

# 固体发动机喷管扩张段斜向缠绕成型技术研究进展

郭亚林 刘毅佳 李瑞珍 滕会平 赵文斌

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

**文 摘** 布带斜向缠绕结构具有良好的抗烧蚀性能,在国外广泛应用于火箭、导弹的头帽和发动机喷管构件。本文简单介绍了固体发动机喷管树脂基扩张段的布带缠绕成型技术,布带斜向缠绕成型技术在国外固体火箭发动机喷管上的应用情况及我国固体发动机喷管扩张段布带斜向缠绕成型技术的研究进展。

**关键词** 固体发动机,喷管扩张段,斜向缠绕,烧蚀

中图分类号:TB332,V463

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.003

## Progress of Angled Tape-Wrapping Technology for SRM Nozzle Exit Cone

GUO Yalin LIU Yijia LI Ruizhen TENG Huiping ZHAO Wenbin

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

**Abstract** Angled tape-wrapping structure has been widely used as the nose cap of rocket and missile and the nozzle insulator of solid rocket motor (SRM) due to its excellent erosion resistant ability. Firstly, the tape-wrapping processing for SRM nozzle exit cone is briefly introduced in this paper. Then, the application of angled tape-wrapping structure on the SRM nozzle abroad is presented. Finally, the development of angled tape-wrapping structure on the SRM nozzle exit cone in our institute is discussed.

**Key words** SRM, Nozzle exit cone, Angled tape-wrapping, Ablation

### 0 引言

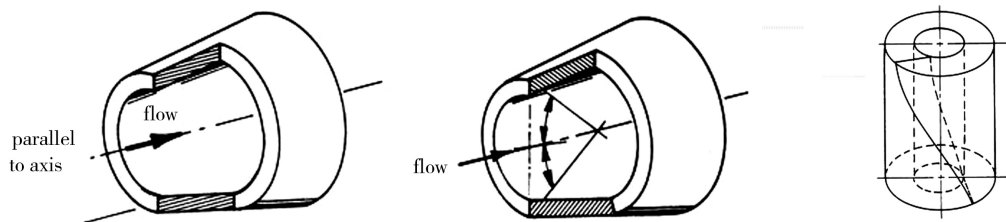
扩张段是火箭发动机喷管中提高能量转换效率的关键部件,要承受高温、烧蚀和力学载荷的综合作用。树脂基扩张段具有可靠性高、生产周期短、成本低等优点,在国内外广泛应用于高性能固体火箭发动机。国外树脂基扩张段的制备方式主要有布带重叠缠绕、布带斜向缠绕、花瓣铺层等。其中布带斜向缠绕结构具有优异的抗烧蚀冲刷性能,被广泛应用作高性能固体发动机喷管扩张段的入口端、背壁、端头帽以及火箭的头帽等。国内固体发动机喷管构件目前主要采用布带重叠缠绕成型方式,布带斜向缠绕成型技术尚处于研究阶段,与国外有较大差距。为了充分利

用布带斜向缠绕结构优良的抗烧蚀性能,降低固体发动机扩张段入口端的烧蚀率,国内近些年也开展了固体发动机喷管扩张段的斜向缠绕成型技术研究。本文在简单介绍固体发动机喷管树脂基扩张段布带缠绕成型技术的基础上,分别介绍了布带斜向缠绕成型技术在国外固体火箭发动机喷管上的应用情况和国内固体发动机喷管扩张段布带斜向缠绕成型技术的研究情况。

### 1 树脂基扩张段的布带缠绕技术

#### 1.1 树脂基扩张段的成型方法

国外树脂基扩张段的成型方法有布带重叠缠绕、布带斜向缠绕、花瓣铺层等,见图1<sup>[1-6]</sup>。



(a) Tape wrap parallel to axis (straight tape) (b) Tape wrap angled to axis (bias tape) (c) Rosette

图1 国外树脂基扩张段的制备方式

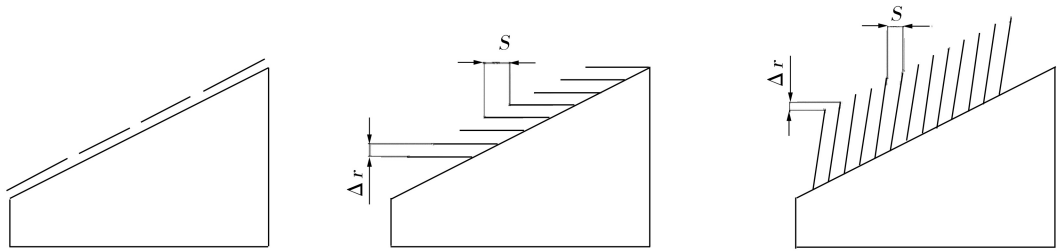
Fig1 Processing types of resin composite exit cone abroad

收稿日期:2014-04-04

作者简介:郭亚林,1971年出生,研究员,材料学专业,研究方向为复合材料。E-mail:gylaaa@sohu.com

布带重叠缠绕方法不需要布带发生变形,缠绕工艺也相对简单,因此最先被研究并应用。针对喷管喉部的强烧蚀需求和弹头的外防热需要,布带斜向缠绕方法在20世纪70年代被欧美国家开发并应用。花瓣铺层方法效率较低,应用较少。另外,小型试验发动机也有采用模压工艺制备扩张段。扩张段作为一种锥形

回转体,其重叠缠绕结构是指布带平行于锥形回转体轴线的缠绕方式,斜向缠绕结构则是指布带与锥形回转体轴线方向呈一定角度的缠绕方式,如图2<sup>[1-6]</sup>所示。另外还有一种平行缠绕结构是指布带平行于锥形回转体母线的缠绕方式,这种方式在发动机扩张段上的应用较少。这里主要介绍布带斜向缠绕结构形式。



(a) Tape parallel to cone surface (b) Tape parallel to center line (c) Tape angled to center line

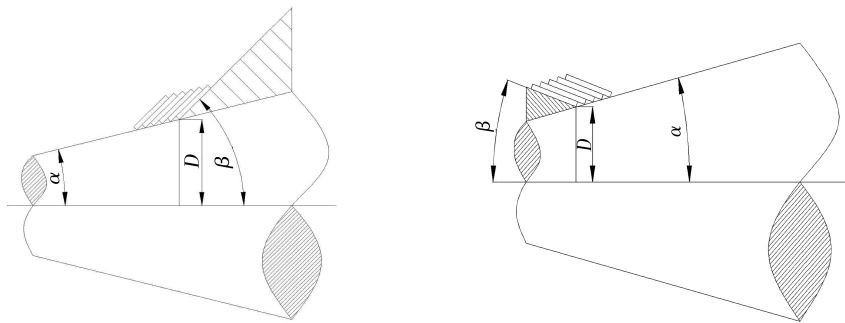
图2 锥形回转体布带缠绕的几种形式

Fig. 2 Types of tape wrapping for cone

## 1.2 布带斜向缠绕结构形式

布带斜向缠绕又可以分为由芯模大端向小端的斜向缠绕[图3(a)]和由芯模小端向大端的斜向缠绕[图3(b)]<sup>[7-8]</sup>。其中发动机喷管扩张段的成型需要采用图3(b)所示的斜向缠绕结构形式,即由芯模小端向大端的斜向缠绕,这种斜向缠绕结构中,构件

内部布层方向与气流方向一致,抗烧蚀剥蚀能力强。可以制作出内部为抗烧蚀耐热材料,中间为隔热材料,外部为结构材料的烧蚀耐热构件。图3(a)所示的由芯模大端向小端的斜向缠绕结构,构件外部布层方向与气流方向一致,因此适于制作导弹头锥等外热防护结构或发动机喷管收敛段。



(a) Tape wrapping from larger end

(b) Tape wrapping from small end

图3 布带斜向缠绕结构示意图

Fig. 3 Diagram of angled tape wrapping structure

斜向缠绕技术的关键是如何使布带展成连续的扇形并定向排列在芯模表面上,因此要求布带具有一

定的变形率(图4)<sup>[8]</sup>。

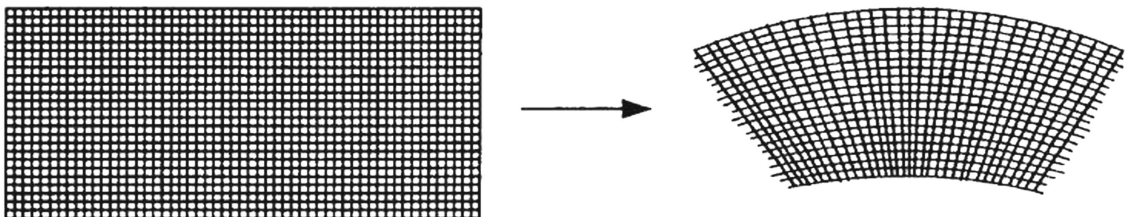


图4 布带变形

Fig. 4 Distortion of the tape

变形布带是斜向缠绕技术必不可少的,目前国内

外常见的变形带有三种:一种为将平纹布沿45°方向斜裁对接而成<sup>[4]</sup>;另一种为变密度针织碳布带<sup>[9]</sup>;第三种为经编衬纬变形布<sup>[10]</sup>。在斜向缠绕过程中,布带的变形能否满足斜向缠绕工艺的要求一般采用布

带缠绕能力指数  $\xi[\xi = D/(B\sin\beta)]^{[9]}$  来衡量, 式中,  $D$  为缠绕处芯模直径,  $B$  为布带宽度,  $\beta$  为缠绕角。通常认为, 在  $\xi \geq 5$  时, 可以进行斜向缠绕, 当  $\xi < 1.6$  时, 斜向缠绕几乎不可能。

## 2 布带斜向缠绕技术在国外固体发动机喷管上的应用

由于布带斜向缠绕结构良好的抗烧蚀性能, 在一定程度上可以有效的降低材料的烧蚀率, 因此, 布带斜向缠绕技术已在国外先进固体火箭发动机喷管上已得到广泛应用。

### 2.1 固体战略导弹

美国先进的潜射导弹三叉戟 I 的第二级扩张段在与喉部出口环相邻的扩张比  $< 7$  区域, 扩张段内衬采用了与中心线呈  $15^\circ$  角缠绕的碳布/酚醛 FM5055 材料<sup>[1]</sup>。三叉戟 II 的三级发动机扩张段也采用了斜向缠绕树脂基材料。

### 2.2 固体助推器

航天飞机固体助推器喷管采用了从  $0^\circ \sim 70^\circ$  多种不同角度的布带斜向缠绕结构作为烧蚀防热构件(图 5), 图中箭头方向为布带方向。大力神 IV 固体助推发动机扩张段绝热层采用  $15^\circ$  斜角, 入口段采用  $75^\circ$  缠绕, 喉部采用  $45^\circ$  缠绕(图 6), 图中箭头方向为布带方向, 箭头上数字为斜向缠绕角度。欧洲 Ariane 5 固体助推器扩张段在扩张比  $< 2$  区域采用  $45^\circ$  角缠绕的碳/酚醛材料<sup>[1, 11-16]</sup>。

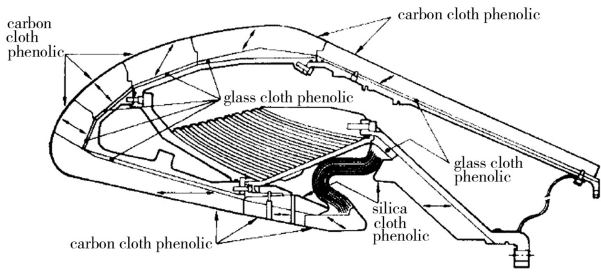


图 5 航天飞机固体助推器喷管结构

Fig. 5 Nozzle structure of space shuttle booster

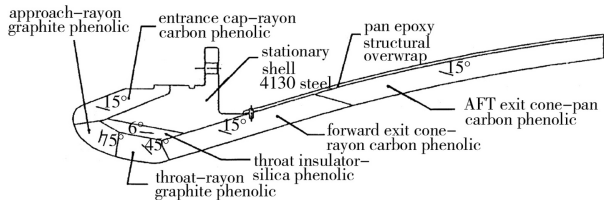


图 6 大力神 IV 全尺寸发动机喷管结构

Fig. 6 TITAN IV SRMU nozzle cross-section

### 2.3 固体运载

印度“极地轨道卫星运载火箭(PSLV)”的一级发动机喉衬为碳/酚醛布带斜向缠绕成型, 布带与喷管轴线夹角为  $60^\circ$ ; 扩张段前部和二次喷射孔处也是  $60^\circ$  斜向缠绕的碳/酚醛材料, 二次喷射孔处还有高硅

氧/酚醛衬层, 扩张段后部为  $0^\circ$  缠绕(重叠缠绕)的高硅氧/酚醛衬层<sup>[1, 17]</sup>。

## 3 我国固体发动机喷管扩张段布带斜向缠绕成型技术

我国固体发动机喷管树脂基扩张段目前以布带重叠缠绕成型工艺为主。近些年来, 西安航天复合材料研究所开展了布带斜向缠绕成型等树脂基扩张段成型技术研究。突破了布带斜向缠绕方法和连续变形胶带制备等关键技术, 实现了固体发动机扩张段布带斜向缠绕成型工艺的实验验证, 制备了小型试验发动机斜向缠绕扩张段, 并进行了初步试验测试评价。

### 3.1 $\Phi 315$ mm 发动机扩张段斜向缠绕成型工艺验证

在连续变形胶带制备和斜向缠绕成型方法研究的基础上, 通过改造布带缠绕设备, 制作出了  $\Phi 315$  mm 发动机斜向缠绕扩张段工艺试验件(图 7)。该扩张段的半锥角为  $15^\circ$ , 斜向缠绕角为  $12^\circ$ 。对其沿母线方向进行解剖, 剖面图见图 8。可以看出, 布层与扩张段轴线之间成  $12^\circ$  排布, 表明该扩张段实现了斜向缠绕结构。

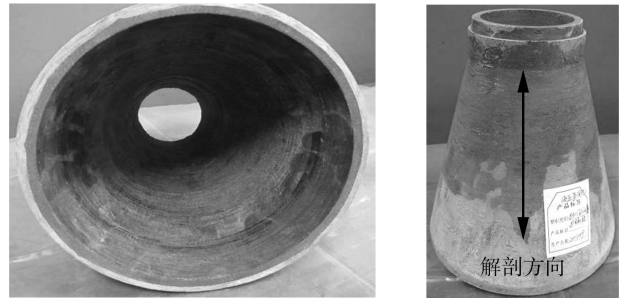
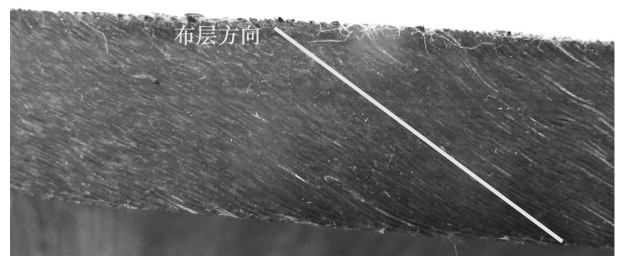


图 7 3k 平纹斜裁碳布斜向缠绕  $\Phi 315$  mm 发动机扩张段样品

Fig. 7 Sample of angled tape wrapping exit cone for  $\Phi 315$  mm motor



(a) Cross section of angled tape wrapping exit cone for  $\Phi 315$  mm motor



(b) A area

图 8  $\Phi 315$  mm 发动机扩张段样品解剖图

Fig. 8 Cross section of  $\Phi 315$  mm motor  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 3 期

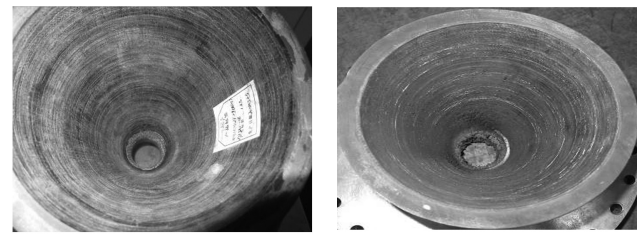
### 3.2 $\Phi 315$ mm 发动机斜向缠绕扩张段研制

制作了  $\Phi 315$  mm 试验发动机斜向缠绕扩张段, 见图 9。该斜向缠绕扩张段通过了  $\Phi 315$  mm 分段式速燃发动机热试车试验。热试车前后扩张段的内面状态见图 10。试验结果分析表明, 与作为对比的重叠缠绕扩张段相比, 斜向缠绕扩张段的烧蚀量(特别是入口端)整体小于重叠缠绕扩张段, 最大线烧蚀率降低约 16.7%。



图 9  $\Phi 315$  mm 发动机喷管斜向缠绕扩张段

Fig. 9 Angled tape wrapping exit cone of  $\Phi 315$  mm motor



(a) Prior to test (b) After test

图 10  $\Phi 315$  mm 发动机斜向缠绕扩张段

Fig. 10 Angled tape wrapping exit cone of  $\Phi 315$  mm motor

### 3.3 $\Phi 480$ mm 发动机斜向缠绕扩张段研制

在  $\Phi 315$  mm 发动机斜向缠绕扩张段成功热试车的基础上, 制备出  $\Phi 480$  mm 发动机斜向缠绕扩张段(图 11), 其中扩张段入口端的碳/酚醛材料(扩张段入口黑色部分)采用了斜向缠绕成型工艺。该斜向缠绕扩张段通过了  $\Phi 480$  mm 速燃发动机热试车试验, 扩张段的烧蚀状态良好(图 12)。

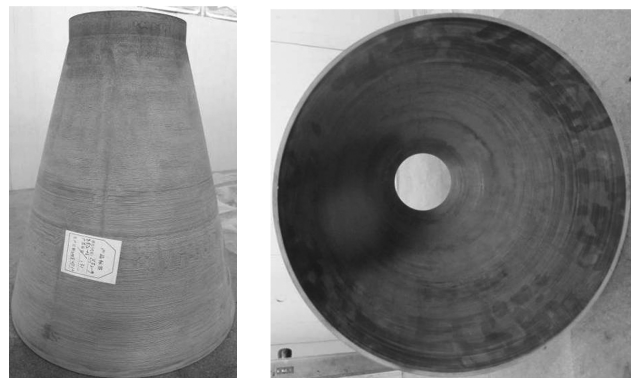
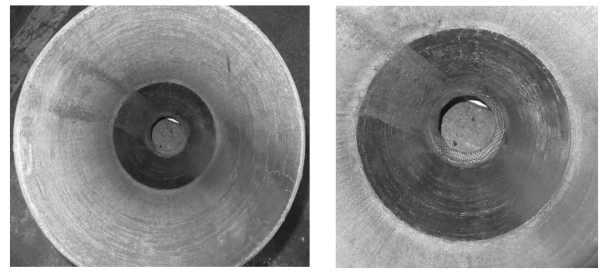


图 11  $\Phi 480$  mm 速燃发动机斜向缠绕扩张段试车前状态

Fig. 11 Angled tape wrapping exit cone of  $\Phi 480$  mm motor prior to test  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 3 期



(a) whole exit cone (b) angled tape wrapping area

图 12  $\Phi 480$  mm 速燃发动机斜向缠绕扩张段试车后状态

Fig. 12 Angled tape wrapping exit cone of

$\Phi 480$  mm motor after test

## 4 结语

固体发动机喷管布带斜向缠绕扩张段具有优异的抗烧蚀性能, 国外已得到广泛应用, 技术成熟度很高。国内应在现有研究的基础上, 深化固体发动机喷管构件的斜向缠绕成型技术研究, 推动其向工程化方向发展, 提升斜向缠绕成型的技术成熟度, 实现斜向缠绕构件的产品应用, 促进固体发动机喷管性能的提高。

## 参考文献

- [1] 《世界导弹与航天发动机大全》中国航天工业总公司编辑委员会编. 世界导弹与航天发动机大全[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999: 256-687
- [2] Goo N S, Yoon K J, Heo S. Structural analysis of tape-wrapped structures [J]. Computational Materials Science, 2005, 34: 369-376
- [3] 张建艺. 碳酚醛带缠复合材料成型工艺进展[J]. 航天工艺, 1998(2): 54-57
- [4] AIAA78-0950
- [5] 史耀耀, 肖颖, 常丽丽. 数控布带缠绕机机构实现及工艺方法研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(3): 408-412
- [6] 马正锋. 数控布带缠绕机工艺参数控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 10-20
- [7] 涂华军. 基于 BP 网络的布带缠绕机参数 PID 控制系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005: 2-5
- [8] 周云端. 专用缠绕机的开发与张力控制系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 2-6
- [9] 黄坚定, 张建艺. 国外带缠碳酚醛材料成型工艺、性能及应用[R]. 西安: 四院情报研究报告, 1995: 92-103
- [10] 匡松连, 罗永康, 季雪松, 等. 连续变形带斜缠防热层技术研究[J]. 宇航材料工艺, 2000, 40(5): 36-39
- [11] Hall W B. Standardization of the carbon-phenolic materials and processes. Vol. 1 Experimental studies [R]. NASA Grant No. NAG8-545
- [12] 肖颖, 史耀耀, 常丽丽. 复合材料缠绕成形工艺研究[J]. 电加工与模具, 2007(5): 56-60
- [13] 郭亚林. 缠绕参数对斜向缠绕布带相对变形率的影响[J]. 航天动力材料, 2012(1): 17-18
- [14] 郭亚林. 布带斜向缠绕方法研究[C]. 四院科技委材料与工艺专业组 2012 年度学术研讨会论文集, 2012
- [15] AIAA2001-3437
- [16] Bussiere M, Mora B. Ariane 5 booster nozzle: components description and dimensioning [J]. Acta Astronautica, 1994 (34): 83-89
- [17] AIAA91-2588

(编辑 李洪泉)