

文章编号: 1006-9941(2010)04-0460-07

复合固体推进剂静电危险性研究进展

鲍桐, 张炜

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 从复合固体推进剂静电危险性实验测试方法、理论预估和静电对推进剂的作用机理等三方面, 综述了国内外固体推进剂静电危险性研究的进展。国外使用有关设备测量实际作用于推进剂试样上的静电能量作为静电感度评价标准; “渗透系数”模型可实现对推进剂静电危险性的简单预估, 基于热点形成发展的计算模型建立了推进剂的静电危险性与推进剂力学、燃烧性能之间的联系; 利用红外测温方法, 观察到了静电作用过程中热辐射和热传导, 形成了广为接受的“热点”形成机理。国内尚需加强复合固体推进剂静电危险性的系统研究, 形成可靠的复合固体推进剂静电危险性评价方法。

关键词: 物理化学; 复合固体推进剂; 静电危险性

中图分类号: TJ55; O64; V512.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.023

1 引言

复合固体推进剂由于比冲高、原材料易得, 可实现贴壁浇注式装药, 在火箭、导弹, 尤其是战略导弹中, 获得了广泛的应用。作为一种含能材料, 复合固体推进剂对热、机械、冲击波、静电等外界激源具有一定的敏感性。如果在生产、储存、运输等过程中受到超过一定强度的外界刺激源的作用, 可能会燃烧甚至爆炸, 酿成灾难性后果。而静电常常是重大事故的罪魁祸首之一。如 1985 年 1 月 11 日, 美国^[1] 部署在前西德的潘兴 II 导弹发生发动机爆炸事故, 造成 3 人死亡, 16 人受伤, 损失惨重。经过深入的调查研究^[2], 事故原因归结为复合材料壳体与运输车上的支架摩擦起电, 在推进剂药柱局部形成的高电场, 击穿药柱并形成静电放电, 药柱被点燃, 进而发生爆炸。1993 年国内某研究所^[3] 卧式混合机爆炸, 据分析是由于加料过程中, 物料和器壁摩擦而产生静电, 引燃物料所致。因此, 开展固体推进剂静电安全性研究, 形成可靠的静电危险性评价方法, 加深静电对推进剂的作用机理的认识, 有利于探索相应的降感技术, 为复合固体推进剂的安全使用提供帮助。

2 静电危险性实验测试方法

静电危险性测试的基本原理: 先将一个电容器 (C) 接到高压电源充电, 再把充电后的电容器经过限流电阻 (R) 连接到推进剂试样上进行放电 (即 RC 放电), 根据试样点燃与否, 调整充电电压 (U) 或电容值, 改变作用在试样上的放电能量, 求得试样的 50% 静电点火能量或最小点火能等参数, 作为推进剂静电危险性 (也称为静电感度) 大小的判据。

准确地判断推进剂在静电感度测试中是否发生分解、燃烧和爆炸等危险性变化是测试中的关键问题。一般来说, 可以借鉴火炸药感度测试中火炸药是否爆发的判断方法, 采用听声响、看有无发烟和火光等感官判断。但是这种判别方法存在人为因素的影响, 因此需要进一步改进。张志敏^[4] 采用毛细管测压法, 直接测定静电火花作用下样品在爆燃小室内是否发生分解使压力上升作为判断依据。刘培德^[4] 建议, 采用气相色谱法分析样品在静电火花作用下发生反应生成的气体产物, 来判断测试中样品分解与否。Lee^[5] 使用红外测温装置记录试样在测试过程中的温度变化, 以出现剧烈温升作为分解标志。由于毛细管测压法简便易行, 成为复合固体推进剂静电火花感度测试标准^[6] 中推荐使用的方法。

法国和美国在复合固体推进剂静电危险性测试研究方面开展了较多的工作。早在 20 世纪 80 年代初法国火炸药公司 (SNPE) 的 Kent 和 Rat^[7] 就采用电容

收稿日期: 2009-10-19; 修回日期: 2009-12-28

基金项目: 国家安全重大基础研究课题子专题 (批准号: 61337030301)

作者简介: 鲍桐 (1982 -), 男, 博士生, 主要从事推进剂安全性研究。

e-mail: baotong2000@sohu.com

放电装置对含铝推进剂的静电感度进行研究,他们采用的实验装置如图 1 所示。该测试方法的特点:(1) 电极与推进剂之间没有间隙,减少了空气放电造成的能量损失;(2) 试样的尺寸较大,降低了小尺寸试样引起的散热效应。

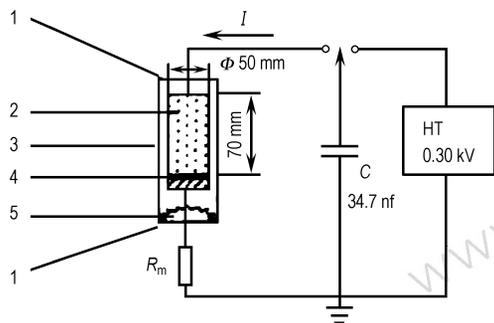


图 1 文献[7]中使用的测试装置示意图

1—电极, 2—推进剂, 3—透明罩, 4—金属膜, 5—干燥剂

Fig.1 Sketch map of the test device used in reference [7]

1—electrode, 2—propellant sample, 3—transparent cover, 4—metal film, 5—desiccant

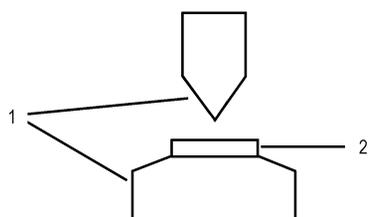


图 2 固定式电极示意图

1—电极, 2—试样

Fig.2 Sketch map of the fixed electrode

1—electrode, 2—sample

在 1985 年“潘兴”导弹事故前,美国^[8]主流的测试方法是采用矿务局(Bureau of Mine)的炸药静电火花感度测试装置,着重研究固体推进剂的静电火花感度。采用固定电极式的测试装置,试样与电极之间有空隙(图 2)。该装置实际上考察的是放电形成的电火花是否能够引燃推进剂试样。但火花放电过程中存在能量耗散(击穿空气等效效应),且小尺寸试样的散热过大。Mellor 等^[9]重点考察了电极形状、电极材料、放电时间等因素对测试结果的影响规律,指出这种装置测试时使用的样品量偏少,需要借鉴气体和液滴样品的火花引燃测试和法国所采用的推进剂静电放电感度测试方法。

1985 年“潘兴”导弹事故发生后,美国有关机构联系法国 SNPE 公司^[10]开展联合调查,会谈结论之一

就是决定采取类似于“法国测试方法”的方法来测试潘兴 II 推进剂的静电感度。该测试是在 3 月进行的。起初两天,在室温环境下的实验没有发现试样起反应,然后将试样放在事故发生时的温度条件下进行实验,结果发生了点燃现象。这是因为低温条件降低了材料的电导率,导致了静电的持续积累,当静电积累到一定强度,在推进剂内部发生击穿放电,推进剂被引燃。按照美国的测试方法,认为事故中使用的推进剂曾是静电安全性能最好品种之一。该事件促使美国有关研究机构改进传统的测试方法,寻求更加准确的推进剂静电危险性表征方法。主要的改进之处在于使用有关技术手段,客观地记录作用在试样上的实际放电能量,而非以往简单地认定电容器上的总能量 $1/2(CU^2)$ 都作用到了试样上,以实际作用能量作为反映推进剂的静电危险性的指标。

据文献[11]报道,在火炸药静电感度测试领域,美国空军于 20 世纪 70 年代设计了一种静电感度测试系统,将示波器用于电压-时间、电流-时间信号的记录,然后积分计算静电火花能量,作为衡量火炸药生产、加工和使用中静电感度的标准仪器。但是 1985 年之前,类似的装置并没有用于固体推进剂的静电危险性测试。

1987 年,海军水面武器中心(Naval Surface Warfare Center)^[9]设计了一套电容放电装置,用于测量静电对含铝炸药作用时的能量积累。该装置的电压、电流信号记录部分与上述美国空军的火炸药静电感度测试仪器类似。针对含铝炸药试样的特点,装置在电极设计上做了改进,因为该类炸药具有一定的弹性,所以装置中采用平板电极,且电极之间的距离可调,以确保试样与上下两个电极可靠接触,减少空气放电引起的能量损耗,以保证测试精度。该测试装置可应用于固体推进剂静电危险性测试。

1990 年, Lee 在其博士论文^[5]中对固体推进剂静电危险性测试装置进行了改进:电压、电流信号记录部分采用了精度更好的示波器、高压探头、电流探头。两电极间的距离可调,并能够对有弹性的试样保持一定的压力作用;试样测试前,先涂一层导电胶,以确保试样与电极之间导通;用高速摄影仪记录实验现象,分析推进剂在静电放电作用下的点火过程,使用红外测温方法记录了试样在点火过程中的温度变化。

与国外的发展历程相似,国内推进剂行业的静电危险性测试方法一直借鉴火炸药行业的有关经验。目前国内最常见的测量装置是静电火花感度仪,与美国矿务局的实验装置一致,如原航天工业部标准^[6]中规定测量

固体推进剂试样时两电极之间的距离保持为1 mm, 推进剂试样的质量 30 ~ 35 mg。但这类装置直接用来测试推进剂的静电危险性存在以下问题: (1) 实验中的能量损耗难以量化表示; 以 $1/2(CU^2)$ 为静电作用能存在系统误差; (2) 试样质量很小, 一般是毫克级, 试样的散热效应太大, 样品的危险性可能无法如实地反映。关于上述两个问题, 刘天儒^[12] 对片状和粉状推进剂样品, 进行了静电危险性的测试, 发现按照 $1/2(CU^2)$ 作为静电作用能存在很大误差, 需要改进。

石家庄军械工程学院^[13-15] 研制了一种测量电火工品静电感度的方法, 称为“真实静电感度测试方法”, 测试原理如图 3 所示, 其包含电压、电流数据采集处理系统(图 4)。与国外有关测试装置类似, 该测试方法也采用示波器记录电压-时间、电流-时间数据, 可以准确地记录实际作用到试样上的能量大小。该学院的李德鹏等^[14] 利用该装置进行了几种火炸药静电感度的测试, 发现实际作用于试样上的静电放电能量平均为 $1/2(CU^2)$ 的 40% 左右, 两者之间存在较大的误差。这说明用实际作用能表征试样的静电感度更加可靠, 但这种静电感度的测试方法尚未在火炸药行业获得广泛应用, 也未用于固体推进剂静电危险性测试。

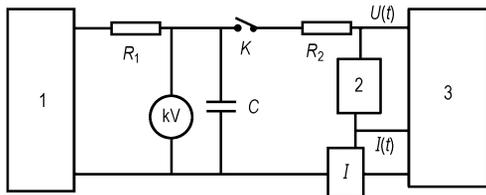


图 3 电火工品“真实静电感度测试”原理图^[13]

1—高压直流电源, 2—试样, 3—数据采集处理系统

Fig. 3 “The real electrostatic sensitivity test” scheme of electric explosive device

1—high voltage DC source, 2—sample, 3—data gathering and processing system

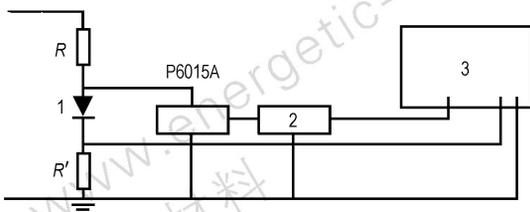


图 4 “真实静电感度测试系统”中电压电流测量装置^[14]

1—电极, 2—补偿器, 3—示波器

Fig. 4 The voltage and current test device in “the real electrostatic sensitivity test system”

1—electrode, 2—compensator, 3—oscillograph

总体来说, 在推进剂静电危险性测试领域, 目前国内最常见的测量装置还是静电火花感度仪, 相对精确的真实静电感度测试方法还未获得应用。另外在测试技术方面, 针对固体推进剂样品特性的某些技术细节的研究, 还不够深入, 例如采取技术措施保证电极与试样之间导通良好, 以降低空气放电引起的能量损耗, 提高测试精度等。

3 推进剂静电危险性规律及理论预估

在固体推进剂静电危险性实验的基础上, 有关研究者对实验结果进行总结归纳, 形成了对推进剂静电危险性的一些规律认识, 提出了一些理论预估方法。与实验测试方法相比, 理论预估方法相对安全、廉价, 可作为实验研究的有效补充。

20 世纪 80 年代初 Kent 和 Rat^[7] 测量了不同温度下推进剂试样的体电阻率, 他们发现体电阻率取对数后与温度的倒数成线性关系, 某些试样的直线会出现拐点(图 5), 表现出与半导体类似的特性。他们指出, 服从折线 I 的推进剂是对静电敏感的, 而服从折线 II、III 的推进剂往往对静电不敏感。

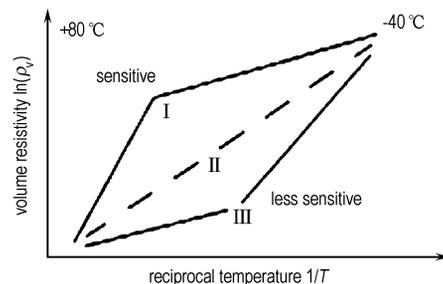


图 5 文献[7]中体电阻率与温度变化曲线

Fig. 5 Volume resistivity vs $(1/T)$ in reference [7]

他们还提出了渗透系数 (P), 以此对推进剂的静电危险性进行简单的理论预估。该系数定义为:

$$P = \frac{N_c / N_i}{\sigma_L V_L} \quad (1)$$

式中, N_c 表示导电粒子的数目 (Al); N_i 表示绝缘粒子的数目 (AP、HMX 等); σ_L 表示粘合剂的电导率; V_L 表示单位质量粘合剂的体积。他们认为 P 值高于一定数值的推进剂对静电敏感, 反之则对静电不敏感。该系数建立了静电危险性与推进剂组分物性参数的联系, 其计算简便, 能在一定程度上预估推进剂的静电敏感性; 但所包含的信息有限, 不足以全面地反映复合固体推进剂静电危险性的影响因素。

1990年海军武器中心(Naval Weapon Center)的Covino^[11]研究了复合固体推进剂的静电火花感度与推进剂燃速之间的关系。他指出推进剂的燃速并不是影响静电感度的唯一因素,推进剂的电学性能,如击穿电压强度、介电常数等对静电感度也有较大影响。1991年Covino和Hudson^[8]总结了固体发动机中静电产生的七种原因:(1)绝缘体之间的摩擦起电;(2)在外电场作用下,材料发生电极化;(3)材料内部温度升高引起的热电子发射;(4)光电效应引起的光电子发射;(5)放射性衰退引起的电子发射;(6)材料机械损伤过程中产生电子;(7)材料降温过程中产生电压。他们还提出了评价推进剂静电危险性的五个步骤。第一步计算包含更多材料参数的改进后的渗透系数 P_{imp} :

$$P_{imp} = \left(\frac{\rho_n}{\rho_c} \right) \left(\frac{\text{wt}\%C}{\text{wt}\%nf} \right) \left(\frac{d_{nf}}{d_{ci}} \right)^3 \left[\frac{\rho_b}{\text{wt}\%b} \left(\frac{\text{wt}\%C}{\rho_c} + \frac{\text{wt}\%n}{\rho_n} \right) + 1 \right] \rho_{vb} \quad (2)$$

式中, ρ_n 表示绝缘粒子的密度; ρ_c 表示导电粒子的密度; ρ_b 表示粘合剂的密度; ρ_{vb} 表示粘合剂的体电阻;wt% C表示导电粒子的质量百分数;wt% nf表示细粒度绝缘粒子的质量百分数;wt% b表示粘合剂的质量百分数;wt% n表示粗粒度绝缘粒子的质量百分数; d_{nf} 表示细粒度绝缘粒子的直径; d_{ci} 表示细粒度导电粒子的直径。 P_{imp} 大于 $10^{10} \Omega \cdot m$ 的推进剂可能对静电敏感。第二步测量体电阻,电阻-温度曲线符合图5中折线I的推进剂是对静电比较敏感的。第三步测试推进剂试样的介电常数,介电常数大的推进剂可以储存较多的电能。第四步进行介电击穿实验,测试试样的击穿电压。第五步进行大尺寸试样的R-C放电测试,考察引燃或引爆试样所需的能量。通过这五个步骤,综合评价推进剂静电危险性。

Raun^[16]建立了传热传质方程,对静电放电引起的固体推进剂内部热点的形成与发展进行了数值模拟,计算了不同静电作用时间和外界压强条件下,点燃复合固体推进剂试样所需的静电能,考察了推进剂本身的力学性能、燃烧性能等对静电感度的影响。结果表明,静电作用时间、外界压强、推进剂的燃速、热分解反应活化能和断裂韧性等对推进剂的最小静电点火能量有较大影响。

Daveñas和Rat^[10]分析了推进剂静电危险性的影响因素,他们认为推进剂样品的尺寸越大,越有利于热点生成;推进剂自身的硬度越高,感度越高;降低环境温度,推进剂的感度增加;球形铝粉的感度要低于

不规则形状的铝粉;燃速增大,有利于推进剂形成热点,导致推进剂的感度增高。

国内固体推进剂静电危险性研究主要集中于部分配方的实验测试方面,尚没有针对静电危险性规律总结的文献报道。理论预估方面,一些研究人员利用渗透系数理论,评价了推进剂配方的静电安全性。朱传俊等^[17]在分析高燃速发动机脱模静电安全性时,使用了理论预估的方法。他们采用公式(1)计算了某型号发动机用高燃速HTPB推进剂的渗透系数,计算结果为 $2 \times 10^{11} \Omega \cdot m$,以此推断该高燃速推进剂属于静电敏感型推进剂。但是目前国内还没有更加深入的研究结果见诸文献,也没有研究人员提出新的预估方法。

降低复合固体推进剂的静电危险性,可从两方面采取技术措施,一方面是通过调整配方,降低静电累积程度,以降低危险性;另一种是在推进剂生产、存储、运输各个环节采取安全措施,消除危险静电源。如上文所述,复合固体推进剂的静电危险性与推进剂的力学性能、燃烧性能、铝粉的形貌等因素有关。一般来说,固体发动机对推进剂的力学性能、燃烧性能有一定的要求,其可调范围较窄,因此从调整推进剂的配方角度降低复合固体推进剂静电危险性,一般要求在不影响其他主要性能的基础上加以调节,所能采取的技术措施也很有限,例如使用规则球形铝粉、对静电感度较高的氧化剂粉料采取包覆等表面改性措施等。工业部门广泛采取的安全措施包括静电接地技术、加装消电器等消电措施,以降低AP等粉料在加料和混合中的静电积聚;另外通过合理的工装设计与选材,对有可能接触和摩擦的材料,选取带电序列中顺序邻近者,并尽可能降低两种材料间的接触摩擦面积和次数,以使产生的静电量最小,也是有效的技术措施。

4 静电作用机理研究

在推进剂静电危险性实验测试和理论预估研究的基础上,部分学者开展了更加深入的实验研究和理论分析,希望从静电对推进剂作用机理的角度,加深对推进剂静电危险性的认识。

1985年“潘兴”导弹事故前,法国SNPE公司就深入开展了固体推进剂静电感度的研究工作,其中Kent和Rat^[7]的工作具有代表性。他们通过高速摄影记录实验过程,使用X射线扫描实验前后的推进剂试样,结果表明对静电敏感的推进剂受到静电作用体现在两方面:一是引燃,在引燃过程中,试样中出现裂纹,火焰就从这些裂纹中产生;二是裂纹的产生和扩展。若

静电作用强度不足以引燃,试样中会产生大量细小裂纹,保持静电作用,小裂纹会扩展形成大裂纹,裂纹的产生和扩展总是出现在引燃之前。引起裂纹扩展,推进剂所受的电压必须超过某一临界值;而引起燃烧时,施加给推进剂的能量必须超过临界值。

他们研究了受到持续增长的电压作用时,推进剂中的电流变化。如图6所示,在较低电压下,电流与电压服从欧姆定律;随着电压的增加,电流相应地线性增长;在接近击穿电压时, I (电流)- U (电压)曲线不再保持线性,会发生振荡;达到击穿电压后,电流迅速增大,推进剂试样产生裂纹或被引燃。Roux等^[18]将 I - U 曲线的振荡部分归结为推进剂内发生了某种形式的击穿,若保持该强度的电压作用足够长时间,或施加更高强度的电压,整个推进剂就会发生电击穿,甚至被引燃。总体而言,Kent和Rat在固体推进剂静电作用机理研究上揭示了很重要的两个方面,即电击穿与裂纹形成、扩展,为该领域的后续研究奠定了基础。但因为当时的条件限制,其研究工作局限于宏观层面,未涉及到细观裂纹扩展、击穿,更没有提及“热点”理论。

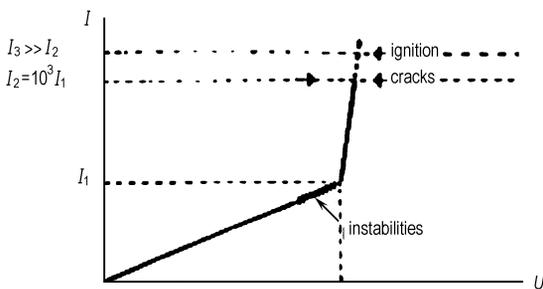


图6 推进剂试样的 I - U 曲线^[7]

Fig. 6 I - U curve in the propellant sample

1985年“潘兴”导弹事故后,美国军方资助多家研究机构深入开展推进剂的静电危险性研究,进行了静电对推进剂作用机理的研究探索。1989年4月,陆军Army Research Office^[11]组织召开了关于复合固体推进剂静电引燃的研讨会,总结这段时期的研究成果。

在这次研讨会上,Electro Magnetic Applications公司的Larson等通过理论计算模拟受到静电放电作用时,推进剂内的电场分布、可能发生击穿的位置以及发生击穿时的电流通道,模拟了复合固体推进剂静电危险性发展过程中的一部分。Physics International公司的Schneider等测量了电弧放电的能量密度,并采用划分不规则网格的方法研究推进剂的电学行为。Electro Magnetic Applications公司的SunderRaj

等^[19]采用有限元法计算了推进剂中的电场分布情况。科罗拉多大学的Gyure等^[20]采用Monte Carlo法产生金属粒子随机分布于绝缘体中的二维几何模型,再采用数值方法求解该几何模型下的Laplace方程,获得在均一外电场作用下试样的电场分布、电击穿区域和击穿路径。图7中椭圆线所圈区域为计算所得的电击穿路径,图中金属粒子随机分布于绝缘介电质中,击穿发生在一条金属粒子间有较多接触的路径上。计算表明发生击穿所需的电场强度随金属粒子间平均距离的增大而线性增加,该计算结果与实验结论比较符合。

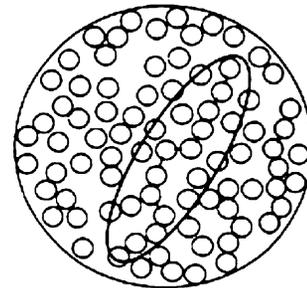


图7 击穿路径计算结果^[20]

Fig. 7 Numeration result of breakdown path

这段时期,美国的研究工作侧重于研究静电作用下推进剂试样的电学特性,从电场分布、电击穿区域和击穿路径等方面解释静电作用机理,这些研究对从理论上认识静电作用机理进行了有益的探索,但是不足之处在于这些工作基本上都是理论分析和数值模拟,缺乏必要的实验基础。

1990年, Lee^[5]使用高速摄影仪(2×10^7 f/s)记录了HTPB推进剂试样在受到静电放电作用时的变化,并使用红外测温的方法记录了试样在点火过程中的温度变化。他观察到在静电能量的强度为400 ns内850 mJ时,试样上出现了尺寸为 $(61.8 \pm 21.4) \mu\text{m}$ 的裂纹。红外测温的结果表明,裂纹区内等离子体的温度高达13000 K。他建立了解析模型预测放电通道的扩展情况,建立了热化学动力学方程,模拟裂纹区内等离子体对周围推进剂的热辐射和热传导作用。他的工作集基础实验与理论分析于一体,建立了静电作用下,推进剂内部热点的分析模型。

1995年Mellor等^[21]总结了前人的研究成果,提出了推进剂受到静电刺激后的能量转化和危险演变模型。如图8所示,该模型将静电作用归结为热激励,用热点的形成及发展变化描述推进剂受到静电刺激后的作用机理,是目前广为接受的静电作用机理。

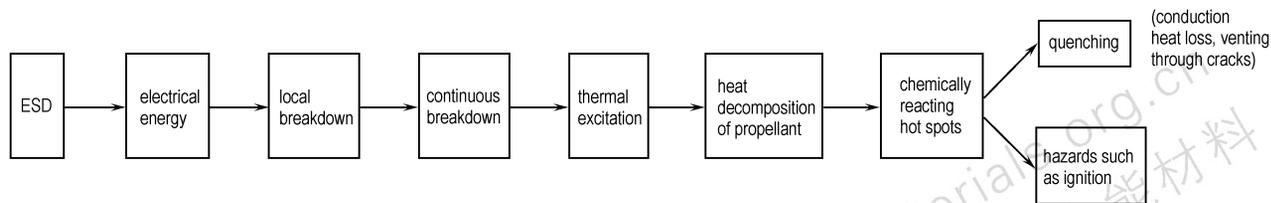


图8 Mellor A M 提出的推进剂静电作用机理模型^[21]

Fig.8 Electrostatic effect mechanism of propellant proposed by Mellor A M

从文献检索的情况看,国内关于静电对推进剂作用机理方面的研究尚没有文献报道,加强该方面的研究,有利于加深对推进剂静电危险性的认识,为探索可靠的静电危险性理论预估方法和相应的降感技术奠定基础。

5 结束语

综上所述,国内复合固体推进剂静电危险性研究尚落后于国外,最主要的问题是缺乏系统性的研究,未形成可靠的复合固体推进剂静电危险性评价方法^[22]。由于涉及配方保密等因素,国外的许多研究细节无法获知,这就要求我们必须加强复合固体推进剂静电危险性的自主研究,在静电危险性实验研究的基础上,开展理论分析,加深静电作用机理的认识,形成自己的复合固体推进剂静电危险性评估方法体系,客观准确地评价复合固体推进剂的静电危险性,在此基础上,形成更为有效的降感技术手段,为复合固体推进剂的安全使用提供技术支持。

参考文献:

- [1] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社,1994: 634. HOU Lin-fa. Composite Solid Propellant[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House,1994: 634.
- [2] Knauer J A. Technical Investigation of 11 January 1985 Pershing II motor fire [C] // Department of Defense Explosives Safety Board. Minutes of the 22nd Explosives Safety Seminar, Anaheim California, 1986. Alexandria, Virginia: Department of Defense Explosives Safety Board, 1986: 1005 - 1014.
- [3] 吴玉金,野延年. 混合生产中固体推进剂的安全问题[J]. 固体火箭技术,1998,21(4): 51 - 53. WU Yu-jin, YE Yan-nian. Safety problems in solid propellant mixing[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1998, 21(4): 51 - 53.
- [4] 曹海峰,王国立. 火炸药静电感度研究的进展[J]. 矿冶,2002,11(1): 17 - 20. CAO Hai-feng, WANG Guo-li. Progress in research on sensitivity of powder and explosive to static electricity[J]. *Mining & Metallurgy*, 2002, 11(1): 17 - 20.
- [5] Lee R J. Ignition in solid energetic materials due to electrical discharge[D]. Washington D C: The American University, 1996.
- [6] 复合固体推进剂及其他火炸药静电火花感度测试方法[S]. QJ1469-88. Electrostatic spark sensitivity test of composite solid propellant and other explosives[S]. QJ1469-88.
- [7] Kent R, Rat R. Static electricity phenomena in the manufacture and handling of solid propellants[J]. *Journal of Electrostatics*, 1985, 17(3): 299 - 312.
- [8] Covino J, Hudson F E. Current assessment methodology for electrostatic discharge hazards of energetic materials[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1991, 7(6): 894 - 903.
- [9] Mellor A M, Stoops D R, Rudy T P, et al. Optimization of spark and ESD propellant sensitivity tests. a review[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1990, 15(1): 1 - 7.
- [10] Davenas A, Rat R. Sensitivity of solid rocket motors to electrostatic discharge: history and future[R]. AIAA 99-2930, 1999.
- [11] Mellor A M. Workshop on ESD ignition of composite solid propellants[R]. ADA218599, 1990.
- [12] 刘天儒. 固体火箭发动机静电着火研究[R]. GF-A0021393G, 1996. LIU Tian-ru. Research on electrostatic ignition of solid rocket motor[R]. GF-A0021393G, 1996.
- [13] 刘尚合, 智敦旺, 刘直承, 等. 一种测量电火工品静电感度的方法: 中国, CN1055054A[P]. 1991-11-2. LIU Shang-he, ZHI Dun-wang, LIU Zhi-cheng, et al. A method to test electrostatic sensitivity of electric explosive device: China, CN1055054A[P]. 1991-11-2.
- [14] 李德鹏, 汪佩兰, 徐立新. 火炸药相对和实际静电感度的对比分析[J]. 兵工学报, 1997, 18(2): 162 - 164. LI De-peng, WANG Pei-lan, XU Li-xin. Comparison of the relative and real electrostatic sensitivities of propellants and explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 1997, 18(2): 162 - 164.
- [15] 魏光辉, 国海广, 孙永卫. 电火工品静电安全性评价方法研究[J]. 火工品, 2005(2): 21 - 24. WEI Guang-hui, GUO Hai-guang, SUN Yong-wei. Research on the evaluation method of electrostatic safety for electric explosive device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005(2): 21 - 24.
- [16] Raun R L. Modeling of ESD-induced confined ignition of solid rocket propellants[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 120(1): 107 - 124.
- [17] 朱传俊, 李文岛, 许力莱. 高燃速发动机脱模静电安全性分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 663 - 668. ZHU Chuan-jun, LI Wen-dao, XU Li-lai. Electrostatic safety analysis on mandrel removing of a high burning rate SRM[J]. *Journal of Hebei University(Natural Science Edition)*, 2007, 27(6): 663 - 668.

- [18] Roux M, Auzazeau M, Brassy C. Electric spark and esd sensitivity of reactive solids, part one: Experimental results and reflection factor for sensitivity test optimization[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, 18(6): 317-324.
- [19] SunderRaj V R. Modeling of electrostatic fields in solid propellants using finite element techniques[C] // IEEE 1989 National Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1989: 113-118.
- [20] Gyure M F, Beale P D. Dielectric breakdown in continuous models of metal-loaded dielectrics[J]. *Physical Review B*, 1992, 46(7): 3736-3746.
- [21] Mellor A M, Wiegand D A, Isom K B. Hot spots history in energetic materials[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 101(1): 26-35.
- [22] 郝海霞, 裴庆, 高红旭. 固体推进剂静电火花敏感度测定方法研究综述[C] // 2005年火炸药学术研讨会, 长沙. 2005: 509-511. HAO Hai-xia, PEI Qing, GAO Hong-xu. Progress in study on testing method of electrostatic spark sensitivity for solid propellant [C] // 2005 Symposium on Explosive, Changsha. 2005: 509-511.

Review on Electrostatic Hazards of Composite Solid Propellant

BAO Tong, ZHANG Wei

(Institute of Aerospace and Materials Engineering National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The progress in research on electrostatic hazards of composite solid propellant was summarized in three aspects, which are experimental testing method, theoretical prediction and electrostatic effect mechanism. Researchers used special equipments to measure the electrostatic energy acted on the sample indeed. This energy was the criterion of electrostatic sensitivity. The percolation coefficient was used as a simple prediction of electrostatic hazard, and the model based on hot spots forming & growth was used to predict the electrostatic hazard with the characters of propellant itself, such as mechanical, burning characters. Based on temperature measured by infrared method and observation heat radiation and transfer caused by electrostatic energy, the popularly accepted "hot spot" mechanism were outlined.

Key words: physical chemistry; composite solid propellant; electrostatics hazards

CLC number: TJ55; O64; V512.3

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.023



第8届"用于凝聚态物质中冲击加载的新模型和爆炸流体力学的计算机程序"国际会议概况

第8届"用于凝聚态物质中冲击加载的新模型和爆炸流体力学的计算机程序"国际会议于2010年5月24-28日,在法国巴黎召开。会议由法国的CEA主办,参会者主要来自于俄罗斯、法国、美国、中国、英国。参会文章135篇,大会报告31篇,其中14篇为特邀报告;分会场口头报告主要分为3类:Hydrodynamic、Microscopic、Experimental,共79篇;海报25篇。

会议的主题包括两方面:一方面是金属系统内的冲击波:适用状态方程、弹塑定理、损伤模型和相关研究;另一方面是炸药中的冲击波:未经反应的炸药及爆轰产物的状态方程、反应区(化学与热力学性质)的分析及相关研究。

在含能材料方面,美国的L. E. Fried、俄罗斯的I. I. Karpenko等从微观尺度层次介绍了冲击、剪切作用下热点的形成过程。会议论文中,多篇文章介绍或总结了相关炸药的点火、成长模型,未反应炸药状态方程及爆轰产物状态方程。如美国的R. Menikoff介绍了三种点火增长模型:DAGMAR、JTF、CREST,其中CREST模型在多篇文章中提到。俄罗斯的B. A. Nadykto对多种未反应炸药及爆轰产物的状态方程进行了归纳总结。实验研究方面,俄罗斯进行了较为细致的研究,他们对非理性炸药、炸药结构对其能量输出的影响、双冲击起爆等方面开展了工作,包括爆炸残骸软回收技术等的研究。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 韩勇供稿)