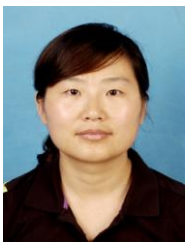
轻型复合材料整体桁架结构研制技术

殷永霞 张 芳 谭 放
（北京空间机电研究所，北京 100076）



摘要：研究了一种新型轻质碳纤维复合材料整体桁架结构形式及其成型方法，介绍了采用水溶性芯模技术并使用真空袋热压罐成型方式制备轻型田字形碳纤维复合材料整体桁架结构件的工艺路线和产品成型效果。结果表明：采用水溶性芯模制备轻型复合材料整体桁架结构质量良好，各项技术指标满足设计使用要求。为整体框架的研制提供一种崭新的思路和方法的同时，极大地缩短了框架结构的研制工艺流程，提高了其整体性能。

关键词：水溶性芯模；轻型；碳纤维复合材料；整体桁架结构

Development Technology of Lightweight Composite Truss Structure

Yin Yongxia Zhang Fang Tan Fang
(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076)

Abstract：The paper studied a new type of lightweight carbon fiber composite truss structures and its forming method, and introduced the process route and product forming effect of the light shape of carbon fiber composite truss structure using the water soluble core technology and the vacuum bag autoclave molding. The results show that: the quality of light whole composite truss structure prepared by water soluble core mold was well，and various technical indicators meet the design requirements. It provided a new thought and method for the development of whole truss structure, which can greatly shorten the development process and improve the overall performance.

Key words：water soluble core；lightweight；carbon fiber composite materials；whole truss structure

1 引言

卫星系统减重是当今世界各国在航天领域普遍遇到的一个技术难题[1~4]。桁架结构作为航天器结构有效地减轻了系统的重量，且具有许多其它的优异性能：a.净空间值高；b.在空间容易展开或装配；c.空间性能优良，适合应用在大跨甚至超大跨结构中；d.桁架结构是高次超静定结构，具有承受多向受力的性能，其刚度和整体性较好，能有效地承受集中荷载、非对称荷载和各种动力荷载。另外，碳纤维增强树脂基复合材料桁架可以通过结构设计让其热膨胀系数接近于零，由其做成的航天器结构具有很好的空间热稳定性。这些优良性能使桁架结构成为发展最快的一种空间结构形式，广泛地应用于航天器的主承力结构、刚性支撑结构、空间可展开结构和机构及大跨度范围的刚性连接结构中。

在国外，大型桁架结构在新一代大容量通讯卫星、中继卫星、电子侦察卫星、航天飞机和空间站等航天器上已得到了广泛应用，大幅度提高了这些飞行器的空间性能。在国内，复合材料多向接头的成型制造技术还处于研制阶段水平，成型工艺的手段较单一，自动化水平较低，复杂结构大多采用手工工艺成型，存在生产效率较低、质量不太稳定、材料利用率相对低、制造周期比较长、制造费用高等缺点。

在结构设计中，为了减轻结构的重量和提高结构的效率，复合材料结构部件的发展方向是力求实现结

作者简介：殷永霞（1977-），高级工程师，复合材料专业；研究方向：树脂基复合材料成型工艺研究。
收稿日期：2014-05-19

构的整体性，不用或少用连接，但受限于传统金属模具脱模工序的需求，整体框架的研制基本无法实现。为了满足这一设计要求，本文采用一种新型的水溶性芯模材料成功研制出一种轻型碳纤维复合材料田字型整体桁架结构，为整体框架的研制提供了一种崭新的思路和方法。

2 田字型复合材料整体桁架结构设计

基于上述航天器结构设计的理念，力求在不影响其空间性能的同时减轻结构的重量和提高结构的效率。本文设计中避开了形式复杂、制作繁琐的接头，设计了一个轻型田字形整体空心桁架结构，外形尺寸为 302mm×302mm×32mm，其中梁的高度和宽度都为 32mm，壁厚 1mm。具体结构如图 1 所示。

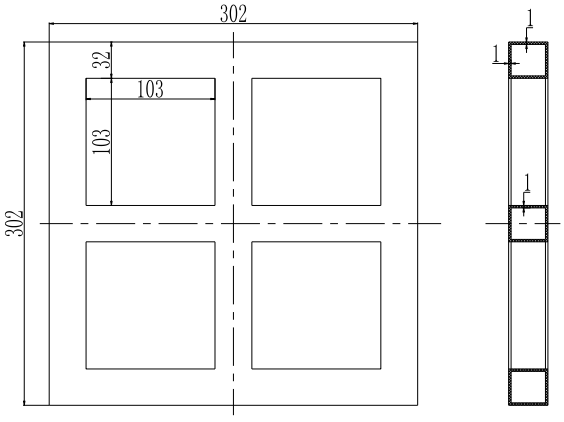


图 1 田字型整体桁架结构示意图

3 工艺方案

3.1 材料选择

碳纤维增强树脂复合材料具有很高的比强度和比刚度，性能优异，且工艺成熟，是航天器结构中应用最多的复合材料，因此本文根据实际应用需求选择了碳纤维增强树脂基复合材料制备轻型田字型整体桁架，产品成型所用主要原材料见表 1。

表 1 主要原材料

名称	规格状态	用途
高强度碳纤维	T700-12K	增强材料
T300 平纹碳布	3K，面密度 200g/m^2	增强材料
树脂	环氧 648	树脂基体

3.2 成型工艺

复合材料常规的成型工艺方法是采用金属模具提供制件的外形和尺寸精度，采用模压或真空袋加压保证内部结构的致密性。该桁架结构为整体空心结构，采用传统的金属模具整体成型无法实现脱模，因此必须采用分体成型、脱模后再胶接，而此种方法无法实现整体铺层，纤维的连续性无法保证，会影响框架的整体力学性能。而新型的水溶性芯模可以解决这一难题，水溶性模具的主要特点和优势有以下三点：

a. 易成型：模具材料固化前是流体或半固体状态，可根据产品的形状和成型需求浇注或压铸成型，固化后即形成具有相应形状和尺寸要求的固体材料；

b. 抗压、耐温：固化后的模具具有耐温和抗压特性，可以满足复合材料制件成型所需的高温和高压条件要求；

c. 模具材料具有水溶特性，在复合材料制件成型后，通过向模具中注水或泡在水中，短时间内就可实现模具的溃散，使模具具有流动性，通过一个很小的开口即可实现模具的脱模和清理，操作极为方便、省力，且可以保护产品在脱模工序不受损伤。

以上的三个特点决定了水溶性模具可以解决某些特殊结构如空腔型、超薄型的复合材料整体成型的难题。因此，在本论文中，轻型田字型整体桁架即采用了此种新型的水溶性材料作为芯模，配合真空袋热压罐的加热、加压方式成型。此工艺方法既能实现整体铺层、一次固化，保证结构的力学性能和整体性，又能在制件成型后快速顺利脱模，有效保护产品不受损伤。

该工艺方法制备田字型整体桁架的工艺流程见图 2。

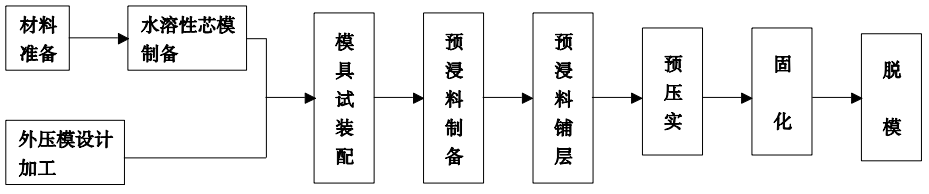


图 2 轻型田字型整体桁架的工艺流程

该工艺方法所用到的辅助材料及仪器设备见表 2、表 3。

表 2 辅助材料

名称	规格状态	用途
水溶性芯模材料	进口	模具
单面带胶聚四氟乙烯玻璃布	7005S	隔离
脱模剂	CHEMLEASE	脱模
聚酯薄膜	厚 0.1mm	隔离
透气毡	Airweave N 10	透气材料
真空尼龙薄膜	Ipplon WN 1500	真空袋
密封胶条	GS-213	密封
有孔隔离膜	WL5200B-P3-001-48”-600’-SHT	隔离

表 3 仪器设备

仪器设备名称	型号规格	用途
电热鼓风干燥箱	DGF20022	干燥
预浸排布机	--------	制备预浸料
热压罐	--------	固化
超声/缺陷检测仪	SONIC-138VFD	探伤
游标卡尺	精度 0.02mm	尺寸检验
电子秤	精度 1g、0.1mg	重量检测
婆梅密度计	量程 0.900～1.000g/cm^3，精度 0.001g/cm^3	密度检测

3.3 铺层设计

为保证框架的整体力学性能，其主体采用 T700-12K 无纬布准各项同性铺层的方式，为防止表面分层，在内外表面各铺一层碳布以提高表面的整体性和铺层工序的可操作性。

4 制造工艺过程

4.1 水溶性芯模制备

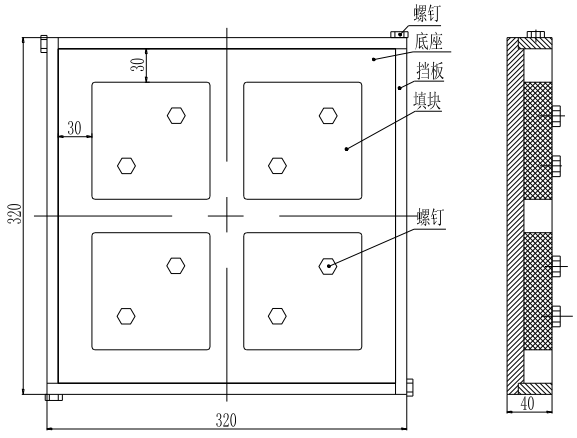


图 3 水溶性芯模金属母模结构示意图

根据田字形复合材料整体桁架结构的形状尺寸，设计并加工出一个用于成型田字形芯模的金属母模，其结构形式见图 3。将水溶性芯模材料紧密的填充到母模中，确保母模的各边角处均紧密填充芯模材料，然后将预成型的芯模放入电热鼓风干燥箱中，在 125℃的温度下加热 4h 取出[5]，脱去金属母模，即成型为复合材料整体桁架结构成型需用的水溶性芯模，其照片见图 4。

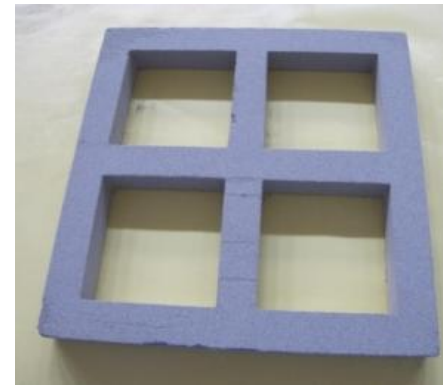


图 4 水溶性芯模照片

芯模使用前，需对芯模进行一些简单的机械加工，将芯模的表面打磨光滑平整，如果尺寸有偏差，还需对芯模进行切、铣等加工，确保芯模的尺寸能够满足产品制备的要求。

由于水溶性芯模为多孔结构，成型后的芯模表面光洁度较差，而且后期在使用芯模制备复合材料结构件时，高温固化过程会导致复合材料内部的树脂和水溶性芯模中的胶粘剂发生相互迁移，从而影响产品的表面质量和强度性能指标，也会对芯模的水溶性产生影响，因此，在制备过程中需要对芯模进行表面处理。

本文通过以下三种不同的表面处理方式进行了对比试验：

a. 在芯模表面粘贴一层蓝色聚酯薄膜；

b. 在芯模表面喷涂一层密封剂；

c. 在芯模表面粘贴一层单面带胶聚四氟乙烯薄膜。

通过试验比较三种处理方法的工艺操作性、对芯模水溶性的影响以及对复合材料结构件表面质量的影响评判其效果。

4.2 桁架结构件的制备

a. 预浸料制备

按照工艺规范和工艺文件制备相应规格的无纬布预浸料和碳布预浸料，检验预浸料的面密度、树脂含量、挥发份、外观质量等指标，确保满足工艺设计

要求。

b. 下料、铺层

按照工艺设计的角度、尺寸对预浸料进行裁剪、下料，在模具上进行逐层铺贴，裁剪及铺层过程主要保证角度精度和拐角处纤维的连续性。

c. 预压实

采用真空袋法每铺贴 4 层进行一次抽真空预压实一次，确保铺层到位、致密，保证产品内部质量。

d. 固化

在铺层完毕的田字形桁架坯料件上铺放聚四氟乙烯玻璃布、均压板、透气毡、真空尼龙薄膜，并用密封胶带将真空尼龙薄膜四周粘到固化平台上，抽真空检查气密性；封装好后将制件放入热压罐中于 170℃、0.5MPa 压力下保温 2h 固化成型。

e. 脱模修整

固化完成后，拆除辅料及压板，取出制品。为了满足芯模的脱模需要，在基本不影响桁架整体强度的基础上，在桁架的四个侧面各开一个 28mm×28mm 的方孔，将桁架结构件放在自来水管下冲刷（见图 5），从方孔处向桁架内注水，将内部的芯模溶解，即得到整体桁架结构件。

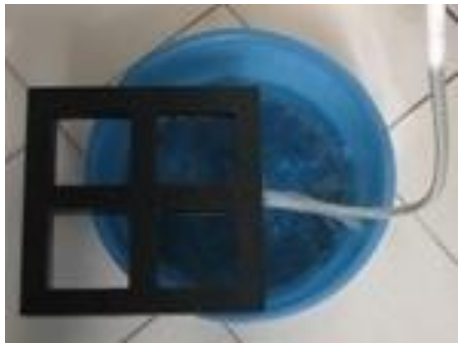


图 5 田字形桁架脱模过程

5 结果与讨论

5.1 水溶性芯模的表面处理效果

不同表面处理的试验结果表明：在芯模表面直接粘贴一层单面带胶聚四氟乙烯薄膜，不仅工艺操作性好，固化完成的产品表面光滑平整、外观质量好，而且这种方法处理的芯模可以在最终脱模阶段通过直接清理出薄膜即可将拐角处残留的芯模全部脱出，易于清理。

5.2 脱模效果

产品的脱模过程就是水溶性芯模的水溶解过程。由于芯模的密度小于水的密度，在自来水冲刷过程中，溶解的原材料会漂浮起来流出桁架，而不会堆积在空心桁架中影响水对芯模的继续溶解，从而有效地提高了水溶速率。整个田字形桁架芯模的脱模时间为 30min 左右，脱模操作非常简单、方便、快捷、环保。

5.3 产品成型效果

采用可溶性材料作为芯模，用真空袋热压罐成型工艺制备的碳纤维/环氧 648 田字形整体桁架结构件，表面平整光滑、外观质量良好，无损检测未发现疏松分层裂纹等缺陷，内部质量符合规范要求，外形尺寸符合设计指标要求，具体检测结果见表 4，产品照片见图 6。

表 4 田字形整体桁架结构件性能

	设计指标	实际测试
外观质量	平整光滑无毛刺分层缺陷	良好，符合要求
桁架长度	302mm	302.3mm
桁架宽度	302mm	302.25mm
桁架高度	32mm	31.8mm
桁架壁厚	1mm	1.1mm
桁架重量	实测	404g
无损探伤	不低于 GJB2895 B 级要求	未发现疏松、分层、裂纹缺陷，符合 GJB2895 B 级要求

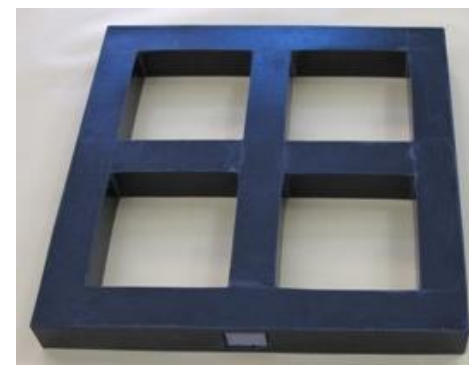


图 6 田字形整体桁架结构

6 结束语

a. 通过采用新型的水溶性芯模技术成功研制出了一种轻型碳纤维复合材料田字型整体桁架结构，制件质量良好，各项性能满足设计指标要求。

b. 与传统的采用连接接头和杆件胶接成型制备的桁架结构相比，此整体桁架成型制造过程操作简单，可实现整体铺层，保证纤维的连续性，一次固化整体成型无需装配。该桁架整体成型技术在大大缩短工艺流程、减少工序的同时，能够显著减轻结构重量，有

效地提高了连接部位的结构强度和桁架的整体力学性能，为航天器复合材料整体框架的研制提供了一种崭新的思路和方法，具有教大的应用价值和经济效益。

c. 通过对水溶性芯模的表面粘贴单面带胶聚四氟乙烯薄膜，不仅使芯模表面光滑平整，铺层工序易于实施，而且有效防止了固化时复合材料产品中的树脂与芯模中的胶粘剂相互迁移，达到了很好的隔离效果，此外该隔离层在脱模时可以帮助清理拐角处的芯模材料，防止芯模材料残留。

d. 水溶性芯模的溶解性好，脱模工序操作简单、方便、快捷、环保，该模具技术可以应用其他类似复合材料结构的研制。

参考文献

1 高建军. 俄罗斯树脂基复合材料及应用[J]. 高科技纤维与应用，2003，28(2)：26

2 杨乃宾. 国外复合材料飞机结构应用现状分析[J]. 航空制造技术，2002(9)：21

3 赵稼祥. 航天先进复合材料的现状与展望[J]. 热固性树脂，2000，15(2)：37

4 李贺军，罗瑞盈，等. 碳/碳复合材料在航空领域的应用研究现状[J]. 材料工程，1997(8)：8

5 张芳，殷永霞，谭放. 水溶性芯模性能和应用研究[J]. 航天制造技术，2012(6)：53

※※※

（接上第16页）

3.3 调整焊接参数

为进一步减小焊接线能量及避免筒体内表面有焊漏，调整了焊接参数。通过反复试验，焊缝1和焊缝2的焊接电流调整为40～50A，焊丝直径由Φ1.0mm改为Φ0.8mm；其它部分不做变动。

3.4 采用强迫冷却

强迫冷却又称散热法，就是将焊接处的热量迅速散走，使焊缝附近的金属受热面积大大减小。强迫冷却一般在焊缝背面垫铜板或通水冷却，燃烧室的结构和材料都不适合采用（1Cr17Ni3材料具有淬火倾向)，所以采用背面通氩气冷却，冷却效果与垫铜板或通水冷却相比要缓和许多，但也可以起到降低焊缝区域热量积累，减小焊缝金属高温停留时间。通氩气对焊缝背面还可起到保护作用。通过试验，最终背面氩气流量定为15～25L/min。氩气保护工装见图6，工装为夹层结构内部有金属丝织物，使得氩气比较均匀柔和吹出。

图6 氩气保护工装

4 工艺改进效果

利用上述改进工艺措施，先后焊接数百件产品，仅有2件产品出现表面微裂纹，裂纹深度小于0.1mm，通过机械打磨的方式去除。生产实践证明工艺改进措施是可行的，基本解决了燃烧室机匣安装座的焊接裂纹问题。

5 结束语

通过生产实践证明，针对燃烧室机匣安装座焊接裂纹采取的优化焊接参数、分段焊接、有序焊接、背面氩气冷却等措施十分有效，产品焊接质量稳定，基本解决了产品焊接裂纹问题。

通过裂纹产品的处理证明，对于焊接产生的微表裂纹，在满足产品强度、刚性等要求的前提下，采取机械方法去除裂纹最为安全和经济，应优先采用。

参考文献

1 王金生. 航空发动机含焊缝燃烧室外机匣和轴承座强度和寿命研究. 西北工业大学，2004

2 褚志华，刘杰，孙辉. 发动机中焊接类机匣焊接的裂纹控制. 中国新技术新产品， 2013，22：79

3 叶广宁，刘振岗，周凯，等. 发动机中介机匣焊接延迟裂纹控制工艺研究. 航空维修与工程，2011(4)：64～65