

U形截面包容环优化设计方法研究*

RESEARCH ON THE OPTIMAL DESIGN METHOD OF U-SHAPED SECTION CONTAINMENT RING

章晓东**¹ 张亚楠² 刘建新³ 陈利强^{2,4} 宣海军***²

(1. 浙江大学 海洋学院, 舟山 316021)

(2. 浙江大学 能源工程学院, 杭州 310027)

(3. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

(4. 中航工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106)

ZHANG XiaoDong¹ ZHANG YaNan² LIU JianXin³ CHEN LiQiang^{2,4} XUAN HaiJun²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

(2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

(4. AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China)

摘要 U形结构包容环是涡轮起动机通常采用的保护装置。在满足涡轮转子被包容的条件下,对U形截面包容环进行结构优化以获得一个轻便且包容的结构,有利于提高飞机的安全性和推重比。提出了一种U形截面包容环的优化设计方法,该方法采用最优拉丁超立方设计、数值模拟、响应面建模、多岛遗传算法实现包容环截面多参数的优化设计。并通过仿真和试验相结合的方法,分析了不同结构参数对碎片剩余动能和包容环体积的影响权重,研究了U形包容环的不同结构参数对包容结果的影响,并对优化设计后的包容环进行包容性试验验证。结果表明,包容环厚度参数对碎片剩余动能的影响最大,权重比为38%;且影响包容效果主要结构参数是厚度和槽深。仿真与试验结果对比中包容环变形量的误差小于2%,提出的优化设计方法合理可靠。可为U形包容环结构的质量减轻提供先验知识和优化方法。

关键词 空气涡轮起动机 U形截面包容环 结构优化设计 DOE样本库 响应面建模 多岛遗传算法
中图分类号 V214.19

Abstract U-shaped containment ring is usually used as protection device for turbine starters. Under the condition that the turbine rotor is contained, structural optimization of the U-shaped section containment ring was carried out to obtain a light and inclusive structure, which improved aircraft safety and thrust-to-weight ratio. An optimal design method for U-shaped cross section containment ring was proposed. The method adopted the optimal Latin hypercube design, numerical simulation, response surface modeling, and multi-island genetic algorithm to achieve the optimal design of multiple parameters of containment rings cross section. By combining simulation and experiment, the influence weights of different structural parameters on the residual kinetic energy of debris and the volume of containment rings were analyzed. The influence of different structural parameters of U-shaped containment ring on the containment results was studied. Containment test was carried out to verify the optimized containment ring. The results show that the thickness of the containment ring has the greatest influence on the residual kinetic energy of the debris, and the weight ratio is 38%. The main structural parameters affect the inclusion effect are thickness and groove depth. The error of inclusion ring deformation is less than 2% in the comparison between simulation and test results, which indicates that the optimization design method proposed is reasonable and reliable. The research results can provide prior knowledge and optimization methods for the quality reduction of U-shaped containment ring structures.

Key words Air turbine starter; U-shaped section containment ring; Structural optimization design; DOE sample library; Response surface modeling; Multi-island genetic algorithm

Corresponding author: XUAN HaiJun, E-mail: marine@zju.edu.cn, Tel: +86-571-87951223, Fax: +86-571-87951223

Manuscript received 20230101, in revised form 20230210.

*20230101收到初稿, 20230210收到修改稿。

**章晓东, 男, 1996年生, 江西景德镇人, 汉族, 浙江大学海洋学院硕士研究生, 主要研究方向为空气涡轮起动机包容性研究。

***宣海军 (通信作者), 男, 1977年生, 浙江绍兴人, 汉族, 浙江大学能源工程学院教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为航空发动机转子结构安全与完整性。

0 引言

随着航空飞行器的迅速发展,空气涡轮起动机作为飞机发动机启动的重要辅助动力装置变得更加广泛。由于空气涡轮起动机转速极高,若发生涡轮盘爆裂容易造成非包容事故,需要一个安全可靠的包容环起包容作用。在满足包容的前提下,尽可能减轻包容环的质量有利于减轻发动机的质量,提高发动机性能,这也成为优化包容环结构的一个主要研究方向。

涡轮起动机发生非包容事故,可能造成机毁人亡的灾难性事件^[1],因此在试飞前必须进行包容性试验,满足“FAR25.1461”条和“CCAR25.1461”条等适航条款规定。国内外对轮盘碎片包容的研究较少。在国内,李娟娟等^[2-5]进行了圆环/机匣包容试验,结合数值仿真,对机匣包容机理、包容过程的影响因素等进行了探讨和研究;祝昭丹等^[6]通过采用能量法与仿真模拟相结合的方法,对试验器外环的包容强度和厚度尺寸进行研究,计算与试验结果表明该方法可以较好地评估试验器结构强度;李宏钦等^[7]在进行了多次某型空气涡轮起动机轮盘包容性试验,试验中采用预制裂纹法使涡轮盘在定转速下破裂成 3 块,分别撞击不同厚度包容结构和不同的包容环支承结构,结果表明,合适的包容结构及其支承结构有助于提升包容结构的包容能力;蒋聪等^[8]通过试验发现,涡轮盘破碎飞出后,主要特征为包容环内壁的撞击以及沿包容环内壁的周向滑移刮擦运动,包容环通过自身变形和内壁与涡轮的刮擦滑移吸收能量,该研究结果对空气涡轮起动机的包容结构设计具有很好的指导意义;刘志强等^[9]以某空气涡轮起动机为例,讨论了轮盘包容环厚度与选材,证明了以 1.15 倍临界包容厚度值作为安全系数确定工程许用包容环厚度的设计方法,通过比较不同材料包容环的包容能力,发现用高极限强度和高延伸率的材料作为包容环材料能够实现明显减重。国外 HAGG A C 等^[10]对于圆盘撞击包容环的能量安全计算,提供了一种合理可靠的计算方法;STAMPER E 等^[11]找到一种合适的网格方法,采用 Ansys/Ls-Dyna 模拟轮盘破裂为均匀的 4 块碎片后撞击包容结构的损伤状况。国内外目前对于涡轮盘撞击包容环的数值仿真方法、包容机理的认识已经有了巨大进步,但是对于 U 形包容环结构的优化,尚缺乏一套系统的优化方法。

综上所述,本文针对如图 1 所示的空气涡轮起动机涡轮盘外围的 U 形截面包容环,为满足其轮盘破裂后的包容性设计要求,并实现包容环质量最轻的目标,拟构建基于有限元数值仿真的结构优化设计方法,并通过试验验证准确性。

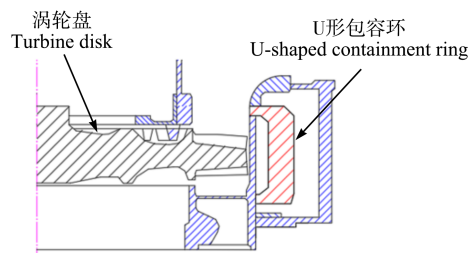


图 1 空气涡轮起动机包容结构

Fig. 1 Containment structure of gas turbine starter

1 计算模型

参考某在役空气涡轮起动机,确定本文研究用的涡轮盘和 U 形截面包容环结构如图 2 所示。为方便研究,将复杂曲面涡轮叶片简化为直叶片。涡轮盘主要结构参数有轮盘厚度 t_1 、叶尖直径 D_1 ,其中 $t_1=20$ mm, $D_1=156$ mm。包容环内径 $d_0=160$ mm,外径为 D_0 ,U 形截面结构参数有厚度 t 、槽深 d 、槽缘宽 w 和槽高 h 。

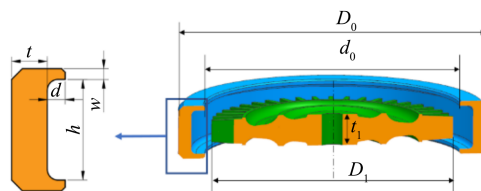
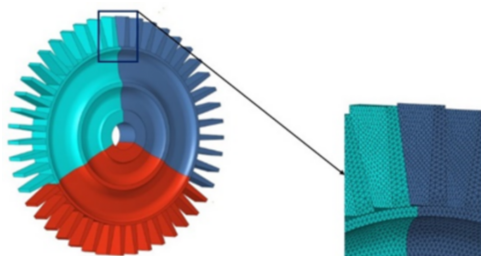


图 2 U 形截面

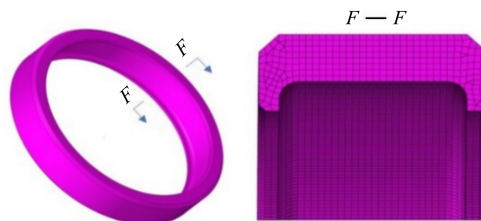
Fig. 2 U-shaped cross section

有限元网格模型如图 3 所示,涡轮盘周向均分为 3 块,采用四面体网格划分,包容环采用六面体网格划分,厚度方向布置 7 层网格,轮盘碎片与包容环的接触方式采用单面腐蚀接触,设置动、静摩擦因数为 0.15,接触刚度因子取 1。为避免虚假穿透,设置接触刚度



(a) 涡轮盘整体网格模型

(a) Integral grid model of turbine disk



(b) 包容环整体网格模型

(b) Containment ring integral grid model

图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element models

罚因子值为 0.9。设置包容环上下面为自由边界条件,涡轮盘破裂转为 78 000 r/min。

涡轮盘所用材料为 TC11,包容环所用材料为 GH625。为开展轮盘碎片与包容环撞击过程的显式动力学数值仿真选用 Johnson-Cook(J-C)材料本构模型和失效模型^{[12][13] 140-146},参数如表 1 所示^[14-15]。

表 1 材料的 J-C 本构模型与失效准则参数

Tab. 1 J-C constitutive relation and fracture criterion constant

材料 Material	A/MPa	B/MPa	n	C	m
TC11	1 098	1 092	0.93	0.014	1.1
GH625	447	1 651	0.7	0.03	1.626
材料 Material	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
TC11	-0.09	0.27	0.48	0.014	3.87
GH625	0.537 7	0.89	-4	0.171	-0.32

J-C 本构模型^[16]的表达式为

$$\sigma_e = [A + B(\epsilon_e^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

式中, σ_e 为流动应力; ϵ_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$,其中 $\dot{\epsilon}_e^p$ 为塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考塑性应变率; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$,其中 T 为材料实际温度, T_0 为室温, T_m 为材料熔点; A 为屈服应力; B 、 n 表征应变硬化效应; C 为应变率常数; m 为温度常数。

J-C 失效模型^{[13]140-146}的表达式为

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

式中, $\sigma^* = P / \sigma_{eff} = R_\sigma$,其中 P 为静水压力, σ_{eff} 为 von-Mises 等效应力, R_σ 为应力三轴度; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为失效常数。

失效准则基于连续损伤力学的 J-C 累积损伤准则,定义损伤参数 D 为

$$D = \int \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right) d\epsilon_e^p \quad (3)$$

当 $D=1$ 时,材料失效。

2 U 形截面包容环的优化设计方法

为在满足涡轮盘 1/3 破裂包容的前提下,获得质量最轻的包容环设计结果,设计如图 4 所示的结构优化设计方法。首先采用势能法^[17]估算出包容环厚度,生成初始包容环,在此基础上确立包容环结构样本库,通过数值仿真计算在实验设计(Design of Experiment, DOE)样本数值仿真结果库基础上构建响应面模型,进行结构参数对包容性的影响分析,选取较为重要的结构参数采用遗传算法优化出最佳的结构。

2.1 初始包容环的生成

在构建 DOE^[18]样本库之前,需要一个初始的包容环结构,采用势能法可以简单估计出一个初始结构。

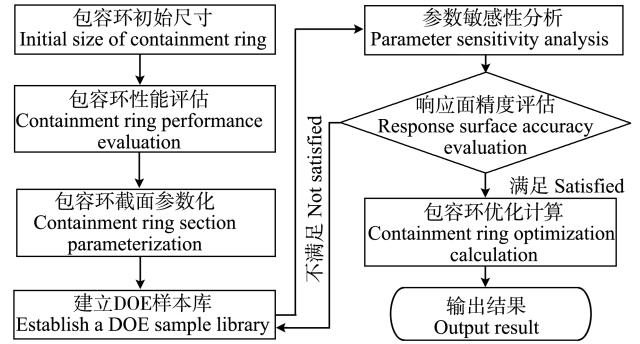


图 4 优化流程

Fig. 4 Optimization process

初设 $d=7.5$ mm, $w=3$ mm, $h=28$ mm, 根据势能法公式估算出包容环厚度,势能法公式总结如下:

$$\begin{cases} E_k = \frac{1}{2} J \omega_0^2 \\ E_p = \frac{(\sigma_{0.2} + \sigma_b)}{2} \delta V \\ \eta = \frac{E_p}{E_k} \end{cases} \quad (4)$$

式中, η 为包容系数; $\sigma_{0.2}$ 为屈服极限强度; σ_b 为拉伸极限强度; δ 为延伸率; V 为包容环有效体积(涡轮盘撞击环的有效区域); J 为涡轮盘转动惯量; ω_0 为涡轮盘自由运转转速; E_k 为涡轮盘动能; E_p 为包容环有效体积的势能。为了满足包容环有效体积势能不小于涡轮盘动能,此处设置 $\eta=1$,根据式(4)得出 V 的值计算出 $t=9$ mm。此时包容环外径 $D_0=193$ mm,对该初始包容环进行数值仿真的结果如图 5,涡轮盘碎片包容在包容环内,包容环呈三角状但未被拉断,变形后的外切圆直径 $D_{00}=220$ mm,外径胀大率仅为 14%,仍有较大包容余量。

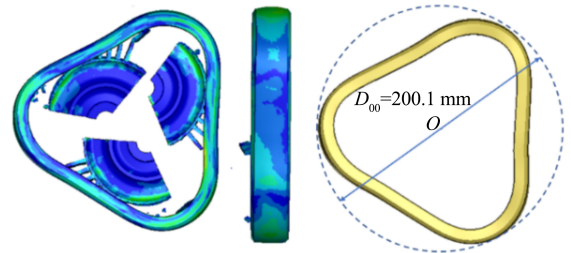


图 5 初始包容环仿真结果

Fig. 5 Initial containment ring simulation results

2.2 结构参数对包容性的影响分析

在初始包容环的基础上,采用最优拉丁超立方设计方法(Optimal Latin Hypercube Design, OLHD)和响应面建模^{[19] 1460-1465}的方法分析结构参数对包容性的影响。其中 DOE 可以使得 U 形截面结构参数的取值范围具有非常好的空间填充性和均衡性,使得结构参数之间的相互联系对包容性的影响得到充分的反映,为响应面分析提供样本基础,响应面可以很好地拟合结构参数和 E_k 之间复杂的响应关系,且具有良好的鲁棒性(包容环是否具有包容性通过 E_k 进行量化)。

表 2 结构参数变化范围

Tab. 2 Range of structural parameters

结构参数 Structural parameter	初始值 Initial value	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
厚度 Thickness t/mm	9	7.5	9
槽深 Groove depth d/mm	7.5	5	10
槽缘宽 Groove edge width w/mm	3	1.5	4.5
槽高 Groove height h/mm	28	20	30

根据初始包容环的数值仿真结果,样本结构设置 DOE 样本生成中不同结构参数范围如表 2 所列,包容环厚度下限相对于初始值减少 1/6,槽深的上下限相对于

初始值分布增加和减少 1/3。槽缘宽的上下限相对初始值分别增加和减少 1/2,槽高的距离不小于涡轮盘的最大厚度 20 mm,不大于涡轮盘最大厚度的 1.5 倍。

响应面模型可以用响应面函数 $f(x)$ 表示,函数 $f(x)$ 可以为 1 阶、2 阶、3 阶和 4 阶多项式,为了获得更准确的模型,此处采用 4 阶多项式函数建模,构造该模型所需要的样本数目可根据式(5)选择。

$$M_{\min} = \frac{(N + 1)(N + 2)}{2} + 2N \tag{5}$$

式中, $M_{\min}$ 为最少样本点个数; N 为输入变量的个数。 $N=4$ 时, $M_{\min}=23$ 。 此处取样本数 $M=30$ 生成样本库, 并进行数值仿真计算,得到结果样本库如表 3 所示。

表 3 数值仿真结果样本库

Tab. 3 Sample library of numerical simulation results

样本序号 Sample number	厚度 Thickness t/mm	槽深 Groove depth d/mm	槽缘宽 Groove edge width w/mm	槽高 Groove height h/mm	包容环有效体积 Effective volume of containment V/mm^3	涡轮盘动能 Turbine disc kinetic energy E_k/kJ	是否包容 Whether containment or not
1	7.70	5.70	2.20	21.0	118 841	1.06	否 No
2	8.54	8.80	2.25	21.2	145 647	0.88	否 No
3	7.55	7.40	2.10	21.4	123 252	1.26	否 No
4	8.30	6.60	3.28	21.6	152 738	0.68	是 Yes
5	8.76	5.60	4.20	21.8	170 501	0.71	是 Yes
6	7.84	6.20	3.00	22.0	140 402	0.79	是 Yes
7	7.20	9.76	2.44	22.2	147 224	0.98	否 No
8	7.40	8.66	2.15	22.4	132 252	1.36	否 No
9	8.40	7.90	2.90	22.6	159 108	0.63	是 Yes
10	8.14	6.54	3.80	22.8	163 169	0.49	是 Yes
11	7.26	5.90	2.50	23.0	126 079	1.14	否 No
12	7.80	7.55	3.47	23.2	158 932	0.50	是 Yes
13	8.43	7.46	2.34	23.4	150 953	0.57	是 Yes
14	8.00	6.80	3.20	23.6	156 219	0.67	是 Yes
15	7.60	8.10	4.26	23.8	174 451	0.44	是 Yes
16	7.73	9.00	2.30	24.0	146 683	0.95	是 Yes
17	8.30	9.48	4.10	24.2	195 573	0.51	是 Yes
18	8.80	8.56	3.70	24.4	193 173	0.64	是 Yes
19	8.25	7.20	3.10	24.6	165 969	0.49	是 Yes
20	8.47	8.47	4.30	24.8	199 537	0.66	是 Yes
21	7.44	7.10	3.40	25.0	156 657	0.63	是 Yes
22	7.00	8.75	2.59	25.2	143 567	1.80	否 No
23	7.15	5.80	3.23	25.4	143 801	0.67	是 Yes
24	7.15	6.45	3.37	25.4	158 213	0.49	是 Yes
25	7.10	7.83	2.79	25.8	147 257	0.89	否 No
26	8.18	7.00	3.90	26.0	183 152	0.64	是 Yes
27	7.37	10.10	4.16	26.2	191 033	0.40	是 Yes
28	8.10	8.38	3.62	26.4	186 565	0.51	是 Yes
29	7.33	8.20	4.45	26.6	185 035	0.43	是 Yes
30	7.22	7.74	2.88	26.8	154 719	0.52	是 Yes

响应面函数表达式见式(6),将 E_k 作为模型的结果输出 $f(x)$,U形环结构参数作为模型的输入变量 x_n 。

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \sum_{i=1}^N \beta_{i+N} x_i^2 + \sum_{i=1}^N \beta_{i+2N} x_i^3 + \sum_{i=1}^N \beta_{i+3N} x_i^4 + \sum_{ij(i < j)} x_i x_j \quad (6)$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{4N}, \beta_{ij}$ 为待估参数。经过计算,响应面模型表达式为

$$E_k = 1009.64 - 2012t + 54.39d + 34.9 + 473.46h + 383.69t^2 - 10.97d^2 - 21.82w^2 - 29.76h^2 - 32.38t^3 + 1.0d^3 + 4.65w^3 - 0.83h^3 + 1.02t^4 - 0.034d^4 - 0.36w^4 + 0.009h^4 - 0.23td + 0.49wt - 0.2ht + 0.13 - 0.013dh + 0.19wh \quad (7)$$

式中, t 为厚度; d 为槽深; w 为槽缘宽; h 为槽高。

响应面模型存在一定误差,需要进行误差分析来确保该模型的准确性。响应面模型的拟合精度评估公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中, $\tilde{y}_i$ 为第 i 个点的近似模型预测值; y_i 为第 i 个点的验证值^[20]。 R^2 的值越大,拟合度越高,当 $R^2 \geq 0.9$ 时表示模型建立成功,此处 $R^2 = 0.91$,故响应面模型建模成功。

根据响应面模型进行计算分析,得到各个结构参数对碎片剩余动能和包容环体积的影响权重,如图6所示,包容环厚度和槽深对碎片剩余动能和体积的影响最大,经过建模后得到的槽深和厚度与能量的等高线关系如图7所示,图中 A_1 区为包容区, A_2 区为非包容区。对响应面模型进行计算分析,根据各个结构参数对碎片动能影响的权重图6可知,厚度是影响碎片剩余动能最大的因素,占比权重将近38%,依次递减是槽深、槽缘宽、槽高。故在包容环设计时,可将包容环的厚度作为首先需要考虑的因素。从结构变量和涡轮盘碎片剩余动能的等高线图7可知,当 $d \leq 5.4$ mm,

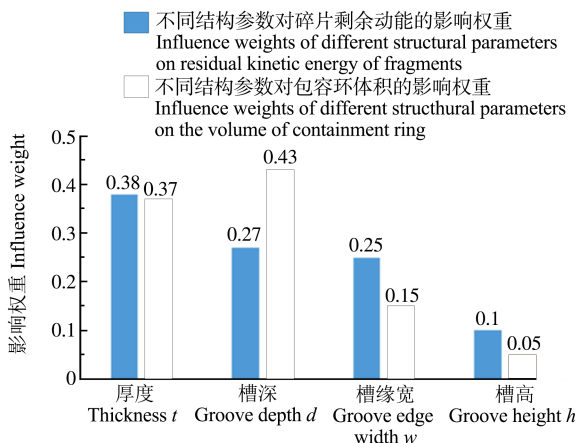


图6 不同结构参数的影响权重

Fig. 6 Influence weight of different structural parameters

$t \leq 7.6$ mm时,超出包容下的最大能量,当 $t < 7.2$ mm时,即使槽深 d 达到10 mm,能量仍然较高,超出包容下的最大能量,这同时也进一步验证了厚度对包容性的影响要大于槽深。

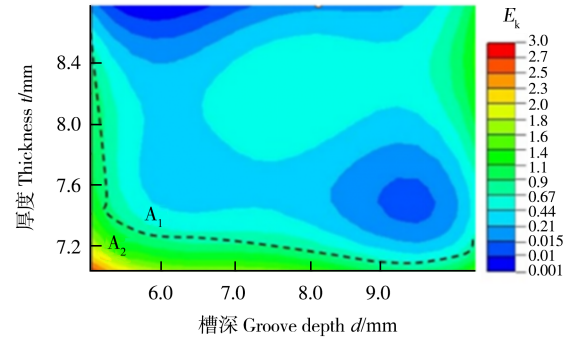


图7 剩余动能的等高线图

Fig. 7 Nephogram of residual kinetic energy

2.3 包容环U形截面的结构优化

由以上分析结果可知,槽深 t 和厚度 d 是影响包容环体积和涡轮盘剩余动能的主要因素,故选用此两个结构参数采用多岛遗传算法进行优化,设置槽缘宽3 mm,槽高28 mm,优化目标为 $\minimize(V)$,限制条件为 $0.1 \text{ kJ} \leq E_k \leq 0.9 \text{ kJ}$ 。优化过程如图8所示,可知厚度 t 和槽深 d 在140代以后趋于稳定,优化前后参数对比如表4。在达到相同包容性能的前提下,优化后的包容环质量减轻了19.4%。

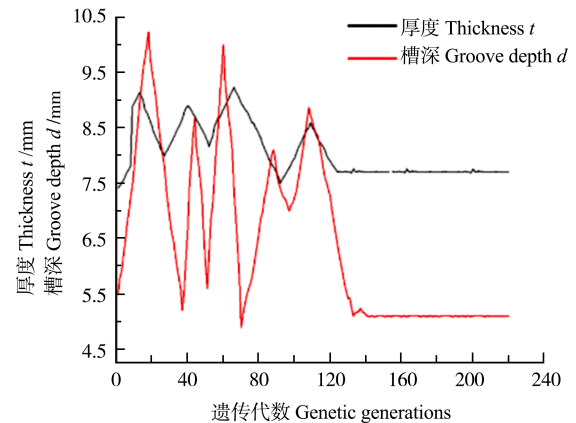


图8 厚度、槽深迭代优化过程

Fig. 8 Iterative optimization process of thickness and groove depth

表4 优化前后对比

Tab. 4 Comparison before and after optimization

	厚度 Thickness t/mm	槽深 Groove depth d/mm	槽缘宽 Groove edge width w/mm	槽高 Groove height h/mm	质量 Mass M_1/g
优化前 Before optimization	9	7.5			1 758
优化后 After optimization	7.7	5.1	3	28	1 417

3 数值仿真与试验验证

为验证优化后包容环的包容能力,并研究厚度和槽深对包容能力的影响,根据以上优化计算结果,设计如表 5 所列 3 种结构参数的包容环在立式高速旋转试验台上开展试验验证。Ⅱ型是优化后包容环,用于验证优化结果是否包容,Ⅰ、Ⅱ型包容环用于探究不同厚度包容环对涡轮盘的包容效果,寻找相同槽深情况下包容环的临界包容厚度范围,Ⅰ、Ⅲ型包容环用于探究出不同槽深包容环对涡轮盘的包容效果,Ⅱ和Ⅲ型包容环由于槽深和厚度均不同,故不做比较。由于包容环在受到撞击中会被拉伸,需设置一个间隙允许包容环变形,防止对周围结构干扰,此处设置允许变形发生的环周围的间隙直径是包容环原始外径的 140%^{[19]1460-1465}。故设置包容条件为包容环不被拉断且实际外径变化率不超过 40%。

表 5 包容环结构参数

Tab. 5 Containment ring structure parameters

序号 Serial number	厚度 Thickness t/mm	槽深 Groove depth d/mm	槽缘宽 Groove edge width w/mm	槽高 Groove height h/mm
Ⅰ	7.5	5.1		
Ⅱ	7.7	5.1	3	28
Ⅲ	7.5	7.5		

包容环是涡轮起动机涡轮盘破裂后的最主要的保护零件,因此在数值模拟和试验验证中忽略其他零部件的影响,只建立了涡轮盘和包容环模型。包容环在数值模拟中处于自由状态,在试验中 U 形环和转阶段之间采用胶水粘牢的方式将包容环固定,最大程度实现包容环处于自然边界状态。包容环的安装位置参考 SAE Aerospace-ARP-85F^[21],试验件安装如图 9 所示,涡轮盘由主轴带动到破裂转速,此时涡轮盘的周向应力达到涡轮盘材料的极限强度从而发生破裂,涡

轮盘碎片撞击包容环,促使包容环发生变形。涡轮盘破裂方式为三等份破裂,此时涡轮盘碎片产生的平动动能最大,对包容环的损伤最大。

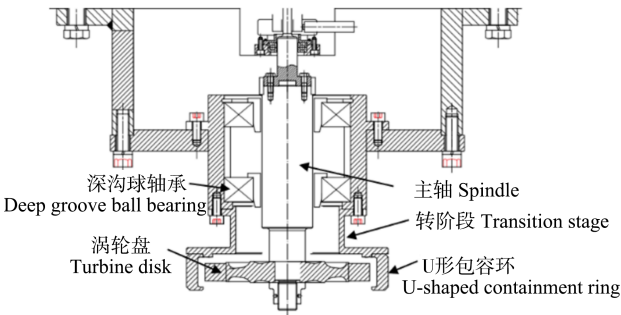


图 9 试验件安装

Fig. 9 Installation of test parts

4 结果分析

三种结构包容环进行数值仿真和试验的结果如表 6 和图 10 所示。当槽深为 5.1 mm 时,厚度为 7.5 mm 的包容环被拉断,厚度为 7.7 mm 的包容环被撞击呈三角状,涡轮盘碎片包容在包容环内。数值仿真和试验结果中测得Ⅱ型包容环变形后的外切圆直径分别为 221 mm 与 225 mm,两者误差小于 2%,实际外径变化率 $\mu = \frac{D_{01} - D_0}{D_0} = 21\%$,小于包容条件设置的 40%,故起到了包容作用。当包容环厚度为 7.5 mm,槽深增加至 7.5 mm 时,包容环被撞击呈三角状,涡轮盘碎片包容在包容环内,数值仿真和试验结果中的测得的包容环变形后的外切圆直径分别 225 mm 与 228 mm,两者误差小于 2%,实际外径变化率为 20%,故起到包容作用。综上所述,数值仿真与试验结果在包容能力以及包容环变形后的形状与尺寸等方面比较吻合。Ⅰ、Ⅱ型包容环试验结果可知,槽深为 5.1 mm 时包容环临界厚度在 7.5~7.7 mm;Ⅰ、Ⅲ型包容环试验结果可知,扩大槽深有利于提高包容能力。

表 6 数值和试验结果总结

Tab. 6 Summary of numerical and test results

序号 Serial number	初始外径 Initial outside diameter D_0 /mm	数值结果外径 Numerical result outside diameter D_{00} /mm	试验后外径 Outside diameter after test D_{01} /mm	实际外径变化率 Actual outside diameter rate of change $\mu/\%$	是否包容 Whether containment or not
Ⅰ	185.2	—	—	—	否 No
Ⅱ	185.6	221	225	21	是 Yes
Ⅲ	190.0	225	228	20	是 Yes

5 结论

采用基于瞬态撞击动力学仿真的优化设计方法开展 U 形截面包容环包容能力的数值仿真和结构优化

设计,并在立式高速旋转试验台上开展验证试验。对比分析仿真与试验结果,得出以下结论:

1) 采用参数化建模、包容性数值仿真、构建 DOE 样本库、参数权重分析和遗传算法优化等过程,获得

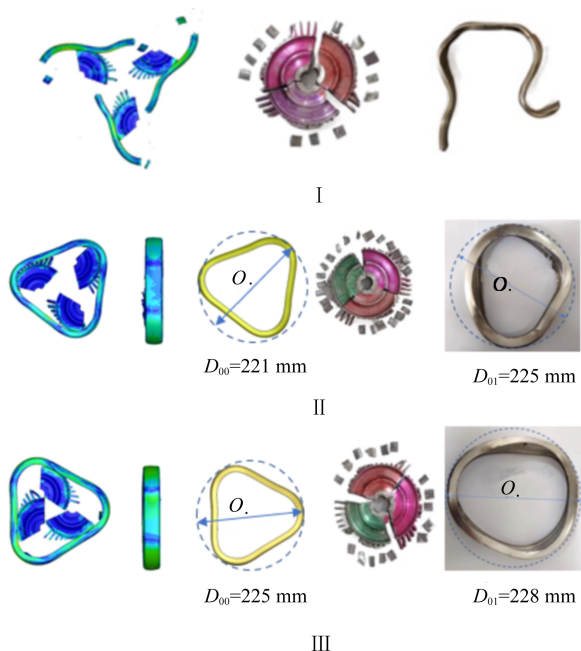


图 10 仿真与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation and test results

了一种U形截面包容环结构优化设计的方法。试验验证结果表明,该方法合理可行,包容环变形量的试验与仿真误差小于2%。

2)通过响应面模型分析包容环截面参数对碎片剩余动能和包容环体积的影响权重,发现包容环厚度和槽深对碎片剩余动能和体积的影响最大,尤其是厚度参数为影响碎片剩余动能最大的因素,占比权重将近38%,依次递减是槽深、槽缘宽和槽高。

3)根据包容环优化计算结果,设计出3种不同截面参数的包容环开展包容能力的试验验证。结果表明,采用本文提供的数值仿真优化方法能准确获得包容环的临界包容厚度,临界包容时GH625材料包容环的外径变形量达到21%,并且扩大槽深有利于提高包容效果。

参考文献(References)

- [1] MOUSA N A, WHALE M D, GROSZMANN D E, et al. The potential for fuel tank fire and hydrodynamic ram from uncontained aircraft engine debris[R]. Washington D. C. : US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 1997: 13-14.
- [2] 李娟娟,宣海军,廖连芳. 轮盘碎片撞击圆筒体的试验研究[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集, 2009: 8.
LI JuanJuan, XUAN HaiJun, LIAO LianFang. Experimental study on the impact of wheel fragment on cylinder body[C]//Proceedings of the Ninth National Conference on Shock Dynamics, 2009: 8 (In Chinese).
- [3] 宣海军,陆 晓,洪伟荣,等. 航空发动机机匣包容性研究综述

[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1860-1870.

XUAN HaiJun, LU Xiao, HONG WeiRong, et al. Review of aero-engine case containment research[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1860-1870(In Chinese).

- [4] 何 庆,宣海军,刘璐璐. 航空发动机风扇叶片撞击机匣的响应机理研究[C]//第十届全国冲击动力学讨论会论文集, 2011: 1-8.

HE Qing, XUAN HaiJun, LIU LuLu. Study on response mechanism of aero-engine fan blade impinging on casing [C] // Proceedings of the Tenth National Conference on Shock Dynamics, 2011: 1-8 (In Chinese).

- [5] 何 庆,宣海军,刘璐璐,等. 叶片相互作用对机匣叶片包容过程的影响[C]//第20届全国结构工程学术会议论文集:第II册, 2011: 533-538.

HE Qing, XUAN HaiJun, LIU LuLu, et al. Multi-blade effects on the containment of aero-engine fan case during blade-out event [C]// Proceedings of the 20th National Conference on Structural Engineering: Volume II, 2011: 533-538(In Chinese).

- [6] 祝昭丹,陈国栋,刘 闯,等. 高速转子试验器包容环厚度计算[C]//第三届中国国际透平机械学术会议论文集, 2018: 1-7.

ZHU ZhaoDan, CHEN GuoDong, LIU Chuang, et al. Calculation of containment ring thickness for high speed rotor tester [C] // Proceedings of the Third China International Conference on Turbine Machinery, 2018: 1-7(In Chinese).

- [7] 李宏钦,杨宗阳,蒋 聪,等. 航空发动机空气涡轮起动机包容结构研究[J]. 航空发动机, 2019, 45(3): 51-57.

LI HongQin, YANG ZongYang, JIANG Cong, et al. Study on containment structure of aeroengine air turbine starter [J]. Aeroengine, 2019, 45(3): 51-57(In Chinese).

- [8] 蒋 聪,熊 欣,刘 冕,等. 空气涡轮起动机超高速涡轮包容结构性能分析与研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(8): 37-42.

JIANG Cong, XIONG Xin, LIU Mian, et al. Performance analysis and research on the containment structure of ultra-high speed turbine in air turbine starter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(8): 37-42(In Chinese).

- [9] 刘志强,鞠晓蓉,宣海军,等. 高能转子轮盘包容机理和包容环结构优化[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 70-76.

LIU ZhiQiang, JU XiaoRong, XUAN HaiJun, et al. Containment mechanism and structural optimization research for disk containment of high-energy rotor [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 70-76(In Chinese).

- [10] HAGG A C, SANKEY G O. The containment of disk burst fragments by cylindrical shells [J]. Journal of Engineering for Power Volume 96(2), 1974: 114-123.

- [11] STAMPER E, HALE S. The use of Ls-Dyna models to predict containment of disk burst fragments [C]//10th International Ls-Dyna User Conference, 2008: 25-34.

- [12] TENG X, WIERZBICKI T. Evaluation of six fracture models in high velocity perforation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(12): 1653-1678.

- [13] CHEN M, NIU Q L, AN Q L. Johnson-Cook constitutive equation for titanium alloy TC11[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 589/590: 140-146.
- [14] 范晓敬. U 型截面包容环包容性数值仿真与结构优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 30-35.
FAN XiaoJing. Research on containment numerical simulation and structure optimization of U-shaped containment ring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 30-35 (In Chinese).
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperatures [J]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*; April 19-21, 1983. Hague, Netherlands, 1983: 541-557.
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [17] GIARD J R. Air turbine starter turbine wheel containment[J]. *SAE Transactions*, 1984(93): 459-463.
- [18] 陈洪武, 田 铖, 彭聪聪. 基于 Box-Behnken 法的曲柄结构优化设计[J]. *机械强度*, 2017, 39(5): 1220-1223.
CHEN HongWu, TIAN Cheng, PENG CongCong. Optimal design of crank based on Box-Behnken method [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2017, 39(5): 1220-1223 (In Chinese).
- [19] 孙 权, 鹿业波, 陈建钧. 基于响应面法剪切修正 GTN 模型损伤参数的确定[J]. *机械强度*, 2019, 41(6): 1460-1465.
SUN Quan, LU YeBo, CHEN JianJun. Determination of damage parameters of shear modified GTN model by response surface method [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2019, 41(6): 1460-1465 (In Chinese).
- [20] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 153-156.
LAI YuYang. Isight parameter optimization theory and examples detailed explanation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 153-156 (In Chinese).
- [21] SAE Aerospace-ARP-85F. Air conditioning systems for subsonic airplanes[J]. Warrendale: Society of Automotive Engineers (SAE) Aerospace, 2012: 27.