

共聚型网状聚氨酯抑爆材料的应用

吴灵¹, 黄成亮¹, 于名讯¹, 袁宝国¹, 邵军¹, 徐洪波¹, 杨卫²

(1. 中国兵器工业第五三研究所, 济南 250031;

2. 深圳市国志汇富高分子材料股份有限公司, 深圳 518040)

摘要: **目的** 评价共聚型网状聚氨酯抑爆材料的使用性能和抑爆功能。**方法** 介绍共聚型网状聚氨酯抑爆材料的抑爆机理, 针对车辆燃油箱的使用工况及抑爆考核要求, 模拟油箱装填抑爆材料后对油箱开展加油、振动、高温贮存等适用性试验, 以及带油补焊、40 mm 火箭弹静爆等抑爆试验。**结果** 该材料具有较好的消沫功能, 能降低油料中固体颗粒污染物含量, 高温长贮后 0 号柴油与-35 号柴油中的固体颗粒污染物含量分别为空白油样的 37.6%, 52%, 对油箱进行带油补焊试验过程中、补焊完成后的射击测试, 以及 40 mm 火箭弹的静爆试验均未发生爆炸。**结论** 共聚型网状聚氨酯抑爆材料与燃油的相容性较好, 具有优异的抑爆性能。

关键词: 共聚型网状聚氨酯; 抑爆材料; 适用性试验; 带油补焊; 静爆试验

中图分类号: TB484.3; TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0016-05

Application of Copolymerization Reticulated Polyurethane Explosion-proof Material

WU Jiong¹, HUANG Cheng-liang¹, YU Ming-xun¹, YUAN Bao-guo¹, SHAO Jun¹,
XU Hong-bo¹, YANG Wei²

(1. Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China;

2. Shenzhen Guozhihuifu Polymer Material Co., Ltd., Shenzhen 518040, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate usability and explosion-proof function of copolymerization reticulated polyurethane explosion-proof material. The explosion-proof mechanism of copolymerization reticulated polyurethane explosion-proof material was introduced. According to the working conditions and explosion-proof assessment requirements of the vehicle's fuel tank, the adaptability test of refueling, vibration and high-temperature storage, as well as the oil patching, 40 mm projectile static blast experiment and other explosion-proof tests with the fuel tanks filled with explosion-proof material were carried out. The result showed that, the materials had good defoaming effect and it could reduce the solid particle contaminants in fuel. Compared to the blank diesel sample, the contents of solid particle contaminants in 0# and -35# diesel were respectively 37.6% and 52% after the high-temperature storage for a long time. The fuel tanks had no explosion both in the shooting test during and after the oil patching and in the 40 mm projectile static blast experiment. The copolymerization reticulated polyurethane explosion-proof material has good compatibility with the fuel and excellent explosion-proof performance.

KEY WORDS: copolymerization reticulated polyurethane; explosion-proof material; adaptability test; oil patching; static blast experiment

共聚型网状聚氨酯抑爆材料(以下简称抑爆材料)因其抑爆性能优异、质量轻、装填方便灵活等优点^[1]被各发达国家应用在飞机、舰船、车辆的燃料箱中用于抑爆防爆,是目前国际上应用最广且公认的主流抑爆材料^[2]。抑爆材料由开孔的改性聚氨酯泡沫材

料经网格化处理后而成,其结构是五边形十二面体,面与面的交线称为经络,经络为相邻的多面体所共有而形成各向异性的立体骨架结构,经络间形成的层膜经网格化处理后消失。该材料的应用对提高飞机、车辆和舰船战时生存能力具有重要作用,在军事工业和

收稿日期: 2017-09-19

作者简介: 吴灵(1973—),男,高级工程师,主要研究方向为高性能工程塑料及特种功能材料。

民用工业等领域有广泛的应用前景^[3]。

美军在越战时期因直升机和作战飞机油箱被击中发生爆炸而损失惨重,因此率先将网状聚氨酯抑爆材料用作军用飞机、车辆及舰艇燃油箱的防火抑爆充填材料,经过多年应用改进,美军已研发出第 1 代聚酯型产品、第 2 代聚醚型产品直至今天全面应用的第 3 代阻燃抗静电网状聚氨酯抑爆材料。美军已将抑爆材料全面应用于 C130, P3, F4, F5, A10, F14, F15, FA18 等主力战机中^[4-7],最近美国奥什卡什公司研制的 4 代军车 JLTV、抑地雷反伏击车 MARP 使用的油箱内部就添加了同类抑爆材料,美国通用动力公司研制的斯特赖克装甲车改型车后门两侧油箱内也装填了类似抑爆材料,俄罗斯紧随其后也将该材料应用于装备油箱中,国内引进的俄罗斯战车和飞机上均有网状抑爆材料的大量应用^[8-11]。这里将介绍抑爆材料进行的部分适用性试验及抑爆性能考核试验。

1 抑爆机理

抑爆材料具有独特的三维网络结构,见图 1。将可燃气体的爆炸空间分隔成无数的小室,对火焰的传播形成一道道阻隔屏障,将点火范围限制在点火源附近很小空间内,同时材料内含有大量嫁接的吸能基团,快速吸收热能并钝化燃烧反应中的自由基,降低燃烧反应速率,在这种独特网络结构和吸能基团的作用下,火焰锋的传播与压力波的能量释放被大大削弱,有效阻止了链式爆炸反应的发生,从而起到抑爆的作用^[12-15]。



图 1 网状聚氨酯抑爆材料的三维网络结构

Fig.1 The three-dimensional network structure of reticulated polyurethane explosion-proof material

2 适用性试验

抑爆材料装填到油箱内部,与燃油这类有机溶剂长期浸泡在一起,通过模拟油箱实际使用状态,开展加油、振动及高温贮存等相关试验,分析燃料使用状态及成分的变化,是否受到污染或能否满足使用要求,分析抑爆材料与燃油的相容性,为后续应用研究提供数据支撑。

1) 消沫性能。利用填充抑爆材料的模拟透明油箱进行加油试验,通过泡沫层的表观厚度表征抑爆材

料对柴油冲击泡沫的消除作用。

2) 抗振性能。利用冲击振动台架,按 GJB 150.16—2009 的要求对填充了抑爆材料的模拟油箱进行振动试验来模拟实际行车试验,振动时间共计 48 h。对振动前后-35 号柴油品质分别按 GB/T 509—1988, SH/T 0093—1991, GB/T 6540—1991 的规定要求测试军用柴油的胶质含量、固体颗粒含量和色度等指标,分析抑爆材料在振动试验前后对柴油品质的影响。

3) 军用柴油相容性。将抑爆材料在 70 °C 条件下的-35 号军用柴油中连续浸泡 12 周后,按规定要求测试军用柴油的胶质含量、固体颗粒含量和色度,对比燃料的变化,分析抑爆材料与燃料的相容性。

4) 抑爆材料抗静电可靠性。对抑爆材料进行抗静电可靠性测试试验,将抑爆材料标准试样通过浸泡 0 号柴油 12 周、5 号航空煤油 12 周后,对其按 GB/T 1410—2006 进行体积电阻率的测定,来检测抗静电体系在抑爆材料中的稳定性和可靠性。

5) 带油补焊。在装填抑爆材料的油箱内加入 0 号柴油,静置 12 h 后,用 7.62 mm 穿甲燃烧弹射击油箱油气混合部位,检查油箱的情况,然后将油箱残余柴油放空后,暴晒 2 h,油气充满整个油箱,用气焊对弹孔进行切割、封堵,检查油箱内抑爆材料状态并对补焊后的油箱补充适量柴油、静置不少于 1 h 后,再次射击油箱,对比补焊工艺对抑爆材料抑爆性能的影响。

6) 40 mm 火箭弹静爆。40 mm 火箭弹静爆试验装置见图 2,该项试验是模拟装备油箱遭受火箭弹打击时,破甲战斗部击穿油箱产生静爆后抑爆材料的抑爆能力。试验方法为将 40 mm 裸装药破甲战斗部置于试验油桶前引爆,产生的高温射流在接触 0 号柴油气液界面位置穿过油桶,并评价抑爆材料的抑爆性能。

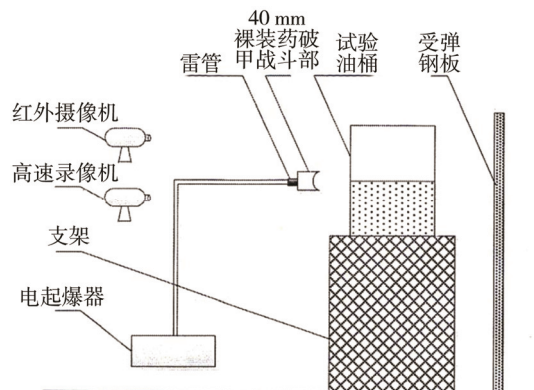


图 2 40 mm 火箭弹静破甲试验

Fig.2 40 mm projectile static armor piercing experiment

3 结果与讨论

3.1 消沫性能对比试验

向油箱内加注燃油时,燃油内溶解的空气与油箱

内空气和加注的燃油在剧烈的冲击与搅拌下在燃油表面形成大量的油泡沫,并不断积累,从而影响了加油速度,利用填充抑爆材料的模拟透明油箱进行加油消沫对比试验,向空白油箱与装填抑爆材料的油箱内加注油料,待自封加油枪自动关闭或油箱内充满泡沫时关闭加油枪,待柴油泡沫消失后,测量油箱顶部至油面的高度,即加油时产生的泡沫厚度,每种加油速度下重复 3 次,结果见表 1。不同加油速度时,装填抑爆材料的油箱与空白油箱的泡沫厚度检测结果见表 2。

表 1 消沫试验结果
Tab.1 Defoaming test results

填充材料	泡沫层 厚度/cm	消沫时间/s	平均消沫 速度/(cm·s ⁻¹)
无填充	26.5	90	0.29
	26.0	88	
	26.5	89	
抑爆材料	25.0	75	0.33
	24.0	72	
	25.3	74	

表 2 加油速度不同时的泡沫厚度
Tab.2 The thickness of the foam at different refueling
speeds cm

加油速度/(L·min ⁻¹)	装填抑爆材料	空白油箱
50	第1次	23.5
	第2次	24.0
	第3次	23.5
	平均值	23.5
70	第1次	31.5
	第2次	29.5
	第3次	31.5
	平均值	31.0
100	第1次	18.0
	第2次	18.5
	第3次	19.5
	平均值	18.5

注:加油速度为 50, 70 L/min 时使用自封加油枪,加油速度为 100 L/min 时使用普通加油枪

由表 1 可知,装填抑爆材料的消沫速度均比空白油箱快,平均消沫速度比空白油箱提高 13.7%。由表 2 可知,装填抑爆材料的油箱在不同的加油速度下,泡沫层厚度均小于空白油箱内的泡沫层厚度,产生这一现象的主要原因是网状聚氨酯抑爆材料具有独特的三维网络结构,生成的油气泡与抑爆材料经络互相接触碰撞时,更易使油泡沫破碎,释放空气,从而起到消沫功能。上述结果表明,装填抑爆材料的油箱在加油时具有较好的消沫能力和更高的加油效率,可满足

足正常使用要求。

3.2 抗振性能对比试验

采用填充抑爆材料的模拟油箱,油箱尺寸为 600 mm×400 mm×500 mm,内部 100%填充抑爆材料,试验介质为-35 号柴油。开始试验时,清洗模拟油箱,装填抑爆材料;模拟油箱内加注约 90 L 军用-35 号柴油,静置 30 min 后,从排油口取 5 L 柴油作为基准油样,然后用振动试验台对模拟油箱进行振动试验,振动试验参照 GJB 150.16—2009 进行。

试验条件:垂直振动,窄带带宽为 100~112 Hz,幅值为 1.2764g²/Hz,扫描带宽为 3 Hz,连续振动 48 h。振动完成后静置 30 min,取 5 L 油样送检,对振动前后取的油样测试胶质含量、固体颗粒污染物含量、色度等参数。油样的振动前后性能对比见表 3。

表 3 抗振试验性能对比
Tab.3 Comparison of vibration resistance test performance

油样	色度	实际胶质含量/(mg·(100 mL) ⁻¹)	固体颗粒污染物含量/(mg·L ⁻¹)
油箱振前	1.0	3.7	1.38
油箱振后	1.0	4.5	0.52
标准	≤3	≤10	≤10

由表 3 可知,抑爆材料振动前后油样的色度无变化,实际胶质略有增大,油箱振动后油样中的固体颗粒含量大幅度降低,油样各项性能均符合军用柴油标准要求。试验结果表明,用台架振动试验模拟行车试验时,抑爆材料与燃油相容性好,振动后燃油性能符合相关标准,满足使用要求。

3.3 军用柴油相容性对比试验

将抑爆材料在 70 ℃高温条件下的 0 号柴油中连续浸泡 12 周后,按上述标准检测分析燃料的色度、固体颗粒污染物含量、实际胶质含量变化情况,确定抑爆材料在高温条件下与燃油的相容性。油料相容性对比试验结果见表 4。

表 4 油料相容性对比试验
Tab.4 Comparative test of fuel compatibility

油样说明	色度	实际胶质含量/(mg·(100 mL) ⁻¹)	固体颗粒污染物含量/(mg·L ⁻¹)
浸泡抑爆材料	1.0	6.5	0.47
高温平行油样 (无浸泡物)	1.0	6.2	0.90
常温原始油样	1.0	6.1	0.80
标准	≤3	≤10	≤10

由表 4 可知,在 70 ℃高温油样中浸泡 4 周后,与常温油样、高温平行油样对比,油料的色度没有变

化,实际胶质含量略有增加,固体颗粒污染物含量大幅度降低,油样其他性能均符合军用柴油标准要求。

上述试验结果表明,油箱内添加抑爆材料后,经过常温振动、高温长期贮存,燃油的色度保持不变,实际胶质含量略有增大,但符合标准要求,燃油中的固体颗粒污染物含量大幅度降低,-35 柴油与 0 号柴油分别是空白油样的 37.6%, 52.2%,这是因为抑爆材料具有的三维网状结构可吸附过滤燃油中的游离性物质,大大减少燃油中促使沉淀发生的物质,使得燃油中的羟酸、铜离子、硫酮等固体颗粒污染物含量保持在较低的水平,改善了燃油的贮存环境,提高了燃油的贮存期限,抑爆材料与燃油相容性较好,满足燃油的使用要求。

3.4 抑爆材料抗静电可靠性试验

抑爆材料的试样通过浸 0 号柴油 12 周、5 号航空煤油 12 周后再进行抗静电可靠性测试,检测抗静电剂在抑爆材料中的稳定性和可靠性,查看抑爆材料是否会因抗静电剂的溶出或迁移而使其抗静电性能下降,试验结果见表 5。该实验测试仪器为 KEITHLEY6517 静电计,施加电压为 500 V。

表 5 抗静电可靠性试验
Tab.5 The antistatic reliability test

序号	体积电阻率 (×10 ¹¹) /(Ω·cm)			
	0号柴油		5号航煤	
	浸泡前	浸泡后	浸泡前	浸泡后
1	2.8	3.1	8.2	7.8
2	4.4	4.6	3.4	2.9
3	4.1	4.0	4.9	4.7
平均值	3.8	3.9	5.5	5.1

由表 5 可知,抑爆材料采用的独特抗静电体系具有较好的可靠性和稳定性,不会因长时间浸泡在燃油中发生溶出与迁移,抑爆材料的体积电阻率均维持在 10¹¹ Ω·cm 这一数量级,与未进行浸泡的抑爆材料相比,抗静电性能变化不明显,材料性能均满足抗静电使用要求。

3.5 带油补焊试验

用 7.62 mm 穿甲燃烧弹射击填充抑爆材料油箱的油气混合部位,油箱没有燃烧爆炸,只在油箱表面留有一个弹孔,然后利用钎焊对油箱弹孔进行切割、封堵作业。完成补焊后,从油箱内取出抑爆材料,发现在焊接部位的抑爆材料表面呈轻微受热变形状态,将抑爆材料回填入补焊的油箱中并补充适量柴油、静置 1 h 后,再次用 7.62 mm 穿甲燃烧弹射击油箱的油气混合部位,油箱没有燃烧爆炸。试验结果表明,抑爆材料具有优异的抑爆性能,满足带油补焊要求,补

焊工艺造成的轻微损伤对抑爆材料的抑爆性能没有影响。

3.6 40 mm 火箭弹静爆试验

按 40 mm 火箭弹静爆试验的规定,分别对空白油箱与装填抑爆材料的油箱进行静爆对比试验,静爆试验结果见图 3。由图 3 可知,空白油箱被 40 mm 破甲弹击中 0 号柴油气液界面位置,立刻爆炸燃烧,油箱破坏严重,而装填网状聚氨酯抑爆材料的油箱被 40 mm 破甲弹击中 0 号柴油气液界面位置后,没有发生爆炸。由于抑爆材料吸收了大量热量与能量,油箱破坏程度相对较轻。静爆试验结果表明,网状聚氨酯抑爆材料能够抑制油箱所受破甲弹射流引起的爆炸,吸收其爆炸能量,抑爆效果显著。



图 3 静爆试验结果

Fig.3 Static blast experiment results

4 结语

抑爆材料装填到燃油箱内用于燃油箱的抑爆已得到美国、俄罗斯等军事大国的应用证明,是提高武器装备安全性能必不可少的安全措施,国内抑爆材料技术水平与国外同类产品相当,在满足使用要求的前提下具有优异的抑爆功能。紧密围绕国家“一带一路”的经济战略与“军民融合”的国家战略,加大力度推广网状聚氨酯抑爆材料在军用装备燃油系统、军民用燃油贮存设施上的应用,对加快武器装备的技术提高与升级换代,稳步提高全军装备与军民设施的安全性有着重要的意义。

参考文献:

[1] 曲芳,孙成喜,江平,等. 充填俄制网状聚氨酯泡沫

- 燃油箱的燃油冲刷静电实验研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2004, 21(4): 17—19.
- QU Fang, SUN Cheng-xi, JIANG Ping, et al. Electrostatic Fuel Impingement Test in Fuel Tank with Russian Reticulated Polyurethane Foam[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2004, 21(4): 17—19.
- [2] 田宏, 吴穹, 高永庭, 等. 网状聚氨酯泡沫材料的发展[J]. 航空材料学报, 2001(6): 59—63.
- TIAN Hong, WU Qiong, GAO Yong-ting, et al. The Development of Reticulated Polyurethane Foam[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001(6): 59—63.
- [3] 王松, 陈朝辉, 陈红梅, 等. 网状聚氨酯泡沫应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 298—301.
- WANG Song, CHEN Chao-hui, CHEN Hong-mei, et al. Progress in Application of Reticulated Polyurethane Foam[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2003, 21(2): 298—301.
- [4] 魏徵, 王源升, 余红伟. 飞机油箱用网状聚氨酯泡沫的研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2013, 28(4): 1—3.
- WEI Zheng, WANG Yuan-sheng, YU Hong-wei. Research Progress in Reticulated Polyurethane Foam for Aircraft Fuel Tanks[J]. Polyurethane Industry, 2013, 28(4): 1—3.
- [5] MIL-B-87126, Baffle Materials, Explosion Suppression, Expanded Aluminum Mesh for Aircraft Fuel Tank[S].
- [6] MIL-B-83054B, Baffle and Inerting Material, Aircraft Fuel Tank[S].
- [7] MIL-PRF-87260B, Performance Specification Foam Material, Explosion Suppression, Inherently Electrostatically Conductive for Aircraft Fuel Tank[S].
- [8] 郑双忠, 高永庭, 李美玉. 网状聚氨酯泡沫塑料在飞机燃油箱中的应用[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(6): 26—28.
- ZHENG Shuang-zhong, GAO Yong-ting, LI Mei-yu. Application of Reticulated Polyurethane Foam in the Airplane Fuel Tank[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(6): 26—28.
- [9] 田宏. 飞机油箱的防火抑爆填充材料[J]. 国际航空, 1992(2): 59—60.
- TIAN Hong. A Fire-proof and Explosion Suppression Filling Material for Airplane Tank[J]. International Aviation, 1992(2): 59—60.
- [10] 武琴, 李绍雄. 网状聚氨酯泡沫的制造与应用[J]. 现代化工, 1991(6): 49—51.
- WU Qin, LI Shao-xiong. Manufacture and Application of Reticulated Polyurethane Foam[J]. Modern Chemical Industry, 1991(6): 49—51.
- [11] 田宏, 王旭. 燃油箱填充用防火抑爆网状泡沫材料[J]. 火灾科学, 2000, 9(2): 37—41.
- TIAN Hong, WANG Xu. The Reticulated Polymer Suppressant Foam for Fire and Explosion Packed in Fuel Tank[J]. Fire Safety Science, 2000, 9(2): 37—41.
- [12] EDWARDS K L. Material and Constructions Used in Devices to Prevent the Spread of Flames in Pipelines and Vessels[J]. Materials Design, 1999, 20(5): 245—252.
- [13] 江平, 李晓光, 高永庭. 燃油箱中空充填网状聚氨酯泡沫抑爆原理[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2003, 20(4): 13—15.
- JIANG Ping, LI Xiao-guang, GAO Yong-ting. Explosion Suppression Mechanism of Void Design Reticulated Polyurethane Foam for Fuel Tank[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2003, 20(4): 13—15.
- [14] 战仁军, 于凌云, 郭洁. 便携式储油囊中网状聚氨酯泡沫材料阻燃抑爆性机理研究[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(8): 40—41.
- ZHAN Ren-jun, YU Ling-yun, GUO Jie. The Mechanism Research on Burning Preventing and Blast Restraining Performance of Reticulation TPU Foam in Portable Oil Storage Bag[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2009, 35(8): 40—41.
- [15] 王震. 飞机燃油箱防爆及抑爆材料应用技术[J]. 航空科学技术, 2002(3): 33—35.
- WANG Zhen. Explosion Suppression for Aircraft Fuel Tanks and Application Technology of Suppression Material[J]. Aeronautical Science & Technology, 2002(3): 33—35.