

文章编号:1674-8190(2013)01-071-05

连续纤维增强整体叶环结构方案优化设计

刘小利, 陆山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘要: 为设计出更轻质高强度的轮盘, 提高航空发动机推重比, 基于 ANSYS 优化平台, 提出并建立整体叶环子午面结构参数化模型, 筛选子午面主要结构优化设计变量, 在金属盘结构设计准则应力标准基础上, 提出并建立纤维增强整体叶环轻量化结构优化设计数学模型。扩展并建立复合材料轮环结构优化设计约束条件。借助轮环结构优化数学模型及 ANSYS 优化方法, 通过典型纤维增强整体叶环结构优化设计, 得到满足所有强度约束条件下的轻量化轮环结构, 钛基 SiC 纤维在增强整体叶环结构的同时可以减少 39.92% 的质量, 表明纤维增强整体叶环设计技术在叶环结构减重方面具有明显优越性, 表明纤维增强整体叶环结构方案设计方法的有效性。

关键词: 整体叶环; 减重; 纤维增强复合材料; 轮盘结构优化设计; 应力安全系数

中图分类号: V232.3

文献标识码: A

Structural Optimum Schematic Design of Continuous Fiber Reinforced Bling

Liu Xiaoli, Lu Shan

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aimed for designing much light weight disk with enough strength, based on ANSYS optimization platform, mathematical model of light weight structure optimization design for fiber reinforced bling is put forward and established. parameterization model of structure optimization design for meridian plane of ring is established. Main optimum design variables of meridian plane are chosen, and design constraint conditions of fiber reinforced ring structural optimization are extended and established based on structural design criterion of metal disc. Through structure optimum design of typical fiber reinforced bling, lighter weight ring satisfying all strength constraint is obtained. It is found that the designed ring reinforced by SiC fiber can save 39.92% weight compared with the corresponding disk under same load, and indicates that bling is of obviously advantage in weight saving, and the structure optimization design method of the fiber reinforced bling in this paper is effective.

Key words: bling; weight saving; fiber reinforced composite; disk structure optimum design; stress safety factor

0 引言

发动机增推减重(提高推重比)始终是航空动力不懈追求的目标。目前国内航空发动机金属盘受到材料强度限制, 减重空间非常有限。要想突破目前水平, 实现更轻质、高性能的发动机, 必须采用质量更轻、性能更高的新型材料。连续纤维增强金

属基复合材料(MMC)由于具有强度高、使用温度高及抗疲劳和蠕变性能好的优点^[1], 受到各国航空发动机研究机构的广泛重视^[2-5]。由于旋转盘的主要应力为周向应力, 而纤维沿纵向有较高的拉伸强度, 故可采用连续纤维周向缠绕增强金属基复合材料, 来制造更轻质的叶盘结构——整体叶环。美国纤维增强的 MMC 转子整体叶环研究始于 1984 年, Muschlits 和 Ravindranath^[6] 首先证明了 MMC 整体叶环的可行性。目前, 美国已进行钛基 MMC(TMC)整体叶环整机试验。英国于 20 世纪 90 年代开始研制 TMC 整体叶环, 相对于传统盘甚

收稿日期:2012-02-24; 修回日期:2012-04-04

通信作者:刘小利, nwpu-7154lxl@163.com

至是目前的整体叶盘转子,除减重外,整体叶环技术(内腔)还将有利于转子动力学设计^[5]。

目前,国外公开文献关于纤维增强整体叶环的报道仅限于叶环结构示意图及开展的试验项目,未见关于整体叶环结构设计和强度分析的具体研究内容。国内对整体叶环的结构制造及设计研究更是鲜有报道。因此,尽快开展纤维增强叶环结构设计技术研究是十分必要的。

复合材料叶环结构应用研究进展,依赖于结构设计技术及制造工艺研究的交替发展。本文首先提出并建立连续纤维增强轮环结构优化设计平台。在此基础上,以某高压压气机整体叶环结构为例,设计连续纤维增强整体叶环结构,探讨该类叶环结构设计方案的可行性。

1 轮环轴对称模型建立

1.1 基本假设及选材

综合已有整体叶环设计的基本概念及结构形式^[2-5],作出简化及假设为:

(1) 假设纤维和基体均为理想材料,且均为各向同性线弹性材料。

(2) 轮环子午面可分为内外复合结构:内部结构选用单向连续纤维增强金属基复合材料,纤维沿轮环周向均匀缠绕,在子午面上可简化为均匀横观各向同性材料;外围包裹结构选用金属基体材料。可采用轴对称模型建模分析。

(3) 假设内外结构间界面、纤维与基体间界面均为理想粘结。

(4) 选用较粗的增强纤维可以减少基体与纤维接触界面,提高可靠性,故一般选用直径为 $100 \sim 140 \mu\text{m}$ 的大直径纤维^[6]。

(5) 将叶片离心力等效为轮缘梯形分布载荷。

(6) 可采用单向纤维增强经验公式^[7]对复合材料的宏观弹性常数及基本强度进行估算。

(7) 复合材料失效准则选用 Tsai-wu 各向异性材料失效准则^[7-8]。

1.2 纤维增强轮环结构轴对称参数化建模、优化变量选取

在分析了国外几种整体叶环示意图基础上,设计了整体叶环方案,叶环子午面 1/2 模型及参数化

尺寸如图 1 所示。

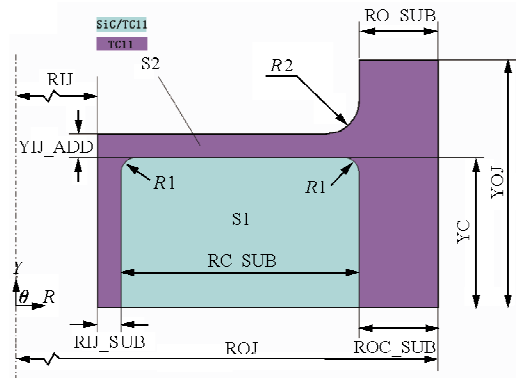


图 1 整体叶环子午面 1/2 模型及参数化尺寸
Fig. 1 Model and characteristic dimensions of bling's meridian plane

从图 1 可以看出,复合材料环 S1 和外围钛合金包裹结构 S2 两部分构成叶环。经筛选所得优化设计参量如表 1 所示。

表 1 叶环子午面特征参数表

Table 1 Characteristic dimensions of bling's meridian plane

已知参数	优化变量
轮环外半径(ROJ)	S2 内壁厚(RIJ_SUB)
轮缘半宽(YOJ)	S1 半宽(YC)
S2 侧壁厚(YIJ_ADD)	S1 径向厚度(RC_SUB)
S2 突肩径向厚度(RO_SUB)	S1 圆角半径(R1)
S2 外缘壁厚(ROC_SUB)	S2 突肩圆角半径(R2)

1.3 失效准则、优化约束状态变量

除主要几何尺寸约束以外,约束条件还应考虑使轮环具有足够的应力储备,它综合反映了防止轮环多种失效模式出现的要求,是众多影响因素的综合性能指标,在轮环结构设计时应予以首先满足。所选的约束应力包括:(1) 环内径处最大周向应力;(2) 子午面平均周向应力(与轮环子午面破裂转速储备一致);(3) 圆柱面最大平均周向、径向应力(与沿圆柱面破裂转速储备一致)。此外,还应考虑轮环的最大等效应力约束。环内径最大等效应力约束为屈服强度的安全系数 1.25。对于复合材料,还要以各节点的 Tsai-wu 强度指数作为约束条件。

由于轮环子午面分内外两种材料结构如图 1 所示,其中,S1 结构材料 SiC/TC11 为均匀横观各

向同性材料,主拉伸方向沿环周向;S2 结构材料 TC11 为各向同性材料,与复合材料结构的基体材料相同。因此轮环的关键约束应力按内外结构分别计算。基于发动机金属轮盘设计准则^[9],推广建立的复合材料环结构设计准则约束应力安全系数如表 2 所示。

表 2 材料约束应力安全系数

Table 2 Safety factors of materials' constrained stresses

约束量名称	安全系数 下限 n_s	约束材料
Tsai-wu 强度指数	1.54	SiC/TC11
环心最大周向应力	1.25	TC11
环心最大等效应力	1.25	TC11
全环最大等效应力(除环心)	1.25	TC11
圆柱面最大平均径向应力	1.25	TC11
圆柱面最大平均周向应力	S1	SiC/TC11
	S2	TC11
子午面平均周向应力	S1	SiC/TC11
	S2	TC11

表 2 中安全系数下限为满足强度设计的近似取值,对于具体问题,可作适当调整。对于 TC11 材料,当满足屈服强度约束时,极限强度约束将自动满足^[8],故按屈服强度约束。而复合材料纤维主控,则按极限强度约束。

2 优化分析

轮环子午面形状优化问题数学模型^[6,9]:

$$\min M = f(X_i, \dots, X_n) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} X_i^l \leq X_i \leq X_i^u & (i=1, 2, \dots, p) \\ N_j = \sigma/\sigma_j \geq N_j^r & (j=1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为目标函数; X_i 为设计变量, X_i^l 和 X_i^u 分别表示设计变量的下限和上限; σ_j 为约束应力或强度指数, σ 表示材料的强度或失效准则临界值, N_j 和 N_j^r 分别表示按强度或失效准则约束时的应力安全系数或失效准则安全系数及其下限。对于本文算例,式中 $p=5, q=9$ 。

ANSYS 优化设计模块提供了两种优化方法:零阶方法和一阶方法。零阶方法不需计算设计变量的导数,它首先利用最小平方拟合来建立目标函数、状态变量关于设计变量的逼近,然后通过对目标函数的逼近添加罚函数,将约束优化问题转化为

无约束优化问题,进而采用 SUMT 法寻优。一阶方法基于设计灵敏度,需计算相关变量的梯度以确定搜索方向,并通过对目标函数添加罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题,进而采用线性搜索来寻优。首先采用零阶方法在全局设计空间进行粗略优化,然后再采用一阶方法在局部设计空间进行细致优化,直到找到最满意的解^[6,9-10]。

利用 ANSYS 平台进行轮环结构优化设计,必须基于 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 建立优化循环所用的轮环应力分析命令流文件,包括一个参数化建模和应力分析的完整过程,即:定义描述轮环子午面形状的几何尺寸参数(设计变量);建立参数化几何模型,进行有限元应力分析,提取约束应力安全系数、强度指数安全系数(状态变量)及轮环质量(目标函数)并赋给相应的参数。在此基础上,运用 ANSYS 的 /OPT 优化设计模块进行优化分析。在优化分析过程中,需要不断考察设计序列结果,如果不能满足设计要求,则应返回调整设计变量的约束区间,重新进行优化分析,直到找到满意的解集;若仍不能满足设计要求,则应返回考查轮环的几何设计参数、所选材料及载荷条件等,进行必要修改后再重新进行优化分析^[8-10]。

3 纤维增强轮环结构优化设计实例分析

以某压气机整体叶环设计为例,其轮缘尺寸及负荷如表 3 所示,以此条件设计出的整体叶盘见参考文献[11]。

表 3 某典型压气机盘的设计分析条件

Table 3 Design conditions of a typic compressor disk

参 数	给定值
轮盘外半径/m	0.228
轮缘宽度/m	0.059
轮缘均布载荷/MPa	21.01
最大转速/(r/min)	15 720

复合材料基体及轮环子午面周边结构材料选用常用航空发动机压气机材料 TC11 钛合金^[12],增强纤维选用直径为 140 μm 的 SCS-6 的 SiC 纤维^[2-5,9]。宏观横向极限强度与宏观观应力比和界面强度有关。界面强度以复合材料中较差材料的

强度值为基准,一般不高于该基准。同时,考虑粘接工艺水平不可能达到理想,假定界面强度为较差材料强度的95%;单胞模型计算所得宏观观应力比的基础上。初步取宏观横向极限强度为较差材料屈服强度的90%。主要材料参数如表4所示。

表4 主要材料参数
Table 4 Main parameters of materials

参数	TC11	SCS-6(SiC _f)	SiC _f /TC11 复合材料
$E_R = E_T / \text{GPa}$	105	390	168.4
E_θ / GPa	105	390	210.6
$P_{R\theta R} = P_{R\theta Y}$	0.3	0.3	0.3
P_{RRY}	0.3	0.3	0.36
$G_{\theta R} = G_{\theta Y} / \text{GPa}$	37	15	21.58
G_{RX} / GPa	37	15	20.98
$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	4 480	3 000	3 888
$V_f / \%$	—	40	—
$[\sigma_\theta] / \text{MPa}$	569	4 000	2 246
$[\sigma_R] / \text{MPa}$	569	800	512
$[\sigma_Y] / \text{MPa}$	569	800	512

注:RY为子午面, θ 为周向(主拉伸方向)。

采用轴对称模型进行复合材料弹性应力分析。计算子午面平均周向应力时,在子午面上按单元面积进行应力平均;计算圆柱面最大平均径向、周向应力时,按一定的间距沿轮环子午面径向选取若干个截面,在每个截面上建立路径并按路径进行应力平均。

根据前述方法,建立了基于ANSYS平台的轮环结构优化程序。经过优化分析,得到纤维增强复合材料叶环结构的优化设计结果,如表5所示。将表5的状态变量安全系数优化结果与表2的安全系数下限值比较可见,全环等效应力安全系数已达到约束临界值,表明目前轮环结构已满足给定强度约束条件下的轻量化解。

为宏观判断优化后材料的利用率,提取复合材料在许用应力下的Tsai-wu强度指数进行比较,S2区也采取了类似Tsai-wu强度指数的表述方法,如图2所示。图中指数小于1时表示结构安全。值得说明的是,在外缘板下的R2处,各应力分量相对值比较大,但相当于等效应力和强度比的Tsai-wu指数,因为去除了静水压力影响,其值反而较小。

表5 整体叶环的轮环结构优化设计结果

Table 5 Optimum design result of ring

程序	参数	符号	优化结果
设计变量	S2 内壁厚/mm	RIJ_SUB	3.01
	S1 半宽/mm	YC	16.15
	S1 径向厚度/mm	RC_SUB	19.47
	S1 圆角半径/mm	R1	4.54
	S2 突肩圆角半径/mm	R2	3.67
状态变量	Tsai-wu 强度指数安全系数	N_f	1.72
	环心等效应力安全系数	N_{ie}	1.289 8
	全环等效应力安全系数	N_{fe}	1.250 7
	环心周向应力安全系数	$N_{\theta e}$	1.419 4
	子午面平均周向 S1	N_{mcc}	1.91
	应力安全系数 S2	N_{msj}	1.661
	圆柱面平均径向 S1	N_{cxc}	9.754
	应力安全系数 S2	N_{cxj}	21.33
目标函数	圆柱面平均周向 S1	N_{cxc}	1.795 1
	应力安全系数 S2	N_{cxj}	1.533
目标函数	轮环总质量	M_{tot} / kg	5.811 3

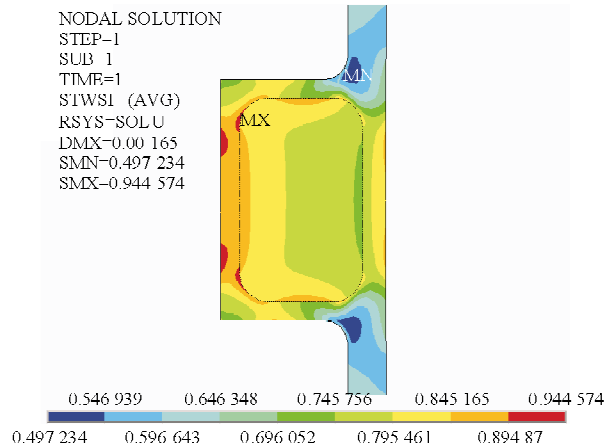


图2 整体叶环 S2 区域 Tsai-wu 强度指数

Fig. 2 Blisk S2 area's Tsai-wu strength coefficient

从图2可以看出,环心Tsai-wu系数已经接近1,表明轮环结构已经达到了优化的目标。经优化的整体叶环相对于整体叶盘盘体部分,减重效果分析如表6所示。

表6 整体叶环相对于整体叶盘盘体的减重效果

Table 6 Weight saving of blisk compared with blisk without blade

结构	质量/kg
整体叶盘盘体 ^[12]	9.672 0
整体叶环环体	5.811 3

对于整体叶盘及整体叶环结构,在叶片离心载荷完全相同的情况下,盘体部分,轮环相对轮盘可减少 39.92% 的质量。证明整体叶环结构具有优越性,也证明本文方法的合理性和有效性。

4 结 论

提出了纤维增强整体叶环的盘体结构优化设计数学模型。基于 ANSYS 优化平台,建立了整体叶环子午面结构优化设计参数化模型,筛选了子午面结构优化设计变量,建立了结构优化设计约束条件。最终形成纤维增强叶环结构优化设计平台。通过典型纤维增强整体叶环结构优化设计,获得满足给定负荷及强度约束条件下的轻量化轮环,并与相同负荷的整体叶盘结构进行对比,钛基 SiC 纤维增强整体叶环结构可以减少质量 39.92%,表明纤维增强整体叶环在减重方面具有明显优越性,证明提出的轮环结构设计方法及平台的合理性和有效性。

参考文献

- [1] 李成功,傅恒志,于翹,等. 航空航天材料[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
Li Chenggong, Fu Hengzhi, Yu Qiao, et al. Aerospace materials[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2002. (in Chinese)
- [2] Koop W, Cross C. Metal matrix composites structural design experience[C]. 26th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, 1990.
- [3] Muschlitz G, Ravindranath R. Evaluation of TiMMC for gas turbine engine rotating components[R]. AIAA-2008-1677, 2008.
- [4] Steffens K, Wilhelm H. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes, what comes after 2000[R]. MTU Aero Engines, Dachauer Str, 665-80995 München, 2001.
- [5] Leyens C, Kocian F, Joachim Hausmann, et al. Materials and design concepts for high performance compressor components[J]. Aerospace Science and Technology, 2003(7): 201-210.
- [6] 《现代应用数学手册》编委会. 运筹学与最优化理论卷[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
Editorial Board of *Modern Application Math Handbook*. Volume of operational research and optimization theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)
- [7] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
Wo Dingzhu. Completedictionary of composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
Yi Xiaosu, Du Shanyi, Zhang Litong. Handbook of composite material [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [9] 《航空发动机设计手册》编委会. 航空发动机设计手册:第 18 册[M]. 北京:航空工业出版社,1999.
Editorial Board of *Aero-engine Design Handbook*. *Aero-engine design handbook*: No. 18[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 博奔创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
Boyi Creative Studio. Parametric finite element analysis of APDL and application examples[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 陆山,陶冶,鲁冯杰. 轮盘结构方案设计及重量预估[C]. 沈阳:中航工业沈阳发动机设计研究所,2010.
Lu Shan, Tao Ye, Lu Fengjie. Disk structural optimum schematic design and weight estimate[C]. Shenyang: AVIC Engine Design Institute, 2010.
- [12] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[S]. 北京:中国航空发动机总公司,1990:1206-1286.
Beijing Institute of Aeronautical Material. Material handbook for aero-engine design[S]. Beijing: General Office of China Aero-engine, 1990:1206-1286. (in Chinese)

作者简介:

刘小利(1986—),女,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机零部件结构设计。

陆山(1955—),男,教授,博导。主要研究方向:航空发动机零部件结构强度、寿命和可靠性。

(编辑:张杰)