 所示,一旦达到爆炸浓度,遇到火源就会发生爆炸。



图 1 液化石油气泄漏后的重气云团聚集在地面低洼处（尚未着火）



液化气体比空气温度低，使得空气中水蒸气凝结成雾滴，所以液化气体泄漏后一般伴随着明显的白雾云团，这是液化气泄漏的特殊现象。雾滴的存在进一步加重了云团的密度，影响其扩散和爆炸过程，譬如有研究表明 10 微米级别的水雾有可能加速爆炸过程的湍动程度，进而增加爆炸的压力。

重气云团沿地面漂流的这种特性使得其云团扩散以及爆炸威力受地形影响尤为显著。一般有障碍阻挡的地方，其云团爆炸威力更大，譬如围墙、隧道、沟渠或地下坑道、道路两侧的灌木丛、隔音围栏、高速匝道口等高出地面的地形，或其它障碍类型的地形。这一方面是障碍物会减弱空气流动，无法及时冲散、稀释可燃性蒸汽云团，另一方面高大障碍物的限制还会使得云团爆炸时压力无法及时、有效地释放。另外，障碍物的存在还可能使得云团火焰在燃烧、传播的过程中得以加速，使得其爆炸威力成倍的增加。

3. LPG 泄漏的主要模式

LPG 相关事故根据其发生的场所有：

- 生产企业的储罐区
- 液化气销售企业的球罐（多数在人群密集区）
- LPG 运输罐车

其中生产企业和销售企业 LPG 球罐主要存在装卸时卸料管泄漏或连接脱落、外部火灾，人为失误或机械故障造成球罐超压，同时也包括球罐法兰连接泄漏，管道及罐体腐蚀泄漏等风险。LPG 运输罐车事故则多发生在装卸和运输等过程，譬如运输过程的撞击、侧翻、追尾等，尤以发生在高速匝道口、隧道口的事故频率和严重程度更高。

LPG 泄漏根据其泄漏速率形式主要有小孔(或裂缝)、法兰连接密封性不好等造成的连续泄漏和 LPG 罐体因机械失效或超压而造成的灾难性瞬间泄漏两种主要形式。根据泄漏发生的位置有以下几种表现形式：

- 储罐装卸管道脱离或破裂
- 储罐连接管道破裂
- 管线材质老化后受振动、撞击等出现裂缝泄漏
- 阀门法兰的密封垫片因老化、开裂、螺栓紧固不均匀等损坏而泄漏，其中阀门前法兰或阀门根部泄漏较难处置



- 储罐根部因材质问题或其它原因出现裂缝泄漏
- 储罐泄压阀故障打开
- 罐体灾难性破裂造成泄漏

其中前 6 种形式主要表现为(小孔)连续泄漏,而第 7 种形式则造成灾难性瞬间泄漏。但连续泄漏若遇到点火源形成喷射火和池火,持续烘烤罐体,也可能升级到罐体灾难性破裂。若装有合适的针对火灾情况的安全泄压阀,则可以降低发生罐体灾难性破裂的可能性;另外,由于快速的泄压可以较大地降低存料,可以降低爆炸的后果。另外,固定储罐一般会装高液位的连锁保护装置以防止储罐因灌满而造成超压。

罐体灾难性破裂一般伴随着沸腾液体扩展蒸汽云爆炸(BLEVE)。该过程属于物理爆炸,具有一定强度的爆炸冲击波,其快速膨胀的蒸汽可以将撕裂的罐体片段抛射到一定的距离。对于大于 5 m^3 的储罐,形状多为圆柱形,其最大抛射距离可以粗略估计为 $L=465 * M^{0.1}$, 其中 M 是储罐内物料质量(kg), L 为最大抛射距离(m)。表 1 列出了不同罐车装填量对应的最大碎片抛射距离,可见**储罐越大,其最大碎片抛射距离越远**。需要指明的是由于各种事故因素的影响,实际抛射距离可小于该计算距离。

表 1 BLEVE 事故时罐体的最大碎片抛射距离

储罐内物料质量 (吨)	最大抛射距离 (m)
1	880
2	1,000
5	1,100
10	1,170
20	1,250

罐体灾难性破裂主要有以下 4 类因素,其占 BLEVE 事故原因的比例如图 2 所示。

- 外部烘烤(譬如泄漏后形成的喷射火、池火,或者罐区火灾因球罐距离太近造成的多米诺效应等)
- 内部超压(高温暴晒、过量灌装、失控反应、高压惰性保护气体压力调节阀失效、储存液体组成不恰当等)
- 罐体主体受损或质量瑕疵(可以是制造质量问题,腐蚀,也可能是外部损坏或车辆碰撞等造成)
- 其它情况,譬如安全阀失效,或者不能有效的泄压等



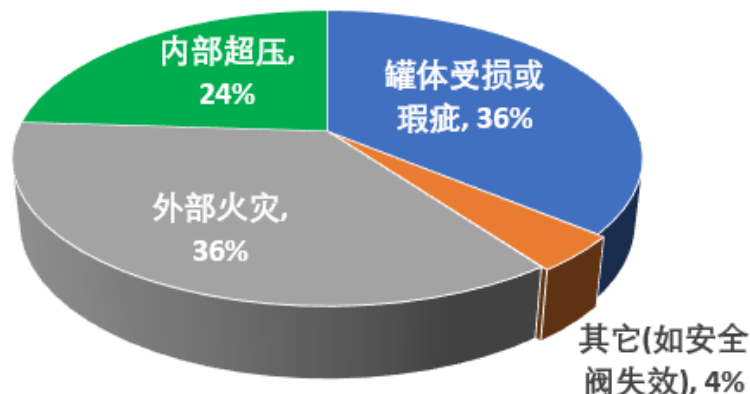


图 2 罐体灾难性破裂(或 BLEVE)的致因模式

外部火灾造成的罐体灾难性破裂,称为热失效,一般会在导致沸腾液体扩展蒸汽云爆炸(BLEVE)的同时,生成的蒸汽云团会被立即点燃并产生较大的火球,经常形成类似于蘑菇云形状的腾起的火球。其爆炸压力一般是由于 BLEVE 物理爆炸所致,而可燃性气体主要表现为火球热辐射形式,单个罐体的事故很少形成二次爆炸。在有多个储罐的情况下,譬如固定的罐区,则有可能形成多米诺效应,导致多次爆炸,如发生在 2017 年 6 月 5 日的山东临沂金誉石化液化气罐爆炸。

除外部火灾以外的其它原因造成的罐体灾难性破裂,称为冷失效。该过程在 BLEVE 的过程中将产生大量的闪蒸气体,并且流淌的液体继续蒸发,与空气充分混合,形成数十米甚至一百米以上的可燃性云团,最后遇到点火源(延迟点燃),形成蒸汽云团化学爆炸(VCE)。由于 VCE 经常比 BLEVE 滞后十几秒甚至 1-2 分钟的时间,所以常常形成第二次或多次爆炸。

罐体热失效一般需要经过较长时间的火苗烘烤,譬如 10 分钟甚至更长,一般情况下人群有足够的时间疏散。相反的,冷失效导致的二次爆炸(即 VCE)通常紧随着第一次爆炸(即 BLEVE),时间间隔一般不超过 3 分钟,尤其 VCE 爆炸比 BLEVE 的冲击波强度要大得多,使得其破坏后果更为严重。

冷失效时, LPG 储罐在第一次物理爆炸的作用下破裂飞出,其罐内液体在飞出的罐体携带下可能存在沿途抛洒的情形,极可能形成更大范围的云团,或者长带状云团,这些都可能强化火焰的加速现象,增大 VCE 的爆炸压力,或者导致多处爆炸的情形。



4. LPG 事故的后果

LPG 事故后果主要有：

- 热失效：BLEVE 爆炸冲击波、抛射碎片、火球热辐射、池火热辐射
- 冷失效：BLEVE 冲击波(一次爆炸)、抛射碎片和 VCE 冲击波(二次爆炸)

具体分析留待后续讨论。

作者： 张彬教授 南京工业大学

刘毅博士 Wood（伍德）化工工艺安全

