

# 新一代运载火箭贮箱大温差泡沫夹层共底研制

李照谦 南博华 何腾锋 崔凡 毛惠明

(上海航天设备制造总厂,上海 200245)

**文 摘** 系统研究了一种铝合金面板/聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫夹层结构低温贮箱共底的结构设计、关键制造技术及结构性能,该贮箱共底成功通过了气密试验、低温打压及隔热性能等试验考核,单底内压 0.54 MPa,低温打压煤油箱压力 0.40 MPa,氧箱压力 0.47 MPa,共底面板不皱损、不失稳,煤油温度不低于 17℃。研制的夹层共底能够满足大温差(约 210℃)、轻质化和发射前无需抽真空隔热等的使用需求,为我国新一代运载火箭成功研制奠定了技术基础。

**关键词** 运载火箭,夹层共底,PMI 泡沫,轻质化

中图分类号:V461

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.017

## Development of Large Temperature Difference Foam Sandwich Co-Bulkhead of Cryogenic Tank for New-Generation Launch Vehicle

LI Zhaoqian NAN Bohua HE Tengfeng CUI Fan MAO Huiming

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacture, Shanghai 200245)

**Abstract** As an ideal layout scheme for launch vehicle, co-bulkhead tank can improve the slenderness ratio of launch vehicle, reduce structure weight and increase structure efficiency and carrying capacity of launch vehicle. This paper systematically studied the structure design, key manufacturing technology and structural property of the aluminum alloy panel/polymethacrylimide (PMI) foam-sandwiched cryogenic tank co-bulkhead, which successfully passed the air-tight test, the low-temperature pressure test and the thermal insulation test. The single-bottom inner pressure was 0.54 MPa, and the low-temperature pressure in coal oil tank and liquid oxygen tank were 0.40 MPa and 0.47 MPa respectively. The co-bulkhead was not wrinkling or collapse after the tests, and the temperature of the coal oil was higher than 17℃.The sandwiched co-bulkhead meets the using requirements of large temperature difference, light weight and no vacuum pumping for thermal insulation before launching, laying technological foundation for successful development of the new-generation launch vehicles.

**Key words** Launch vehicle, Sandwich co-bulkhead, PMI foam, Light weight

### 0 引言

液氧/煤油、液氧/液氢等低温燃料具有高燃烧热、无毒、无污染的特点,是现代航天运载器的先进推进剂,如欧洲的 Ariane 系列火箭、美国的 Delta 系列火箭和 Atlas 系列火箭都已采用了这类低温燃料,我国多型新一代运载火箭也将采用液氧/煤油作为推进剂<sup>[1-3]</sup>。

使用液氧/煤油低温燃料的最大瓶颈是低温液氧煤油共底贮箱制造技术,运载火箭地面准备时间长、空间飞行和停留时间长使得低温贮箱的绝热问题尤

其突出。为有效减轻贮箱质量,提高运载能力,某型号新一代运载火箭中二级贮箱设计为隔热共底结构,将贮箱分为两个独立的系统。下箱中液氧的沸点为 -183℃,要求贮箱具有严格的对外绝热措施,否则低温液体会急剧蒸发,使箱体压力迅速上升,导致箱体爆炸,造成严重后果,据美国航空航天局记录,运载火箭事故中有 56%与液氧贮箱有关。上箱中液体煤油的冰点为 -47℃,为保证煤油的流动性能满足发动机正常工作需要,要求共底结构前后箱具有严格的绝热措施。因此,大温差夹层共底制造是低温燃料贮箱的

收稿日期:2016-04-28

基金项目:中国航天科技集团公司重大工艺专项(ZDGY2014-40)

作者简介:李照谦,1982年出生,博士,高级工程师,主要从事航天先进复合材料的研究工作。E-mail:lizq1210@163.com

关键技术之一。

以减少热量传递(图1)。

本文介绍了一种铝面板/聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫夹层共底的结构设计、成型技术及性能。

## 1 夹层共底结构及材料

### 1.1 结构设计

运载火箭共底贮箱与传统结构相比,减少了级间段部分,可改善全箭长细比,减轻结构质量,提高结构效率和火箭运载能力。新一代运载火箭贮箱夹层共底主要功能主要有二个:一是将低温贮箱分割成两个独立的系统,并使两者独立有效的工作;二是提供有效绝热,可使低温推进剂的热损失降至最小。

共底结构设计为上、下面板是形状相同的椭球曲面,长短轴  $a/b=1.4(a=1\ 100\sim 1\ 140\text{ mm})$ 。上、下面板均由叉形环和铝合金面板拼焊而成。上、下面板之间为非金属夹芯,夹芯为变截面,上、下面板与夹芯之间用超低温胶粘接,并通过叉形环与箱底焊接。上、下叉形环之间由非金属垫圈(如酚醛玻璃钢)隔开,

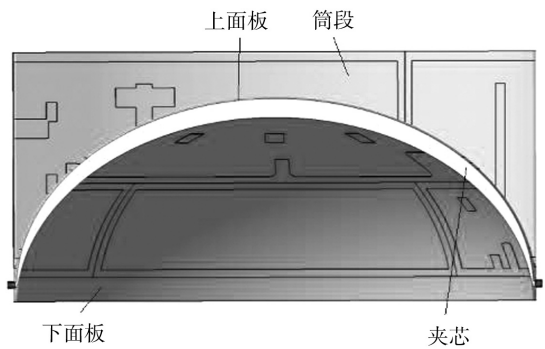


图1 夹层共底结构示意图

Fig.1 Sandwich co-bulkhead structure diagram

### 1.2 材料选择

#### 1.2.1 面板材料

夹层共底上、下面板材料为 LD10-CS 铝合金,其性能参数如表 1 所示。

表 1 LD10-CS 铝合金性能参数

Tab.1 LD10-CS aluminum alloy property parameters

密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	拉伸强度 / $\text{MPa}$	屈服强度 / $\text{MPa}$	断裂延伸率 / $\%$	弹性模量 / $\text{GPa}$	泊松比	剪切模量 / $\text{GPa}$	线胀系数 / $10^{-6}\text{K}^{-1}$	比热容 / $\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	热导率 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
2.84	483	414	13	73.1	0.33	28.0	20.8	0.880	154

#### 1.2.2 夹芯材料

号为 ROHACELL 110WF,其性能参数如表 2 所示。

夹芯材料选用聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫,牌

表 2 PMI 泡沫材料性能参数

Tab.2 Foam property parameters

密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	弯曲强度 / $\text{MPa}$	弯曲模量 / $\text{MPa}$	压缩强度 / $\text{MPa}$	断裂延伸率 / $\%$	弹性模量 / $\text{GPa}$	剪切模量 / $\text{MPa}$	泊松比	线胀系数 / $10^{-6}\text{K}^{-1}$	比热容 / $\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	热导率 / $\text{mW}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
0.11	5.20	221.1	3.55	3.00	0.18	12.94	0.29	50	2.0	29.5

## 2 结果与讨论

表 4 试样力学性能

### 2.1 薄壁面板搅拌摩擦焊工艺研究

Tab.4 Mechanical property test results

夹层共底 LD10-CS 铝合金上、下面板焊接厚度为 2 mm,具有厚度薄、精度要求较高等特点,采用搅拌摩擦焊这一绿色焊接加工方法进行共底面板制造,能够有效控制面板焊接变形、控制面板质量、实现焊接自动化<sup>[4-5]</sup>。对 2 mm 厚 LD10-CS 铝合金板进行搅拌摩擦焊工艺试验,试板规格为 400 mm×150 mm×2 mm,焊接工艺参数如表 3 所示。

试样	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\delta/\%$
母材	404.4	285.6	13.4
FSW	304.2	167.5	6.4
无匙孔 FSW	299.7	165.6	6.5

表 3 搅拌摩擦焊接工艺参数

Tab.3 Friction stir welding technological parameters

焊接转速 / $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接速度 / $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	压入量 / $\text{mm}$	焊接倾角 / $(^\circ)$	回抽速度 / $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
500~800	250~400	0.1~0.2	2~4.5	5~8

对试板进行力学性能测试,并与母材进行比较,测试结果如表 4 所示。可以看出,搅拌摩擦焊接头强度达到了母材的 75.2%,无匙孔搅拌摩擦焊接头强度达到了母材的 74.1%。

焊接速度、搅拌头转速对焊接质量、接头强度、焊缝外貌都有影响,对这些因素和性能综合工艺试验结果表明:(1)在不同搅拌头转速下,焊缝表面外观都在可接受范围,其中搅拌工具旋转速度较高时,焊缝表面飞边略为严重;(2)在可用的搅拌工具旋转速度下所获得的焊缝,在进行 X-射线检测与表面着色检验过程中均没有发现接头内部的明显缺陷,不存在明显的未焊透缺陷,无损检测结果合格;(3)搅拌工具旋转速度并不会明显改变接头延伸率,其对焊接接头力学性能的影响主要表现在抗拉强度。确定了 2 mm LD10-CS 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数为搅拌工具旋转速度 500~800 r/min,焊接速度 250~400 mm/min。

为提高共底薄壁面板焊接精度,设计了专门的共底面板焊接工装集成了圆环纵缝焊接、顶盖环缝焊接、型材框环缝焊接等主要焊缝焊接装夹功能,并且具备圆环铣边等多种功能。工装的一次安装定位可以有效保证箱底制造精度,减少装配焊接的工作量。在压紧装置方面,大量使用了气动压紧,在保证压紧效果的同时提高



图2 数控悬臂式搅拌摩擦焊设备及夹层共底焊接工装

Fig.2 CNC cantilever friction-stir welding equipment and sandwich co-bulkhead welding fixture

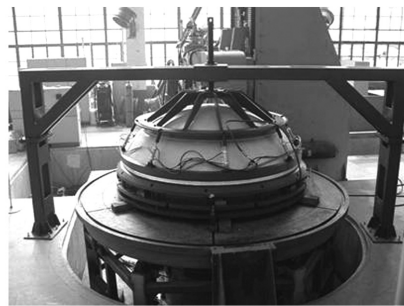


图3 搅拌摩擦焊薄壁面板实物

Fig.3 Physical object of friction-stir welding thin-wall panel

## 2.2 泡沫夹芯仿形加工

大温差泡沫夹层共底为典型的夹层结构构件,主要通过胶接固化成型,PMI 泡沫夹层与面板的型面配合精度是影响夹层共底胶接质量的关键因素。仿形加工是一种提高面板与泡沫夹芯型面适配性的有效手段。但是,夹层共底面板由三块瓜瓣、顶盖及叉型环,通过搅拌摩擦焊焊接成形,其中,瓜瓣和顶盖采用铝合金薄板拉压方式成形,受弹性和焊接多重形变的影响,其实际形状与理论椭圆回转面相比存在较大误差,不能简单通过面板理论模型进行泡沫仿形加工。为此,拟采用数字化测量加工的思路,开展对基于弱刚性引导面反求的大尺寸装配曲面五轴数控加工技术的研究,主要内容包括:夹芯泡沫弱刚性引导面扫描测量及反求建模技术,基于点投影的分区域五轴联动数控加工刀位轨迹规划方法和基于复合材料性能的工艺参数定制等。

### 2.2.1 夹芯泡沫弱刚性引导面扫描测量及反求建模

针对现有测量模式测量周期长、成本高等问题,利用独立的激光扫描测量系统获得面板内表面数据。采用 MetraScan 型激光扫描仪对“面板内表面”进行测量,将上、下面板放置在相应的测量工装上(工装

了装配自动化程度。共底面板搅拌摩擦焊接工装及设备见图2。面板圆环纵缝焊接是共底面板焊接难度最大也是最关键的一环,为满足高精度、小变形的焊接要求,必须要提高焊接运行轨迹精度。采用增加参数的方法使程序运行的拟合度提高,实现了瓜瓣焊缝焊接轨迹偏差小于 0.1 mm。面板焊接完成后实物见图3。

只起定位作用,无需夹紧,最大限度地保证与粘接状态一致),架设测量系统标杆,确定测量坐标系,在待测表面上粘贴“标示点”,通过手持式扫描装备测量上、下面板,得到“面板内表面”测量数据,根据测量精度可调整测量系统分辨率。

将测量系统生成的 STL 格式的的点云数据,导入 GEOMAGIC 软件,进行数据处理。在剔除粗大误差点、杂点后,生成上、下底实测曲面模型,并建立实测曲面模型的坐标系统。通过分析比较原始点云与实测曲面模型、实测曲面模型与理论模型、上下底实测曲面模型之间的误差,生成分析报告,如图4所示。

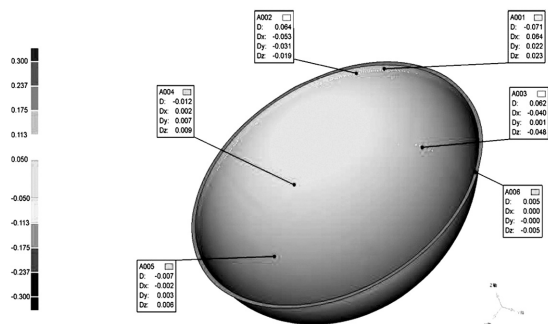


图4 加工模型与实测误差分布

Fig.4 Processing model and actual error distribution

### 2.2.2 基于点投影的分区域五轴联动数控加工刀位轨迹规划

针对夹层三轴加工中存在的易干涉、效率低等问题,提出一种基于点投影的分区域五轴刀位轨迹规划策略与方法。考虑夹芯零件空间尺寸较大,刀位轨迹规划过程中,如图5所示,划分待加工曲面。加工 A 与 B 区时,环形刀刀具轨迹采用 Zig-Zag 模式,刀轴矢量始终指向编程坐标系原点,在保证无全局干涉的前提下,刀具的环形部分始终与工件接触,提高加工效率。

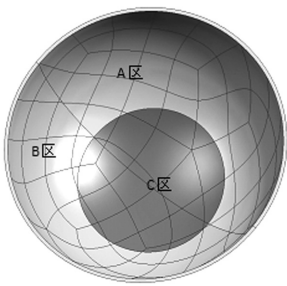
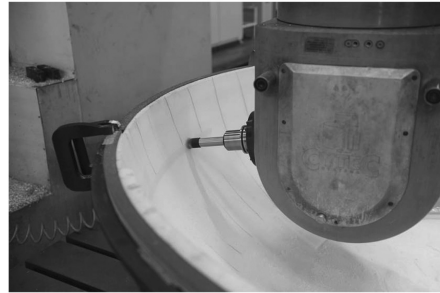


图5 加工模型分区示意图

Fig.5 Processing model zone chart



(a) 示意图



(b) 实际加工

图6 PMI泡沫夹芯胶接型面数控五轴联动仿形加工

Fig.6 PMI foam sandwich bonding profile five-axis linkage CNC contouring manufacture

### 2.3 共底胶接装配工艺

夹层共底上、下面板与泡沫芯材的胶接面积较大、型面复杂(椭球曲面)、刚性配合(泡沫、面板均为刚性),胶接时脱粘缺陷随机性出现,采用常规的胶接工艺很难控制缺陷大小和间距。针对该产品的结构特点,选用VARI技术进行胶接,同时为了保证胶接质量,主要从胶黏剂选择、真空通路和树脂流道的设计、VARI工艺三个方面进行研究,探索适合大温差泡沫夹层共底胶接装配的VARI工艺技术。夹层共底VARI胶接工艺原理如图7所示<sup>[6-8]</sup>。

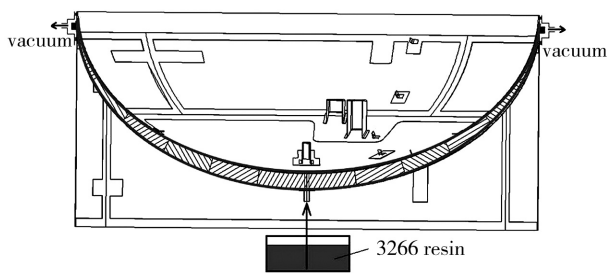


图7 泡沫夹层共底VARI工艺示意图

Fig.7 Foam sandwich co-bulkhead VARI process diagram

#### 2.3.1 胶黏剂选择

环氧3266树脂体系是北京航空材料研究院最新开发的一种RTM用低黏度高韧性环氧树脂体系。其与美国CYTEC公司同级别的CYCOM 823 RTM树脂性能指标相当,某些性能如弯曲性能等还要高些。3266树脂的黏度—时间曲线如图8所示,可以明显看出,随着反应时间的延长,固化度增加,树脂黏度逐渐升高,只是黏度上升的平缓趋势有所区别。在宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第4期

### 2.2.3 基于复合材料性能的工艺参数定制

基于复合材料性能的工艺参数定制模型,选用不同转速、进给速度组合,对夹芯泡沫试切,综合考虑加工效率、泡沫颗粒的剥离等因素,开展PMI泡沫机械加工性能,刀具类型、转速等对该复合材料使用性能、表面完整性等的影响规律研究,筛选了合理的加工参数: $\Phi 44-R6$  mm 环形刀,转速为2 000 r/min,进给速度为3 000 mm/min。PMI泡沫芯材五轴数控仿形加工见图6。

40℃条件下,黏度和工艺周期综合性能最佳,注射初始黏度不大于300 mPa·s,达到先进树脂体系的黏度水平,能够满足夹层共底VARI工艺对树脂体系工艺性要求。

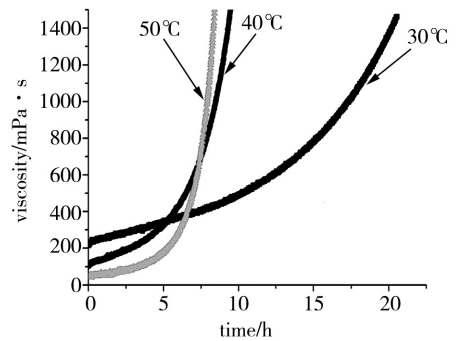


图8 环氧树脂的黏度—时间曲线

Fig.8 Epoxy resin viscosity-duration curves

#### 2.3.2 真空通路和树脂流道的设计

真空通道和树脂流道设计是VARI工艺的关键环节,合理的流道设计不仅可以避免渗过程中树脂发生干涉和干斑的形成,而且还可以缩短树脂在预成型体内的渗透时间。在实际构件的流道设计过程中,往往需要由多种树脂流道组合而成。夹层共底VARI胶接工艺中真空通道和树脂流道主要有三部分组成:面板与泡沫夹芯间的空隙、面板与夹芯包覆玻璃布层、泡沫夹芯打孔及开槽。

泡沫夹芯仿形加工时,面板与泡沫间预留间隙1~1.2 mm。这些间隙的主要作用是玻璃布的铺设预留位置,玻璃布层在成型过程中可作为真空通路和树脂流道。固化后,面板与泡沫夹芯界面处形成玻璃

布增强树脂基复合材料(玻璃钢)增强结构,起到泡沫夹层增强相的作用。同时,泡沫夹芯厚度方向打孔及表面开槽,能够有效促进树脂在夹层共底胶接面的均匀流动。

### 2.3.3 VARI 工艺研究

夹层共底 VARI 工艺装配工装见图 9。该工装主要起两方面作用:一是保证上、下面板定位准确,上、下面板间隙和面板的圆度满足设计要求;二是保证胶接过程中面板与泡沫夹芯间的真空通道。上、下面板通过装配工装进行校正圆度,校正后圆度不大于 0.5 mm,保证上、下面板圆度一致;同时通过将上、下面板上的象限位置反馈到装配工装上,通过上、下螺栓螺接定位,保证上、下面板定位准确。

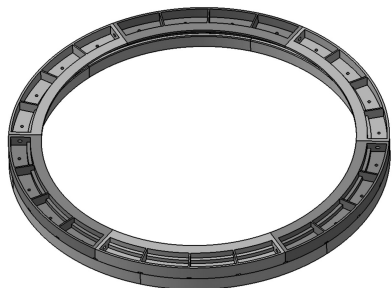


图 9 夹层共底 VARI 工艺装配工装

Fig.9 Sandwich co-bulkhead VARI technology assembly fixture

VARI 工艺装配过程:将面板和泡沫夹芯用装配工装合紧到位,制真空袋,进行泡沫夹层共底整体注胶,指导四周出口部位有胶液渗出,判定注胶结束。注胶完成后,保持抽真空状态,整体进烘房进行固化,固化工艺方案为:80℃保持 2 h,120℃保持 4 h。固化后夹层共底如图 10 所示。



图 10 夹层共底实物

Fig.10 Physical object of sandwich co-bulkhead

### 2.4 夹层共底性能

为了检验夹层共底制造质量,在固化夹层共底时,制造与夹层共底相同材料、工艺的铝面板/PMI 泡沫随炉件,随炉件力学性能见表 5。随炉件试验结果表明夹层共底固化工艺满足制件的性能要求,夹层共底选材合理、固化工艺可靠。夹层共底的关键技术指标是其承载和隔热性能,分别通过气密试验、单底内压和整箱打压试验对夹层共底的服役性能进行了考

核。夹层共底气密性满足指标要求;单底内压 0.54 MPa,夹层共底不皱损,不失稳;低温打压煤油箱压力 0.40 MPa,氧箱压力 0.47 MPa,共底面板不皱损、不失稳;通过整箱对正常发射工况下共底的隔热性能的地面试验,结果表明:箱内煤油最低温度在 17℃左右,相比试验开始时下降了 14℃左右,且多集中在煤油箱与共底形成的狭窄区域处,煤油箱其余区域温度均在 20℃以上,能够满足总体对于煤油温度的要求。

表 5 夹层结构性能数据<sup>1)</sup>

Tab.5 Sandwich structure property data

数据 来源	剪切强度 /MPa	剪切模量 /MPa	侧压强度 /MPa	剥离强度 /MPa
要求值	≥2.0	≥70	≥45	≥55
实测值	2.31	75.64	48.58	65.22

注:1)剪切性能采用 GB/T 1455—2005 测试;侧压强度采用 GJB 130.10—1986 测试;剥离强度采用 GB/T 1457—2005 测试。

### 3 结论

(1)分别利用搅拌摩擦焊、数控仿形加工及 VARI 胶接装配工艺实现了面板成型、PMI 泡沫芯材成型及夹层共底胶接装配,研制了一种承载-隔热功能一体化的铝合金面板/PMI 泡沫夹层结构贮箱共底,为新一代运载火箭成功研制提供了技术支撑;

(2)夹层共底成功通过了气密试验、低温打压及隔热性能等试验考核,单底内压 0.54 MPa,低温打压煤油箱压力 0.40 MPa,氧箱压力 0.47 MPa,共底面板不皱损、不失稳,煤油温度不低于 17℃,性能满足设计指标要求。

### 参考文献

- [1] BENJAMIN F, WILHELM W, WOLFF D E, et al. Thermal control of the cryogenic upper stage of ARIANE 5 midlife evolution[J]. 42<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems, 2012, AIAA 2012-3475.
- [2] CHILTON J H, SMITH D A. Concept of operations visualization in support of Ares I production [R]. 59<sup>th</sup> International Astronautical Congress, 2008, NASA Report: 20090022312.
- [3] 龙乐豪. 新一代运载火箭[J]. 航空制造技术, 2003(2):17-21.
- [4] JOHNSON M R. Friction stir welding takes off at Boeing [J]. Welding Journal, 1999, 78(2):35-39.
- [5] 姚君山,徐萌,贾洪德. 推进剂贮箱先进焊接工艺研究进展[J]. 航空制造技术,2008(8):32-35.
- [6] LI Z Q, NAN B H, HE T F, et al. Study of bonding technology and property of foam-sandwich co-bulkhead of cryogenic tank on launch vehicle[J]. Materials Science Forum, 2015, 817:639-644.
- [7] 赵锐霞,尹亮,潘玲英. PMI 泡沫夹层结构在航天航空工业的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2):13-16.
- [8] 高艳秋,赵龙,刘强,等. 面向航空结构的高性能 VARI 复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2013(15):66-69.