

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.026

高效隔热材料在战斗部中的热防护性能研究

孙晓乐, 刘海青, 万力伦, 焦云多, 杨瑞芳, 王茂洁

(重庆红宇精密工业集团有限责任公司, 重庆 402760)

摘要: 为提高超声速武器的热防护性能, 设计一种高效隔热材料。通过快速烤燃对比试验分析高效隔热材料对战斗部热防护性能的影响。加入高效隔热材料后, 试验件内部的升温速率可大幅度降低; 炸药受热后的开始反应时间从 58 s 延长到 16 min 2 s, 降低了炸药的反应类型。结果表明: 该研究应用于超声速武器战斗部中, 可显著提高战斗部的隔热安全性。

关键词: 超声速; 快速烤燃; 隔热; 放热安全性

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Study on Thermal Protection Performance of High Efficiency Heat Insulation Material in Warhead

Sun Xiaole, Liu Haiqing, Wan Lilun, Jiao Yunduo, Yang Ruifang, Wang Maojie

(Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to improve the thermal protection performance of supersonic weapons, an efficient thermal insulation material was designed. The effect of high efficiency thermal insulation material on the thermal protection performance of warhead is analyzed through the rapid cook-off test. With the addition of the efficient thermal insulation material, the heating rate of the test piece can be greatly reduced, and the initial reaction time of the explosive after heating is extended from 58 s to 16 min 2 s, which reduces the reaction type of the explosive. The results show that the application of this study in the supersonic weapon warhead can significantly improve the thermal safety of the warhead.

Keywords: supersonic velocity; fast cook-off; heat insulation; exothermic safety

0 引言

随着超音速武器系统的发展, 弹体结构外表面的加热问题将愈加严重, 导弹战斗部壳体大多采用薄壁高强度金属材料制成, 当战斗部壳体内部温度超过 150 °C 时, 战斗部主装药的安定性将急剧下降, 最终导致主装药的意外爆轰^[1-4]。

美国 Cabot 公司与 Kawall 公司共同开发的气凝胶隔热材料, 热导率仅为 0.05 W/mK^[5-6]; 美国国家宇航局研究中心开发了复合隔热材料, 隔热性能提高了 10~100 倍^[7-8]; 国内叶丹丹等以硅橡胶为基体, 研制了一种导热系数为 0.11 W/mK, 并将其应用于空空导弹中^[9]。开展高效隔热材料的研究, 解决加热对战斗部装药的影响, 对保证导弹的安全性和有效性具有深远意义。

笔者在对隔热材料隔热机理进行分析的基础上, 采用耐高温改性高分子材料作为基体, 设计一种高效隔热材料, 并通过快速烤燃对比试验验证其在战斗部中的热防护性能。

1 高效隔热材料 GT-1 介绍

笔者采用耐高温、低表面能、高稳定性的改性聚硅氧烷作为基体, 复配空心微珠、热反射纤维、硅酸盐等作为高效隔热填料, 制备出低密度高效隔热材料 GT-1。GT-1 的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 GT-1 主要性能参数

| 高效隔热材料 GT-1 | 性能参数 |
|-------------------------|--------|
| 密度/(g/cm ³) | 0.80 |
| 导热系数/(W/mK) | 0.04 |
| 玻璃化温度/°C | -65.00 |
| 拉伸强度/MPa | 3.50 |
| 适用期/min | 40.00 |
| 硫化时间(常温)/h | 18.00 |

高效隔热材料 GT-1 具有低导热系数、耐高温、与金属界面结合性强、与炸药相容性好等优点; 同时, 该材料制备工艺简单、成本低、涂覆简单、室温下可固化且固化时间短, 适用于多种高温环境下的隔热。

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-09-14

作者简介: 孙晓乐(1985—), 男, 陕西人, 博士, 高级工程师, 从事高能混合炸药开发及应用研究。E-mail: Sunxiaole060420122@126.com。

2 试验

2.1 试验方案设计

在战斗部 1 号(未涂覆隔热材料)和战斗部 2 号(刷涂 0.5 mm 厚涂覆隔热材料)内部分别布置 5 根传感器, 然后装填某型高爆速炸药; 参照 GJB357—87《空-空导弹最低安全要求》4.3.6.1 条的规定, 考核、评定涂覆高效隔热材料的战斗部处于飞机燃油火焰中时的隔热安全性能。

参试战斗部如图 1 所示, 技术状态如表 2 所示。

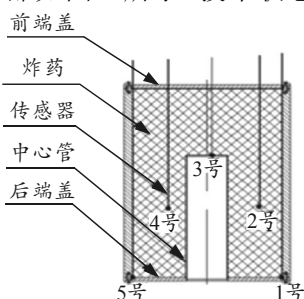


图 1 试验件技术状态

表 2 试验件设计参数

| 序号 | 总重/kg | 规格/mm | 壳体重量/kg | 装填物重量/kg | 备注 |
|-------|-------|----------|---------|----------|---------|
| 试验件 1 | 12.45 | φ156×200 | 4.95 | 7.50 | 未涂覆隔热材料 |
| 试验件 2 | 12.43 | φ156×200 | 4.95 | 7.48 | 涂覆隔热材料 |

试验时, 在受试战斗部上装抱箍及连接螺栓, 横向固定在距油面 900 mm 的位置。在距油面 300 mm 处(传感器 6 号)安装一个热电偶传感器(试验布置如图 2 所示)。

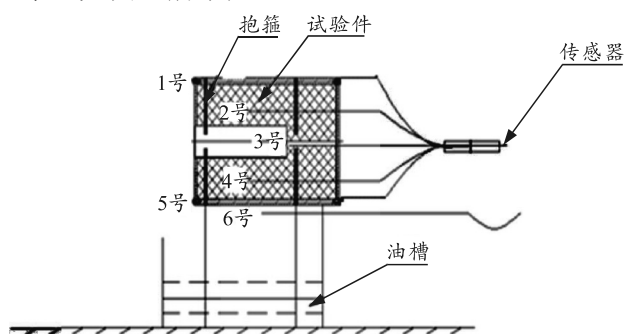


图 2 现场布置

2.2 试验结果

2.2.1 未涂覆隔热材料试验结果

从热电偶温度测试系统得知: 从点火开始计时, 火焰温度随着燃油的充分燃烧逐渐升高, 如图 3 所示, 在第 1 min 34 s 时传感器 8 号温度达到 537 °C。从监控视频观察发现, 受试产品在 8 号传感器达到规定温度(537 °C)后 58 s, 受试产品右端后盖出现亮光, 温度突然急剧上升, 然后炸药开始剧烈燃烧, 如图 4 所示, 整个受试产品持续燃烧约 2 min。燃油火焰熄灭后, 检查发现试验件壳体撕裂。



图 3 试验开始点火



图 4 炸药开始反应

2.2.2 涂覆隔热材料试验结果

从热电偶温度测试系统得知: 从点火开始计时, 火焰温度随着燃油的充分燃烧逐渐升高, 如图 5 所示, 在第 1 min 34 s 时 8 号传感器温度达到 537 °C。从监控视频观察发现, 受试产品在火焰达到规定温度(537 °C)后 16 min 2 s, 受试产品右端冒出大量的黑烟, 温度开始快速上升, 16 min 58 s 时, 受试产品开始喷出火苗, 如图 6 所示, 整个受试产品持续燃烧约 7 min。燃油火焰熄灭后, 检查发现试验件壳体完整。



图 5 试验开始点火



图 6 炸药开始反应

2.3 试验结果分析

通过分析监控录像采集出试验件 1、2 中传感器温度随时间变化情况分别如表 3、4 所示。变化曲线如图 7、8 所示。

表 3 试验件 1 中传感器温度随时间变化

| 时间/s | 试验件内部传感器温度/°C | | | | | 试验件外部传感器温度/°C | 备注 |
|--------|---------------|------|------|-------|-------|---------------|------------------------------|
| | 1 号 | 2 号 | 3 号 | 4 号 | 5 号 | 6 号 | |
| 点火开始 | 30.5 | 30.4 | 30.0 | 30.3 | 30.3 | 29.4 | |
| 点火 60 | 51.5 | 49.8 | 30.3 | 53.8 | 70.0 | 386.7 | |
| 点火 94 | 67.3 | 69.5 | 30.9 | 70.5 | 104.8 | 537.5 | 传感器 8 号达到规定温度 |
| 点火 116 | 79.4 | 75.4 | 35.5 | 83.7 | 119.8 | 660.5 | |
| 点火 152 | 100.5 | 83.6 | 41.7 | 105.9 | 174.1 | 732.7 | 传感器 8 号达到规定温度后 58 s 炸药开始剧烈反应 |

表 4 试验件 2 中传感器温度随时间变化

| 时间/s | 试验件内部传感器温度/℃ | | | | | 试验件外部传感器温度/℃ | 备注 |
|----------|--------------|------|------|-------|-------|--------------|------------------------------------|
| | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 | 5号 | 6号 | |
| 点火开始 | 30.5 | 30.0 | 30.4 | 30.0 | 30.5 | 29.8 | |
| 点火 60 | 30.6 | 30.0 | 30.4 | 30.1 | 31.0 | 387.9 | |
| 点火 94 | 30.7 | 30.0 | 30.4 | 30.3 | 31.7 | 537.2 | 传感器 8 号达到规定温度 |
| 点火 11 | 31.0 | 28.8 | 30.6 | 31.5 | 33.0 | 663.6 | |
| 点火 152 | 31.8 | 30.6 | 31.0 | 32.6 | 35.6 | 733.9 | 传感器 8 号达到规定温度后 58 s |
| 点火 174 | 33.9 | 31.1 | 31.1 | 35.2 | 41.2 | 806.1 | |
| 点火 36 | 44.6 | 40.8 | 31.3 | 49.8 | 55.6 | 818.0 | |
| 点火 474 | 53.5 | 46.5 | 33.7 | 60.6 | 70.5 | 818.5 | |
| 点火 77 | 86.9 | 72.9 | 36.8 | 93.7 | 130.8 | 818.5 | |
| 点火 1 078 | 101.1 | 94.4 | 77.4 | 107.3 | 174.8 | 818.6 | 传感器 8 号达到规定温度后 16 min 2 s 炸药开始缓慢燃烧 |

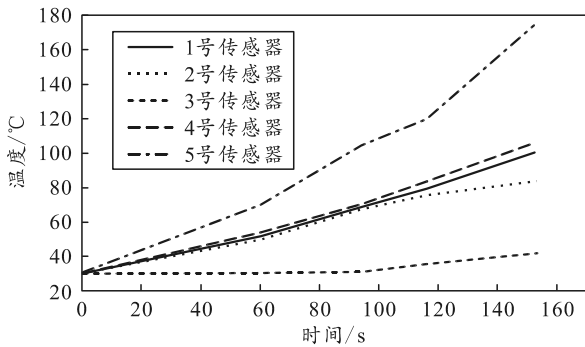


图 7 试验件 1 内部温度变化曲线

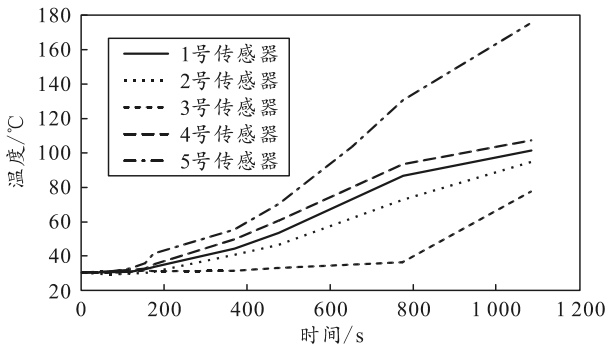


图 8 试验件 2 内部温度变化曲线

分析图 7、8 可得出，试验件 1、2 中 5 号传感器的升温速率最快，1、2、4 号传感器的升温速率基本接近，3 号传感器最慢。通过对比试验件不同部位之间的温度变化趋势，可得出在进行快速烤燃试验时，试验件底部接近壳体壁的部位升温速率最快，中心管端部升温速率最慢，炸药中部次之。原因主要是由于传感器 5 号最先处于火焰外焰的包围中，在此位置先形成高温区域，因此升温速率最快；随着火焰的继续燃烧以及热量在炸药内部由外向内传递，1、4、2 号传感器处开始依次升温，最后再传递到 3 号传感器位置处。

选取试验件 1、2 中 4、5 号传感器进行对比，试验结果如图 9、10 所示。

采用传感器 4 号和 5 号的温度数据分别进行升温速率计算，得出在炸药反应之前，未涂覆隔热材

料的试验件内部升温速率为 0.50 和 0.95 °C/s，而涂覆隔热材料的试验件内部升温速率为 0.02 和 0.03 °C/s，升温速率显著降低。图 9、10 分别为 4、5 号传感器温度随时间变化图。从图中可以看出：涂覆隔热材料能大幅降低试验件内部的升温速率，延缓炸药的反应时间；且试验结果表明，试验件 1 的反应为剧烈的爆燃试验，试验件 2 的反应为较缓慢的燃烧反应，因此通过涂覆隔热材料也可降低炸药的反应程度。

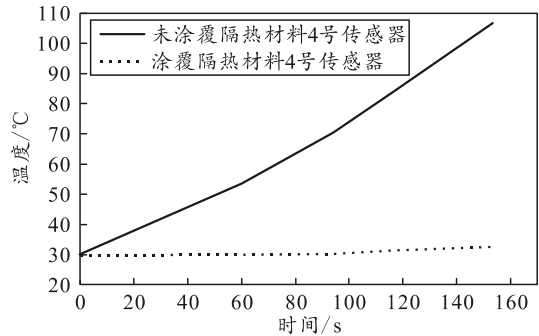


图 9 4 号传感器温度对比曲线

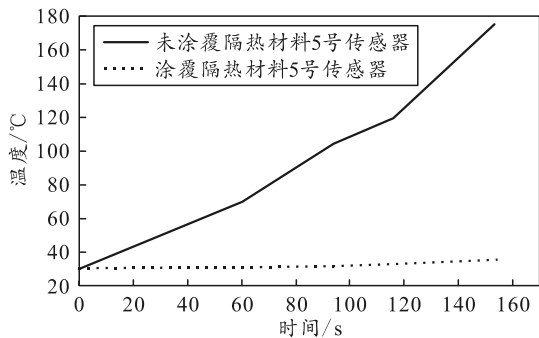


图 10 5 号传感器温度对比曲线

3 结论

1) 加入高效隔热材料后，试验件内部的升温速率可大幅度降低；炸药受热后的开始反应时间从 58 s 延长到 16 min 2 s，满足 GJB357—87《空-空导弹最低安全要求》的标准要求。