

文章编号: 1001-1455(2005)04-0355-06

液体火箭爆炸地面有害气体生成与扩散分析^{*}

陈新华, 向四桂

(总装备部装备指挥技术学院试验工程系, 北京 101416)

摘要:建立了自然液体推进剂运载火箭爆炸时地面残余推进剂蒸发模型和产生的有害气体在大气中的扩散模型,给出了 N_2O_4 /UDMH液体推进剂爆炸产生的地面推进剂残留量、推进剂污染区直径、大气环境中地面残余 N_2O_4 和UDMH推进剂蒸发速率等参数的实验结果。利用该理论模型对大型运载火箭发生意外爆炸事故产生的地面残余推进剂蒸发时间和形成的有害气体危害范围进行了估算。该理论模型可为航天发射场制定安全防护措施提供有用的评估方法。

关键词:爆炸力学;扩散;蒸发模型;推进剂;液体运载火箭

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

目前国内外液体运载火箭仍在使用四氧化二氮(N_2O_4)和偏二甲肼(UDMH)或肼类有毒液体推进剂。这类液体运载火箭发生意外爆炸事故时,散落于地面的未燃有毒推进剂会形成有害气体,对发射场人员造成伤害和环境污染。因此,需要深入研究地面残余推进剂蒸发产生的有害气体生成和在大气中扩散的规律,为航天发射场预测液体火箭爆炸时有害气体危害范围,制定可靠有效的安全防护措施提供相关评估数据。

2 有害气体生成与扩散计算模型

2.1 地面上液体推进剂残留量的估算模型

根据液体推进剂爆炸实验^[1~2]研究结果,液体火箭地面爆炸推进剂散落区内单位面积上渗入地面下的推进剂量计算式为

$$W_{es} = k_e W_0 (1 - k_{bz}) / (\frac{\pi}{4} D_w^2) \quad (1)$$

式中: W_{es} 为单位面积上渗入地面下的推进剂量, kg/m^2 ; W_0 为液体火箭爆炸时推进剂总质量, kg ; k_{bz} 为液体推进剂爆炸反应量系数,与运载火箭爆炸模式有关,取值范围为0.3~0.7,对于使用 N_2O_4 /UDMH推进剂的运载火箭一般取中间值或上限值; k_e 为地面状态系数,取值范围为0~1,工程估算时,对于疏松的干燥地面,地面状态系数 k_e 取为1,对于水泥地面,地面状态系数 k_e 取为0; D_w 为液体火箭爆炸推进剂污染区折合直径, m 。

2.2 液体推进剂污染区估算模型^[1]

地面上液体推进剂强污染区面积 A_{wq} 与推进剂污染区折合总面积 A_w 的关系式为

$$A_{wq} = k_w \frac{\pi}{4} D_w^2 \quad (2)$$

式中: k_w 定义为强污染系数,与火箭爆炸模式有关,取值范围为0.01~0.06,工程估算时, k_w 一般取平均值或上限值。

推进剂污染区折合直径 D_w 与液体火箭爆炸时推进剂总质量 W_0 的关系式为

* 收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-12-06

作者简介: 陈新华(1954—),男,教授。

$$D_w=7.063\ 7W_0^{0.23} \tag{3}$$

2.3 地面残留液体推进剂蒸发形成的有害气体扩散危害距离估算模型

文献[3]给出了有风时大气中地面连续点源气体质量扩散模型为

$$Y(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}+\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \tag{4}$$

式中: $Y(x,y,z)$ 为扩散物质量浓度, kg/m^3 ; Q 为扩散物源强, kg/s ; σ_y 、 σ_z 为扩散参数, m ; $\bar{u}$ 为平均风速, m/s 。

应用式(4)估算事故点下风向推进剂毒气质量浓度,先要确定推进剂毒气源强度和扩散参数 σ_y 和 σ_z 。单位时间,在液体火箭地面爆炸点残余推进剂蒸发形成的毒气源强可用下式计算^[1]

$$Q=A_{\text{wq}}\dot{m}_v \tag{5}$$

式中: A_{wq} 为液体火箭爆炸推进剂强污染区面积,由式(2)确定; $\dot{m}_v$ 为推进剂强污染区毒气生成率。

通过实验研究,提出了大气环境中 N_2O_4 和 UDMH 推进剂蒸发速率计算式^[4]

UDMH

$$\dot{m}_v=(2.522\ 7\times 10^{-6}+1.016\times 10^{-2}t^{-\frac{1}{2}})\left(\frac{p_{s,f}}{p}\right)^{\frac{4}{5}}\bar{u}^{-\frac{1}{3}} \tag{6}$$

N_2O_4

$$\dot{m}_v=(-1.348\ 9\times 10^{-5}+2.220\ 7\times 10^{-2}t^{-\frac{1}{2}})\left(\frac{p_{s,o}}{p}\right)^{\frac{4}{5}}\bar{u}^{-\frac{1}{3}} \tag{7}$$

式中: $\dot{m}_v$ 为蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; t 为蒸发时间, s ; $p_{s,f}$ 为 UDMH 饱和蒸汽压, Pa ; $p_{s,o}$ 为 N_2O_4 饱和蒸汽压, Pa ; p 为发射场当地大气压, Pa ; $\bar{u}$ 为地面平均风速, m/s 。

扩散参数与湍流扩散系数 K 、扩散距离 x 和平均风速 $\bar{u}$ 有关,即 $\sigma_y=\sqrt{2K_yt}=\sqrt{2K_yx/\bar{u}}$, $\sigma_z=\sqrt{2K_zt}=\sqrt{2K_zx/\bar{u}}$ 。由定义式确定扩散系数很困难,文献[5]给出了经验确定方法

$$\sigma_y=\gamma_1x^{\alpha_1}, \quad \sigma_z=\gamma_2x^{\alpha_2} \tag{8}$$

式中: x 为下风向计算点到污染源的距离, m ; γ_1 、 γ_2 为系数; α_1 、 α_2 为幂指数。 γ_1 、 γ_2 、 α_1 、 α_2 是大气稳定度的函数,确定大气稳定度后查表确定 γ_1 、 γ_2 、 α_1 、 α_2 ^[5]。大气稳定度与风速、云量、云状和日照情况等参数有关。

液体火箭爆炸地面残余推进剂蒸发形成的有害气体危害最大距离计算公式可利用式(4)和式(5)导出。设地面是一个完全反射体,即把接触地面的有毒气体完全反射回扩散的空间,那么,沿下风向(x 轴线)扩散物质的浓度是由式(4)给出的浓度的 2 倍,即 $Y(x,0,0)=Q/(\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z)$ 。将式(5)代入,得

$$x_{\text{max}}=\left(\frac{A_{\text{wq}}\dot{m}_v\times 10^6}{\pi Y_{\text{max}}\bar{u}\gamma_1\gamma_2}\right)^{\frac{1}{\alpha_1+\alpha_2}} \tag{9}$$

式中: Y_{max} 为空气中推进剂最大允许浓度, mg/m^3 ; x_{max} 下风向有害气体危害最大距离, m 。

同理,垂直于下风向(y 轴方向)扩散物质的浓度为 $Y(x,y)=\frac{Q}{\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$,将式(5)代入得

$$y_{\text{max}}=\pm\sqrt{2}\sigma_y\left[\ln\left(\frac{A_{\text{wq}}\dot{m}_v\times 10^6}{\pi Y_{\text{max}}\bar{u}\sigma_y\sigma_z}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

式中: y_{max} 垂直于下风向上有害气体危害最大距离, m 。

由此,可以利用式(2)、式(3)、式(5)、式(6)或式(7)计算出有毒气体源强,利用式(9)和式(10)通过迭代计算出地面残余推进剂蒸发形成的有害气体扩散最大范围。

地面残余推进剂蒸发形成的有害气体作用时间可用下式迭代求出

$$t=\frac{k_wW_{\text{es}}}{\dot{m}_v} \tag{11}$$

3 结果分析

图1为模拟火箭爆炸实验时地面残余推进剂(HUDM 和 N_2O_4)蒸发形成的有害气体在大气中的扩散过程^[1]。

利用本文给出的计算模型,根据发射场的气象资料,按不同爆炸模式、不同发射时间,估算了典型运载火箭发生意外爆炸事故地面残余推进剂蒸发形成的有害气体危害范围和时间。

3.1 参与爆炸反应的液体推进剂量对有害气体扩散的影响

液体运载火箭发生意外爆炸事故,参与爆炸反应的推进剂量直接影响爆炸产生的有害气体危害作用的时间和扩散范围。表 1 为模拟 10 月 20 日 13 : 30 运载火箭加注推进剂后,在大气压为 90 kPa、环境温度 为 290 K,天空云量为总云量 ≤ 4 、低云量 ≤ 4 、平均风速为 10 m/s 情况下,在发射台上发生意外爆炸事故,按工作环境最大允许的推进剂浓度^[6](UDMH 为 1.34 mg/m^3 , N_2O_4 为 5 mg/m^3)估算出的地面残余推进剂蒸发形成的有害气体扩散最大范围和毒气作用时间。推进剂强污染系数取 0.06。

表 1 表明,推进剂爆炸反应量系数大,即参与爆炸反应的液体推进剂多,火球温度高,散落于地面的残余液体推进剂蒸发快,有害气体危害作用时间短。由于大气中有害气体的初始浓度比较高,则有害气体危害范围要大一些。这与实际运载火箭爆炸事故资料和 UDMH/ N_2O_4 推进剂爆炸实验有关数据是一致的。通过多年数十次的 UDMH/ N_2O_4 推进剂爆炸实验数据和典型运载火箭爆炸事故资料分析,液体火箭爆炸时推进剂爆炸反应量系数取值为 0.3~0.7。以此范围选择推进剂爆炸反应量系数,按计算时设定的环境条件,若典型运载火箭在发射台上发生意外爆炸事故,UDMH 蒸发形成的有害气体危害作用时间小于 57 h, N_2O_4 蒸发形成的有害气体危害作用时间小于 7.6 h。



图 1 模拟火箭爆炸试验时地面残余推进剂蒸发形成的有害气体在大气中扩散过程

Fig. 1 Diffusing of the vaporized poisonous gas of remnant propellant on the ground after a simulated liquid rocket exploding test

表 1 典型火箭爆炸地面残余推进剂蒸发形成的有害气体作用时间和扩散距离
Table 1 The duration and the diffusion distance of vaporized poisonous gas of remnant propellant on the ground after a liquid launch vehicle explodes

k_{bz}	W_{e}/kg	$W_{\text{es}}/(\text{kg}/\text{m}^2)$	UDMH			N_2O_4		
			t/h	x_{max}/m	y_{max}/m	t/h	x_{max}/m	y_{max}/m
0.3	312 900	20.10	56.812	2 101	175	7.590	2 955	288
0.5	223 500	14.35	29.856	2 278	208	3.753	3 201	331
0.7	134 100	8.61	11.086	2 933	240	1.312	4 120	391

3.2 运载火箭飞行高度对有害气体形成与扩散的影响

表 2 为按运载火箭点火后、在垂直飞行段失去推力落地爆炸模式、以工作环境中最大允许的推进剂浓度计算出的地面残余推进剂蒸发形成的有害气体可能危害到的最大范围。环境条件:大气压取 90 kPa,平均风速取 10 m/s,环境温度取 290 K,天空云量为总云量 ≤ 4 、低云量 ≤ 4 ;污染状况:推进剂强污染系数均取 0.06; t_{r} 为设定火箭飞行时间, h_{r} 为设定火箭飞行高度, W_{s} 为推进剂剩余量(不含卫星), D_{max} 为火球最大直径。表 2 表明,当环境条件相同,火箭在 1 000 m 以下的空中失去推力落地爆炸时,火球直径、推进剂污染区折合直径、毒气危害作用时间及危害最大可能的范围等都相差不大,但推进剂强污染系数不同,这些参数有较大差别。说明有害气体形成和扩散与火箭落地时的倾倒程度有关。

表 2 火箭垂直飞行段失去推力落地爆炸地面残余推进剂蒸发形成的有害气体危害时间和范围

Table 2 Damaging duration and range of vaporized poisonous gas of remnant propellant on the ground when a launch vehicle in the phase of vertical flight falls to the ground and explodes

t_r/s	h_r/m	W_s/kg	D_{max}/m	D_w/m	$W_{es}/(kg/m^2)$	UDMH			N_2O_4		
						t/h	x_{max}/m	y_{max}/m	t/h	x_{max}/m	y_{max}/m
8.0	112	428 417	298.4	139.4	8.42	10.601	2 905	237	1.252	4 081	388
10.5	200	422 610	297.0	139.0	8.36	10.449	2 895	237	1.233	4 068	387
14.5	400	413 318	295.0	138.3	8.26	10.207	2 881	236	1.203	4 048	385
17.0	600	407 512	293.0	137.8	8.19	10.055	2 872	235	1.185	4 035	384
20.0	800	400 544	291.0	137.3	8.12	9.874	2 861	234	1.162	4 019	382
22.0	1 000	395 898	290.0	136.9	8.07	9.753	2 853	234	1.147	4 008	381

3.3 不同季节风速对有害气体扩散的影响

在不同季节里发射场大气温度不同,有的低于 N_2O_4 的冰点温度,有的高于 N_2O_4 的冰点温度。图 2 给出了以工作环境中最大允许的推进剂浓度,由式(9)计算出的冬、春两季不同平均风速下风向上地面残余推进剂蒸发形成的有害气体可能危害到的最远距离。应当指出的是,图 2 的曲线应是光滑的,折线是由于风速在 0~6 m/s 范围内大气稳定度从 A 级到 D 级变换了 6 个等级、而利用文献[5]查表确定的 γ_1 、 γ_2 、 α_1 、 α_2 数据不是连续变化的等因素所造成的。图 3 给出了由式(11)计算出的冬、春两季有害气体蒸发时间。估算时,大气压均取 90 kPa,天空云量均取总云量 ≤ 4 、低云量 ≤ 4 ,火箭均在发射台上已加注待发射,爆炸反应量系数均取 0.7,推进剂强污染系数均取 0.06。

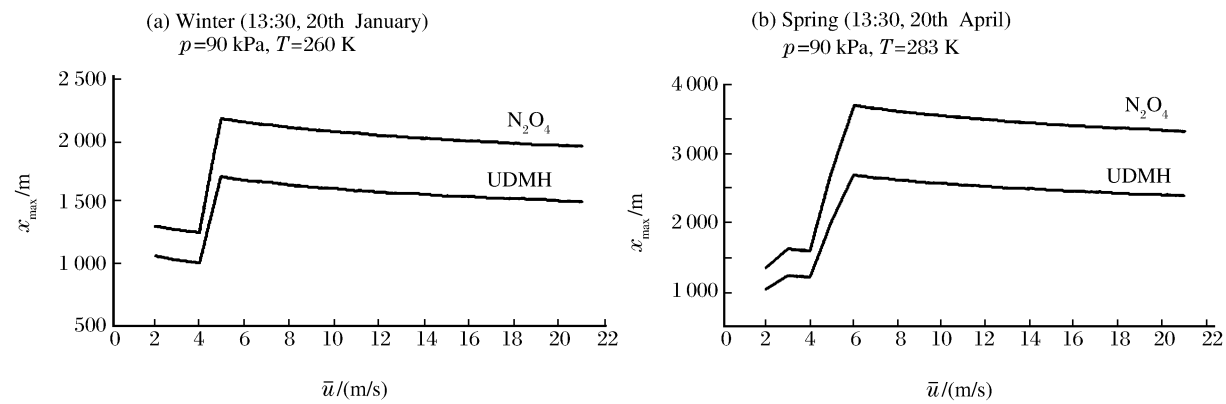


图 2 不同季节推进剂气体最大扩散距离与平均风速的关系

Fig. 2 The relation between the maximum diffusion length for poisonous gas in different season

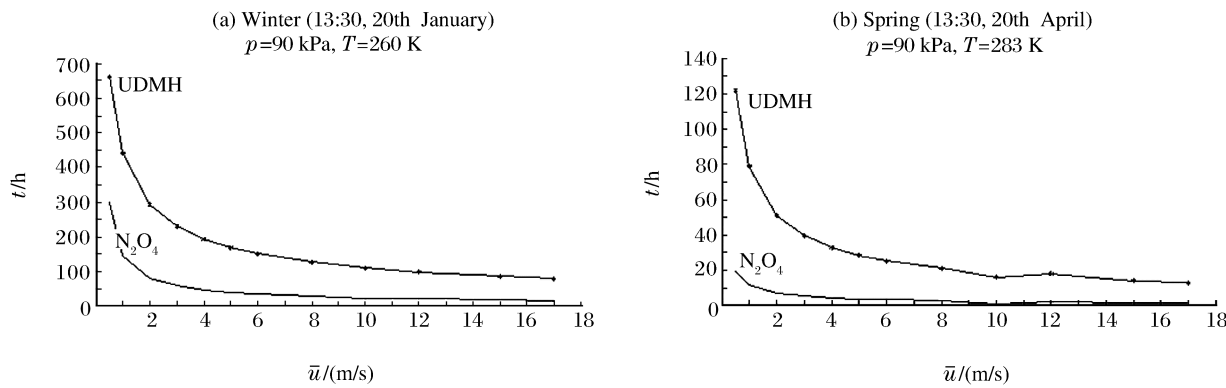


图 3 不同季节地面残余推进剂蒸发时间与风速的关系

Fig. 3 The relation between actuation duration of poisonous gas in different season

由图 2 和图 3 可以看出：

(1)春季的环境温度比冬季的高 23 K,有毒气体的扩散距离大了 4 倍,地面残余推进剂蒸发时间 N_2O_4 缩短为 1/5,UDMH 缩短为 1/6。说明不同季节(环境温度)对有毒气体的扩散和作用时间影响不一样,这是因为不同季节里太阳倾角不同则大气稳定度不同,另外因为推进剂饱和蒸气压是环境温度的函数,环境温度相差 23 K 推进剂的饱和蒸气压必然差别较大,这样导致推进剂的蒸发速率相差较大。

(2)由于地面风速小时,大气稳定性差,若发射场地面平均风速小于 6 m/s,发生液体火箭意外爆炸事故时,地面残余推进剂蒸发形成的有害气体作用时间受风速影响很大,下风向上有毒气体扩散距离随风速增大而更大。这可能是由于平均风速从 0 变化到 6 m/s 时,大气稳定度等级受地面风速和太阳辐射强度影响很大,从极不稳定变化到基本稳定,扩散参数变化很大且 $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ 逐渐减小,风速不是对毒气扩散起主导作用的因素。当地面平均风速大于 6 m/s 时,大气等级度等级趋于一样,并且不受太阳辐射强度的影响,扩散参数与稳定度无关只是扩散距离的函数,当毒源强度比不上风速的变化对毒气扩散浓度的影响时,大气中毒气扩散浓度主要受地面风速的控制,因此发射场地面平均风速大于 6 m/s 时,下风向上有毒气体扩散距离随风速增大而减小。

(3)UDMH 的蒸发速率较 N_2O_4 小,地面残余 UDMH 蒸发形成的有害气体作用的时间较 N_2O_4 长。

3.4 推进剂爆炸反应量对毒气污染危害范围的影响

推进剂爆炸反应量对有害气体污染危害范围的影响,主要体现在地面残余推进剂蒸发形成的有害气体作用时间上。图 4 给出了环境大气压为 90 kPa、环境温度为 290 K、地面平均风速为 10 m/s 时地面残余的 UDMH 和 N_2O_4 蒸发形成的有毒气体作用时间与 UDMH/ N_2O_4 爆炸反应量系数的关系曲线。由图 4 可以看出:按液体推进剂爆炸反应量系数取 0.3~0.7,发射场地面平均风速取 10 m/s,天空云量为总云量 ≤ 4 、低云量 ≤ 4 ,估算典型运载火箭发生意外爆炸事故地面残余的 UDMH 蒸发形成的毒气作用时间最长不超过 57 h,最短不低于 11 h; N_2O_4 毒气作用时间最长不超过 7.6 h,最短不低于 1.3 h。

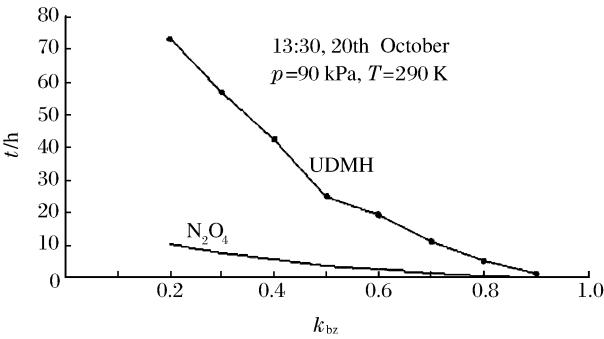


图 4 推进剂毒气作用时间与爆炸反应量系数的关系曲线

Fig. 4 The curves of propellant vaporization duration and reacting dose coefficient

4 结 论

参与爆炸反应的液体推进剂多,火球温度高,散落于地面的残余液体推进剂蒸发快,有害气体危害作用时间短,范围大。当环境条件相同,火箭在 1 000 m 以下的空中失去推力落地爆炸时,火球直径、推进剂污染区折合直径、有害气体危害作用时间及危害最大可能的范围等相差不大。发射场地面平均风速小于 6 m/s 时,地面残余推进剂蒸发形成的有害气体作用时间受风速影响很大。环境温度增高,有毒扩散距离增大,推进剂毒气作用时间缩短。UDMH 气体作用的时间较 N_2O_4 长。提出的计算模型可用于对航天发射场发生运载火箭意外爆炸事故的危害性评估。

参考文献：

[1] 陈新华,彭明伟. 航天发射场有害气体污染范围安全性研究[R]. GF118845.2003.
[2] 陈新华,王振国,张智,等. 液体推进剂爆炸理论与实验研究[J]. 爆炸与冲击,1996,16(1):31-40.
CHEN Xin-hua, WANG Zheng-guo, ZHANG Zhi, et al. Theoretical and experimental studies for liquid rocket propellant explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(1):31-40.
[3] 林肇信. 大气污染控制工程[M]. 北京:高等教育出版社,1999:87-89.

- [4] 陈新华,吴冲华,佟连捷,等. 大气中 N_2O_4 /UDMH 推进剂蒸发特性的研究[J]. 推进技术, 2000, 21(2): 77—80.
CHEN Xin-hua, WU Chong-hua, TONG Lian-jie, et al. Evaporation characteristic of N_2O_4 /UDMH propellant in the air[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(2): 77—80.
- [5] GB3840-83, 制定地方大气污染物排放标准的技术原则和方法[S].
- [6] 高思敏. 液体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.

Emergence and diffusion of the poisonous gas on the ground for liquid launch vehicle explosion

CHEN Xin-hua^{*}, XIANG Si-gui

(Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: This paper presents a vaporization model of remnant propellant on the ground and a diffusion model of the poisonous gas for liquid hypergolic propellant launch vehicle explosion. The estimated mass of remnant propellant on the ground, the equivalent diameter of contaminated zone and the evaporation rate of N_2O_4 and UDMH are conducted for a N_2O_4 /UDMH liquid propellant explosion respectively. The present models are applicable for predicting the vaporization (time) of remnant propellant on the ground and the contaminated range of poisonous gas for large scale liquid hypergolic propellant launch vehicle explosions. It provides an available evaluation method for safety measurement at the space vehicle launching site.

Key words: mechanics of explosion; diffusion; vaporization model; propellant; liquid launch vehicle

^{*} Corresponding author: CHEN Xin-hua
E-mail address: cxh20@cetin.net.cn
Telephone: 010-66364199