

# 复合材料“J”形筋条成型工装研究

付长胜

中国航空制造技术研究院, 北京 101300

**摘要:** 针对目前航空领域常用的“J”形筋条复合材料结构制件, 通过分析制件典型结构及其成型方案, 规定了制件成型工装的设计准则, 提供了多种制件成型工装设计思路, 并分析了各工装设计方案的优劣势以及适用类别。不同结构、不同类型的“J”形筋条可设计相应的成型工装, 筋条成型时应根据工装类型采取针对性措施加强上下R区质量, 保证成型后的产品能够满足设计需求。

**关键词:** “J”形筋条; 工装设计; 质量控制

DOI: 10.63887/fss.2025.1.3.34

## 引言

复合材料具有比强度高、比模量高、质量轻、设计性强、耐腐蚀等优点, 自 20 世纪 60 年代以来在全球获得迅速的发展, 目前已成为现代航空最重要的、不可缺少的材料之一。目前军机上的主要应用部位包括机身、机翼、襟翼、垂尾、进气道、副翼、口盖、起落架舱门等<sup>[1]</sup>。

加强筋壁板结构是复合材料制件典型结构之一, 加强筋可以提高复材壁板的整体刚度。典型加强筋根据截面形状可分为 J 形、T 形、

L 形、工形、帽形等结构。其中 J 形筋条能较大地提高筋条的总体失稳应力。由于结构不对称, 剖面扭心不在腹板平面上, 容易扭转, 一般用于中等载荷水平的壁板上<sup>[2]</sup>。

## 1 “J”形筋条成型方案介绍

典型“J”形筋条依据铺贴结构可分为左腹板、右腹板、下 R 区和下缘条底板四部分, 如图 1 所示。铺贴时先分别铺贴左右腹板, 然后将左右腹板组合起来, 用单向带填充下 R 区后铺贴下缘条底板, 然后封装固化。

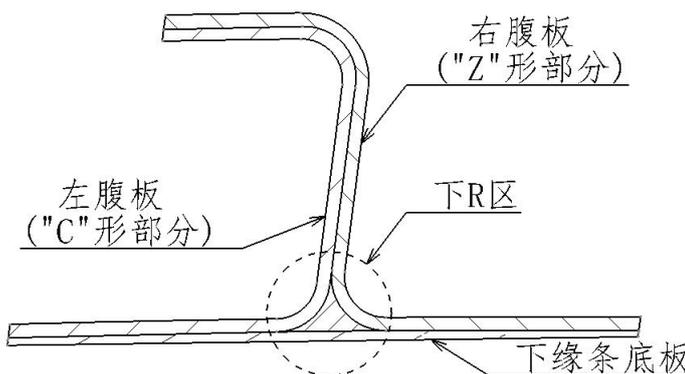


图 1 “J”形筋条结构示意图

成型模具设计是“J”形筋条制造的技术关键之一, 模具设计时需充分考虑筋条结构, 确保筋条能够顺利铺贴及脱模, 并在成型后满足设计规定的外形尺寸、内部质量等方面

的指标。因此, 用于复合材料“J”形筋条成型的模具应具有以下功能<sup>[3]</sup>:

- 1) 保证“J”形筋条外形尺寸精度;
- 2) 保证“J”形筋条位置精度;

3) 保证产品在固化过程中各部位都能够均匀受压;

4) 能够满足复合材料“J”形筋条结构件固化工艺要求;

5) 保证产品固化后能够顺利脱模。

基于“J”形筋条结构特点,其成型模具一般分为“C”形模和“Z”形模 2 部分,如图 2 所示。

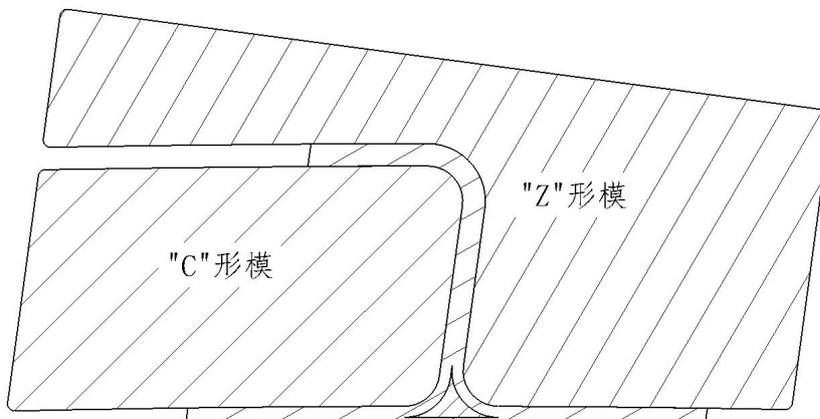


图 2 “J”形筋条成型模示意图

“J”形筋条左右腹板分别在“C”形模和“Z”形模上铺贴,下 R 区一般选用与“J”形筋条同牌号的预浸料,将其裁切成一定宽度,卷成长条状后填入下 R 区,并用工具将单向带挤压密实。预浸料宽度计算公式如下:

$$w = \frac{2r^2 - 2 \times \frac{1}{4} \times \pi r^2}{d}$$

式中 w 为预浸料宽度, r 为“J”形筋条 R 区半径, d 为预浸料厚度。

在该成型方案中,“J”形筋条除下缘条底面外均与模具贴合,因此制件固化成型后

通常表面光滑平整,能够满足设计技术指标要求。下缘条底面在固化封装时,可在模具上固定软模并封装固化。由于软模传递压力时易出现弯折现象,制件成型过程中的误差都会累积在外侧,即“J”形筋条外部的尺寸精度较低<sup>[4]</sup>。

随着复材制件在航空领域的进一步应用,“J”形筋条结构越来越复杂。整体式模具通常无法满足制件工艺需求。例如对于上下缘条呈闭角的“J”形筋条,常规的上下模成型后筋条将无法脱出,如图 3 所示。

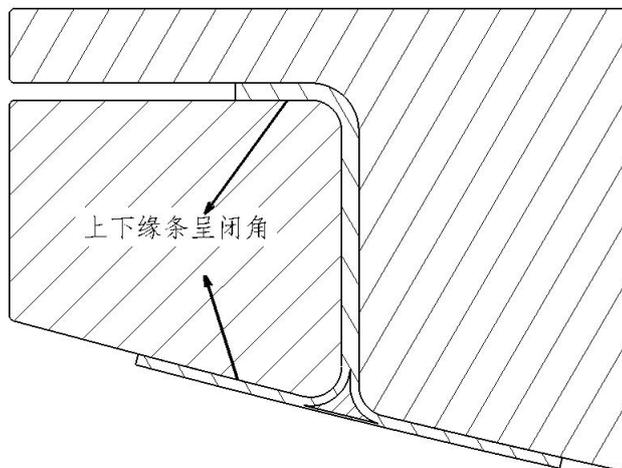


图 3 闭角型“J”形筋条结构示意图

此外，“J”形筋条固化时，热压罐压力主要通过成型模传递至制件上。由于“J”形筋条上缘条、上R区及腹板区域均被成型模包裹，“C”形模和“Z”形模合模后无法判断制件与模具是否贴合，“J”形筋条易出现

因压力施加不均匀导致的孔隙、分层等内部质量缺陷。

## 2 “J”形筋条成型模具方案

针对上下缘条呈闭角的“J”形筋条，可将“C”形模设计为分体式模具，如图4所示。

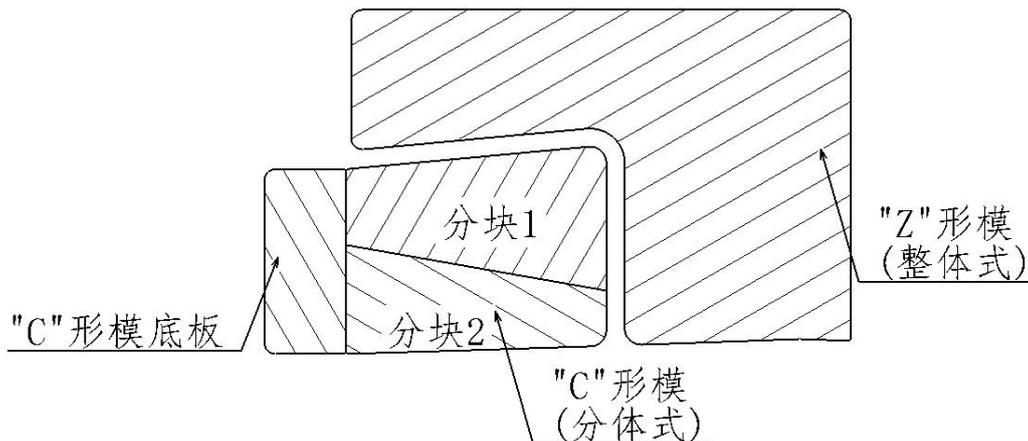


图4 分体式“J”形筋条成型模具示意图

该方案中“Z”形模仍为整体式模具，“C”形模则根据制件结构拆分为若干分块。“J”形筋条铺贴前，将“C”形模分块用螺栓组装到底板上。在“C”形模上铺贴后，将其与铺贴完成的“Z”形模合模，填充单向带并铺贴下缘条底板。随后将“C”形模底板卸下，在拔销孔中填充 Airpad 橡胶等材。此时“C”形模分块未相互连接，因此需将“Z”形模放在下方，弓形夹等固定用工具不得取下，确保封装时模具不得晃动。“J”形筋条固化后，将拔销孔及螺栓孔中填充物取出，适用拔销器按顺序将分块模具依次卸下完成脱模。如图4所示模具结构，需先脱出分块2，然后调整分块1角度并脱出。

形模与“Z”形模未准确对齐，分块模具可以在压力作用下自行活动，确保其能位移到准确的型面位置，从而能与制件更好的贴合，降低筋条因受压不匀出现内部质量缺陷的风险。但是，由于“C”形模采用分块式设计，对模具加工精度要求较高，加工时不仅要考虑各分块的型面精度，还需要考虑其组合后的型面精度及平面度，否则各分块在组装时易出现模具间台阶、拼缝。此外，固化时各分块未相互连接，筋条成型后在分块模具对合处极易出现台阶、树脂堆积等表面质量问题。综上，该结构的筋条成型模具每次组装时均需测量其分块间的拼缝与阶差情况，并对偏差较大处进行修补。

该方案的优点在于，针对任意结构的“J”形筋条，均可通过设计对应的分块方式顺利完成脱模。且由于分块未相互连接，若“C”

除了上述螺栓式连接方式外，还可以将“C”形模设计为组合式，如图5所示

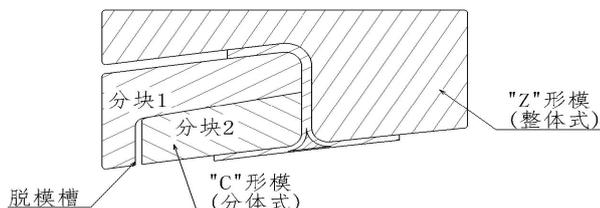


图 5 组合式“J”形筋条成型模具示意图

该设计思路在于将“C”形模具拆分为盖板（分块 1）和分块模具，盖板为整体结构，分块模具可根据模具型面设计并继续拆分，分块模具与盖板或其他分块模具不需螺栓连接。盖板与分块模具间预留有脱模槽数个，铺贴前将所有分块嵌入到盖板中，铺贴后将其与“Z”形模组合起来，用弓形夹等工具夹持后嵌入单向带，并铺贴下缘条底板。该方案的优势在于铺贴、组装、脱模等工序操作简单，但由于“C”形模具铺贴后需裁切预浸料并露出脱模槽，脱模槽位置距制件边缘需留有加工余量尺寸，因此“C”形模整体尺寸较大，铺贴预浸料较多，成本较高。此外，该方案也是分块式模具，因此制件同样存在固化后在分块处出现阶差的情况，模具

同样存在加工精度要求较高、组装时需着重考虑分块模具间对接拼缝及阶差等问题。

由于上述两种方案中“J”形筋条上 R 区仍被筋条成型模包裹，加压时有受压不匀的风险。为解决该问题，可将“Z”形模也设计为分体式模具，但此时上下模均为分体式模具，固化加压时所有模具均会在压力作用下位移，导致制件成型后表面出现较大的台阶与纤维错位。

为避免该情况，可将“Z”形模截开，“J”形筋条腹板及下 R 区仍用成型模包裹成型，上 R 区及上缘条处放置软模封装成型。或是去除“Z”形模，完全用软模代替，如图 6-7 所示。

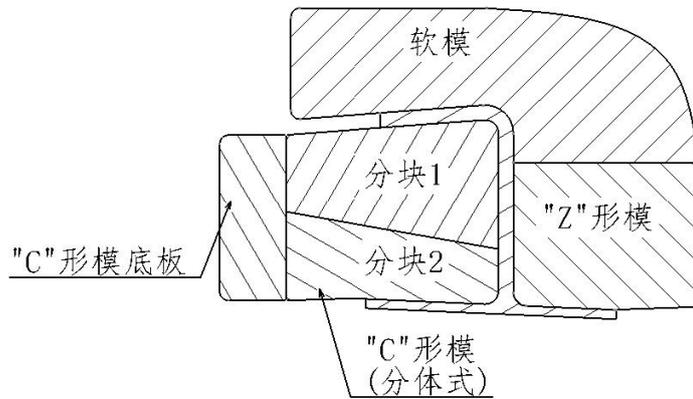


图 6 软硬模结合的“J”形筋条成型模具示意图

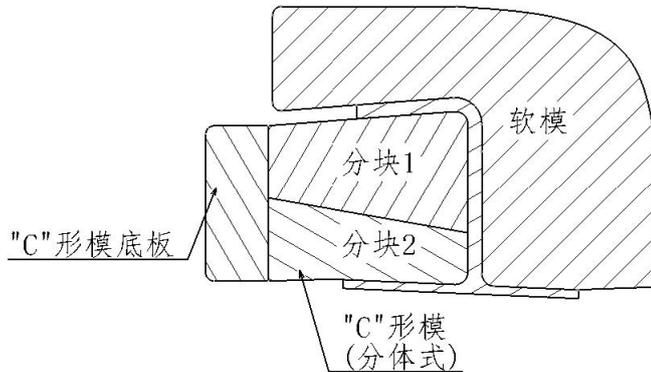


图 7 软硬模结合的“J”形筋条成型模具示意图

与硬模成型相比,软硬模搭配可保证“J”形筋条一侧均匀受压,软模可采用 Airpad 橡胶成型,通过掺杂织物预浸料来调整软模硬度,成型后可在上下 R 区等位置断开,确保软模能在该区域与制件充分贴合,避免在型面变化区域发生因软模架桥导致的疏松缺陷<sup>[5]</sup>。图 6 所示的模具方案在保证“J”型筋条下 R 区及腹板表面平面度的同时,在上 R 区处增加软模避免内部质量缺陷。但在上 R 区软模和“Z”形模间易出现树脂堆积导致的制件表面褶皱,且筋条固化后上 R 区表面质量与软模质量关联较大,易出现贫树脂、富树脂等表面质量缺陷。

图 7 所示的模具方案则完全去除了“Z”形模,因此需要设计下缘条成型模,铺贴时先在下缘条成型模上铺贴下缘条底板,此时需确认预浸料铺层角度是否铺贴正确。然后将“C”形模具与下缘条成型模组合合模,填充单向带后在模具上继续铺贴“Z”形部分。铺贴后放置预成型的软模并封装固化。该方案的优势在于脱模方便,筋条合格率高。但由于“J”形筋条一侧均由软模成型,软模设计复杂,过硬则不利于压力传递,易在上下 R 区产生缺陷;过软则成型后筋条表面会出现树脂褶皱、表面凹陷等缺陷,影响成型后

的装配使用。且单向带填充方式与其他结构模具不同,填充时需准确计算单向带预浸料宽度,并用特定工具确保填充密实,避免因单向带填充过多导致筋条下缘条凸起或因单向带填充不足导致内部质量缺陷。

## 结语

(1) 本文提供了 4 种针对“J”形筋条的成型模具设计思路,并详述了每种模具的适用范围和优劣势。

(2) 对于结构简单的“J”形筋条,“C”形模具和“Z”形模具设计为整体式模具,下缘条处用软模成型。

(3) 对于上下缘条呈闭角的“J”形筋条,可将“C”形模具设计为分体式模具,分块可用螺栓组装到模具底板上或直接嵌入到盖板中,成型后将分块模具依次取出完成脱模。

(4) 对于型面复杂的“J”形筋条,需采用软硬模结合的方式成型。可将“Z”形模具中上 R 区部分去除改用软模,或是取消“Z”形模具并在该部分整体用软模成型。该方案能够有效解决筋条成型后的内部质量问题,但如何设计软模还需要根据筋条型面具体分析。

## 参考文献

- [1] 赵渠森, 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 航空航天工业部科学技术研究院, 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990.
- [3] 鄢和庚等, 复合材料“J”型加筋壁板成型工艺研究[J]. 教练机, 2018(1):4-8.
- [4] 刘文等, 复合材料 J 型加筋壁板制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2017. 000(016): 70-74.
- [5] 李义, 叶宏军, 翟全胜. J 型加筋复合材料壁板筋条“R”区质量控制技术研究[J]. 科技与创新, 2018, (06):81-82.

作者简介: 付长胜, 男, 1995-, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为复合材料制件成型