

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.07.010

压装炸药防护层制备工艺的优化及其性能

蒲虹蓉¹, 罗观², 吴奎先², 刘绪望², 唐长兴², 赵天波¹

(1. 北京理工大学化学与化工学院, 北京 100081; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 在压装炸药表面增加保护涂层, 可以提高压装炸药的安全稳定性。探索用石蜡聚集体、热熔性高强度氟碳树脂、聚氨酯、聚酰亚胺及其合金材料制备压装炸药防护层。通过对热压融合过程不同配方材料的成型观察、防护层的硬度以及防护层与药柱的粘结性的测试, 制备出了符合热压融合工艺的防护层材料, 其中热塑性聚氨酯90(粉末)+SiO₂, PI+铝粉样品性能优异, 达到防护层生产工艺能一次性成型, 简便快速的要求。

关键词: 压装炸药; 防护层材料; 石蜡聚集体; 氟碳树脂; 聚氨酯; 聚酰亚胺

中图分类号: TJ55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)07-0050-06

Optimization of Preparation Process and Performance of Protective Layer for Pressurized Explosive

Pu Hongrong¹, Luo Guan², Wu Kuixian², Liu Xuwang², Tang Changxing², Zhao Tianbo¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Chemical Materials, China Institute of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Adding a protective coating on the surface of the pressed explosive can improve the safety and stability of the pressed explosive. A new type of paraffin aggregate is used as the basic protective layer for this project, and the protective layer material for press-fit explosives is developed, including fluorocarbon resin, polyurethane, polyimide and their alloy materials. Through the observation of the forming of different formula materials, the hardness of the protective layer and the testing of the adhesion between the protective layer and the grain during the hot-pressing fusion process, the protective layer materials conforming to the hot-pressing fusion process are prepared, among which thermoplasticity polyurethane90 (powder)+SiO₂, PI + aluminum powder samples have excellent performance and meet the requirements of one-time forming and simplicity and rapidness in the production process of the protective layer.

Keywords: pressed explosives; protective layer materials; paraffin aggregates; fluorocarbon resin; polyurethane; polyimide

炸药的安全性研究对国民经济建设和国防军事应用具有重大的意义^[1-3]。在压装炸药表面增加保护涂层, 可以减少压装炸药柱出现掉粉、掉块的现象, 同时减少药柱与金属弹壳间直接摩擦, 并且可以增强药柱导热性能, 从而提高压装炸药的操作安全性^[4-5]。

现有的防护层材料主要采用表面涂刷^[6], 模具定位涂刷^[7], 以及在熔液中浸沾、取出^[8]等方式形成防护层, 但由于现有防护层材料在涂刷过程中熔化、迁移作用, 防护层会因药柱表面紧力不同而发生分布不均的情况。而且现有制备工艺需要在药柱成

型基础上进行二次加工, 工艺相对复杂, 改用新的制备工艺, 使防护层与炸药在生产过程中一次成型, 简化炸药的生产工艺。因此笔者采用课题组前期研制的新型石蜡聚集体^[9-10], 作为基础防护层。这种石蜡聚集体具有独特的物理性质, 在室温到蜡的熔点范围内是固体, 在更高的温度至200℃范围内是半流体, 不流淌, 在保留石蜡本身的相变吸热、润滑作用的基础上, 还具有较强的对各种极性 & 非极性表面的粘附能力。研制石蜡聚集体材料制备压装炸药防护层, 并探索氟碳树脂^[11]、聚氨酯(PUR)^[12]、聚酰亚胺(PI)高聚物^[13-14]及其复合材料的防护层, 为战

基金项目: 国家自然科学基金项目(20973022, 11472048)

通讯作者: 赵天波, 博士生导师, 主要从事相变材料以及炸药敏感技术的研究 E-mail: sky6926123@126.com

收稿日期: 2020-04-16

引用格式: 蒲虹蓉, 罗观, 吴奎先, 等. 压装炸药防护层制备工艺的优化及其性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7): 50-55.

Pu Hongrong, Luo Guan, Wu Kuixian, et al. Optimization of preparation process and performance of protective layer for pressurized explosive[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7): 50-55.

斗部装药研制提供技术支撑。图1为压装炸药压装成型装置的初步设计图。

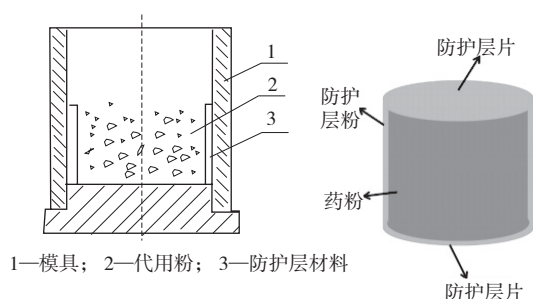


图1 压装炸药装置初步设计图

1 实验部分

1.1 原材料

氟碳树脂[全氟乙烯丙烯共聚物(FEP)、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)、聚四氟乙烯(PTFE)、全氟烷氧基树脂(MFA)、聚偏二氟乙烯(PVDF)];东莞市塑宇塑胶原料经营部;

PI(1): 38 μm , 日本三井公司;

PI(2): 38 μm , 广州塑特盟有限公司;

50 $^\circ$ 、70 $^\circ$ 石蜡: 上海华申康复器材有限公司;

聚乙烯蜡: 山东优索化工科技有限公司;

热塑性 PUR(PUR-T): 60, 90, 130, 德国拜耳公司;

石油醚: 北京市通广精细化工有限公司;

二氧化硅(SiO_2): 38 μm , 山东佰鸿新材料有限公司;

二硫化钼(MoS_2): 山东佰鸿新材料有限公司;

N, N-二甲基甲酰胺(DMF): 市售;

铝粉、炸药代用粉: 中国工程物理研究院化工材料研究所。

1.2 仪器及设备

电子天平: JM-B10002 型, 诸暨市超泽衡器设备有限公司;

控温仪: MYS-200 型, 山东鄞城威瑞科教仪器有限公司;

液压油压机: 20T, 青岛孚润汽车保修设备有限公司;

数显电动搅拌器: JJ-1A 型, 上海标本模具厂;

硬度计: 艾测五金专营店;

万能拉力机: 5 kN, 武汉国量仪器有限公司。

1.3 防护层的制备

(1) 石蜡聚集体防护层材料的制备。

用 50 $^\circ$ 石蜡制备了 SiO_2 -石蜡聚集体、聚脲-

石蜡聚集体、石墨烯-石蜡聚集体、氮化硅-石蜡聚集体、膨胀石墨-石蜡聚集体, 与适量 MoS_2 在 120°C 下加热混合均匀, 制成薄片, 密度 2.0 g/cm^3 。再将薄片制成圆筒, 放置于模具内侧, 将炸药代用料放入中间进行压制, 温度 80°C 、压力 20 MPa, 保温保压 1 h。

(2) 聚合物防护层材料的制备。

方法一: 将石蜡粉末、氟碳粉末、铝粉或 SiO_2 粉末、PUR-T 粉末充分搅拌, 混合均匀, 放入压制样品的模具, 120°C , 20 MPa 进行压制, 保温保压 1 h, 冷却后脱模, 即得柱状样品。

方法二: 将颗粒 PUR-T 粉末溶解在 DMF 中, 待溶解后, 按比例加入 PUR-T 粉末、PI 粉末、 SiO_2 粉末、 MoS_2 粉末或铝粉, 烘箱 60°C 挥发 3 d 后粉碎, 放入压制样品的模具, 120°C , 20 MPa 进行压制, 保温保压 1 h, 冷却后脱模, 即得柱状样品。

1.4 防护层材料的测试及性能表征

(1) 拉开法附着力测试。

防护层的力学性能按照 GB/T 5210-2006 测试。防护层压制好后, 用胶粘剂将试柱直接粘结到底材的表面上, 胶粘剂固化后将粘结的实验组合置于拉力试验机上, 粘结的实验组合经可控的拉力试验, 测出破坏涂层/底材间附着所需的拉力^[15-16]。

(2) 硬度测试。

防护层的硬度按照 GB/T 531-1992 测试。将压制好的防护层擦净, 放置于 5 mm 厚的平整的玻璃板, 硬度计用定负荷架固定, 在试样缓慢地完全受到质量为 1 kg 的负荷时起 1 s 内读数, 试样上的每一点只测量一次, 点间距不小于 6 mm, 与试样边缘的距离均不小于 12 mm。每个样品的测试点不少于 3 个, 取测定值中位数为实验结果^[17-18]。

2 结果与讨论

2.1 石蜡聚集体防护层材料

图2为压制后的直观效果图。由图2和实验结果分析, 采用几种不同种类的石蜡聚集体作为药柱的防护层, 在 80°C 下进行压制时, 石蜡聚集体均被压出, 蜡在此温度下变成液体, 基本全部流出, 药柱表面仅剩极少量蜡, 不能有效起到防护层的防护作用。

因此, 改用石蜡聚集体与高聚物协同作用的方式, 形成防护层, 以达到 $80\sim 120^\circ\text{C}$ 高温下防护层材料不被挤出, 又有石蜡作润滑剂, 以达到降低摩擦的目的。



图2 石蜡聚集体作防护层时压制直观效果

2.2 氟碳树脂粉末防护层

氟碳树脂以牢固的 C—F 键为骨架,同其它树脂相比,其耐热性、耐化学药品性、耐寒性、低温柔韧性、耐候性和电性能等均较好,且由于其结晶性好,故具有不粘附性、不湿润性。广泛应用于厨房和烹调用具、造型模具、造纸等工业用机械的高级卷材涂料,各种罐类、输送管线、泵类、反应釜、换热器及精密器械等的涂装及衬里方面。氟碳树脂均系高熔点(180~380℃)、不溶于溶剂的固态树脂。

(1) 材料选择及其主要性能数据。

选择合适性能的 5 种氟碳树脂,进行热压成型实验,实验结果以及现象分析见表 1。实验时的压强为 20 MPa,时间是 1 h。

表1 氟碳树脂粉末热压成型实验

序号	材料	邵氏硬度	密度 / (g·cm ⁻³)	温度 / °C	现象分析
1 [#]	PVDF	67	1.76	120	不挤出,成型性好,韧性稍好,颗粒内部呈透明固态
2 [#]	MFA	66	1.76	90	不挤出,成型性好,韧性稍好,颗粒内部呈透明固态
3 [#]	PFA	50	2.14	120	不挤出,成型性好,韧性稍好,颗粒内部呈透明固态
4 [#]	ETFE	27	1.7	120	不挤出,成型性好,韧性稍好,颗粒内部呈透明固态
5 [#]	FEP	29	2.15	120	不挤出,防护层较脆

从表 1 结果可见,氟碳树脂的密度较高均在 1.7 g/cm³ 以上。与炸药代用粉一起热压成型时,在 90~120℃ 时均无挤出。但均较脆。因此,采用高聚合物中合金的概念,选择粘结性好但熔点低的 PUR-T 进行复合实验(表 2)。实验时的温度均为 120℃,压强为 20 MPa,时间为 1 h,样品的密度均为 2.0 g/cm³。

PUR-T 的综合性能好,其硬度、弹性及熔点均可在一个较大范围内调节。因此,选择不同型号的 PUR-T 与 PVDF 形成的合金作为防护层材料。

PUR-T 的韧性好,但密度较低,为 1.25 g/cm³,加入 SiO₂ 粉末提高密度,并加入石蜡和石蜡聚集体以提高润滑性能,在配方上进行调节,进行热压成型实验,实验结果以及现象分析见表 2。

表2 氟碳树脂粉末与 PUR-T 制备的合金热压成型结果

序号	样品	邵氏硬度	现象分析
1 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +50 [#] 石蜡	69	不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性
2 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +2% 费托蜡		挤出,晶粒具有良好的成型性和韧性
3 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +2% 聚乙烯蜡	77	不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性
4 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +3% 聚乙烯蜡	68	不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性
5 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +4% 聚乙烯蜡	65	挤出,晶粒具有良好的成型性和韧性
6 [#]	PVDF+PI+SiO ₂ +2% 70 [#] 石蜡		挤出,晶粒具有良好的成型性和韧性
7 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +0.5% 70 [#] 石蜡		不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性
8 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +1% 70 [#] 石蜡		不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性
9 [#]	PVDF+PUR-T+SiO ₂ +2% 70 [#] 石蜡	65	不挤出,良好的颗粒成型性和良好的韧性

由表 2 可见, PVDF 中加入 PUR-T 生成聚合物合金并以 SiO₂ 调节密度后,其韧性仍然很好,并且加入高熔点蜡,韧性很好,抗高温挤出性能明显提高。符合防护层的要求。

同时, SiO₂ 的加入,有效地吸纳了石蜡,使其防高温挤出性能明显提高,这可能是由于 SiO₂ 颗粒本身具有大量微孔所致。

(2) 优选样品拉伸性能及其它主要性能。

选择表 2 中的 4[#] 样品与代用粉作为拉伸实验表 3 的 1 号样品,用 PVDF+PUR-T+SiO₂+3% 聚乙烯蜡单独压制为表 3 中的 2[#] 样品,用 PVDF+PUR-T+SiO₂ 单独压制为 3[#] 样品,测试其拉伸强度,拉伸试验见表 3。图 3 为氟碳树脂与 PUR-T 合金作防护层的拉伸试验结果图。

表 3 中,1[#] 样品上层为防护层(PVDF+PUR-T+SiO₂+3% 聚乙烯蜡),下层为代用粉,做拉伸性能测试,拉伸断面如图 3a 所示,在代用粉和防护层界面的附着力为 0.91 MPa,代用粉和防护层并没有融合,断裂界面代用粉量较多,说明防护层颗粒之间的粘结强度较代用粉高。2[#] 和 3[#] 分别为含 3% 聚乙烯蜡的防护层(如图 3b 所示)和不含聚乙烯蜡的防护层(如图 3c 所示)拉伸数据,通过观察断裂界面,附着力分别为 2.29 MPa 和 3.97 MPa,说明防护层粉体间粘结力更好。

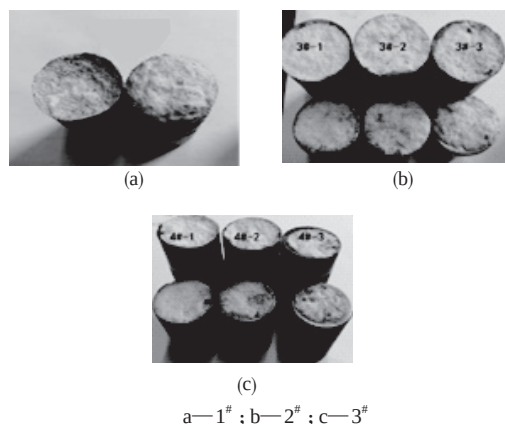


图3 氟碳树脂与PUR-T合金作防护层的拉伸试验结果图

表3 氟碳树脂与PUR-T合金作防护层的拉伸试验

序号	附着力 / MPa	现象分析
1 [#]	0.91	通过观察断裂界面,代用粉末和保护层没有熔合,并且断裂界面处的代用粉末的量较大,这表明保护层的颗粒之间的结合强度高于代用粉末的结合强度。
2 [#]	2.29	通过观察断裂界面,晶粒断裂靠近结合点,晶粒中间没有断裂。与纯代用粉末的拉伸试验数据相比,保护层粉末之间的结合力更好。
3 [#]	3.97	通过观察断裂界面,晶粒断裂靠近结合点,晶粒中间没有断裂。与纯代用粉末的拉伸试验数据相比,保护层粉末之间的结合力更好。

综上,对比3种样品的拉伸数据可知,防护层粉体之间的粘结强度比代用粉的粉体间的粘结强度高,防护层与代用粉之间的粘结强度不高。

选择氟碳树脂作为防护层材料,一是因为氟碳树脂本身非常稳定,不会对炸药中的活性组分产生影响,二是因为目前压装炸药中炸药粉末的表面是用氟碳树脂进行包覆的,因此在相互作用下,防护层可以与炸药本体有更大的粘结力,三是因为氟碳树脂的熔点较高,能够在热压成型时的高温下保持形状,避免挤出。

PVDF 氟碳树脂化学结构为 $-(CF_2-CH_2-)_n$,之所以有如此独特的优良性能,是其结构中含有大量的C—F键,键能是485 kJ/mol,远大于C—H, C—O, Si—O, Si—C等。C—F键键能极强, C—C键主链四周又被一系列带负电的F原子包围,形成了高密度的立体屏蔽,保护了C—C键的稳定,使其很难被光、热及化学因素破坏。

单一的氟碳树脂具有高化学惰性,难溶难熔,对炸药的附着力差,通过与PUR-T共混可改善其附着力。氟碳树脂和PUR-T在高温高压下具有较好的相容性,在加热固化过程中,氟碳树脂微粒会软化并与PUR-T熔融形成致密的“高分子合金”,从而保证涂层具有完整性、光泽度、透明性和柔韧性。

通过最后实验数据分析,氟碳树脂与PUR-T合金材料的防护层与炸药本体间的粘结力还需要增强。

2.3 PUR-T 防护层材料

(1) PUR-T 防护层。

选择PUR-T弹性体作为防护层材料,一是因为PUR-T本身非常稳定,不会对炸药中的活性组分产生影响,二是PUR-T生产工艺成熟,选择范围比较广泛,在硬度、模量以及耐高温性上性能优异,可以根据需要选取不同型号的PUR-T。

①样品及其主要性能数据。

选取不同硬度的PUR-T材料分别用 MoS_2 、铝粉、 SiO_2 粉末进行密度调节。温度为120℃,压强为20 MPa,时间为1 h。制得的样品的密度均为20 g/cm³。实验结果以及现象分析见表4。

表4 PUR-T复合防护层样品及其主要性能

序号	防护层材料	现象分析
1 [#]	PUR-T60+ MoS_2	防护层挤出且较脆
2 [#]	PUR-T60+ SiO_2	防护层挤出,具有韧性
3 [#]	PUR-T60+Al	防护层挤出,具有韧性
4 [#]	PUR-T90+ MoS_2 +DMF	防护层不挤出,成品较脆
5 [#]	PUR-T90+ SiO_2 +DMF	不挤压,成品韧性好
6 [#]	PUR-T90+Al+DMF	防护层不挤出,成品较脆
7 [#]	PUR-T130+ MoS_2 +DMF	防护层不挤出,成品较脆
8 [#]	PUR-T130+ SiO_2 +DMF	防护层不挤出,成品较脆
9 [#]	PUR-T130+Al+DMF	防护层不挤出,成品较脆
10 [#]	PUR-T90(粉末)+ SiO_2	防护层不挤出,成品较脆

通过对实验条件和样品主要性能的筛选,5[#]样品性能较优。

②部分优选样品拉伸性能及其它主要性能。

由于10[#]样品制备方法简单,因此选择表4中的10[#]样品PUR-T90(粉末)+ SiO_2 与代用粉进行压制,作为拉伸实验表5的3[#]样品,用PUR-T90(粉末)+ SiO_2 单独压制为表5中的2[#]样品,用代用粉单独压制为1[#]样品,进行拉伸试验,拉伸断面图如图4所示。拉伸试验结果见表5。

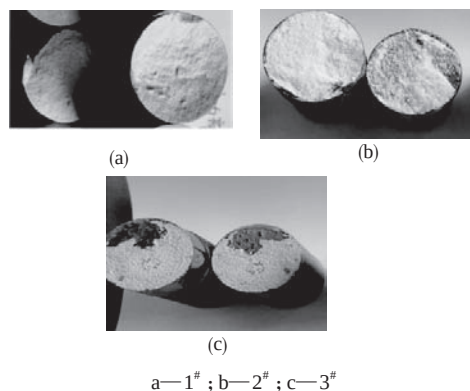


图4 防护层与代用粉热压成型的样品拉伸性能试验结果图

由表5可知,代用粉附着力为1.2 MPa,拉伸断

面如图 4a 所示, PUR-T90(粉末)+SiO₂ 防护层附着为 2.37 MPa, 拉伸断面如图 4b 所示, 代用粉与防护层之间附着力为 2.05 MPa, 拉伸断面如图 4c 所示, 数据表明防护层本身附着力与力学性能优于代用粉, 且防护层与代用粉之间附着力较强, 可满足防护层要求。

表 5 防护层与代用粉热压成型的样品拉伸性能

序号	防护层材料	附着力 / MPa	现象分析
1	代用粉	1.2	代用粉的内部断裂界面
2	PUR-T90(粉末)+SiO ₂	2.37	防护层中的断裂界面
3	PUR-T130(粉末)+SiO ₂ / 代用粉=1 / 1	2.05	断裂界面在代用粉末和保护层之间, 没有明显的边界, 表明替代粉末和保护层之间具有良好的附着力。

(2) PUR-T-PI 粉末复合防护层材料。

将 PI 引入 PUR 防护层体系, 因为 PI 分子与 PUR 分子的交联, 增加了防护层体系的整体强度和韧性, 制备出更加符合要求的防护层材料。

样品及其主要性能数据。

将不同型号的 PUR-T(60, 90, 130) 与 PI(1), PI(2) 复合成聚合物合金, 并采用 SiO₂ 调节密度, 制成防护层材料, 进行热压成型试验。试验中温度为 120 ℃, 压强为 20 MPa, 时间为 1 h。实验结果以及现象分析见表 6。

由表 6 可见, 两种纯 PI(1), PI(2) 在热压成型过程中, 无挤出, 样品的硬度高, 但韧性一般, 密度低。PI 与 PUR-T 形成聚合物合金后, 低型号 (熔点低) 的 PUR-T 在热压成型时有挤出, 采用高型号 (熔点高) 的 PUR-T 后, 提高了合金的韧性, 并且在热压成型时无挤出。采用 SiO₂ 提高密度后, 依然保持了高的硬度和韧性。

2.4 PI 防护层材料

将 PI 用 SiO₂ 调节密度均为 2.0 g/cm³, 用蜡提高润滑性, 进行热压试验, 试验结果以及现象分析见表 7。实验时的压强为 20 MPa, 时间为 1 h。由表 7 可见, 采用 PI 作防护层的试验中, 不加石蜡的样品硬度高, 石蜡超过 10% 时的样品有挤出, 当石蜡在 3% 以及 5% 时样品没有挤出。样品适合作为防护层材料。

部分优选样品拉伸性能及其它主要性能。

选择表 7 中的 17[#] 样品 PI+SiO₂ 与代用粉进行压制, 作为拉伸实验表 8 的 3[#] 样品, 用 PI+ 铝粉与代用粉进行压制为表 5 中的 2[#] 样品, 用代用粉单独压制为 1[#] 样品, 进行拉伸试验, 结果见表 8。

表 6 PUR-T-PI 粉末复合防护层热压成型试验

序号	防护层材料	密度 / (g · cm ⁻³)	现象分析
1 [#]	PI(1)	1.6	防护层不挤出, 样品硬度较高
2 [#]	PI(2)	1.6	防护层不挤出, 样品硬度较高
3 [#]	PUR-T60+PI(1)+SiO ₂ +DMF	1.8	防护层挤出, 样品硬度较低
4 [#]	PUR-T90+PI(1)+SiO ₂ +DMF	1.8	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 具有一定的弹性。
5 [#]	PUR-T130+PI(1)+SiO ₂ +DMF	1.8	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 具有一定的弹性。
6 [#]	PUR-T90+PI(1)+DMF	1.4	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 在 160℃ 下不软化。
7 [#]	PUR-T90+PI(2)+DMF	1.4	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 在 160℃ 下不软化。
8 [#]	PUR-T130+PI(1)+DMF	1.4	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 在 160℃ 下不软化。
9 [#]	PUR-T60+PI(1)+DMF	1.4	防护层挤出, 成品较软
10 [#]	PUR-T60+PI(2)+DMF	1.4	防护层挤出, 成品较软
11 [#]	PUR-T130+PI(1)+DMF	1.4	防护层不挤出, 样品硬度高, 韧性好, 在 160℃ 下不软化。
12 [#]	PUR-T90+PI(2)+SiO ₂ +DMF	1.8	防护层不挤出, 样品硬度较高
13 [#]	PUR-T130+PI(1)+SiO ₂ +DMF	1.8	防护层不挤出, 样品硬度较高

表 7 提高密度后 PI 粉末复合防护层热压成型试验

序号	防护层材料	温度 / ℃	现象分析
14 [#]	PI+SiO ₂	85	防护层不挤出, 良好的附着力和硬度
15 [#]	PI+SiO ₂	120	防护层不挤出, 良好的附着力和硬度
16 [#]	PI(1)+SiO ₂ +3%100 [#] 石蜡	85	防护层不挤出, 良好的附着力和硬度
17 [#]	PI(1)+SiO ₂ +3%100 [#] 石蜡	120	防护层不挤出, 良好的附着力和硬度
18 [#]	PI(1)+SiO ₂ +5%100 [#] 石蜡	120	防护层不挤出, 良好的附着力和硬度
19 [#]	PI(1)+SiO ₂ +10%100 [#] 石蜡	120	防护层挤出, 样品硬度良好
20 [#]	PI(1)+SiO ₂ +5% 聚乙烯蜡	85	防护层不挤出, 有良好的附着力和硬度
21 [#]	PI(1)+SiO ₂ +5% 聚乙烯蜡	120	防护层不挤出, 有良好的附着力和硬度
22 [#]	PI(1)+SiO ₂ +10% 聚乙烯蜡	120	防护层不挤出, 有良好的附着力和硬度

由表 8 数据可知, 代用粉附着力为 1.2 MPa, 拉伸断面的 SEM 照片如图 5a 所示。粉末 PI(1)+ 铝粉防护层与代用粉之间附着力为 2.08 MPa, 拉伸断面的 SEM 照片如图 5b 所示, 粉末 PI(1)+SiO₂ 代用粉与防护层之间附着力为 1.82 MPa, 拉伸断面如图 5c 所示, 表明防护层本身附着力与力学性能优于代用粉, 且防护层与代用粉之间附着力较强, 可以满足防护层要求。

表8 PI 防护层拉伸性能测试

序号	防护层材料	附着力 / MPa	现象分析
1 [#]	代用粉	1.2	代用粉的内部断裂界面
2 [#]	PI(1)+ 铝粉 / 代用粉 =1 : 1	2.08	断裂界面位于代用粉与保护层之间,没有明显的边界,表代用粉与保护层之间的附着力良好。
3 [#]	PI(1)+SiO ₂ / 代用粉 =1 : 1	1.82	断裂界面在代用粉和保护层之间,没有明显的边界,表明代用粉和保护层之间具有良好的附着力。

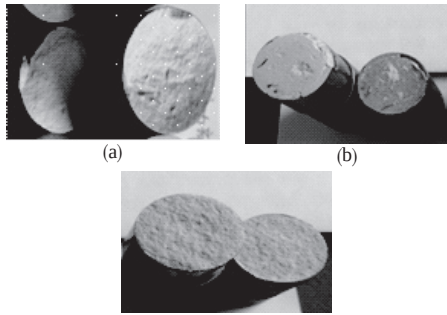
a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]

图5 防护层拉伸性能测试试验结果图

3 结论

(1) 制备的防护层材料有 PUR-T 与 PI 两种,其中 PUR-T90 (粉末)+ SiO₂, PI+ 铝粉样品均能达到防护层要求:密度均可达到 1.8~2.0 g/cm³,邵氏硬度合适,与药柱相容性良好,满足在热压过程中与药粉共同成型,易于脱模的工艺要求。

(2) 通过对压装炸药中热压融合工艺探究,制备出符合工艺过程的防护层材料,满足一次成型热压工艺中对防护层的要求,简化了压装炸药防护层的成型工艺。

参考文献

- [1] Oommen C, Jain S R. Ammonium nitrate: A promising rocket propellant oxidizer[J]. J Hazard Mater, 1999, 67(3):253-281.
- [2] Fischer N. Pushing the limits of energetic materials—the synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(38):20 418-20 422.
- [3] Luo Qingping, Long Xinping, Nie Fude. The safety properties of a potential kind of novel green primary explosive: Al / Fe₂O₃ / RDX Nanocomposite[J]. Materials, 2018, 11(10).DOI:10.3390 / ma11101930.
- [4] 李昆,王晓峰,高立龙,等. 国外炮弹用炸药研究进展 [J]. 飞航导弹, 2017(4):69-72.
Li Kun, Wang Xiaofeng, Gao Lilong, et al. Research progress of explosives for shells abroad[J]. Cruise Missile, 2017(4):69-72.
- [5] 周旭辉,陈学平. 炸药精密压装安全控制技术 [C] // 重庆市人民政府、中国工程物理研究院. 全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集 (下). 重庆:《含能材料》编辑部, 2011:371-373.
Zhou Xuhui, Chen Xueping. Safety control technology of explosive precision pressing [C] // Chongqing Municipal People's Government, China Institute of Engineering Physics. Proceedings of the National Symposium on Hazardous Substances and Safety Emergency Technology (II). Chongqing: Editorial Department of Energetic Materials, 2011:371-373.
- [6] Wu D. Brushing the surface: cascade reactions between immobilized nanoreactors[J]. Nanoscale, 2020, 12(3):1 551-1 562.
- [7] Adamenko N, Agafonova G, Kazurov A, et al. Explosive pressing of fluoroplastic composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19:2 248-2 251.
- [8] Wang Xian, Zeng Qun, Li Jinshan, et al. First-principles-based force field for 2,6-Diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105)[J]. ACS Omega, 2019, 4(25):21 054-21 062.
- [9] 王丽丽. 石蜡 / 聚苯乙烯微胶囊和石蜡聚集体的制备及表征 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
Wang Lili. Preparation and characterization of paraffin / polystyrene microcapsules and paraffin aggregates[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [10] Tao R, Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. Energy & Fuels, 2006, 20(5):2 046-2 051.
- [11] Zhang C. Understanding the desensitizing mechanism of olefin in explosives versus external mechanical stimuli[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114 (11):5 068-5 072.
- [12] 廖肃然, 罗运军, 孙杰, 等. 水性聚氨酯的合成及其对 CL-20 的包覆 [J]. 含能材料, 2006(5):336-339.
Liao Suran, Luo Yunjun, Sun Jie, et al. Synthesis of waterborne polyurethane and its coating on CL-20[J]. Energetic Materials, 2006(5):336-339.
- [13] Sasaki T, Moriuchi H, Yano S, et al. High thermal stable thermoplastic-thermosetting polyimide film by use of asymmetric dianhydride (a-BPDA)[J]. Polymer, 2005, 46(18):6 968-6 975.
- [14] Li J. The effect of surface modification with nitric acid on the mechanical and tribological properties of carbon fiber-reinforced thermoplastic polyimide composite[J]. Surface and Interface Analysis, 2009, 41(9):759-763.
- [15] Maurel V, Guipont V, Theveneau M, et al. Thermal cycling damage monitoring of thermal barrier coating assisted with LASAT (Laser Shock Adhesion Test)[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 380.DOI:10.1016 / j.surfcoat.2019.125048.
- [16] 陈婧. 对涂装产品划格检验附着力的几点建议 [J]. 电镀与精饰, 2019, 41(10):33-37.
Chen Jing. Some suggestions on marking and testing adhesion of coating products[J]. Electroplating and Finishing, 2019, 41(10):33-37.
- [17] 童龙刚, 王文礼, 李恒羽, 等. 铝合金维氏硬度试验的测量不确定度评定 [J]. 理化检验 (物理分册), 2018, 54(11):819-821.
Tong Longgang, Wang Wenli, Li Hengyu, et al. Evaluation of measurement uncertainty in vickers hardness test of zirconium alloy[J]. Physical and Chemical Examination (Physical Division), 2018, 54(11):819-821.
- [18] 杨化浩, 者东梅, 朱天戈, 等. 样品制备方式对测定高分子材料纳米压痕硬度的影响 [J]. 塑料工业, 2016, 44(8):67-70.
Yang Huahao, Zhe Dongmei, Zhu Tiange, et al. Effect of sample preparation methods on determination of nanoindentation hardness of polymer materials[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(8):67-70.