

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.006

# 双基推进剂用硅橡胶材料包覆设计研究<sup>\*</sup>

武 威 陈 军 杨 月 李艳春 成 一  
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 以自制涂层、硅橡胶为包覆层对双基推进剂进行包覆,采用热分析法对迁移进硅橡胶包覆层的硝化甘油(NG)含量进行分析,结果表明 NG 含量极少;并对其黏结性能进行测试,试验数据表明其黏结可靠、良好。将此包覆设计用于实际装药包覆,将包覆盖装药装填到自制火药启动器后,在常温(25 ℃)、低温(-50 ℃ × 12 h)、高温(60 ℃ × 12 h)条件下和经过高低温冲击试验后进行发动机静态点火试验,测试燃烧室压力-时间曲线( $p-t$  曲线),结果表明工作曲线均正常。

[关键词] 应用化学;硅橡胶;双基推进剂;热分析;高低温冲击试验;发动机静态点火试验; $p-t$  曲线

[分类号] TJ55

## 引言

现代火箭或导弹的固体发动机装药时,需要在固体推进剂的表面涂覆一层特殊的功能材料,以实现固体推进剂的确定模式的燃烧<sup>[1]</sup>,得到可控的推力,确保火箭或导弹的动力系统正常工作。随着对火箭或导弹的设计要求的增高,包覆层的设计也越来越重要。包覆的成败直接关系到发动机的推力能否达到要求,也直接决定固体发动机的内弹道性能、工作时间等。且对于包覆盖装药而言,其使用寿命往往取决于包覆层的寿命,而不是药柱。对于不同类型的固体推进剂,包覆材料、包覆方法也各不相同。在小型发动机设计中,一般采用较高抗压强度的双基或改性双基推进剂<sup>[2]</sup>。双基系装药包覆层通常是一种或几种高分子复合材料,主要由黏结剂、填料和一些功能助剂组成<sup>[3-4]</sup>,它需要满足抗增塑剂迁移性能、黏接性能、力学性能、相容性能、耐烧蚀和少烟等要求<sup>[5]</sup>。包覆层中应用最广泛的高分子材料有:有机硅橡胶、聚氨酯、纤维素衍生物、酚醛树脂、乙丙橡胶等<sup>[3,6]</sup>。由于材料性能各不相同,因此,针对不同的要求,选择合适的包覆层。有机硅橡胶是一种性能优异的新型合成材料,它由硅和氧原子交替形成主链,与硅相连的有机基团组成其侧链,兼备有机材料与无机材料的双重特性<sup>[7]</sup>。因此,具有很多适合用作包覆材料的优点,例如,较高的耐热、耐烧蚀、耐老化和抗硝化甘油迁移能力,同时与无机填料、高分子类材料混溶性好,可以室温固化,是一种很有发

展潜力的包覆材料<sup>[8]</sup>,但其黏结性能、力学性能较差<sup>[9]</sup>。国内外学者为了将硅橡胶成功应用于推进剂的包覆,做了大量研究,但始终没有彻底地解决问题。

为了利用硅橡胶包覆材料的较高的耐热性,改善其黏结性能的不足,提高包覆效果,本文以酚醛树脂、聚乙烯醇缩丁醛和 3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH-550)合成特殊涂层,涂覆在双基推进剂药柱表面,以硅橡胶为包覆材料对药柱进行包覆,用热分析法检测迁移到包覆层中的硝化甘油(NG)含量,并测试其黏结性能;将此种包覆方法应用于实际装药,将包覆盖装药装填到自制火药启动器,测试其在常温(25 ℃)、低温(-50 ℃ × 12 h)、高温(60 ℃ × 12 h)条件下和经过高低温冲击试验后燃烧室的  $p-t$  曲线。

## 1 试验部分

### 1.1 试剂与仪器

TG-DSC-MS-IR 联用仪,型号 STA449C,德国耐驰;Bruker Tensor 27 傅里叶红外光谱仪;微机控制电子万能材料试验机,深圳市新三思材料检测有限公司;ZQ-Y 型压力传感器,湖南宇航科技有限公司;YE3818/01 信号放大器,无锡裕天科技有限公司;数据采集器,深圳市伊璐华科技有限公司;火药启动器,自制;双基推进剂,西安近代化学研究所提供;硅橡胶胶黏剂,南大 704;聚乙烯醇缩丁醛,相对分子量 170 000 ~ 250 000,阿拉丁试剂;酚醛树脂,工业

\* 收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助(NSFC51202113)

作者简介:武威(1991-),男,硕士研究生,主要从事双基推进剂包覆研究。E-mail:wuweioyj@163.com

级,济宁宏明化学试剂有限公司;3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH-550),纯度>98%,广州中杰化工有限公司;无水乙醇,CP;丙酮,CP。

1.2 药柱表面处理及涂层制备

药柱表面处理:将双基推进剂药柱加工为圆柱体形状,截面半径0.5 cm,高度2.5 cm。将药柱的一侧端面用3#砂纸打磨平整,然后用丙酮将药柱擦洗干净,脱脂<sup>[10]</sup>,放入30℃的烘箱内干燥24 h,以保证丙酮挥发干净。以备后续试验使用。

涂层制备:将0.75 g 酚醛树脂、0.5 g 聚乙醇缩丁醛溶解于20 mL 丙酮乙醇(体积比为1:3)混合溶剂中,完全溶解后,滴加2 mL KH-550,在60℃下反应4 h,待溶剂挥发,即得到涂层浆料。将浆料均匀涂覆到已处理的药柱表面,通过调节自制模具(图1)的底部螺栓来控制,涂覆厚度为0.1 mm。

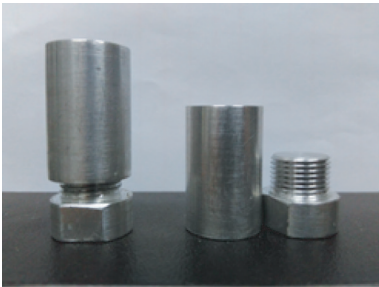


图1 模具结构示意图  
Fig.1 Structure of the mould

1.3 测试样品设计

NG 迁移测试样品设计:将经过处理的药柱放进自制模具中,用螺栓控制药柱高度以调节包覆层浇注厚度,为2 mm,按表1进行硅橡胶的浇注,即在1#号样品中以硅橡胶直接包覆,2#号样品中先以涂层对药柱进行涂覆,再以硅橡胶进行包覆,样品结构见图2(a)。然后将样品在温度为30℃、相对湿度为60%的条件下固化24 h。以备后续试验使用。

黏结性能测试样品设计:参照胶黏剂对接接头拉伸强度的测定方法<sup>[11]</sup>中的规定制作样品,即将未涂覆涂层的2个药柱以硅橡胶胶黏剂进行胶接,通过模具控制硅橡胶层厚度为2 mm,称为3#样品;涂覆有涂层的2个药柱以硅橡胶胶黏剂进行胶接,硅橡胶层厚度为2 mm,称为4#样品。图2(b)为样品

表1 NG 迁移样品设计

Tab.1 Design of NG migration samples		
样品编号	涂层(厚度0.1 mm)	包覆层(厚度2.0 mm)
1#	无	硅橡胶
2#	有	硅橡胶

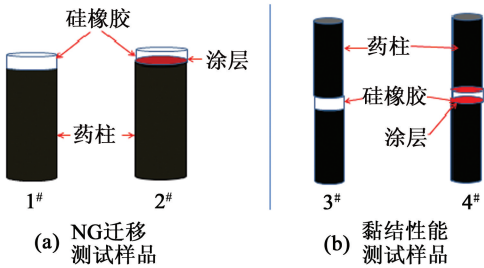


图2 测试样品结构示意图  
Fig. 2 Structure of test samples

结构。将样品放在温度为30℃、相对湿度为60%条件下固化24 h。以备后续试验使用。

1.4 包覆层中 NG 迁移量检测

加速迁移试验:为了缩短 NG 迁移达到平衡的时间,将1#、2#样品和空白硅橡胶放进65℃的烘箱中进行加速迁移试验,时间为24、48、96、120 h。利用模具将包覆层完整切下,检测其中 NG 的量。

NG 迁移量检测:分别将1#、2#样品的包覆层、空白硅橡胶用 TG-DSC 检测 NG 含量。条件为:样品量85 mg,温度40~300℃,升温速率5 K/min,保护气、吹扫气(N<sub>2</sub>)20 mL/min,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚。

1.5 黏结性能测试

加速老化试验:将3#、4#和空白硅橡胶放进65℃的烘箱中进行加速老化试验,时间为0、96、192、288 h。

黏结性能测试:将3#、4#样品、空白硅橡胶在万能材料试验机上进行拉力试验。参照 GB/T 6329—1996 胶黏剂对接接头拉伸强度的测定<sup>[11]</sup>。

1.6 实际装药下 p-t 曲线的测试

将药柱加工为圆柱体状,圆柱体截面直径为3.5 cm,高为4.0 cm。采用对药柱底面、侧面包覆的方式进行实际装药包覆。在双基推进剂侧面、底面涂覆涂层后,以硅橡胶进行包覆,以模具控制包覆层厚度为2 mm,待固化后,脱模,安装点火装置,并将包覆药柱装填到火药启动器后,参照温度冲击试验(冷热冲击试验)标准<sup>[12]</sup>进行低温、高温、高低温交替试验。

低温试验:将火药启动器放在温度为-50℃的低温箱里,保持12 h,并在温度为-50℃的条件下进行点火试验,测火药启动器工作时燃烧室的 p-t 曲线。

常温试验:将火药启动器在25℃条件下进行点火试验,测其 p-t 曲线。

高温试验:将火药启动器放在温度为60℃的恒温箱,保持12 h,并在温度为60℃的条件下进行点

火试验,测其  $p-t$  曲线。

高低温交替试验:将火药启动器放在温度为 60 ℃ 的恒温箱,保持 12 h 后,将其转移到温度为 -50 ℃ 的低温箱,保持 12 h;如此重复 3 次。完成高低温交替试验后,将火药启动器进行点火试验,测其  $p-t$  曲线。

2 结果与讨论

2.1 热分析法检测包覆层中 NG

对空白硅橡胶、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>样品(加速迁移 120 h)进行热分析试验,其 TG 和 DTG-DSC 分析结果如图 3、图 4 所示。

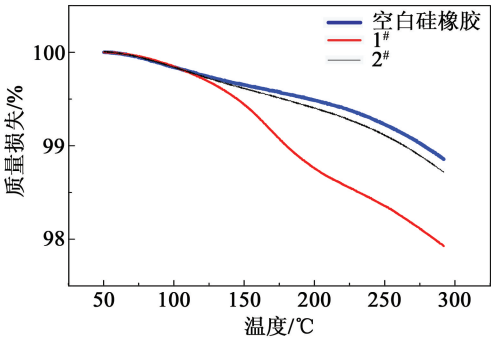


图 3 3 种样品的 TG 分析  
Fig. 3 TG curves of three samples

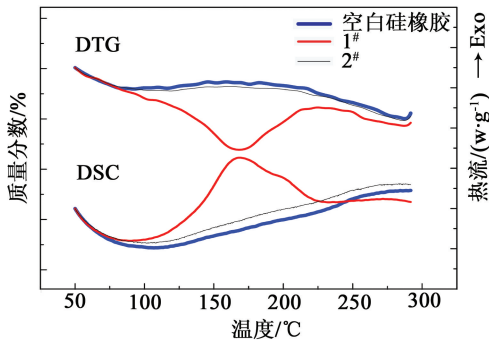


图 4 3 种样品的 DTG-DSC 分析  
Fig. 4 DTG-DSC curves of three samples

图 3 中空白硅橡胶的 TG 曲线可以看出,样品有很小的质量损失,即在 50 ~ 300 ℃ 时,硅橡胶有很少量的分解。而在未涂覆涂层 1<sup>#</sup>样品的 TG 曲线中,在 100 ~ 225 ℃ 时有一个明显的失重台阶,而在 225 ℃ 之后的 TG 曲线与空白硅橡胶的 TG 曲线基本平行。

图 4 中,对比空白硅橡胶与 1<sup>#</sup>样品的 DTG 曲线可以得出,空白硅橡胶在 100 ~ 225 ℃ 时没有明显的峰,而 1<sup>#</sup>样品的 DTG 曲线有明显的峰出现。

在空白硅橡胶与 1<sup>#</sup>样品的 DSC 曲线中,空白硅橡胶在此温度段没有明显的吸、放热峰。而 1<sup>#</sup>样品的 DSC 曲线在 100 ~ 225 ℃ 出现了明显的放热峰,

而根据文献记载<sup>[13]</sup>,纯 NG 的分解温度为 150 ~ 230 ℃,综合对比这两个样品的 TG、DTG 曲线,此放热峰应是包覆层中 NG 的热分解放热峰。且硅橡胶与双基推进剂的相容性很好<sup>[7]</sup>,即表明硅橡胶与双基推进剂组分(NG)之间无相互作用。由此可以得出,硅橡胶包覆层中的 NG 分解发生在 100 ~ 225 ℃。而 2<sup>#</sup>样品的 TG、DTG-DSC 曲线与空白硅橡胶样品的基本重合,表明几乎没有 NG 迁移到 2<sup>#</sup>样品包覆层中。

因此,硅橡胶包覆层中的 NG 含量可以通过将其在 100 ~ 225 ℃ 的失重量减去空白硅橡胶在此温度段的失重量得到。

2.2 包覆层中 NG 含量分析

经过加速迁移试验后,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>样品中的 NG 含量随时间的变化趋势见图 5。由于影响 NG 迁移因素众多,因此每个试验重复 4 次,取数据的平均值和标准偏差。

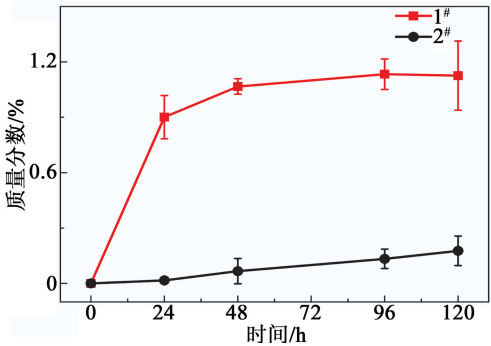


图 5 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>样品的 NG 质量分数变化趋势  
Fig. 5 Change tendency of NG content in Sample 1<sup>#</sup> and Sample 2<sup>#</sup>

如图 5,在 65 ℃ 下进行对样品进行加速迁移试验,在没有涂覆涂层的 1<sup>#</sup>样品中,NG 含量在 0 ~ 48 h 期间不断增加,在 48 ~ 120 h 期间基本处于稳定状态,质量分数为 1.1 % 左右;而 2<sup>#</sup>样品的 NG 含量基本接近 0。因此,当药柱与硅橡胶包覆层间涂覆涂层后,基本没有 NG 从药柱迁移到硅橡胶包覆层中。这可能是因为,涂层中 KH-550 水解后产生的活性基团 R—Si—OH 与酚醛树脂<sup>[14]</sup>、聚乙烯醇缩丁醛分子中的—OH 发生缩合反应,分子之间互相交联,形成了交联密度大的高分子材料,具有较强的抗 NG 迁移能力<sup>[15]</sup>;而硅烷偶联剂水解产物也可发生自身缩合,它的自聚物也具有较强抗 NG 迁移能力<sup>[16]</sup>。

因此,涂层具有优异的抗 NG 迁移能力,可成功阻挡大部分 NG 的迁移。



2.3 黏结性能

对 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>样品和空白硅橡胶经过不同时间的加速老化之后,在万能材料试验机上对其力学性能进行测试,测试方法参照 GB/T 6329—1996<sup>[11]</sup>,为了减小误差,每个试验重复 5 次,取其平均值,结果见表 2。

从表 2 中可以得到,未涂覆涂层的 3<sup>#</sup>样品在未经过加速老化时,硅橡胶与药柱有一定的黏结力,破坏方式为包覆胶层破坏;而经过 288 h 加速老化后,界面与胶层发生严重的脱黏现象,证明硅橡胶单独作为包覆层无法实现与药柱的可靠黏结。涂覆涂层的 4<sup>#</sup>样品在加速老化 288 h 后,其破坏方式为硅橡胶胶层破坏,且涂层与药柱黏结完好。这表明,涂层的添加改善了硅橡胶包覆层与药柱的黏结情况。其原因可能为涂层中含有的未与酚醛树脂、聚乙烯醇缩丁醛完全交联的 Si—OH 与药柱中的硝化棉(NC)分子中未硝化的—OH 发生反应<sup>[17]</sup>;同时,在硅橡胶固化时参与了生胶的交联,即涂层与药柱、硅橡胶有化学键的作用,增加了界面的黏结强度<sup>[18-19]</sup>。

因此,药柱涂覆涂层,以硅橡胶进行包覆,其黏结性能可满足包覆要求。

2.4 实际装药下的 *p-t* 曲线

评价一种包覆材料、包覆工艺是否适用于固体推进剂的包覆,是否具有实用性,最重要的是包覆装药在进行常温、低温(−40℃)和高温(60℃)条件下的静态评估时,是否具有优异的性能<sup>[20]</sup>。这性能是指在发动机工作时,燃烧室的 *p-t* 曲线正常。对一定的固体发动机,燃烧室压强直接影响固体发动机的推力、工作时间等。在固体发动机工作时,一旦出现包覆层脱粘,药柱燃烧面急剧增大,燃烧室压强也会相应地急剧增高,若压强超过燃烧室所能承受的最大压强,则会发生爆炸事故。若 *p-t* 曲线平滑,则可证明药柱燃烧平稳,包覆有效。

根据火药启动器使用环境要求,选择更宽、更恶

劣的温度范围,并增加了高低温交替冲击试验。  
将火药启动器在经过不同温度试验后,进行了发动机静态点火试验,其 *p-t* 曲线见图 6。

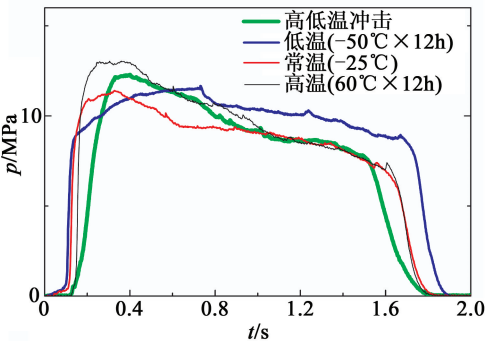


图 6 *p-t* 曲线  
Fig. 6 *p-t* curves of samples

如图 6,因为包覆装药采用侧面、底面包覆的方式,药柱燃烧模式为端面燃烧,在火药启动器刚刚点火时,自由空间很小,装药燃烧的燃气生成率远远大于喷管质量流率,压强迅速上升;随着药柱的燃烧,喷管喉部受高速高温高压气流的冲刷,截面积增大,喷管质量流率发生变化,且燃烧室自由体积随药柱的剧烈燃烧而急速增加,使压强渐渐减小,也导致推进剂的燃速下降,燃气生成率也渐渐下降;因此,火药启动器工作时,燃烧室的 *p-t* 曲线总体趋势属于递减型。

常温下的 *p-t* 曲线平滑,无明显的凸起;低温(−50℃×12h)下的最大压强较小,燃烧时间较长,*p-t* 曲线平滑;高温(60℃×12h)下的 *p-t* 曲线平滑,也无明显凸起;经过高低温冲击试验的 *p-t* 曲线也较平滑,没有明显凸起;证明在这几种条件下,药柱燃烧平稳,药柱与涂层、硅橡胶材料黏结可靠,并未发生脱粘现象。火药启动器工作情况见图 7。

点火试验后,对火药启动器进行解剖,观察残留硅橡胶包覆层的样貌,见图 8。

从图 8 中可以看出,药柱燃烧过后,包覆层仍然保持完整,起到了限燃、保护发动机的作用。这是因

表 2 不同老化时间硅橡胶包覆层的拉伸强度  
Tab. 2 Tensile strength of silicone rubber with different aging times

老化时间/h	空白硅橡胶 拉伸强度/MPa	3 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>		
		拉伸强度/MPa	破坏方式	拉伸强度/MPa	破坏方式	涂层与药柱黏结情况
0	1.04	1.10	内聚破坏	1.10	内聚破坏	完好
96	0.96	0.81	混合破坏	0.89	内聚破坏	完好
192	0.82	0.43	混合破坏	0.70	混合破坏	完好
288	0.86		脱粘	0.81	内聚破坏	完好

注:内聚破坏指胶层破坏。混合破坏是指界面与胶层均发生破坏。



图7 静态发动机试验

Fig.7 Static engine test



图8 残留包覆层样品

Fig.8 Inhibitor samples after test

为涂层中的酚醛树脂组分具有耐瞬时高温性能<sup>[21]</sup>,且在热分解时会吸收大量热能,同时形成具有隔热作用及较高强度的炭化层,使内部材料得到保护<sup>[22]</sup>,且硅橡胶有很高的耐热性、耐烧蚀性<sup>[7,23]</sup>。因此,这种包覆设计能够满足药柱燃烧速度和燃烧室压强的控制要求。

将设计的包覆方法用于双基推进剂,对火药启动器在常温、低温( $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$ )和高温( $60\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$ )条件下和经过高低温冲击试验后进行静态评估,其性能均优异,药柱燃尽后,包覆层保持完整,具有一定的实用性。

### 3 结论

1)在双基推进剂表面预先涂覆涂层,再以硅橡胶进行包覆,NG迁移量极少,黏结性能可靠,可满足包覆要求。

2)将此包覆设计进行实际装药包覆,并应用于火药启动器,在常温( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、低温( $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$ )、高温( $60\text{ }^{\circ}\text{C} \times 12\text{ h}$ )和经过高低温冲击试验后,均可正常点火工作,具有一定的实用性。

### 参 考 文 献

[1] AGRAWAL J P, POLHARAKAR R D. Inhibition of rocket propellant[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 1980, 39(1): 633-640.

[2] 于洋,范红雨,王宁飞,等.自由装填式药柱贮存过程中的变形分析[J].含能材料,2007,15(5):524-528.

YU Y, FANG H Y, WANG N F, et al. Deformation analysis of free loading propellant in storage[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(5):524-528.

[3] 詹惠安,郑邯勇,赵文忠,等.固体推进剂包覆层的研究进展[J].舰船防化,2009(3):1-5.

ZHAN H A, ZHENG H Y, ZHAO W Z, et al. Research progress on inhibitor of solid propellant[J]. Chemical Defence on Ships, 2009(3):1-5.

[4] 姚楠,王江宁,刘子如,等.热塑性聚氨酯弹性体对高固体含量改性双基推进剂力学性能的影响[J].含能材料,2008,16(2):196-200.

YAO N, WANG J N, LIU Z R, et al. Effect of thermoplastic polyurethane elastomer on mechanical properties of modified double-base propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(2):196-200.

[5] 刘艳芳,张大伦,贾继书,等.分子筛改性 NEPE 推进剂丁粒包覆层研究[J].化学推进剂与高分子材料,2006,4(5):47-49.

LIU Y F, ZHANG D L, JIA J S, et al. Study on HTPB liner modified with molecular sieve for NEPE propellant[J]. Chemical Propellants Polymeric Materials, 2006,4(5):47-49.

[6] 杨云.绝热包覆材料综述[J].上海航天,1990(3):48-51,9.

[7] 詹惠安,郑邯勇,赵文忠,等.填料对推进剂用 RTV-2 硅橡胶包覆材料性能的影响[J].固体火箭技术,2010,33(4):463-466.

ZHAN H A, ZHENG H Y, ZHAO W Z, et al. Effect of fillers on properties of RTV-2 silicone rubber used in inhibitor of propellants[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010,33(4):463-466.

[8] DAVID C S S, SAYLE S. Silicone for aerospace insulation;US 4953476[P]. 1986-06-20.

[9] 冯圣玉,张杰,李美江,等.有机硅高分子及其应用[M].北京:化学工业出版社,2004:116-151.

[10] 李东林,牛西江,崔伟.双基系推进剂与包覆层之间的迁移和脱粘问题[J].火炸药学报,1996(3):41-45.

LI D L, NIU X J, CUI W. The migration and debonding between double base propellant and inhibitor coating[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1996(3):41-45.

[11] 上海橡胶制品研究所.胶粘剂对接接头拉伸强度的测定;GB/T 6329—1996[S].北京:国家技术监督局,1996.

[12] 中国船舶工业总公司第七研究院.军用设备环境试验方法 温度冲击试验;GJB150.5—86[S].北京:国防科学技术工业委员会,1986.

[13] 刘子如.含能材料热分析[M].北京:国防工业出版社,2012:52.

- LIU Z R. Thermal analyses for energetic materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012:52.
- [14] 刘洪波, 杨荔, 陈惠, 等. 偶联剂对石墨/酚醛树脂复合双极板性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(7): 53-58.
- LIU H B, YANG L, CHEN H, et al. Effect of coupling agent on the properties of phenolic resin/graphite composite bipolar plates[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(7): 53-58.
- [15] 陈宝喜, 李建军, 苗彩琴. 丁腈橡胶对三元乙丙橡胶包覆剂抗硝化甘油迁移性能的影响[J]. 火炸药学报, 2004, 27(1): 56-58.
- CHEN B X, LI J J, MIAO C Q. Effect of acrylonitrile-butadiene rubber on nitroglycerin migration from propellant to EPDM inhibitor[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(1): 56-58.
- [16] 赵凤起, 单文刚, 李上文. 有机硅烷偶联剂在固体火箭发动机装药中应用及其作用机理综述[J]. 含能材料, 1998, 6(1): 37-42.
- ZHAO F Q, SHAN W G, LI S W. A review on silane coupling agents used in solid rocket motor charges and their action mechanism [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1998, 6(1): 37-42.
- [17] 李瑞琦, 姜兆华, 王福平, 等. 推进剂与硅橡胶包覆层间粘接性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(3): 265-267.
- LI R Q, JIANG Z H, WANG F P, et al. Binding property of silicone rubber inhibitor and propellant[J]. Material Science and Technology, 2003, 11(3): 265-267.
- [18] 孟征, 欧育湘. 含包覆  $\varepsilon$ -HNIW 的 NEPE 推进剂的力学性能[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 60-62.
- MENG Z, OU Y X. Mechanical properties of NEPE propellant containing two coated  $\varepsilon$ -HNIW [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(1): 60-62.
- [19] 邹德荣. 双基推进剂用丁羟胶包覆层研制[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 52-55.
- ZOU D R. Development of HTPB liner for double-based propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(1): 52-55.
- [20] AGRAWAL J P, VERGNAUD J M. Genesis of development of inhibition technology for rocket propellants and recent work [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 1992, 51(5): 375-382.
- [21] PILATO L. Phenolic resins: a century of progress[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010: 1-4.
- [22] 蒋颂波, 王云英, 孟江燕, 等. 白炭黑偶联处理对硅橡胶性能的影响[J]. 表面技术, 2008, 37(5): 21-23.
- JIANG S B, WANG Y Y, MENG J Y, et al. The reseach of silicone rubber reinforced by fumed silica which modified by silane coupling agent [J]. Surface Technology, 2008, 37(5): 21-23.
- [23] 陈国辉, 常海. 硅橡胶包覆层的研究进展[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 200-203.
- CHEN G H, CHANG H. Progress in silicone rubber inhibitor[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(3): 200-203.

## Study on Inhibition of Double-based Propellant by Silicone Rubber

WU Wei, CHEN Jun, YANG Yue, LI Yanchun, CHENG Yi

Chemical Engineering School, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The double-based propellant was inhibited by homemade barrier coat and silicone rubber. Nitroglycerin (NG) migration from double-based propellant into silicone rubber inhibitor was studied by thermal analysis. Experimental results show the content of NG in silicone rubber is minimum. Evaluation of bonding performance of propellant was also performed by tensile test, which shows that the bonding is reliable. Design of inhibition was used in cartridge starter.  $p-t$  curve of the engine combustor was also tested, and it shows that the engines work very well no matter at room temperature (25 °C), low temperature (-50 °C  $\times$  12 h), high temperature (60 °C  $\times$  12 h) or alternating high and low temperature by inhibition for propellant.

[KEYWORDS] applied chemistry; silicone rubber; double-based propellant; thermal analysis; alternating high and low temperature experiments; engine ignition experiments of the static;  $p-t$  curve