

旋翼机复合材料旋翼桨叶 设计制造及展望

Design Manufacture and Prospect of Composites Rotor Blade of Rotorcraft

沈阳航空航天大学辽宁省通用航空重点实验室 佟刚
沈阳航空航天大学 郝旭



佟刚
博士,教授,研究方向为先进通用
飞机设计方法与技术、机械设计与理论。

旋翼机最重要的部件就是旋翼,不同于直升机的旋翼,其不与发动机相连,由前方气流吹动其自旋转从而提供升力。旋翼设计及制造的好坏将直接影响旋翼机的性能,如果旋翼机旋翼出现故障断裂,后果不堪设想。只有一个好的旋翼,才能真正实现旋翼机的安全特性。直升机也具有旋翼,并且旋翼设计技术相对成熟。参考直升机的旋翼设计^[1],对旋翼机旋翼进

相比于直升机,旋翼机结构更加简单,对旋翼的要求也降低了很多。早期旋翼机旋翼选材上多使用铝合金等金属材料。随着材料学的不断进步,先进复合材料因其可靠性更高、经济性更好、使用寿命更长、旋翼性能更优越等优势,逐渐成为旋翼制造材料的首选。相信在不远的将来,复合材料必将能在全机使用。

行研究。相比于直升机,旋翼机结构更加简单,对旋翼的要求也降低了很多。早期旋翼机旋翼选材上多使用铝合金等金属材料。随着材料学的不断进步,先进复合材料因其可靠性更高、经济性更好、使用寿命更长、旋翼性能更优越等优势,逐渐成为旋翼制造材料的首选。相信在不远的将来,复合材料必将能在全机使用。

复合材料旋翼桨叶结构设计

旋翼桨叶是细长式旋转结构(弹性梁),为了产生升力必须高速旋转(桨尖速度多在 200m/s 以上),因此要承受很大的离心力载荷;同时又要考虑很大的交变气动载荷作用,桨叶的受力情况十分复杂^[2]。出于气弹响应

及稳定性的考虑,一般要求桨叶的整体有效重心在约 25% 的弦长前。因此,桨叶的结构设计,其剖面构造形式多为前缘实而重、后缘薄而轻的非对称闭合载荷梁。

1 旋翼桨叶大梁选材

从航空航天领域发展的趋势看,纤维增强树脂基复合材料逐渐成为制造航空航天飞行器结构件材料的主流。在旋翼桨叶选材设计中,目前使用较多的是玻璃纤维或碳纤维增强环氧树脂复合材料^[3]。通过表 1 的对比,从比强度、比刚度、比疲劳强度来说,碳纤维也是很优秀的材料,但是它更脆一些。而玻璃纤维复合材料因为其优异的纵向拉伸强度,轻质、较高强度、较高模量以及稳定的化学性能等

表1 纤维增强树脂基复合材料对比

| 特性 | 玻璃纤维 | 碳纤维 |
|--------|--------------|-----------------|
| 变形特性 | 变形特性较好,许用应变大 | 变形特性一般,许用应变小 |
| 损伤容限特性 | 抗冲击及机械损伤能力强 | 抗冲击及机械损伤能力一般 |
| 扭转特性 | 扭转特性一般 | 有更大的 E/G,扭转特性更好 |
| 重量特性 | 重量轻 | 重量更轻,比模量和比强度更高 |
| 工艺特性 | 工艺特性更好 | 对制造工艺缺陷非常敏感 |

特点,成为了制造旋翼机旋翼桨叶大梁材料的首选。

2 旋翼桨叶剖面结构设计

旋翼机旋翼翼型的选择可以参考直升机翼型。在直升机翼型中,按照大梁的构造划分,比较常见的有 C 形梁、D 形梁以及多管梁结构。按照剖面分隔或封闭区间的划分有单闭腔、双闭腔和多闭腔等。依据表 2 的对比结果,以及旋翼机旋翼因其特殊的自旋转方式,不必考虑桨叶的扭转力矩的特点,复合材料旋翼桨叶一般采用 C 形结构,这样既能充分发挥其优点,又能有效地节省成本,是旋翼机翼型的首选。

3 桨尖结构和桨根段结构

传统的直升机复合材料桨尖结构,除蒙皮、大梁外,要求预制的零件多,相对复杂。而旋翼机旋翼就简单得多,在旋翼桨尖结构设计时,主要采用整流罩封闭桨叶尖端就可以了。相应的桨尖配重也可以在整流罩中增加

金属块来实现。至于桨尖形状,考虑到制造成本,仍采用传统的矩形桨尖即可。当然,随着旋翼机的发展和功能的强大,以后的旋翼机桨尖形状也将如直升机一般,开始尝试由单纯的矩形桨尖到尖削桨尖、尖削后掠桨尖、抛物形桨尖等变化。

同理,考虑到旋翼机多采用的旋翼跷跷板式结构,以及为了避免旋翼根部处应力载荷过大,造成旋翼根部

疲劳断裂,和保证传力、受力状态良好,旋翼桨叶与旋翼毂的连接多为如图 1 所示结构,采用加强板螺栓连接形式。故而在旋翼桨叶根部处设计时,亦可设计成整流罩或者切断面直接封闭形式。此种设计的优点是结构简单,制造容易。

4 蒙皮铺设

旋翼桨叶蒙皮提供桨叶的主要升力面和扭转刚度,承受部分离心力和弯矩,是桨叶的外部维形件也是重要的次承力件。蒙皮的铺设一般选用织物,通常采用玻璃纤维增强复合材料或玻璃纤维与碳纤维增强复合材料混合铺层。蒙皮内表面与大梁相贴,外表面有时需要增加一层薄的预浸平纹玻璃布,保护碳布蒙皮因损伤带来的表面应力集中问题,可获得较高的表



图1 旋翼桨叶根部处与旋翼毂连接方式示意图

表2 桨叶剖面构型优缺点对比

| 结构 | 优点 | 缺点 | 桨叶剖面构型示意图 |
|--------|------------------------------------|------------------|----------------------|
| C 形梁结构 | 结构简单,工艺性好,易保证制造质量,有利弦向中心布置 | 最大缺点是抗扭刚度偏低 | 前缘配重 C 形大梁 填芯 蒙皮 后缘条 |
| D 形梁结构 | 扭转刚度大大提高 | 成型工艺比 C 形梁结构复杂 | 前缘配重 D 形梁 填芯 蒙皮 后缘条 |
| 多管梁结构 | 抗扭刚度大,适合先进薄翼型,具有良好的破损安全特性和优异的抗弹击性能 | 成型工艺最复杂,制造难度和费用大 | 前缘配重 多管梁 填芯 蒙皮 后缘条 |

面粗糙度。主要以 $\pm 45^\circ$ 对称铺层为主,辅助以少量的 $0^\circ/90^\circ$ 铺层。

5 内腔填芯

内腔填芯主要起到支撑作用,选材上的主要要求是抗压强度高、密度小、耐冲击。目前,比较常用的旋翼内腔填芯有 3 种:聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫填芯、耐高温芳香族聚酰胺 (Nomex) 蜂窝填芯以及铝蜂窝填芯^[4]。但是经过实践检验,为了避免碳纤维复合材料与金属铝电偶腐蚀和在空中遭到雷击,一般不会使用铝蜂窝填芯。

表 3 对比剩下两种填芯,得出结论为泡沫填芯更好一些。旋翼采用 C

表3 泡沫填芯与纸蜂窝填芯对比

| 影响因素 | 硬质泡沫塑料填芯 | Nomex 纸蜂窝填芯 |
|----------|--|--|
| 制造工艺方面 | 国内已积累了一定的经验 | 结构复杂,易出现“键盘效应”,影响蒙皮表面平整性;受相关工艺成型技术限制,国内尚未采用过 |
| 成型工艺方面 | 使用热成型来加工复杂形状;能承受更高的固化温度和压力,不用填充处理;机械加工容易 | 机械加工更难一些 |
| 维修角度方面 | 闭孔形式,无水汽影响。更易修补,直接切除,粘接替换泡沫即可 | 容易聚集水和水汽,增加重量,甚至冰冻膨胀破坏孔格,维修困难且费用高昂 |
| 材料可设计性方面 | 芯材可根据实际形状来设计,成型后强度要达到要求 | |
| 受力方面 | 具有高剪切强度,力学性能呈各向同性 | 力学性能呈各向异性 |

形大梁与泡沫填芯相配合的结构形式,工艺过程更简化,还能保证工艺质量和外形平整。

另外,中国直升机设计研究所提出一种的新型的填充方法^[5],即在蒙皮、大梁所围的空间内完全以短切纤维填充。好处是短切纤维填充件不需要预制,与桨叶一次模压成型,减少了制造零件数,制造过程快速简便。另外,通过在短切纤维填充区域表面打孔,实现灵活的配平方式,操作简便,精度较高。

6 桨叶后缘厚度的确定

复合材料桨叶的后缘部位一般是由桨叶上、下蒙皮部分延伸到桨叶后缘部分叠合而成,其厚度受蒙皮向后延伸的层数和布层厚度影响(如图2)^[6]。因此,桨叶后缘修型段设计既要能满足气动要求,又要能保证尺寸合理和提高局部刚度。一般采用玻璃纤维或碳纤维单向带铺设,也有采用玻璃织物的。

旋翼的制造

复合材料旋翼桨叶的研制过程

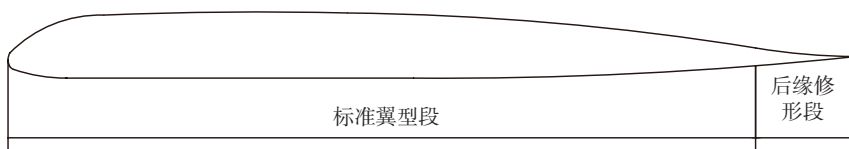


图2 桨叶后缘图

中,设计与制造要有机结合、协调统一。只有综合考虑了设计与制造过程,才能产生出既符合设计性能要求,又具有高质量、低成本的旋翼。目前旋翼机复合材料旋翼的制造方法可分为两种,一种是参考直升机旋翼桨叶制造过程,采用闭合模具热压固化成型的方式。此种方法也分为高温固化胶接成型工艺技术(美意)和中温共固化模压成型工艺技术(欧直)。通过在模具中一起成型旋翼,又或者是使用模具成型旋翼的多个部件,在进行二次胶接,来实现对旋翼的制造。D形大梁或多管梁多采用第一种成型方式,C形大梁则多用第二种成型方式。但随着复合材料成型工艺技术的发展,特别是复合材料一次成型工艺的成熟,后者因为制造的旋翼零件数少、结构整体性好,有利于提高桨叶疲劳寿命,逐渐成为主要制造方式。另一种则是对于私人自制的旋翼,由于私人制作的旋翼机对旋翼要求不多、结构简单,多使用传统加工工艺制造。直接铸造锻造或者模压成型都是比较常见的方

结束语

在未来,随着复合材料的发展变化,以及旋翼机功能上的增强,对于旋翼机旋翼设计必然有更高的要求:

(1)在旋翼桨尖形状上,为了实现旋翼机速度的大幅度提升,必然会出现新型桨尖形状,如后掠、尖削形状等;

(2)旋翼设计制造上,目前已经提出了新型填充物来实现旋翼制造一次成型及配重可调性,未来旋翼机旋翼制造将向一次成型发展;

(3)为了实现旋翼机飞行时能及时反映旋翼的健康状况,在不影响旋翼整体重量要求的情况下,如何植入芯片,实现对旋翼的实时监测技术也将是未来革新的方向;

(4)我国在小型旋翼机复合材料旋翼设计制造方面积累了不少经验,设计制造水平有很大提高。但是在大中型旋翼机复合材料旋翼设计制造方面,还缺少实际经验。应该多与外国旋翼机公司合作,共同研发适用于大中型旋翼机的旋翼;

(5)我国幅员辽阔,气候条件多样,应根据具体环境气候设计相适应的旋翼,并逐步实现同一性。

参考文献

- [1] 杨乃宾,倪先平.直升机复合材料结构设计.北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 郭俊贤,樊光华.国产复合材料在直升机旋翼桨叶研制中的应用.直升机技术,1998(3):6-10.
- [3] 中国航空研究院.复合材料结构设计手册.北京:航空工业出版社,2001.
- [4] 蔡建丽.泡沫夹层结构复合材料低速冲击损伤阻抗特性[D].南昌:南昌航空大学,2011.
- [5] 伊春望,黄璐,刘达经,等.一种新型复合材料旋翼桨尖结构形式.直升机技术,2005(2):8-11.
- [6] 刘达经.复合材料旋翼桨叶研制中的几个问题分析.直升机技术,2002(3):25-28.

(责编 深蓝)