

先进复合材料格栅结构 与大型飞机

Advanced Composite Grid Structure and Large Aircraft

北京航空航天大学 燕 瑛 刘玉佳 廖宝华 闫 伟



燕 瑛

工学博士,北京航空航天大学航空科学与工程学院教授,博士生导师,中国复合材料学会秘书长、常务理事,中国复合材料学报副主编,主要从事飞行器复合材料结构设计与分析的研究工作,发表论文 70 余篇,主持完成国家“863”、国家自然科学基金、航空科学基金、国防科技预研基金、总装和空装预研等科技项目 30 余项,获部级科技成果奖二项,“霍英东全国青年教师奖”,航空工业总公司“优秀留学回国人员”,北京市“师德先进个人”和北京市“爱国立功标兵”等奖项。

先进复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性和工艺性好等特点,尤其适用于大型结构及整体结构,是理想的航

空结构材料。在飞机上采用先进复合材料可以大幅度减轻机体结构质量、改善气动弹性、提高飞机的综合性能,因此复合材料结构件在民用飞机上得到了越来越广泛的应用,复合材料将取代金属和非金属等常规材料成为新一代飞机机体的主体结构材料。

随着航空器结构的发展,飞机独特的环境和性能要求对结构设计提出了新的课题:结构超轻型化,最佳构型设计和结构多功能化。因此,寻求一种将高效、功能化和低成本集于一身的结构形式是广大工程和科研人员追求的目标。先进复合材料格栅结构可以综合新材料技术和新结构设计的优点,以较强的可设计性和多种优良性能而广受关注,是当前国际上认为最有前景的新一代先进轻

质超韧材料,逐步得到工程界重视,国内外也相继开展了研究和应用,并逐渐显示出了无可比拟的应用前景。

质超韧材料,逐步得到工程界重视,国内外也相继开展了研究和应用,并逐渐显示出了无可比拟的应用前景。

先进复合材料格栅结构的发展与在民机中的应用

格栅结构首先由苏联提出,并已用于航空航天结构,苏联解体后,近 20 年来,该结构在美国得到了高度重视,已经成功地应用于具有平面、曲面、柱面和圆锥外型的各种航空航天结构中,并逐渐显示了其无可比拟的应用前景。

20 世纪 90 年代,Stanford 大学首先提出了以纤维增强复合材料(CFRP)为加强肋的格栅结构。先进复合材料格栅结构(AGS)由加筋网格(格栅)和被支撑的壳体(蒙皮)组成,筋(或肋骨)可以布置在蒙皮

的一侧或两侧。以格栅形式布置的筋可在有限增加板壳结构重量的前提下,大幅度提高其载荷极限和损伤容限,特别是对蒙皮和肋骨均由纤维增强复合材料制成的结构。

目前,格栅结构的应用形式主要有平板、圆筒或圆锥3大类。

格栅结构主要有3种基本结构形式:格栅板壳结构、格栅加筋板壳结构和格栅夹层结构。格栅板壳结构由纯格栅组成,上下无面板,格栅为主承力构件。格栅加筋板壳结构由一层面板和格栅组成,面板与格栅共同受力。格栅夹层结构由2层面板和格栅组成,面板主要承受面内正应力,抵抗弯曲载荷,格栅作为夹芯主要承受剪切作用,由于格栅本身具有较强的力学性能,能部分承担弯曲荷载。

根据加筋肋与蒙皮的相对位置,格栅加筋结构分为不对称格栅加筋结构和对称格栅加筋结构,不对称格栅加筋结构又有内蒙皮格栅加筋结构和外蒙皮格栅加筋结构2种。

格栅结构的网格形式主要有双向网格(包括正交各向异性网格和非正交各向异性网格)、三向网格(其中包括准各向同性等边三角形网格)和四向网格。

1981年由苏联中央研究院(CRISMB)研制出直径1.3m,高1.4m格栅加筋圆筒结构,其轴压载荷远远高于根据经典壳理论的预测值,这一结果使研究者认识到复合材料网格结构的巨大潜能。随后进行了直径2.3m和直径2.4m的试验件的研究,在一系列较为深入的研究基础上,CRISMB在1986年研制出商用飞机伊尔114机身的复合材料格栅结构部段,该结构直径2.86m,长6m,重量280kg,历经数次飞行考核,性能优异。

俄罗斯还针对大型运输机和民机研制了复合材料格栅机身壁板结构。研究表明,该类机身结构重量同

样比铝合金同类结构轻60%;即使考虑到实际结构具有端部隔框、舱门以及接头等构件,实际的减重效果仍可达40%左右。同样,俄罗斯还研制了复合材料格栅形式的一系列主承力结构,如机身承载隔框、格栅形剪力腹板、机翼和水平安定面肋和梁、格栅形容舱地板梁,同样达到了显著减轻结构重量和降低运营成本的效果。

近年来,随着复合材料制造技术的不断发展,复合材料格栅结构开始逐步应用于飞机、导弹、卫星和运载火箭等结构上,特别是在商用飞机上的应用,如欧洲空客公司生产的A300、A310和A320的尾翼安定面就采用了格栅结构,A380、波音787机身结构上用得更多。我国在新型支线客机ARJ-21飞机机身壁板上也使用了复合材料格栅结构。

AGS的制造工艺与技术保障

目前,复合材料的结构制造工艺大致可归结为缠绕、拉挤、层合和树脂传递模塑法等,这些工艺成型的复合材料结构的制造费用都大大超过了结构的原材料成本,而先进复合材料格栅结构的优点是其制造成本将基本接近于原材料成本,为此,先进

复合材料格栅结构是一种可与传统的复合材料结构相竞争的低成本复合材料新型结构。

格栅结构受轴向压缩作用时,其环向肋只受相对低的拉伸应力,此时蒙皮几乎不受轴向载荷。增强肋是格栅结构中的主要承载部件,所以选择制造工艺的主要目的是提供合适的品质和力学性能。先进复合材料格栅结构在制作过程中首先需要解决2个问题:(1)格栅结构的加强肋是相互交叉的,交叉处会引起纤维堆积和堆积处纤维的弯曲,使得格栅结构的纤维体积分数不到50%,降低了结构的力学性能,形成强度和刚度的薄弱处,在受压载荷作用下尤为明显;(2)为提高结构的抗弯和抗屈曲性能,要尽可能提高加筋肋法向的高度以获取更高的截面惯性矩。

目前,格栅成型工艺主要包括:(1)将单向板或波纹板加工成窄条作为格栅肋条,粘贴于面板上形成格栅结构;(2)短切纤维模压制造等网格格栅结构;(3)利用硅橡胶模和平面铺层工艺制造平面格栅梁板结构;(4)采用缠绕工艺和硅橡胶模、石膏模或铝合金模制造连续纤维格栅圆筒及其它曲面结构;(5)采用拉挤成型工艺和嵌锁工艺制备四边形



A380机身段

玻璃纤维格栅结构。

近 10 年来,美国和俄罗斯相继发展了多种复合材料格栅结构制造新工艺,现大致归纳如下几种:俄国的沿销钉湿法缠绕工艺;美国波音公司电子束固化硬模湿法缠绕工艺;美国斯坦福大学节点延展法;美国飞利浦实验室固化橡胶模块缠绕法;美国空军实验室混合模块法;美国空军实验室和波音发展公司具有混合模块纤维铺设法;美国 Alliant Tech System 公司具有膨胀镶嵌法;美国空军实验室和波音发展公司定位膨胀模块法;The Bruce Force Approach 湿法缠绕;复合材料光学有限公司 The SnapSat 法。以下将对其中具有代表性的几种工艺方法加以介绍。

最早的 AGS 制造工艺是由菲利普实验室提出的,采用一个硅胶橡皮垫裹在一个金属的圆柱轴上,预浸纤维缠绕在硅胶橡皮垫的外表面,根据需要格栅结构可以缠绕成三角形、四边形等多种形式。硅胶是一种热膨胀系数较大的材料,缠绕之后的格栅结构在热固化时,硅胶橡皮垫受热膨胀产生径向挤压,挤压使“鼓囊”处纤维与树脂重新分配以致均匀。这种工艺模具形式单调,仅限于圆柱型结构;此外还有热膨胀不易控制与

不易实现生产自动化等缺点。美国的空军实验室针对板壳结构的特征,提出了具有代表性的基于缠绕的混合工艺法和模具膨胀工艺,克服了以上工艺的不足,使 AGS 得到工程上的成功应用。随后 Colwell 等人针对平板格栅结构特点提出了“铆钉增强格栅工艺”和“套管增强格栅工艺”,前者是应用一定量的铆钉分开加筋肋交叉处的纤维,从而减少纤维的堆积以提高格栅的强度和刚度;后者应用复合材料套管横向铺设,纵向采用纤维捆绑来构造复合材料格栅结构,复合材料横向套管起到模具和结构的双重作用。斯坦福大学的 Tsai 等人综合考虑结构成本和力学性能提出了拉挤-互锁的格栅工艺,这种工艺方法使平板型格栅结构制作成本大为降低,在 GLAST 太空望远镜的描述仪上首次应用取得成功。哈尔滨工业大学的杜善义教授等人将目前的 AGS 成型工艺概括为:混合工艺法,模具膨胀工艺和拉挤-互锁格栅工艺及其增强改进工艺。

由于连续纤维缠绕、自动铺带技术(ATL)和自动纤维铺放技术(AFP)等先进制造技术的使用,极大地降低了制造成本,而且新设备的出现也解决了许多传统制造工艺中的难题。

AGS 在民机上应用的优势

根据外界条件,选择不同的结构,可提高结构的有效性和可靠性。格栅结构独特的结构形式使其具有较高的可设计性和优良的潜在性能。例如,AGS 结构可以设计成其大部分的载荷由肋骨承载的高肋骨格栅结构;也可以被设计成由蒙皮承载,而肋骨仅是为了提高结构抵抗总体失稳能力的低肋骨格栅结构。格栅结构的开放构形使得结构还可以进行多功能设计,比如填放吸波泡沫形成隐身结构夹层等。因此,AGS 结构在安全性、可维护性、降低成本和减轻结构重量这几方面具有其他材料和结构形式无可比拟的优势。

(1) 安全性是大型民用飞机必须考虑的问题。

AGS 作为复合材料结构,它拥有复合材料结构的一切优良性能,如比强度高、比刚度大等。

AGS 属于拉伸主导型结构,肋板主要承受轴向拉压作用,充分发挥了复合材料单向性能优异的特点,具有良好的面内承载能力。

AGS 结构具备良好的抗损伤能力,对缺陷不敏感,结构破坏具有延性特征。与蜂窝夹层结构相比,AGS 结构具有更强的损伤容限度;除了其存在固有的损伤容限能力外,还具有容纳由于冲击引起局部结构分层损伤的潜力,它可以把损伤和破坏限制在一个局部格栅单胞内,不使其继续扩展,从而避免了结构进一步出现灾难性失效破坏的可能;由于 AGS 结构传递载荷路径的冗余性,故其具有损伤和破坏形态多样性的特征,例如:肋骨失稳、肋骨断裂、蒙皮微裂纹、蒙皮失稳和结构整体失稳等,故其具有较强的后继承载能力。

AGS 结构是一种开放式结构,具有较好的适应环境的能力。譬如,AGS 结构不易吸收和保存水分,而蜂窝夹层结构就因为其容易保存水



波音 787 后机身段

分,导致其材料极易被腐蚀。

(2) 低成本是飞机保持竞争力的关键。

AGS 结构的制造过程是一个自动化的制造过程,其制造效率要比采用大量手工操作的蜂窝夹层结构高得多。连续纤维缠绕、自动纤维铺设技术已被用于 AGS 结构的成型,对于热塑性复合材料,不需要袋塑和热压处理的原位固结已成为可能,因而减少了制作成本。

(3) 减重是飞机设计永恒的话题。

格栅结构减重效果明显,具有很高的重量效率。格栅结构在几何形式上具有较好的拓扑优化性,对于相同重量的结构,格栅结构的截面惯性矩大,自稳定性高,抗弯、抗屈曲性能良好,其加强肋具有较高的法向高度,相比整体化技术的另一变形体——纵横加筋结构,能获得更高的结构效率。

单向的复合材料加筋肋没有材料的匹配问题,不会出现分层等现象,具有较高的损伤容限和抗疲劳能力,在载荷作用下,尤其是冲击载荷作用下,即使加筋肋受损,裂纹也不易传播,克服了层合板结构易分层的缺陷。

具有各向异性结构形式的格栅结构与材料力学性能各向异性的复合材料协同工作,能更好满足结构各方向强度与刚度的不等同要求,提高结构效率,满足飞行器结构的轻量化要求。

(4) 格栅结构的开放空间构形便于检测和补修,具有良好的可维护性。而夹层结构一般采用手工制成,对湿气特别敏感,而且很难检测和修补。

AGS 的分析与优化设计

复合材料格栅结构在大幅度提高结构强度的同时,降低了结构抗稳定性的能力。1988 年,俄亥俄州

立大学 Troy Meink 对运载火箭整流罩的格栅结构与蜂窝夹芯结构作了比较,发现格栅结构的强度比蜂窝夹芯结构高出 28%,而格栅结构整流罩的屈曲临界载荷却比夹层结构低 55%; 斯坦福大学 Steven Huybrechts 等进行过类似的研究,结果也表明在同等质量条件下,格栅结构在大幅度提高结构强度的同时,降低了抗稳定性的能力。因此,在格栅结构的设计应用中,稳定性是必须首先考虑的问题,复合材料格栅结构的屈曲问题成为该领域备受关注的课题。

研究表明,对于制造完整、无初始缺陷的复合材料格栅结构,在单轴、双轴和组合载荷作用下,会呈现结构整体屈曲、面板局部屈曲和筋条折损等多种失稳模态,结构变形与失效机理较为复杂。除了刚度和强度问题引起复合材料格栅结构失效外,实际格栅结构中存在的非规则性,对整个结构的失效行为和强度都有不同程度的影响。因此复合材料格栅结构的力学行为复杂,屈曲稳定性问题对于航空航天用的薄蒙皮薄筋条格栅结构来说,是其突出的基本力学问题。

解决稳定性问题主要是确定格栅结构的失稳临界载荷(屈曲载荷)和失稳模态(屈曲模态)。人们已经作了不少研究,并相继提出了诸多针对完善 AGS 结构的稳定性分析的理论及数值研究方法,所采用的分析模型主要有离散加强筋模型(DSM)、有限元模型(FEM)和平铺加筋模型(SSM)。

另一方面,有关格栅结构的优化设计研究对航空航天工业领域尤为重要,满足屈曲稳定性约束条件和强度约束的格栅结构优化逐渐受到重视,包括通过优化设计复合材料铺层参数(如铺设顺序)来最大化屈曲临界载荷的研究。AGS 结构优化设计是一个属于多任务、多约束、连续变量和非连续变量混合的优化问题。

下面以先进复合材料格栅加筋圆筒结构的稳定性分析和优化设计为例,阐述一种针对此结构的快速高效的研究方法。

(1) 参数化建模。

利用 MSC. Patran 的 PCL(Patran Command Language) 语言二次开发快速建模的方法,建立复合材料格栅加筋圆筒的有限元模型。

(2) 稳定性分析。

利用 MSC. Nastran 有限元分析软件对有限元模型进行稳定性分析,得到在轴压和外压作用下复合材料格栅加筋圆筒的屈曲模态和屈曲载荷。

(3) 结构优化设计。

在有限元分析的基础上,利用 MATLAB 的神经网络工具箱,通过 MSC. Nastran 有限元计算得到的数据对神经网络进行训练和检验,建立结构总体屈曲临界载荷和质量的神经网络响应面模型。以满足一定承载能力的条件下结构重量最轻的目标,利用遗传算法工具箱对结构进行优化设计。

展望

先进复合材料格栅结构是一种具有优良性能和发展潜力的新型复合材料结构形式,在大型飞机上具有良好的应用前景,可应用于机身壁板、机身地板梁、机翼和水平安定面的梁和肋、中央翼盒、起落架舱门等结构上。

复合材料设计和制造技术是制造大飞机的关键技术之一。复合材料低成本制造技术是先进复合材料格栅结构能否广泛应用的关键。目前,以混合工艺法、模具膨胀工艺和拉挤-互锁及其增强改进工艺为代表的工艺方法已经取得较大的成功和应用,我们应该继续研究可靠性高、可重复性强和自动化的成型工艺方法,引进和发展大型 AGS 结构的自动化生产设备。(责编 依然)