

# 一种定向断裂复合材料密封盖的研制<sup>\*</sup>

徐振钦 韩 冰

(南京工程学院材料工程学院,南京 211167)

**摘要** 介绍某多管火箭武器复合材料定向断裂密封盖的制备,着重讨论拓扑自锁定向断裂密封盖的结构设计、材料选择、成型工艺和耐烧蚀设计。试验和计算结果均符合定向断裂设计要求。

**关键词** 复合材料 密封盖 定向断裂 烧蚀

密封盖用在箱式火箭武器定向器的两端,是保证箱式发射技术的关键因素之一。根据作战环境和战术指标要求,前端密封盖应能保证火箭弹出定向器前的瞬间,在外加触发条件下能够自行破碎,使火箭弹顺利通过而不损伤引信,后密封盖则被火箭弹发动机的燃气射流冲破;同时密封盖应有一定的强度,能承受相邻管发射时的燃气射流冲击,还应满足气密、抗振、耐老化、耐“三防”、耐高低温等要求。因此,材料选择、成型工艺、耐烧蚀设计是复合材料密封盖的关键技术。

易碎式密封盖在国外已成功应用于导弹和多管火箭发射上,如在飞航导弹和防空导弹上使用易碎式密封盖的有美国的“陆麻雀”、“爱国者”、“战斧”和“捕鲸叉”,意大利的“阿斯派德”、“信天翁”和“斯帕达”,英国的“海鸥”,德法的“罗兰特”等。在无控多管火箭武器上,美国的 M270 火箭炮和高机动性火箭炮 HIMARS 采用了易碎式密封盖<sup>[1]</sup>。我国对易碎式密封盖的研制起步较晚,现处于试制探索阶段,效果不很理想<sup>[2]</sup>。

笔者提出一种新的定向断裂式复合材料密封盖,采用拓扑自锁结构来满足密封盖结构的正向强度和刚度要求,当在反向施加一较小冲击力时,密封盖可完成定向触发断裂,并基于非线性有限元分析了正向承受燃气射流冲击力仿真计算、利用落锤反向冲击实验,进行了断裂验证和密封盖烧蚀自熄性试验。

## 1 密封盖的基本设计要求和思想

### 1.1 基本设计要求

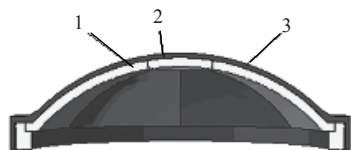
(1) 密封盖的破坏强度:密封盖在火箭弹速度 12 m/s 的反向冲击下裂开而不损坏引信,1.5 MPa 的相邻燃气射流正向冲击力下密封盖不被破坏。

(2) 密封盖的透湿率应满足火箭弹的长期贮存要求。

(3) 密封盖能承受燃气流的冲刷烧蚀作用。

### 1.2 设计思想

德国克劳斯塔尔大学的 Y. Estrin 教授和澳大利亚的 A. V. Dyskin 博士等<sup>[3]</sup>提出一种利用同样尺寸、形状的子结构规则排列并施加边界约束,得到一种拓扑自锁的复合结构。在此结构中,每一独立子结构都由它周围的结构所固定,而无须粘结材料。实验表明,这样的自锁结构具有较高的强度,同时具有很好的抗冲击能力,特别是能有效地阻止裂缝在结构中的伸展<sup>[3]</sup>。笔者借助拓扑自锁结构作为定向断裂盖的承载层,利用其整体承载及其“西瓜瓣”型子结构之间接触面无粘结、反向冲击时约束解除即可定向断裂成规定碎块的性能达到前端密封盖的工作要求。图 1 为拓扑自锁定向断裂复合材料密封盖的结构。



1—玻璃钢承载层; 2—环氧树脂密封层; 3—抗烧蚀功能层

图 1 定向断裂复合材料密封盖结构示意图

由图 1 可看出,其承载层采用 8 片子结构(包括 1 片弧顶圆心子结构、6 片“西瓜瓣”子结构及 1 片用于和定向管连接的子结构)按一定规则排列并施加边界约束,各子结构相互以平面或曲面接触而无粘结,每一个子结构都被相邻子结构的接触面所固定。承载层选用连续的、高强度的玻璃纤维纱,经过浸渍环氧树脂,湿法连续缠绕,在一定的温度下固化成型,经机械加工成 8 片子结构。密封层由环氧树脂制成连续层,与每一个子结构都粘结。环氧树脂具有很强的粘结性能,力学性能优良,耐化学药品性、耐候性、电绝缘性好且尺寸稳定,因此密封层选

<sup>\*</sup> 南京工程学院科研启动基金项目(KXJ08005)

收稿日期:2009-06-01

用环氧树脂可满足其作战环境和战术指标的各项要求,而且可较好地与承载层各子结构粘结。抗烧蚀功能层置于密封层表面,采用的是抗烧蚀、抗冲刷性能优异的有机涂料。

2 密封盖的制备

2.1 成型工装的设计与加工

由于支撑层对各子结构的尺寸要求较高,而本研究属于试制阶段,因而不可能设计制造专用夹具或专用机床进行加工。笔者采用一体式铝合金模具手糊成型半成品,按照设计要求,在加工时留有刀具余量,两个整体式半成品加工成一个成品的7块子结构。

2.2 抗烧蚀功能层材料

在酚醛树脂中加入适当的填料、催化剂与固化剂,选择合适的固化工艺,制得了具有耐高温、抗高速气流烧蚀冲刷、抗高温氧化、防气动加热烧蚀和绝热等特点的烧蚀隔热涂料。其固化后与承载层之间有良好的粘结力,受火箭弹高温燃气流烧蚀冲刷后表层炭化率高。

2.3 承载层材料

增强材料主要有碳纤维、高强度玻璃纤维和普通玻璃纤维等类型。其中碳纤维综合力学性能好,但价格高;普通玻璃纤维价格便宜,但综合力学性能相对较差,要达到产品有关技术要求必然要增加缠绕层厚度,因而导致产品质量增加。高强度玻璃纤维无捻纱综合力学性能优良,比强度、比模量高,性价比高,是成型火箭武器密封盖的理想材料。

常用的树脂基体有不饱和聚酯、环氧树脂、酚醛树脂等。其中不饱和聚酯树脂力学性能较差;酚醛树脂固化时有小分子放出,为防止制品中产生气泡一般需加压成型,固化时体积收缩率较大,为3%~5%,与玻璃纤维粘结力差;环氧树脂粘结力强,力学强度高,固化时无小分子生成,因而制品密度大,固化收缩率低且耐霉菌<sup>[4]</sup>。因此,有针对性地选择几种高性能环氧树脂,进行不同体系的对比试验,最终确定了环氧树脂和多元酸酐为主的树脂体系。

实验材料选择如下:

- 苯酚(P):工业一级,北京燕山石化公司;
- 甲醛(F)溶液:工业品,南京化工厂;
- 碱性催化剂:自制;
- 有机硅改性剂:化学纯,市售;
- 环氧树脂:E-51,无锡蓝星环氧树脂厂;
- 六氢苯酐(HHPA):嘉兴阿尔法精细化工有限

公司;

玻璃纤维:EWR200,南京冠群工业材料技术有限公司。

2.4 成型工艺研究

复合材料密封盖的研制工艺主要包括承载层成型装备的设计、工艺参数设计和缠绕成型工艺研究;密封盖承载层固化成型的整体机械加工工艺技术;环氧树脂密封层材料的配方和涂敷工艺;密封盖外表面的抗烧蚀功能层材料的配方设计和涂敷工艺4部分。另外,还要针对密封盖的整体结构、定向断裂的强度、刚度要求来确定工艺流程。

复合材料密封盖成型工艺流程如图2所示。

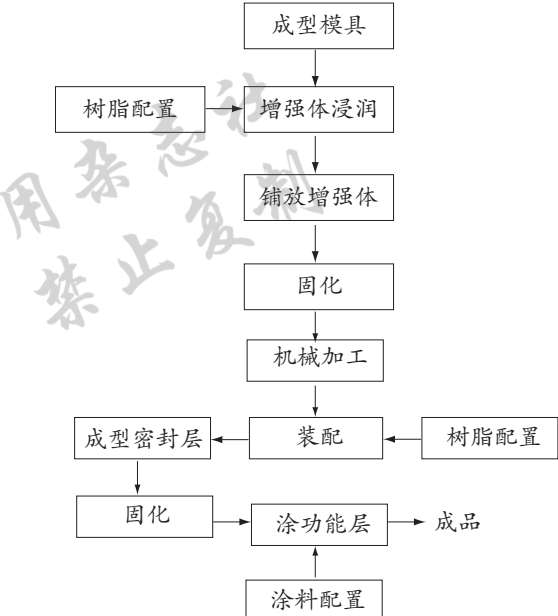


图2 成型工艺流程图

图3为制成的密封盖模型照片。玻璃钢承载层的厚度为4 mm,环氧树脂密封层厚度0.8 mm,抗烧蚀层厚度为0.3 mm。



图3 密封盖模型照片

3 性能测试

落锤式冲击试验:采用南京理工大学生产的落锤式冲击试验机分别以不同的落锤质量、高度、能量、冲击速率测试;

密封盖烧蚀试验: 用乙炔和氧气的混合气火焰烧蚀密封盖(乙炔火焰虽与燃气射流不同, 但其火焰温度能达到 2 000 ℃左右, 和燃气射流温度相近, 烧蚀时间比燃气射流作用时间长, 因此用乙炔火焰代替燃气射流烧蚀密封盖可以验证其耐烧蚀性能)。

#### 4 密封盖的定向断裂力学性能分析及烧蚀研究

##### 4.1 火箭弹反向冲击实验

实验采用的装置为落锤式冲击试验机, 落锤可通过增减配重块来调节冲击能量, 冲击头外形按火箭引信体尺寸制作, 并制作了简易底座来压紧固定密封盖圆周, 使其外表面悬空, 对三个简易制作的密封盖进行反向冲击实验。图 4 为密封盖受冲击后的断裂图。落锤质量为 1.28 kg, 当落锤高度为 500 mm 时, 落锤冲击能量为 6.278 J, 冲击速度为 3.132 m/s, 对第一个密封盖进行冲击, 结果为密封盖顶部被冲破一个和顶心子结构一样大小的破口, 其余表面基本完好, 如图 4a 所示。增加落锤高度为 800 mm, 此时落锤冲击能量为 10.04 J, 冲击速度为 3.96 m/s, 对第二个密封盖进行冲击, 结果为密封盖顶部冲破, 密封层沿着“西瓜瓣型”子结构接触面区域出现明显的裂纹, 但没有完全裂开, 如图 4b 所示。增加落锤质量为 2.28 kg, 落锤高度不变, 此时落锤冲击能量为 17.89 J, 对第三个密封盖进行冲击, 结果密封盖基本上沿支撑层的子结构间接面完全断裂, 如图 4c 所示。

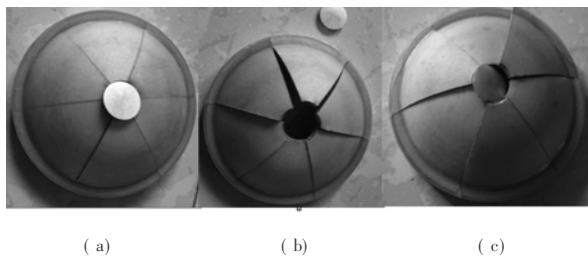


图 4 密封盖受冲击后的断裂图

根据 GJB 573A - 1998 引信环境与试验方法之规定“将装有全备引信的实验弹从 1.5 m 的高度以头向下等 5 种姿态自由跌落到以混凝土为基座的厚度不低于 75 mm 的钢板上, 火箭引信要有足够的安全性和可靠性”, 笔者所设计的密封盖显然不会对引信造成破坏。

##### 4.2 燃气射流冲击数值计算

火箭弹出定向管口后, 燃气射流对相邻管的密封盖产生冲击作用, 定向断裂式密封盖应能承受燃气射流的正向冲击作用而不被破坏。采用非线性有

限元分析程序 ABAQUS/EXPLCIT 建立密封盖的三维实体分析模型。密封盖均采用 C3D8R 六面体单元进行模拟, 燃气射流以“step time”函数的形式以实测数值计入, 幅值为 1.5 MPa, 以压力形式作用于密封层正面, 求解终止时间为 8 ms。

经计算, 在冲击过程中密封盖所产生的最大应力、承载层子结构间节点接触应力如图 5 所示。密封盖在燃气射流的冲击下, 承载层各子结构拓扑自锁, 向心楔紧, 形成球状整体承力。自锁整体产生应力较大的部位主要在各个子结构的接触面上, 尤其是子结构和定向管端接触的根部, 其中子结构间最大楔紧接触应力为 33.17 MPa, 整体结构的最大应力值为 28.09 MPa。由于不论是复合材料承载层还是环氧树脂密封层, 其材料的压缩强度均远高于最大应力值, 可知燃气射流冲击力对定向断裂式密封盖影响不大, 不会对密封盖造成破坏。

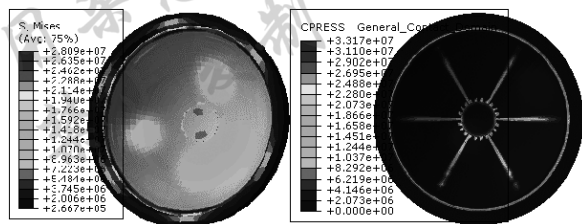


图 5 密封盖受燃气冲击的应力、接触力

##### 4.3 烧蚀试验

多管火箭弹发射时, 相邻发射管的密封盖会受到发动机燃气射流的冲击烧蚀作用, 通过烧蚀试验可检验密封盖的抗烧蚀功能层的烧蚀性和自熄性能。

密封盖烧蚀不同时间后的照片见图 6。由图 6 可看出, 当烧蚀 2 s 时, 涂有抗烧蚀功能层的密封盖外表面烧黑, 局部保留原色; 当烧蚀 4 s 时, 密封盖外表面全黑, 且黑度增加, 碳化现象明显。

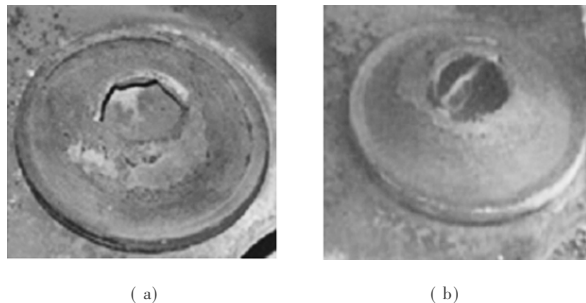


图 6 密封盖烧蚀不同时间后的照片  
a—烧蚀 2 s; b—烧蚀 4 s

由烧蚀试验结果可看出, 该材料密封盖在火焰中不会燃烧也不会变形, 这说明密封盖的抗烧蚀性

能良好。由于燃气射流对密封盖的烧蚀时间很短,远小于烧蚀试验的2 s和4 s,因而研制的定向断裂式密封盖能承受燃气射流的冲刷烧蚀作用。

## 5 结论

(1) 采用高强度玻璃纤维、环氧树脂体系,通过合理的缠绕、固化和加工工艺,可以保证密封盖的弯曲强度、弯曲刚度等性能满足设计技术要求;

(2) 通过采用拓扑自锁的方法解决了密封盖的定向断裂问题;

(3) 把烧蚀隔热涂料涂覆于密封盖外表面,可有效解决复合材料密封盖的烧蚀和冲刷问题。

这种定向断裂多管火箭武器密封盖的试验结果

和计算结果均符合设计要求,可用于我国现役装备的改造,进一步改善武器系统单一发射平台的现状。

## 参考文献

- [1] 孙甫. MY-9 易碎材料在武器系统上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2002(2): 25-28.
- [2] 张中利, 于存贵, 马大为, 等. 冲击作用下易碎式密封盖数值仿真及实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 62-66.
- [3] Dyskin A V, Estrin Y, Kanel-Belov A J, et al. A new principle in design of composites materials: Reinforcement by interlocked element[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 483-491.
- [4] 黄丽. 高分子材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

## DEVELOPMENT FOR A DIRECTIONAL FRACTURE COMPOSITE SEALING COVER

Xu Zhenqin, Han Bing

(School of Material Engineering, Nanjing Institute of technology, Nanjing 211167, China)

**ABSTRACT** A directional fracture composite sealing cover molding technology used in a multi-barrel rocket launch weapons was introduced. The topological self-locking closures to the directional fracture of structural design, material selection, molding techniques and ablation-resistant design were discussed emphatically. Test and calculation results could meet the design requirements of directional fracture.

**KEYWORDS** composite, sealing cover, directional fracture, ablation

## 风机叶片骨架芯材“中国造”

制约我国风能发电产业发展的一大瓶颈——风机叶片骨架材料结构泡沫芯材今后将不再依赖进口。

近日,常州天晟新材料股份有限公司在中科院长春应用化学研究所和四川大学高分子科学与工程学院的支持下,研制成功 Strucell 结构泡沫夹芯材料。该产品通过了德国劳氏船级社 GL 认证,性能达到国际先进水平,一举打破国外公司的技术垄断。随着一期年产能 3000 t 的产业化基地,在常州国家环保产业园落成,常州天晟成为国内首个拥有结构泡沫芯材技术并形成产业化基地的企业。中国可再生能源学会风能专业委员会主任认为,Strucell 结构泡沫芯材在中国的诞生具有里程碑意义,全球结构泡沫芯材产业格局将因此发生新变化。这种新材料以乙烯基聚合物为基础,具有芳香酰胺聚合网络修正的刚性交联结构,刚度、强度、抗疲劳性、抗冲击性优良。它能耐多种化学物质,几乎不吸水,隔热、隔音,可与碳纤维、玻璃纤维、不饱和聚酯等多种纤维复合结构形成夹芯复合材料。常州天晟总经理表示,结构泡沫芯材质量不到风机叶片的 5%,成本却占整个叶片的 10%~20%。该材料实现国产化后,不仅促进了我国高分子和复合材料产业结构调整及优化升级,同时在性价比、供货周期、售后服务等方面将使风机叶片用户受益。与采用进口结构泡沫芯材相比,使用 Strucell 泡沫夹芯材料可节约成本 25%~30%。结构泡沫芯材是风机叶片的关键材料,此前我国一直依赖进口。目前全球结构泡沫芯材处于供不应求局面。

中国复合材料学会理事、中国船舶工业集团公司第 708 研究所研究员说,结构泡沫芯材早期应用于军事领域及游艇。全球可再生能源风电行业的崛起,使风能叶片的主材料结构泡沫芯材价值大大提升。此外,该材料还可应用于高速铁路、轨道交通、船舶、航空航天等领域。(中聚)

## 塑料管禁铅——促进热稳定剂更新换代

中国塑料加工工业协会塑料管道专委会发表了全面禁铅宣言的消息后,热稳定剂行业表示,要抓住这一机遇促进热稳定剂行业产品的更新换代。中国塑协塑料助剂专委会热稳定剂分会会长分析认为,塑料管道行业禁铅过程可能会面临两方面考验:一方面要达到相关的环保标准要求,实现产品的升级换代,必然会增加成本,这对聚氯乙烯管道这样一个微利行业来说,有一定压力;另一方面,与铅盐热稳定剂相比,目前国内现有的钙锌复合热稳定剂、有机锡热稳定剂在稳定性、应用范围和价格上还有一些差距。热稳定剂生产企业还要在开发高效、环保新产品上加快步伐,同时通过技术研发进一步降低生产成本也十分必要。

国内几家热稳定剂龙头企业的反馈也很积极。大部分企业认为,随着企业环保意识的增强,无铅热稳定剂的用量也在大幅增加。河北精信化工集团有限公司总工称,尽管遇到金融危机,该公司 2009 年上半年钙锌环保型热稳定剂的销量增长 50%,特别是广东、福建等地的塑料管材企业的环保意识比较强,以环保型热稳定剂替代铅盐的企业越来越多。(中华塑网)