

拓扑优化在框架式模具结构选形中的应用

Application of Topology Optimization in Structure Selection of Frame Mould

中航工业北京航空制造工程研究所 张 铖 梁宪珠 胡江波 薛向晨 李春林 常德斌

[摘要] 对航空复合材料构件制造用框架式模具进行了底部支撑框格的结构拓扑优化;根据对优化结果的分析以及2种底部支撑框格的有限元模拟结果对比,证明了框架式模具底部支撑框格采用桁架式开口具有较高的结构效率。

[ABSTRACT] Topology structure optimization is made for the supporting structure of bottom frame mould in aeronautical composite component manufacturing. Based on the optimization results analysis and comparison between two finite element simulation results of the bottom supporting structures, it is proved that truss type opening for supporting frame on frame type mould bottom efficiency.

关键词: 框架式模具 拓扑优化 选形

Keywords: Frame mould Topology optimization Structure selection

复合材料问世以来,以其轻质、高强的优异力学性能和其材料本身独特的可设计性得到航空、航天等众多制造工业的青睐。尤其在航空领域,复合材料在飞行器结构上的用量已然成为了评价其是否先进的衡量标准之一。随着近几十年来航空工业对复合材料设计、制造更加深入的认识,复合材料构件逐渐趋于大型化、整体化。与此同时,也对复合材料的制造工艺提出了更高的要求。

复合材料构件的成型是材料与结构同时成型的过程。因此,成型过程需要使用必要的工装模具,以尽量避免构件产生变形,影响构件最终的力学性能。目前航空用大型复合材料构件主要有翼面类和机身类2种。其维型工装通常由型面工装和支撑工装2部分组成,其中型面工装用于保证复合材料构件的外形面符合设计要求;支撑工装用于将工作载荷下支撑型面工装的变形控制在设计要求范围内,最终满足构件的外形要求。图1为典型翼面类模具,由于其底部支撑结构是由众多隔板组合成的框格式样,通常被称为框架式模具。

在复合材料制造工艺设计阶段,框架式模具是其中较为重要的设计环节。该环节需要考虑到模具在工作

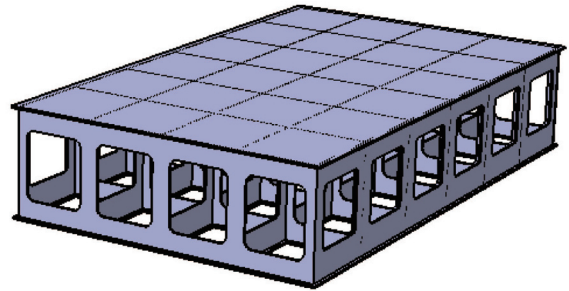


图1 典型翼面类模具

Fig.1 Typical mould for wing airfoil surface

载荷下的变形及其对材料固化过程当中的温度场均匀性的影响,因此,通常需要模具的刚度满足一定的条件,且重量尽可能小。以往由于复合材料构件的尺寸较小,框架式模具在其设计过程中很少出现刚度不满足要求的情况。而随着复合材料构件的大型化,制造工艺需要模具的设计使用更好的拓扑结构,以满足构件大型化对工艺更加严格的要求(在满足结构刚度需求的前提下,尽可能降低模具重量)。目前,有关结构拓扑优化应用方面的文献已有不少^[1-3],但关于框架式模具的结构拓扑优化方面的文献基本没有。本文旨在通过结构拓扑优化方法,对航空用复合材料构件制造过程中所使用的框架式模具的结构选形进行初步研究。

1 框架式模具拓扑优化模型

上文已给出了框架式模具的结构形式。目前框架式模具的制造主要使用钢材进行加工。底部通过对一定厚度的钢板进行数控加工,切割掉部分材料,以实现对整个结构的减重。而对于如何减去材料,以往并没有这个方面的研究,只是通过经验将隔板开出一定尺寸的方口,并通过有限元计算进行验证,符合刚度要求,则认为设计满足要求。

本文从实际出发,将拓扑优化内容限定在隔板的材料分布上,在给定的载荷和边界条件下,得到隔板优化后的拓扑结构。由此建立如图2所示的框架式模具拓扑优化模型。

模型中分为拓扑优化区与非拓扑优化区。拓扑优

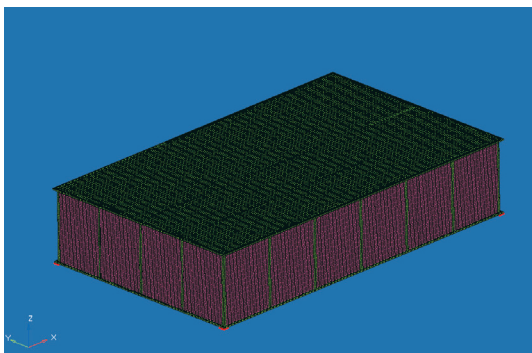


图2 框架式模具拓扑优化有限元模型

Fig.2 FE model of topology optimization of frame mould

化区(图2中红色区域)位于模具底部的隔板支撑结构区域,由于隔板交叉位置处在模具制造过程中为焊接区,因此将隔板交叉处均设置为非拓扑优化区。在该拓扑优化过程中,不涉及底部边框和上部型面的材料分布,因此其他部位均设置为非拓扑优化区(图2中绿色区域)。

1.1 网格单元

模型中结构单元采用六面体单元。为提高拓扑计算结果的精确程度,将拓扑区划分为174406个单元,非拓扑区划分为77773个单元,共计单元数252179个。

1.2 载荷与约束

框架式模具在工作状况的载荷主要有温度载荷、自身重力载荷以及型面上部构件与工装的重力载荷。考虑到模型的简化与普适性,优化时不考虑温度载荷(据文献[4]记载框架式模具工作状况的温度载荷对模具结构的影响有限,可以忽略),整体施加重力载荷;同时型面上部构件与工装对于模具的重力载荷简化为型面上表面的均布载荷,约束为模型底部四角多点支撑。

1.3 响应与优化目标

在框架式模具拓扑优化问题中,设置最小柔度为优化目标,拓扑区域体积为优化响应。该优化问题在给定的材料体积区间内得到柔度最小的材料分布状况。

2 结果分析

通过拓扑优化计算,优化过程共计迭代步数31次。图3为优化后的模型非拓扑区的材料分布情况,其中红色区域为材料保留区域。

由图3分析可知,材料在内部隔板非拓扑区的分布呈条状分布,外侧隔板材料分布相对较多。因此可认为,框架式模具底部支撑隔板在消减材料时,应尽量使保留的材料呈桁架结构,且外侧隔板应相对内部隔板进行适当的加强。

根据对拓扑优化结果的分析,结合实际的工程经

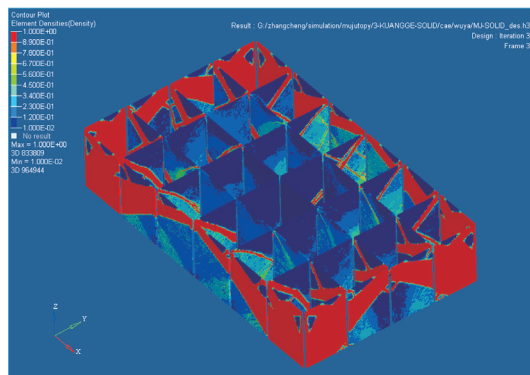


图3 框架式模具拓扑优化结果

Fig.3 Topology optimization result in frame mould

验,本文认为如图4所示的桁架开口结构形式应为框架式模具的底部结构效率较高的拓扑结构。

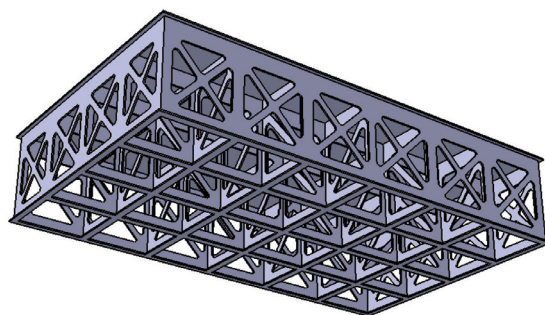


图4 桁架式开口的底部支撑结构

Fig.4 Bottom supporting structure for truss type opening

为进一步证明桁架式开口结构的优势,本文针对相同结构尺寸的框架式模具进行了底部方形开口与桁架式开口2种结构的有限元模拟,比较在边界条件相同和质量近似的情况下,2种结构的变形量大小。有限元模拟的结构变形云图如图5、图6所示,表1为2种结构

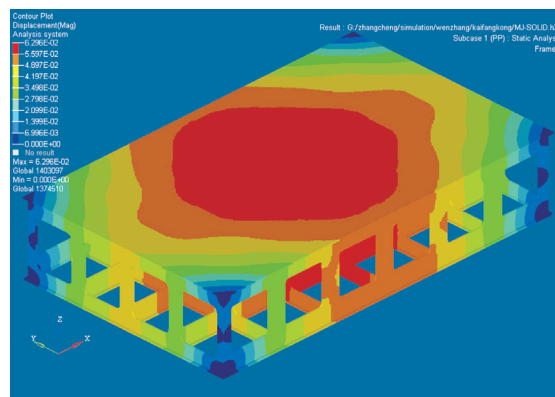


图5 方形开口模型变形量云图

Fig.5 Deformation cloud chart for square type opening model

(下转第68页)

拟负载的0.172%。故可忽略这部分影响因素,将式(26)改写为:

$$\begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

由式(29)可知: θ_1 与前助力器1的长度和夹角 α 有关,是一个随3个助力器运动关系变化而变化的变量值,其中 α 可由公式(6)求得。但 α 与3个助力器的长度之间存在非线性关系,这增加了 α 求解的难度和精确性。但若 θ_1 变化范围不大,且当其取某一定值时仍能满足工程精度要求,则在系统正常工作时,将 θ_1 作为变量不断的精确求解出来的工程意义不大。按照此思路,根据前助力器1在六边形笼架上的安装关系,可测算出 θ_1 的变化范围是 $(7.697^\circ, 10^\circ)$ 。在此取 θ_1 是其上、下限的近似平均值,即 $\theta_1=8.8^\circ$ 。则其误差范围可由以下方法确定:

$$\left| \frac{\cos 10^\circ - \cos 8.8^\circ}{\cos 10^\circ} \right| \times 100\% = 0.347\%$$

$$\left| \frac{\cos 7.697^\circ - \cos 8.8^\circ}{\cos 7.697^\circ} \right| \times 100\% = 0.279\%$$

由以上求解可知,当使用 $\theta_1=8.8^\circ$ 时,其误差小于0.347%,满足系统工程要求。则式(29)可变化为:

$$\begin{bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.988 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

由式(30)可看出,由于前助力器1安装倾角较大,导致加载缸1输出力为 f_1 时,只有其中的0.988 f_1 传递给了前助力器1。故为满足系统设计的要求,当前助力器1所需的载荷谱为 P 时,控制系统输入指令应调整为1.012 P 。

6 结论

本文通过以上对于系统中存在的力耦合情况分析,经计算发现其关系虽然复杂,但造成的影响在系统允许的误差范围之内,因此可忽略这部分耦合因素。从而该多通道系统的各负载模拟通道可实现独立控制,采用与单通道系统相同的控制方案,从而论证了在满足工程要求的前提下,该MIMO耦合系统可实现一个相对简单易于实现的控制策略。

参考文献

- [1] 王占林. 液压伺服控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1987.
- [2] 路录祥, 王新洲, 王遇波. 直升机结构与制造. 北京: 航空工业出版社, 2009.

(责编 小城)

(上接第63页)

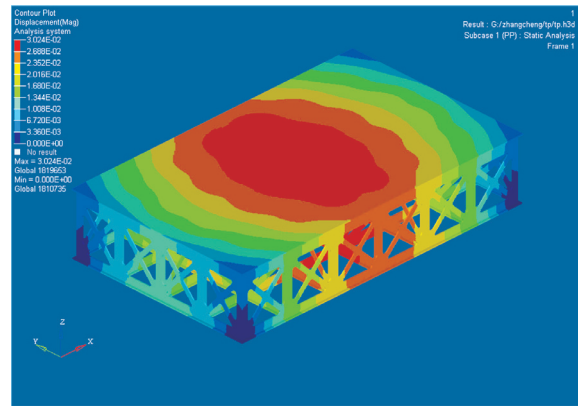


图6 桁架式开口模型变形量云图

Fig.6 Deformation cloud chart for truss type opening model

表1 方形开口模型与桁架式开口模型变形量和质量对比

开口结构	质量 /kg	变形量 /mm
方形开口	2066.489	6.296e-02
桁架式开口	2024.316	3.024e-02

的变形量及重量对比。

通过上述结果可知,在边界条件相同和质量近似的情况下,桁架式开口模型的变形量约为方形开口模型变形量的48%。由此可知,框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式要优于方形开口形式,其结构效率优势明显。

3 结论

本文对航空复合材料制造过程中使用的框架式模具的底部支撑结构进行了拓扑结构优化。通过拓扑结构优化的结构,结合工程经验,认为框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式具有较好的结构效率;并通过有限元模拟,对比了方形开口与桁架式开口模型在边界条件相同和质量近似的情况下的结构变形,证明了框架式模具底部支撑结构采用桁架式开口形式具有明显的结构效率优势。

参考文献

- [1] 李学修, 黄虎, 刘长虹. 拓扑优化方法在轻卡车身结构改进中的应用. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(1): 11-15.
- [2] 潘峰, 朱平, 孟瑾. 微型货车车架的拓扑优化设计与研究. 机械设计与研究, 2008, 24(2): 87-90.
- [3] 扶原放, 金达锋. 多工况悬架下摆臂结构优化设计方法研究. 机械设计与制造, 2009(8): 1-3.
- [4] 岳广全, 张博明, 杜善义, 等. 热压罐成型工艺所用框架式模具的变形分析. 复合材料学报, 2009, 26(5): 148-152. (责编 深蓝)