

材料与结构的新概念优化设计技术

New Concept Optimization Design Techniques of Materials and Structures

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 张卫红



张卫红

西北工业大学教授、博士生导师，教育部第二批长江学者，国家新世纪百千万人才工程入选人。1991年获比利时列日大学应用科学博士学位。1992年至1999年，先后在比利时列日大学从事博士后研究，获比利时教育部高级研究员职称、法国UTBM科技大学高级研究员、终生副教授职称、法国教育部教授资格。

结构设计轻量化，提高有效载荷，满足结构刚度、强度与动力学等性能要求是发展先进飞行器优化设计理论方法与技术的永恒主题。从早期的木质材料、轻质合金到现在的复合材料，每一种材料的应用都促进

了飞机性能的大幅提升，形成“一代材料，一代飞机”的格局，可以说应用新型材料与结构设计技术提高结构效率是贯穿飞机发展过程的主线之一，成为各个时期飞机设计的重要内容。

目前，复合材料、蜂窝材料结构在飞行器设计中的应用已经从最初的非承力部件扩展到关键承力部件。为了进一步发挥材料与结构的可设计性，满足飞行器更为苛刻的服役环境下的性能要求，必须发展先进的材料/结构一体化设计方法，充分使用现代优化设计理论，从多学科角度最大限度地挖掘材料与结构的设计潜力，按结构性能与功能(如承载、防热等)要求开展结构的布局设计，实现“一材多用”，达到材料与结构的最佳匹配。

本文主要介绍近年来蓬勃发

展的拓扑优化设计方法(Topology Optimization Method)，重点阐述该方法在结构布局设计、多孔材料构形设计和材料结构一体化设计中的应用。需要指出的是，在实际应用中设计的可行性必须与材料、结构的制备方法以及制造工艺相结合。

拓扑优化设计方法

自20世纪60年代开始，随着数值计算方法与计算机技术的迅猛发展，结构优化设计技术在飞行器轻量化设计中发挥了巨大的作用，人们采用有限元结构计算与优化设计算法相结合的途径取得了可喜的效果。目前，优化功能模块已成为大型商业化结构计算软件如MSC/Nastran、Ansys、Samcef系统设计工具的重要组成部分。结构优化设计方法经历了尺寸优化、形状优化、拓扑优化

3个发展历程,这也是目前常用的3种基本方法。

尺寸优化通常是在结构形式一定的情况下,通过优化结构的截面尺寸,如杆的截面积、板厚等参数实现结构的减重设计并同时满足强度与刚度设计要求;形状优化设计是在结构形式与截面尺寸均假设不变的情况下,通过改变结构几何轮廓形状达到结构减重或减小应力集中的设计要求;拓扑优化设计方法则是在假设载荷与边界条件不变的情况下如何获得最优拓扑结构形式,即通过优化传力路径提高结构的总体性能(如结构刚度、固有频率)。比较以上3种方法可以发现,前2种方法属于详细设计过程,而拓扑优化则属于概念布局设计,决定了材料在空间的分布,是结构轻量化设计的关键。因此,在实际应用与产品开发中可以先进行拓扑优化,再实施尺寸或形状优化设计。

对拓扑优化技术的研究最早可追溯到1904年,Michell采用解析法研究了应力结束下桁架结构的最优设计问题,并提出了桁架结构设计的Michell准则。由于当时数值计算技术水平的限制,此后很长时间内这一研究并未取得进一步的发展。但是,由于Michell桁架具有严格的理论基础,在结构优化研究中具有重要的理论价值,也成为验证优化方法的标准之一。由于工程实际中大量的结构并非桁架形式而是连续体结构,因此连续体结构的拓扑优化引起许多学者的关注,其难点在于优化模型的描述和庞大计算量带来的数值计算问题。80年代,程耿东院士与Olhoff教授,Bendsoe与Kikuchi教授提出的微结构概念与基于材料均匀化的思想奠定了拓扑优化理论的基础,该方法将材料的布局设计近似为材料微结构设计,通过优化材料微结构参数修改材料的刚度分布并最终确定材料在空间的存在与否。此

后,其他一些更为简洁的方法如渐进优化方法(ESO)、材料惩罚模型法(SIMP)的相继建立使连续体拓扑优化驶入高速发展的快车道,目前拓扑优化技术作为一种结构创新设计方法在结构设计、材料微结构构形设计以及材料与结构一体化设计中发挥了重要作用,下面分别对这3个方面进行介绍。

轻质结构布局优化设计

为便于理解,以悬臂梁结构为例考虑布局优化问题,假设结构承受集中力 F 的作用,需要对具有强、弱2种不同弹性模量的实体材料在矩形设计域内进行优化布局,设计约束条件为每种材料的用量一定,如何确定材料的最佳布局形式使结构的整体刚度(即目标函数)最大,就是拓扑优化需要解决的问题。为此,首先将可设计区域定义为一个基结构(Universe Structure)进行有限元建模网格划分,在此基础上对每一个单元赋予一个称之为伪密度的设计变量,每个单元上材料的有、无对应伪密度变量的0、1取值,并决定了对结构刚度的贡献,采用材料插值模型将0、1离散的设计变量转化为连续变量进行处理,通过优化伪密度变量即可得到拓扑优化设计结果。以上简单算例充分说明,通过单元材料的删除与保留可以获得合理的传力路径,而优化算法的选择需要考虑拓扑优化问题设计变量多,变量数目取决于网格单元数目的特点。

目前,国外商业化软件,如Optistruct(美国Altair公司)、TOSCA(德国FE-Design公司)、OptiShape(日本Quint公司)、Genesis(美国VR&D公司)均将拓扑优化功能作为系统的关键技术进行移植,拓扑优化技术已成为多学科优化设计领域非常重要和活跃的分支,与工程应用的结合亦日趋密切,也曾应用于军、民机,解决了A320

机设计中的技术难题。

进行F-35飞机耳片的结构优化设计时,设计人员发现基于多种经验的传统设计方法所获得的4种方案在减重、刚度、强度性能指标方面均无法满足设计要求。若采用拓扑优化方法通过有限元建模、材料删除与保留、几何光顺的处理可达到减重30%的良好效果并满足所有指标要求。在道尼尔728飞机舱门支撑臂设计中,与初始的结构设计形式相比,采用拓扑优化设计方法获得的新型结构形式不仅使结构减重20%,同时使设计周期缩短了75%。空客飞机机身底部支撑骨架结构以及A380机翼前缘肋结构设计结果表明,由于采用先进拓扑优化方法,结构形式的创新设计大幅度提高了结构效率,获得结构减重达到45%的效果。

虽然近20年来连续体结构拓扑优化已经取得了长足的发展,凭借其技术优势和潜力初步得到了工业界的认可,但是作为一种新的设计方法仍然处在发展的初始阶段。一方面需要在工程领域对拓扑优化技术进行推广,使工程人员掌握并能合理运用;另一方面需要在学术研究层面进一步深化,突破拓扑优化技术在解决复杂载荷问题、多场耦合问题等方面存在的困难。如设计相关性载荷下的结构布局设计,包括温度载荷、惯性载荷、离心力等,这类载荷的共同特点为:设计过程中材料的存在与否决定了载荷的大小,换言之,载荷随着设计迭代过程而发生变化,材料用量的增加将导致载荷的增加,所以与传统的固定载荷问题相比有很大不同,并不是材料越多结构刚度越大。

作者所在的研究小组围绕结构轻量化设计开展了长期的研究,开发了相关设计软件;结合飞行器结构特征研究了典型承力结构形式设计、循环对称圆筒结构加筋设计、设计相关性承力结构设计以及两相材料布

局设计等问题。

轻质材料微结构构形优化设计

多孔材料结构是近年来国际上迅猛发展的一种先进多功能材料形式,融材料功能与结构性能为一体,具有轻质、高比刚度、抗撞、热稳定、降噪等综合优异性能,充分反映了力、热、声、电、磁等学科的融合交叉,

间,设计人员可以通过多功能、多学科协同设计微结构构形、组分材料的体分比以及胞尺度的大小、优化材料的宏观等效物性表征参数,使多孔材料拥有非凡的综合性能。目前,以丹麦学者 Sigmund 提出的以材料特定性能(如负泊松比、零膨胀系数)为目标,基于均匀化方法的微结构构形逆向设计方法构成了目前材料优

要认真考虑试件的大小对测试结果的影响。图 2 为日本学者 Kanyatip Tantikom 等人针对不同层数的多孔结构进行压缩试验时所获得的应力-应变曲线,可以看出当夹芯层数为 3 时,应力-应变曲线发生了很大的变化,尺度效应非常明显,而当层数更多时尺度影响已显得不重要了。

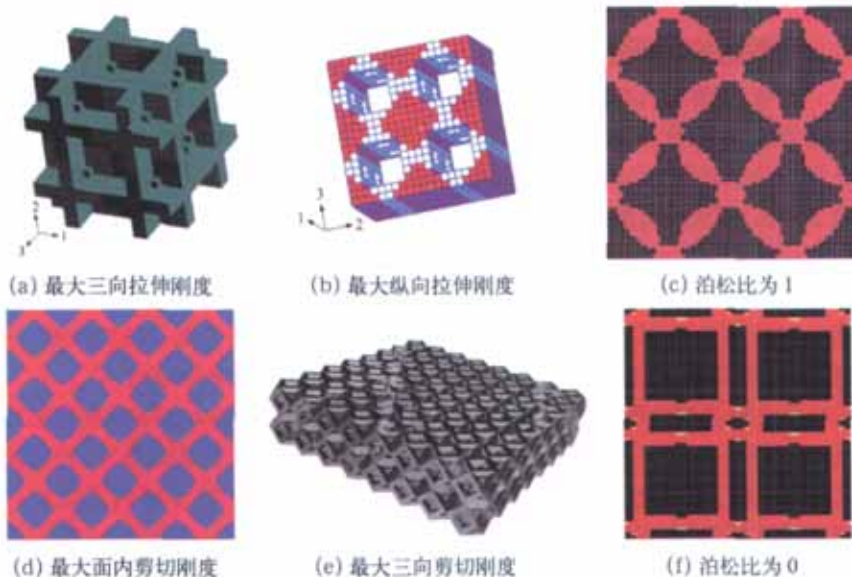


图1 满足不同性能要求的材料微结构构形优化设计

在航空航天飞行器、武器装备、能源、运输、生物医学等众多领域所面临的超轻质、高强韧、热防护等苛刻性能需求中展现出巨大的应用前景。

围绕多孔固体的力学行为与材料制备技术, IUTAM、TMS 等国际权威机构积极推进最新成果共享,近年来举办了高水平专题会议。欧、美、日等发达国家从战略需求考虑,将多孔材料技术列为重点研究发展方向,美国海军科研总署(ONR)、国防高级研究计划局(DARPA)联合哈佛、剑桥等大学与科研机构从材料制备工艺、性能测试与表征、结构设计理论到计算方法等不同层面进行了连续高强度资助。目前,粉末烧结、激光沉积等先进工艺为多孔材料结构的制备提供了有力的支持。

与致密性均质材料相比,正是由于孔穴的存在,极大地拓展了设计空

化设计的主要策略。通过发展面向闭孔、通孔的计算技术,建立了超轻桁架点阵夹芯与特殊功能蜂窝构形等新型结构形式。与此相比,采用多孔固体的均匀化宏观性能表征预测模型与正向设计技术相结合的方式,人们也可以设计具有最大热膨胀系数、热传导系数、弹性模量的多孔材料微结构形式。图 1 所示为进行材料设计时根据不同性能要求所获得的微结构优化构形。

然而随着研究的深入,发现目前使用的均匀化方法由于在理论上采用了材料胞微结构无穷小的假设而无法在孔穴构形设计时考虑胞的尺度效应,而现实中多孔材料胞尺寸同样需要得到有效的表征,正如对多孔材料的力学性能进行测试时需

材料与结构的一体化设计

前面讨论了宏观结构的拓扑优化和多孔材料微结构设计,其中微结构设计是利用微结构性能表征参数在微结构设计空间进行的细观尺度下的拓扑优化,显然,上述宏观、细观优化问题具有相同的本质,但两者处在不同尺度空间,相互分离。然而自然界中存在的结构多由致密性部分、多孔部分以及空洞相结合来获得其生存环境下的最佳性能。如树木、骨骼等的组织结构,都是经过自然进化形成具有多种功能的多孔材料结构。这种自然存在的材料/结构,在宏观尺度上是一种材料,但在细观尺度上却是由具有不同构形的微结构所构成的多孔结构,材料和结构、宏观和细观在这种自然多孔材料上完全统一、没有界限。树木和骨骼就是最好的例子,这种高效结构表现为分层多孔夹芯结构,在横截面上由不同相

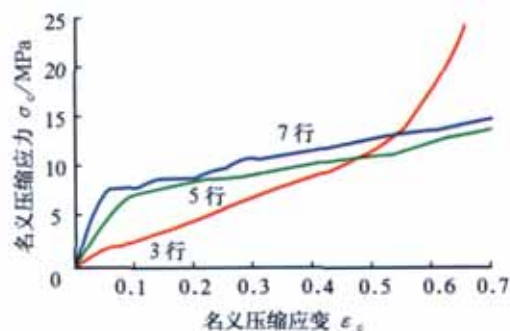


图2 不同层数多孔结构压缩试验应力-应变曲线

对密度的多孔材料分层排列而成,而多孔材料又是由更小尺度的呈分层排列的不同构形微结构构成的,因而在横截面上结构表现为从实体致密

磨粒流—— 数控去毛刺、抛光、表面处理系统

■ 汽车工业零部件



■ 刀具行业

■ 航空航天领域



中国区授权代理

Champion
精品机械有限公司

厂址: 常州 08-182

材料(或蒙皮)到高密度多孔材料层,再到低密度多孔材料层或夹芯层的分层变化。这些概念激发了人们构建一种类似于树木或骨骼组织结构的分层多孔材料层板结构。该结构中不同孔隙率、不同构形的微结构被分层组织分布,利用材料的孔隙率和多孔微结构构形的变化来设计结构的性能,获得结构性能的梯度变化、材料使用效率的最大化。

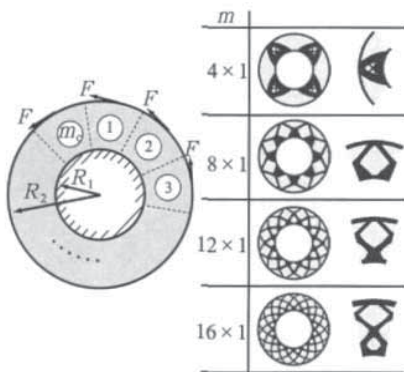


图3 薄壁夹芯圆筒构形拓扑优化设计结果

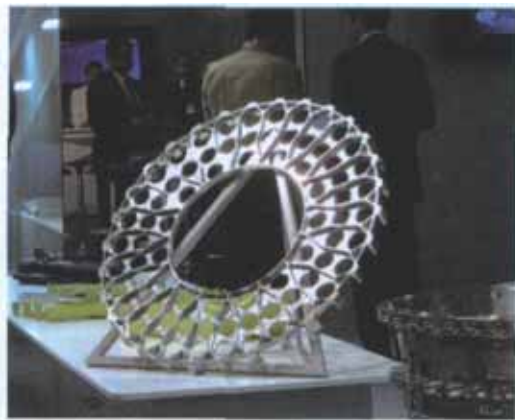


图4 国外发动机典型结构件

因此可以说,材料与结构一体化设计的根本在于:根据宏观结构的承载条件,优化设计材料微结构的拓扑构形与几何尺寸以及孔隙率的空间分布,在满足结构轻量化设计要求的同,使结构性能最优化,提高结构效率,达到材料与结构的最佳匹配。换言之,材料微结构设计于结构宏观优化具有不可分割的内在联系,材料与结构的一体化设计就是要充分考虑材料微结构设计于宏观结构设计的相互耦合作用,挖掘材料与结

构的设计潜力,避免造成材料与结构2个层次上设计的脱节。

对于一个宏观连续体结构,由于载荷的作用,不同位置的受力状况如应力、变形将发生很大的变化,如何在不同位置设计不同的材料微结构构形,使材料的宏观各向异性与结构的受力状况达到最佳匹配就是优化设计需要解决的问题。事实上,由于宏观材料由细观微结构构成,而在细观上微结构表现为类似宏观结构的结构构形。通过设计细观微结构的构形,可以获得具有不同宏观性能的材料。进一步将宏观结构设计于所使用材料的微结构设计相结合,就可以在细观和宏观2个空间同步设计材料和结构。

近年来,西工大结合航空航天需求背景开展了多孔材料夹芯板、循环对称等典型结构形式的一体化设计研究。图3为作者所在的研究小组针对切向载荷下满足最大刚度设计要求的循环对称蜂窝夹芯结构构形给出的拓扑优化设计结果,可看出扇形体胞尺寸对优化构型的影响。图4为2007年巴黎航展国外发动机参展商给出的设计样件。

结束语

介绍了拓扑优化设计方法以及在结构设计中的实际应用,着重探讨了结构设计、材料设计与材料/结构一体化设计3个方面的研究进展,并对一些基本概念进行了介绍。尤其是轻质材料/结构的一体化设计理念,突破了传统的材料与结构设计的界限,将细观材料微结构设计和宏观结构功能/性能紧密联系起来,提高了结构效率,这对于进一步研究复杂载荷环境下的飞行器结构与热防护系统设计,实现材料与结构承载、防热性能优化设计的匹配具有重要的借鉴作用与参考价值。(责编 钟元)