

文章编号: 1006-9941(2004)05-0309-05

烟火型气体发生器气体冷却技术研究进展

李 畅, 杜志明

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:烟火型气体发生器已广泛地应用于各种气囊系统和救生装置中,为了吸收气体发生剂燃烧后放出的热量,降低产气温度,需要对燃烧过程产生的气体进行冷却。本文就冷却剂的选择、使用方式、冷却单元结构设计及冷却过程数值模拟进行了综述。

关键词:烟火技术; 气体发生器; 冷却剂; 冷却技术

中图分类号: TQ567

文献标识码: A

1 引言

烟火型气体发生器是一种快速的产气装置,具有体积小、充气快、灵活方便、不受环境条件影响等优点。它已广泛用于汽车安全气囊、海上救生筏、宇航员救生服、民航飞机紧急救生充气滑梯和救生装置、沉船打捞、紧急灭火、气垫船和橡皮舟快速充气、飞船和无人机软着陆、巡飞弹翼展、军用伪装充气假目标等^[1]。气囊通常需要充入低温气体,而烟火型气体发生剂燃烧后产生的气体温度往往太高,无法满足使用要求。为获得低温气体,冷却技术是不可忽略的措施之一。

在过去几十年中,世界各国对烟火型气体发生器开展了大量研究工作,其中冷却技术研究占据重要位置。本文就国内外烟火型气体发生器中的冷却技术研究进展进行了简要综述。

2 冷却剂的种类

2.1 物理冷却剂

物理冷却是利用冷却剂的升温、熔化和蒸发等吸热过程来降低燃气温度。铁屑、铝屑、硬脂酸、石蜡、水和沙砾等都可作为物理冷却剂。

物理冷却剂兼起过滤器的作用,过滤层有多种形式,可由多层钢丝网构成,也可由钢木和玻璃纤维构

成。在钢丝网中装入冷却剂可阻止燃烧产物中的火花或固体粒子进入气囊,净化气体,保持气囊强度。1980年,美国 Kirchoff 等^[2]在申请的氮气气体发生器专利中使用了玻璃纤维织物和碳钢滤网作为过滤层,将95%以上的固体燃烧残渣留在燃烧室内,得到较为纯净的冷却气体。1989年, Katz 等^[3]发明了一种更简单的过滤器用于汽车安全气囊,即在气囊的一部分囊壁上,用纤维织物做成过滤器。在每平方厘米织物上,由24根经线和21根纬线织成2/1的斜纹图案,在气体作用下,小孔不变大,具有很高的破裂强度。

20世纪90年代以来,国内从事汽车碰撞安全和军工研究的专家与学者开始关注气体发生器的应用研究与发展,对冷却技术也进行了相关研究。1991年,刘淑贞^[4]提到可选用粒度为0.1~2 mm的 Al_2O_3 或 SiO_2 、 SiC 等耐热无机物作为物理冷却剂,如海上救生筏用气体发生器采用的物理冷却剂为0.1~2 mm的 Al_2O_3 粒子,采用24目的不锈钢金属筛网盛装,取得了较好的冷却效果。徐复铭等^[5]研究了物理冷却剂吸热总量的计算方法,在忽略气体发生器壳体部件吸热和辐射散热的情况下,给出了冷却剂吸热总量的计算公式,并讨论了燃烧室压力对气体温度的影响。

2.2 化学冷却剂

化学冷却剂是利用自身吸热化学反应来降低气体发生剂燃烧温度的特殊药剂。通常选用吸热后能够分解成气体产物的物质,在降低温度的同时还增加了气体生成量。作为化学冷却剂的化合物应具备如下条件^[5]:

- (1) 分解温度较低,但存放过程中必须性能稳定;
- (2) 分解时能吸收大量的热;

收稿日期: 2004-04-01; 修回日期: 2004-05-18

作者简介: 李畅(1980-),男,硕士研究生,从事火工烟火的相关研究。

通讯联系人: 杜志明(1962-),男,博导,从事化学物理效应、烟火技术及应用方面的教学和科研工作。e-mail: Duzhiming430@sohu.com

(3) 分解时释放化学性质稳定的无害气体。

考虑到上述要求,化学冷却剂的组分可以选择碳酸钙、碳酸锌、碳酸镁、碳酸钡、碳酸锰、碳酸氢钾、水合碳酸镁(三水合碳酸镁或五水合碳酸镁)、氢氧化锆、硼砂和八水合氧化钡等。它们经过适当的组合和工艺处理后可以实现较好的冷却效果。1995年,何顺录等^[6]在申请的汽车安全气囊用气体发生剂专利中采用 NaHCO_3 (外加12%~7%)作为化学冷却剂,最后测得排气孔附近的温度为170~200℃。不过这类冷却剂的反应产物中有苛性氢氧化物,腐蚀性强。

3 冷却剂的使用方式

冷却剂的使用分为内冷却和外冷却两种方式。内冷却是将物理冷却剂或化学冷却剂均匀地混合于气体发生剂的原料中,使之成为药剂的一部分;外冷却是在气体发生器设计时将气体燃烧室和冷却室分别设置,燃烧气体从燃烧室出来后再进入冷却室冷却,最后进入气囊。

3.1 内冷却

3.1.1 内冷却的特点^[5]

(1) 冷却效果好。在冷却结构中,冷却剂与气体发生剂的组分间能充分接触,物理冷却剂换热充分,化学冷却剂易于分解。

(2) 冷却剂能调节气体发生剂的反应速率和产气速率。一方面吸热反应降低了燃烧反应的速率,另一方面化学冷却剂的分解又增加了气体的生成量,改变了生成气体的时间-压力关系。因此,可以通过合理选择冷却剂种类和控制其加入量的办法,调节反应速率,控制气体生成的规律。

(3) 装药结构紧凑,占据空间小,气体发生器结构更合理。

(4) 改善气体发生剂的感度和强度。因为内冷却剂通常都是钝感剂或粘合剂,含这种组分的发生剂远比不含这种组分的发生剂耐冲击、耐摩擦,更适合在冲击、振动条件下贮存,具有更好的安全性。

3.1.2 内冷却方式的研究进展

自20世纪70年代以来,国外许多气体发生剂配方专利中都加入了内冷却材料。1975年,美国Lundstrom^[7]申请了用于汽车防撞系统气体发生剂配方,该配方选择了以碱金属叠氮化物作为氮气发生剂主要来源,并加入了氧化铝作为降温剂。配方组成为50.16% NaN_3 , 40.75% 无水 CrCl_3 , 9.09% Al_2O_3 ; 或43.47% LiN_3 , 46.53% 无水 CrCl_3 , 10% Al_2O_3 。同年,加拿大

Sidebottom^[8]也申请了用于司乘人员安全系统的气体发生剂配方专利,该配方也采用氧化铝或氧化硅作为降温剂。然而,由于该配方加入了金属粉,使得气体发生剂在燃烧时产生很高的温度,因此未能应用于安全气囊中。1996年,日本Kayaku^[12]申请了气囊用气体发生剂配方专利,该气体发生剂混合物含有碱金属叠氮化物,氧化剂为 $\text{MO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$ (M为二价金属, $n=1\sim 10$)的铁氧体。该配方优点是:产生的热量很小,可同薄层气囊一起使用,且由于产气率的提高,充气机可做得更小。

20世纪90年代以来,国内一些学者也对气体发生剂中添加冷却剂的内冷却方式进行了研究。1997年,南京理工大学黄寅生等^[13]在含叠氮化钠气体发生剂热动力学试验研究中发现, SiO_2 的加入能显著降低反应体系的放热量,从热化学角度证实了 SiO_2 有降温作用,同时影响热化学反应,使体系的反应活化能增加。1998年,南京理工大学化工学院成一、陈守文^[14]经过数年努力,研制成功了一种NFA气体发生剂,主要由NFA、三氧化二铁和硝酸钾组成,属于一种低温型气体发生剂,燃烧热为 $1\,256\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,燃烧温度在 $1\,200\sim 1\,400\text{ K}$ 之间,可以省却发生器中的冷却装置,简化了发生器的结构。另外,他们还开发出了PA^[15]和PAK^[16]系列新型气体发生剂,具有燃烧温度低,燃烧速度快,有毒气体含量较小等优点,适合于汽车安全气囊用气体发生器。

3.1.3 内冷却方式应考虑的其他条件

从冷却效果分析,内冷却有许多优点,但在采用时还要考虑其它条件^[5]。

(1) 如果加入必须量的冷却剂后,将引起发生剂的反应温度大幅度降低,以致无法保证气体发生剂自持燃烧和必需的燃速时,不宜采用内冷却。低温燃气发生剂采用内冷却就有一定难度。

(2) 如果加入的冷却剂将引起气体发生剂安定性变差、强度变差、感度增高、甚至组分间不相容时,也不能采用内冷却。有的冷却剂易分解,有的易吸潮,本身就不够稳定,混合后会加剧药剂的不稳定性。

3.2 外冷却

尽管内冷却效率高,但外冷却也有其可取之处。目前烟火型气体发生器采用的主要冷却方式还是外冷却。

3.2.1 外冷却的特点^[5]

(1) 既能起到冷却气体的作用,又能起到过滤气体的作用。烟火型气体发生剂燃烧产物中普遍含有固

体颗粒。这些固体残渣具有较高的温度,有时还有腐蚀性,不允许直接进入气囊。合理设计外冷却结构就能在冷却气体的同时,又起到过滤固体残渣的作用,使冷却装置具有多重功效。

(2) 外冷却降温范围宽,排气的温度甚至可以达到或接近环境温度。因为冷却剂与气体发生剂分开放置,冷却剂不会干扰气体发生剂的点火和燃烧,所以冷却剂的种类和用量不受气体发生剂的限制,只要装置空间允许,就能保证良好的冷却效果。

(3) 外冷却所用冷却剂容易选择,冷却剂的几何因素、物理和化学性质等都比内冷却材料的要求宽松,铁丝、金属片、玻璃纤维甚至普通水都可以作为物理冷却剂。有时,带有酸性和碱性的化合物也可以作为外冷却的化学冷却剂。如果选择得当(如选用值高、分解吸热量大的冷却剂),外冷却效果可以优于内冷却效果。

3.2.2 外冷却方式

绝大部分烟火型气体发生器都采用如下两种外冷却方式。

(1) 夹层液体冷却^[5]。即在不混合冷却剂与反应热气体情况下,让反应所产生的热气体加热夹层中的冷却液并使之蒸发,在冷却液的升温 and 蒸发过程中反应产生的热气体得以冷却。

(2) 冷却室冷却。即让燃烧反应产生的热气体流经特别设计的、放置冷却剂的冷却室。冷却室将流过的热气体降至要求的温度,又不引起燃烧室压力的反常增加。这要求既要增加燃气和冷却剂的接触面积,又要防止气体流动阻力太大。根据这个原则,对于长径比较大的气体发生器,可采用装药与冷却剂径向排列的结构。图1就是这种装置的结构示意图。该结构能提供较大的接触面积,且气体在冷却室流动时不会产生过高的阻力。许多汽车安全气囊用气体发生器都采用这种冷却结构。1997年,人类第一次登陆火星的美国“火星探路者”号火星探测器着陆系统中的气体发生器也是采用这种外冷却装填结构,获得了较为理想的冷却效果^[18]。前不久,美国的“机遇”号和“勇气”号火星探测器着陆系统仍采用了与此类似的冷却结构,也取得了预期的结果^[19]。

为了便于装配和固定,装药和冷却剂也可采用轴向排列的结构(见图2)。这种结构较紧凑,便于加工和装配,也便于固定。文献[4]中介绍的海上救生筏用气体发生器就是采用的这种冷却结构。2000年,美

国的 Stephen Fails 和 Russell Reed^[20] 在发表的文章中介绍了一种防火气体发生器,其中的冷却室也是采用这种与装药轴向排列的冷却结构。

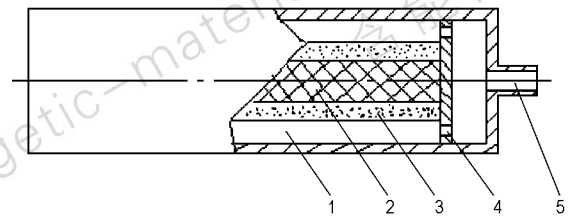


图1 装药与冷却剂径向排列

1—气体通道, 2—气体发生剂, 3—冷却剂,
4—有孔挡板, 5—排气孔

Fig. 1 Radial arrangement

1—gas rout, 2—gas generating agent,
3—coolant, 4—baffle with holes, 5—vent

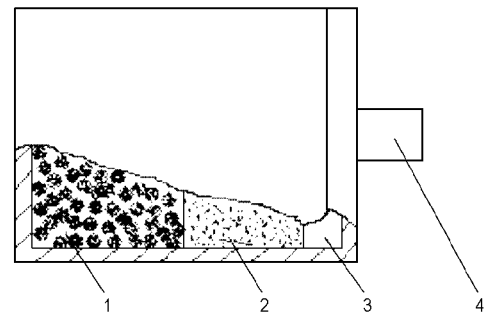


图2 装药与冷却剂轴向排列

1—气体发生剂, 2—冷却剂, 3—气体通道, 4—排气口

Fig. 2 Axes Arrangement

1—gas generating agent, 2—coolant, 3—gas rout, 4—vent

3.3 内冷却与外冷却的综合应用

由于内、外冷却各有优点,许多气体发生器常设计成内冷却与外冷却同时存在的复合型冷却方式,以此达到良好冷却效果,并过滤掉气体发生剂燃烧的固体残渣。2003年,孙志刚等^[17]在双基推进剂用于气囊充气的可行性探讨试验中采用了内冷却与外冷却综合作用的方法。他们采用自制 SM 2001 燃气发生剂配方,同时加入 1% 的燃烧稳定剂 A 以及 15% 的降温材料 B。双基推进剂正常燃烧温度为 1 730 ℃,通过内冷却,当燃气离开燃烧室时,温度可降低到 800 ~ 1 000 ℃,这时再利用外冷却方式进一步使气体冷却,实际测量气体出口温度为 186 ℃,满足了气囊对气体温度的要求。

4 冷却过程的数值模拟研究

烟火型气体发生剂的燃烧及燃气冷却过滤是一个伴随着快速化学反应,多维多相的高温、高压、非稳态流动过程。这一复杂过程使人们认识气体发生器内燃烧及冷却过程的特性较为困难,特别是其装置尺寸较小时,仅靠工程计算和少量的实验测试获取的动态信息已显不足。随着计算机技术的迅速发展,数值模拟研究已成为不可缺少的重要研究手段之一。

烟火型气体发生器的产气过程包括气体发生剂的点火燃烧、气体通过冷却过滤层的流动等。这些过程的数值模拟研究要涉及到燃烧理论、化学反应动力学、流体力学、应用数学和计算机技术等许多学科。人们可以根据燃烧、传热、传质过程的不同机理以及流体力学、化学反应动力学、燃烧学等基础理论,建立系统的物理模型和相应的数学模型,选用或编制相应的计算机软件,在计算机上模拟气体发生剂的燃烧过程及冷却剂的冷却过滤过程。从20世纪50年代末到60年代,人们就试图用数值模拟方法研究燃烧过程,在许多的假设条件下,提出了一些非常粗略和简单的模型,定性地预测了燃烧过程的总趋势。70年代以来,由于应用数学和计算机技术的迅速发展,国外给出了一些定量预测结果及较为完善的模型和计算机软件。针对气体发生器设计中的一些实践问题,也发表了相应的数值计算结果^[21]。90年代后,TRW公司的Carrier等^[22]通过对单粒火药燃烧过程的描述,对气体发生剂燃烧火焰速度进行了数值计算;Khalil等^[23]运用DYNA3D对气囊充气过程进行了数值模拟;Barry Butler等人^[24,25]成功地运用集总参数法,对气体发生器点火以后的热化学过程进行了研究,并对燃烧室中的压力及模拟气囊中的压力温度随时间分布情况进行了研究,但对气体流经冷却过滤层的研究过于简单化。国内南京理工大学的黄寅生等^[26]利用多相流动理论建立了一维两相流模拟方程,分别对气体发生剂的燃烧过程以及气体流经冷却过滤层过程进行了数值计算,分析了燃气流运动的规律以及气体发生器内部的压力、温度以及空隙率等特征参数的分布情况,为气体发生器设计提供了一定的依据。

5 结束语

随着目前航天事业日新月异的高速发展,烟火型气体发生器有更为广泛的应用前景,其中气体冷却技术的研究也将成为一个重要的研究课题。今后应着重

研究内冷却与外冷却同时存在的复合型冷却方式。另外,对气体流经冷却室的流动过程也应重点研究。

参考文献:

- [1] 潘功配,杨硕. 烟火学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997. 373-375.
PAN Gong-pei, YANG Shuo. Principle of Pyrotechnics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997. 373-375.
- [2] Kirchoff. Pelletizable, rapid and cool burning solid nitrogen gas generant[P]. USP 4203787, 1980.
- [3] Katz. Impact protection device for the occupants of motor vehicles with a filter to clean the driving gas[P]. USP 4840397, 1989.
- [4] 刘淑贞. 汽车安全气囊和海上救生筏[J]. 火工品, 1991, (3): 22-28.
LIU Shu-zhen. The safe Airbag on the automobile and lifesaving rubber raft on the sea[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1991, (3): 22-28.
- [5] 徐复铭,包昌火,谢文心,等编著. 能源火炸药在工农业中的应用: 气体发生剂及气体发生器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 237-246.
XU Fu-ming, BAO Chang-huo, XIE Wen-xin, et al. Gas Generating Agent and Gas Generator [M]. Beijing: National Defence Industry Book Concern, 1989. 237-246.
- [6] 何顺录,赵才,李成云. 汽车安全气囊用氮气发生剂[P]. CN 1145329, 1997.
HE Shun-lu, ZHAO Cai, LI Cheng-yun. Nitrogen gas generating composition useful in vehicle safe airbag [P]. CN 1145329, 1997.
- [7] Lundstrom N H. Non-corrosive, odorless gas generating composition[P]. USP 3865660, 1975.
- [8] Sidebottem E W. Gas generating composition[P]. USP 3883373, 1975.
- [9] Divalentin M A. Porous propellant grain and method of making same[P]. USP 3996079, 1976.
- [10] Munich Z S, Holzinger W. Gas-generating composition [P]. USP 4834817, 1989.
- [11] Ube Y I, Kitakyushu K I, Yamaguchi M M, et al. Gas generating composition for automobile airbag [P]. USP 5178696, 1993.
- [12] Nippon Kayaku K K. Gas generating composition for airbag [P]. JP 08283090-A, 1996.
- [13] 黄寅生,戴实之,沈瑞琪,等. 含叠氮化钠气体发生剂热动力学试验研究[J]. 火炸药学报, 1997, 20(2): 47-48.
HUANG Yin-sheng, DAI Shi-zhi, SHEN Rui-qi, et al. Experimental study on thermodynamics of gas generating a-

- gent with sodium azide[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1997, 20(2): 47-48.
- [14] 成一,陈守文. NFA 气体发生器的研究与发展[J]. 汽车技术, 1998, (7): 44.
CHENG Yi, CHEN Shou-wen. Study and development of NFA gas generator [J]. *Journal of vehicle technology*, 1998, (7): 44.
- [15] 陈守文,成一. 汽车安全气囊用非叠氮化物气体发生剂的研究[J]. 汽车研究与开发, 2002, (4): 55-56.
CHEN Shou-wen, CHENG Yi. Study of non-azide gas generating agent useful in vehicle safe airbag[J]. *Journal of vehicle study*, 2002, (4): 55-56.
- [16] 成一,陈守文. PAK 气体发生剂的燃气特性研究[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(4): 59-61.
CHENG Yi, CHEN Shou-wen. Study on burning characteristics of PAK gas generator propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2001, 24(4): 59-61.
- [17] 孙志刚,李朝阳. 双基推进剂用于气囊充气的可行性探讨[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 62-64.
SUN Zhi-gang, LI Zhao-yang. Study on probability of double base propellant for airbag inflation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(1): 62-64.
- [18] Cadogan D, Sandy C, Grahne M. Development and evaluation of the Mars pathfinder inflatable airbag landing system[R]. Paper IAF-98-I. 6. 02.
- [19] James Stein, Charles Sandy. Recent developments in inflatable airbag impact attenuation systems for Mars exploration[R]. Paper AAAF-061.
- [20] Stephen Fails, Russell Reed. Advanced propellant/additive development for fire suppressing gas generators[R]. Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, 2000. 361-370.
- [21] 杨正权,张珊珊. 固体推进剂燃烧的数值模拟研究[J]. 兵工学报·火化工分册, 1996, 9(2): 57-62.
YANG Zheng-quan, ZHANG Shan-shan. Numerical simulation research of solid propellant combustion [J]. *ACTA Armamentaria · the Fascicule of Explosives & Propellants*, 1996, 9(2): 57-62.
- [22] Carrier G F, Fendell F E, Fink IV S F. Deflagration of mixed powders for rapid gas generation [J]. *Combustion Science and Technology*, 1994, (100): 29-55.
- [23] Khalil T B, Wasko R J, Hallquist J O, et al. Development of a 3-dimensional finite element model of airbag development and interactions with an occupant using DYNA 3D [J]. *SAE Trans.*, 1991(10): 251.
- [24] Barry Butler P, Jian Kang, Herman Krier. Modeling and numerical simulation of the internal thermochemistry of automotive airbag inflators [J]. *Progress of Energy Combustion Science*, 1993, (19): 365-382.
- [25] Barry Butler P, Herman Krier, Ernst M Faigle, et al. Numerical simulation of passenger-side automotive airbag inflators [J]. *SAE Technical Paper Series*, 1992, 920848, P171-176.
- [26] 黄寅生. 汽车安全气囊的药剂燃烧特性实验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 1996.
HUANG Yin-sheng. Experiment research and numerical simulation of gas generating agent combustion characteristic for automobile safety airbag [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1996.

Progress in Cooling Technology for Pyrotechnic Gas Generator

LI Chang, DU Zhi-ming

(State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Pyrotechnic gas generator is widely used for various airbag systems and lifesaving equipment. Coolant needs to be appended in the gas generator to absorb heat which was given out by combustion of gas generating agent, thereby it reduces the temperature of gas. In this paper, the choice of physical coolant and chemical coolant for pyrotechnic gas generator, cooling methods, the configuration design of cooling cell and numerical simulation of cooling course are reviewed.

Key words: pyrotechnics; gas generator; coolant; cooling technology; review