

# 固体推进剂装药自动化套包工艺技术研究

李 鹏 刘 晨 路向辉 刘建利 刘剑侠 杨士山\*

(西安近代化学研究所,西安 710065)

**摘 要** 设计了一种固体火箭推进剂装药自动化套包装置,实现了固体推进剂装药套包工艺的自动化人机隔离操作。通过工艺参数研究表明,推进剂涂胶最佳工艺参数为涂胶时间 6s,刮胶次数 2 次,包覆层涂胶最佳工艺参数为涂胶时间 5s,刮胶次数 2 次,球头驱胶最佳工艺参数为驱胶时间 9s,驱胶压力 0.3bar,装药柱面驱胶最佳工艺参数为驱胶速率 10mm/s,驱胶次数 3 次,最佳工艺条件下制备装药的推进剂/包覆层表面粘接强度为 32.9N/cm(20℃)。

**关键词** 套包工艺,自动化,工艺参数

## Study on the processing technology for automated coating of solid propellant charge

Li Peng Liu Chen Lu Xianghui Liu Jianli Liu Jianxia Yang Shishan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065)

**Abstract** The automated coating device of solid rocket propellant was designed. The automated man-machine isolation coating was implemented. The results showed that the best adhesive strength was 32.9N/cm(20℃). It revealed the behavior between adhesive strength to inhibitor and propellant surface treatment quality by different process conditions. The best process parameters of inhibitor adhesive coating were that coating time was 6s and twice, the best process parameters of propellant adhesive coating were that coating time was 5s and twice, the best process parameters of adhesive ball head banishing were that time was 9s and the pressure was 0.3bar, the best banishing speed was 10mm/s and three times.

**Key words** coating process, automation, processing parameter

我国研制的多种空地导弹、反坦克导采用自由装填式装药,装药包覆层为三元乙丙(EPDM),具有耐老化性能好、高低温力学性能优异、耐烧蚀和密度低等优点,是固体火箭发动机装药包覆层的首选材料<sup>[1-7]</sup>。但由于 EPDM 需要在高温、高压下硫化成型,因此不能直接对推进剂药柱进行包覆,一般采用套包工艺。

套包工艺是将包覆层、推进剂药柱分别预先制造,再利用粘接剂将包覆层和药柱粘接在一起的推进剂套包工艺。目前套包工艺均为手工操作,存在以下问题:(1)装药包覆质量一致性差,装药工作可靠性低。传统套包工序存在由于手工操作带来的装药界面粘接质量一致性差等隐患,如果包覆层/推进剂界面发生脱粘,将会引起燃面恶性增大,严重影响弹道性能,甚至导致发动机解体,致使导弹发射失败。(2)产品研制效率低、工艺控制难度大。产品研

制效率低是手工操作的突出问题,导致型号产品无法满足批量装药的需求,成为制约空地导弹、反坦克导弹等战术导弹推进剂装药研制生产的瓶颈,严重影响和制约我军新型武器系统的装备。(3)手工套包操作安全性较低。手工套包工艺过程中,均为人与药柱、化工材料、化学溶剂等直接接触,存在较大的安全风险。

针对存在的问题,本课题组开展了固体推进剂装药自动化套包工艺技术研究,通过自动化套包装置设计加工及自动化套包工艺参数优化,实现固体推进剂装药套包工艺自动化人机隔离操作,提高装药包覆效率、质量及其一致性,提升发动机装药工作可靠性。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

本实验用原材料见表 1。

**作者简介:**李鹏(1982-),男,博士,副研究员,主要从事固体推进剂装药包覆层配方及工艺技术研究。

**联系人:**杨士山(1977-),男,博士,研究员,主要从事固体推进剂装药包覆层配方及工艺技术研究。

表 1 实验用原材料

| 名称      | 主要组成       |
|---------|------------|
| 推进剂药柱   | 改性双基推进剂    |
| 包覆层     | 改性三元乙丙包覆层  |
| XJ-甲粘合剂 | —NCO 组分粘合剂 |
| XJ-乙粘合剂 | —OH 组分粘合剂  |

## 1.2 实验装置及工艺流程

### 1.2.1 实验装置

为了实现套包工艺的自动化操作,本研究以旋转工作台为中心进行设计,包含推进剂涂胶单元、包覆层涂胶套合单元、球面驱胶单元、圆柱面驱胶单元,分别实现药柱球面和柱面涂胶、包覆层涂胶、包覆层与药柱套合、药柱球面驱胶、药柱圆柱面驱胶。自动化套包装置结构示意图见图 1。

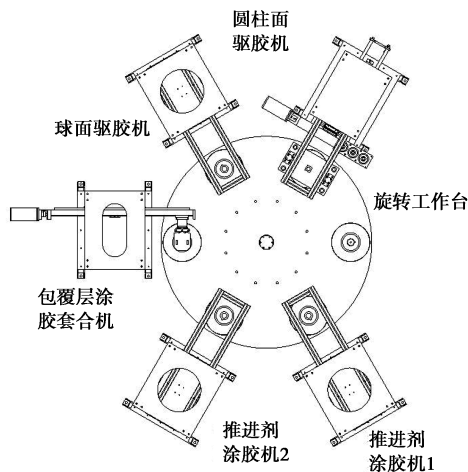


图 1 自动化套包装置结构示意图

### 1.2.2 工艺流程

自动化套包工艺流程见图 2。

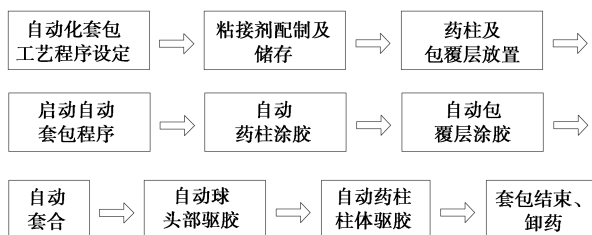


图 2 自动化套包工艺流程图

## 2 结果与讨论

### 2.1 推进剂涂胶工艺参数分析

采用某推进剂进行了涂胶时间、刮胶次数与推进剂表面涂胶效果研究,在自动化套包装置参数控制页面分别设置推进剂淋胶时间为 4s、6s 及 8s,刮胶次数为 1 次、2 次及 3 次进行实验,结果见表 2。

表 2 推进剂涂胶工艺参数与涂胶效果

| 序号 | 工艺参数   |      | 涂胶效果     |
|----|--------|------|----------|
|    | 淋胶时间/s | 刮涂次数 |          |
| 1  | 4      | 1    | 下端大部分未涂到 |
| 2  | 4      | 2    | 下端部分未涂到  |
| 3  | 4      | 3    | 部分未涂到    |
| 4  | 6      | 1    | 部分未涂到    |
| 5  | 6      | 2    | 完全涂匀     |
| 6  | 6      | 3    | 完全涂匀     |
| 7  | 8      | 1    | 部分未涂到    |
| 8  | 8      | 2    | 涂匀,胶量过多  |
| 9  | 8      | 3    | 涂匀,胶量过多  |

由表 2 可见,当淋胶时间为 4s 时,由于淋胶量不足,导致推进剂表面有部分未涂到胶料,当淋胶时间为 6s 时,刮涂 2 次可实现推进剂表面完全涂覆。考虑节省胶料和成本因素,选定的最佳推进剂涂胶时间为 6s,刮胶次数为 2 次。在最佳工艺条件下涂覆的推进剂表面胶料效果见图 3。



图 3 推进剂表面涂胶效果图

### 2.2 包覆层涂胶工艺参数分析

采用某推进剂装药包覆层进行了包覆层涂胶时间、刮胶次数与包覆层表面涂胶效果研究,在自动化套包装置参数控制页面分别设置包覆层涂胶时间为 3s、5s 及 7s,包覆层移动次数为 1 次、2 次及 3 次进行实验,结果见表 3。

表 3 包覆层涂胶工艺参数与涂胶效果

| 序号 | 工艺参数   |      | 涂胶效果      |
|----|--------|------|-----------|
|    | 涂胶时间/s | 移动次数 |           |
| 1  | 3      | 1    | 上端大部分未涂到  |
| 2  | 3      | 2    | 上端部分未涂到   |
| 3  | 3      | 3    | 部分未涂到     |
| 4  | 5      | 1    | 部分未涂到     |
| 5  | 5      | 2    | 完全涂匀      |
| 6  | 5      | 3    | 完全涂匀      |
| 7  | 7      | 1    | 完全涂匀      |
| 8  | 7      | 2    | 完全涂匀,胶量过多 |
| 9  | 7      | 3    | 完全涂匀,胶量过多 |

由表 3 可见,当包覆层涂胶时间为 3s 时,由于淋胶量不足,导致包覆层表面有部分未涂到胶料,当涂胶时间为 5s 时,包覆层移动次数为 2 次可实现推进剂表面完全涂覆。考虑节省胶料和成本,选定的最佳包覆层涂胶时间为 5s,刮胶次数为 2 次。包覆层表面涂胶工艺见图 4。

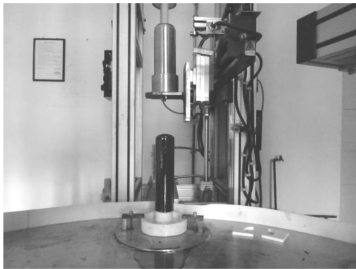


图 4 包覆层表面涂胶工艺图

2.3 球头驱胶工艺参数分析

采用某推进剂装药包覆层与推进剂进行了球头驱胶时间和驱胶压力与球头驱胶效果实验研究,结果见表 4。

表 4 球头驱胶工艺参数与驱胶效果

| 序号 | 工艺参数   |        | 球头驱胶效果    |
|----|--------|--------|-----------|
|    | 驱胶时间/s | 压力/bar |           |
| 1  | 3      | 0.1    | 球头有余胶,不贴合 |
| 2  | 3      | 0.3    | 球头有余胶,不贴合 |
| 3  | 3      | 0.5    | 球头有余胶     |
| 4  | 3      | 0.7    | 球头有余胶     |
| 5  | 6      | 0.1    | 球头有少量余胶   |
| 6  | 6      | 0.3    | 球头有少量余胶   |
| 7  | 6      | 0.5    | 球头有少量余胶   |
| 8  | 6      | 0.7    | 无余胶,完全贴合  |
| 9  | 9      | 0.1    | 球头有少量余胶   |
| 10 | 9      | 0.3    | 无余胶,完全贴合  |
| 11 | 9      | 0.5    | 无余胶,完全贴合  |
| 12 | 9      | 0.7    | 无余胶,完全贴合  |

由表 4 可见,当球头驱胶时间为 3s 时,推进剂球头余胶较多,推进剂与包覆层不贴合,当驱胶时间增至 6s 时,推进剂球头胶料随着驱胶压力变大逐渐减少,当压力为 0.7bar 时,球头已无余胶,推进剂与包覆层完全贴合,进一步进行了 9s 驱胶实验,可以看出,当驱胶时间为 9s,驱胶压力为 0.3bar 时,同样实现了球头余胶的驱除,包覆层与推进剂完全贴合。综合考虑安全因素,选定的最佳球头驱胶时间为

9s,驱胶压力为 0.3bar。球头驱胶工艺如图 5 所示。



图 5 球头驱胶工艺图

2.4 装药柱面驱胶工艺参数分析

对橡胶圈柱面驱胶效果进行了研究,结果见表 5。

表 5 柱面驱胶工艺参数与驱胶效果

| 序号 | 工艺参数                           |          | 柱面驱胶效果             |
|----|--------------------------------|----------|--------------------|
|    | 驱胶速率/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | 驱胶<br>次数 |                    |
| 1  | 5                              | 1        | 柱面有余胶,胶圈下降稳定,效率低   |
| 2  | 5                              | 3        | 无余胶,胶圈下降稳定,效率低     |
| 3  | 5                              | 5        | 无余胶,胶圈下降稳定,效率低     |
| 4  | 10                             | 1        | 少量余胶,胶圈下降稳定        |
| 5  | 10                             | 3        | 无余胶,胶圈下降稳定         |
| 6  | 10                             | 5        | 无余胶,胶圈下降稳定         |
| 7  | 15                             | 1        | 少量余胶,驱胶速率过快,胶圈出现翻转 |
| 8  | 15                             | 3        | 无余胶,驱胶速率过快,胶圈出现翻转  |
| 9  | 15                             | 5        | 无余胶,驱胶速率过快,胶圈出现翻转  |

由表 5 可见,当柱面驱胶速率为 5mm/s、10mm/s 时,橡胶圈下降稳定,驱胶速率为 5mm/s,驱胶次数为 5 次时可以实现余胶的驱除,当驱胶速率为 15mm/s 时,容易发生胶圈翻转,损伤包覆层,影响驱胶效果。同时对柱面橡胶圈驱胶次数进行了研究,当柱面驱胶 1 次时,通过解剖和激光电子散斑检测发现药柱柱面与包覆层界面存在较多的残留粘接剂和气泡,当驱胶次数为 3 次及 5 次时,通过解剖及激光电子散斑检测,未发现脱粘及气泡,多余粘接

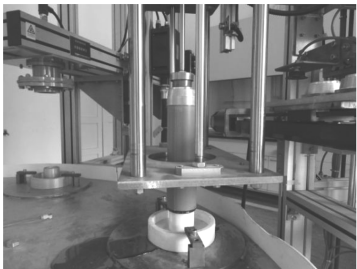


图 6 装药柱面驱胶工艺图

剂驱除完全。综合柱面驱胶安全性及效率,最佳柱面驱胶工艺参数为驱胶速率 10mm/s,驱胶次数 3 次。装药柱面驱胶工艺见图 6。

## 2.5 套包实验分析

利用设计的自动化套包装置及最佳工艺条件对某推进剂与包覆层进行套包实验,将固化后的装药制备成粘接强度测试试样进行剥离强度测试,其结果为 32.9N/cm(20℃),相比传统手工包覆粘接强度 22.6N/cm(20℃)有了较大的提高。对剥离实验后的试样进行观察,发现剥离实验时有较薄包覆层残留在推进剂表面,说明推进剂与包覆层粘接强度高,剥离破坏发生在强度较低的包覆层上,如图 7 所示。

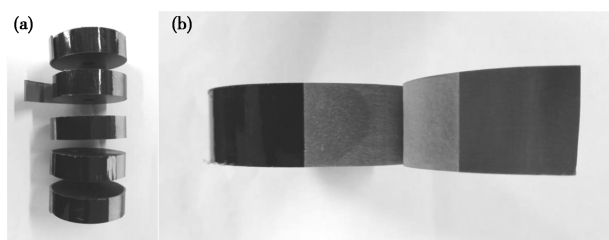


图 7 剥离前后试样的界面图

[(a)剥离前;(b)剥离后]

## 3 结论

(1)通过推进剂涂胶单元、包覆层涂胶套合单元、球面驱胶单元、圆柱面驱胶单元等结构设计,形成了一种固体推进剂装药自动化套包装置,实现了装药套包工艺的自动化人机隔离操作。

(2)通过工艺参数研究可知,推进剂涂胶最佳工艺为涂胶时间 6s,刮胶次数 2 次;包覆层涂胶最佳工艺参数为涂胶时间 5s,刮胶次数 2 次;球头驱胶最佳工艺参数为驱胶时间 9s,驱胶压力 0.3bar;装药柱面驱胶最佳工艺参数为驱胶速率 10mm/s,驱胶次数 3 次。

(3)采用自动化套包装置制备的装药进行界面剥离强度测试,粘接强度为 32.9N/cm(20℃),相比传统手工包覆粘接强度 22.6N/cm(20℃)有了较大的提高。

## 参考文献

- [1] 黄庆东,梁滔,魏绪玲,等.国内外乙丙橡胶技术进展Ⅱ.生产及应用进展[J].合成橡胶工业,2014,37(2):154-158.
- [2] 路向辉,杨士山,刘晨,等.填料对三元乙丙橡胶包覆层性能影响研究[J].化工新材料,2013,41(10):131-132.
- [3] 李鹏,刘晨,李军强,等.六(4-羟甲基苯氧基)环三磷腈阻燃剂/聚酰亚胺纤维对三元乙丙包覆层烟雾性能的影响[J].化工新材料,2019,47(7):107-110.
- [4] 安广亮,刘义华,刘伟,等.EPDM 改性对其绝热材料性能的影响[J].固体火箭技术,2014,37(3):424-427.
- [5] 谈炳东,许进升,贾云飞,等.短纤维增强 EPDM 包覆薄膜超弹性本构模型[J].力学学报,2017,49(2):317-323.
- [6] 何永祝,吕璐,罗国勤.提高 EPDM 绝热层生熟界面粘接性能研究[J].中国粘合剂,2010,19(11):14-17.
- [7] 贾晓龙,李鹏,于运花,等.预分散酚醛中空微球对三元乙丙橡胶绝热层性能的影响及梯度化绝热层的研究[J].固体火箭技术,2010,33(1):99-103.

收稿日期:2019-10-20

修稿日期:2019-12-10

(上接第 232 页)

- [20] Wang C, Bai G, Yue G, et al. Optimization of resin infusion processing for composite pipe key-part and K/T type joints using vacuum-assisted resin transfer molding [J]. Applied Composite Materials, 2016, 23(5):1065-1078.
- [21] 闫超,陈萍.自动铺丝技术及其在飞机复合材料构件制造中的应用[J].玻璃钢/复合材料,2017(11):101-105.
- [22] 钱钧,肖军,赵东标,等.复合材料构架式卫星接头自动铺丝成型仿真研究[J].宇航学报,2004(6):694-696.
- [23] Hizam R M M A C K. A review of FRP composite truss systems and its connections, University of Southern Queensland 2013[C]. Australia: Springer, 2013.
- [24] 孙洋.碳纤维复合材料连接结构的强度分析及其影响因素[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [25] 李凤明,吴志静,刘荣强.铰接桁架结构动力学问题研究[J].宇航学报,2012(5):556-561.
- [26] Shahverdi M, Vassilopoulos A P, Keller T. Experimental in-

vestigation of R-ratio effects on fatigue crack growth of adhesively-bonded pultruded GFRP DCB joints under CA loading [J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(10SI):1689-1697.

- [27] Hai N D, Mutsuyoshi H. Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:347-359.
- [28] 刘良威,刘锦,李志慧,等.复合材料桁架胶接装配技术[J].宇航材料工艺,2013(4):102-104.
- [29] Lavalette N P, Bergsma O K, Zarouchas D, et al. Comparative study of adhesive joint designs for composite trusses based on numerical models[J]. Applied Adhesion Science, 2017, 5(1):1-20.
- [30] Manalo A, Mutsuyoshi H. Behavior of fiber-reinforced composite beams with mechanical joints[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(4):483-496.

收稿日期:2019-01-06