

叶轮倒角尺度对大流量离心压缩机气动和疲劳寿命的影响分析

朱亚迪¹, 陈洪粉², 冀春俊¹, 鲁业明¹

(1. 大连理工大学 能源与动力工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 东方电气集团 东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为了分析不同倒角尺度对压缩机气动性能及疲劳寿命的影响, 首先在控制离心叶轮主要结构参数不变的前提下, 通过调整叶片根部及顶部倒角尺度得到一系列设计模型, 其次通过数值模拟方法对不同设计模型的离心压缩机整级进行全三维稳态模拟并在设计转速下对离心叶轮进行强度计算, 最后联合估算方法及材料曲线计算叶轮部件疲劳寿命。结果表明: 与倒角半径相比, 倒角角度对气动性能的影响更加显著, 在大流量点倒角角度造成等熵效率减小幅度达5%左右, 总压比减小幅度达0.07左右; 与倒角角度相比, 倒角半径更有利于减小应力值; 选取经验参数对不同倒角尺度的离心叶轮进行估算得到的疲劳寿命值与实验值偏差最大为3%, 最小仅为0.09%。

关键词: 离心叶轮; 倒角; 气动性能; 强度; 疲劳寿命

中图分类号: TH452 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.007

[引用本文格式] 朱亚迪, 陈洪粉, 冀春俊, 等. 叶轮倒角尺度对大流量离心压缩机气动和疲劳寿命的影响分析[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 59-67. ZHU Ya-di, CHEN Hong-fen, JI Chun-jun, et al. Analysis for the influence of impeller fillet size on aerodynamic and fatigue life of high-flow centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 59-67.

Analysis for the Influence of Impeller Fillet Size on Aerodynamic and Fatigue Life of High-flow Centrifugal Compressor

ZHU Ya-di¹, CHEN Hong-fen², JI Chun-jun¹, LU Ye-ming¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024;
2. Dongfang Turbine Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Deyang, China, Post Code: 618000)

Abstract: For the purpose of analyzing the influence of different fillet sizes on the aerodynamic performance and fatigue life of the compressor, firstly, a series of design models were obtained by adjusting the fillet size of the root and top of the blade under the premise that the main structural parameters of the centrifugal impeller remained unchanged; secondly, the full three-dimensional steady-state simulation of the whole stage of the centrifugal compressor of different design models was carried out by numerical simulation method, and the strength of the centrifugal impeller was calculated at the design speed; and finally the fatigue life of the impeller components was calculated by the estimation method and the material S-N curve. The results show that compared with the fillet radius, the influence of the fillet angle on the aerodynamic performance is more significant, the isentropic efficiency is reduced by about 5% and the total pressure ratio is reduced by about 0.07 caused by fillet angle at the large flow point; compared with the fillet angle, the fillet radius is more conducive to reducing the stress value; and the fatigue life value estimated by empirical parameters for the centrifugal impeller with different fillet sizes deviates from the experimental value by 3% at the maximum and 0.09% at the minimum.

Key words: centrifugal impeller, fillet, aerodynamic performance, strength, fatigue life

收稿日期: 2023-07-25; 修订日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(52005073); 中央高校基本科研业务费(DUT22RC(3)041)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52005073); Central Government-affiliated Colleges and Universities Basic Scientific Research Business Expenditure Supported Project (DUT22RC(3)041)

作者简介: 朱亚迪(1998-), 男, 大连理工大学硕士研究生.

通讯作者: 鲁业明(1991-), 男, 大连理工大学副教授.

引言

叶轮机械广泛应用于冶金、石油化工、制冷等工业领域,在国民经济中占有重要地位。为保证结构安全性,离心叶轮在叶片与轮毂、轮盖相贯处均要进行倒角处理,倒角的存在影响了压缩机内部流道,从而引起压缩机性能的变化。大流量(流量系数一般大于0.14)离心压缩机具有流动复杂、固有频率低以及转速高等特点,性能容易受到结构参数的影响。因此,明确倒角对大流量离心压缩机气动性能、结构强度的影响规律对保证叶轮机械高性能、高可靠性具有重要意义。

Oh^[1]以Krain后掠叶轮为研究对象,开展了叶轮倒角尺寸对其气动性能影响的研究,结果表明倒角特征的存在导致在全工况范围内压缩机的压比、效率均有所降低;毛明明等人^[2]以轴流压气机转子部件为研究对象,开展了叶顶间隙、叶根倒角特征对气动参数影响的研究,结果发现以上几何特征的存在降低了压气机的气动性能和质量流量;高丽敏等人^[3]以跨音速轴流压气机为研究对象,开展了倒角半径和倒角角度对压气机气动性能影响的研究,结果表明和倒角角度相比,倒角半径对叶轮机械的气动性能影响更加显著,在制造加工时可适当放宽约束要求;王大磊等人^[4]以轴流涡轮转子部件为研究对象,分析了涡轮转子根部倒角对涡轮叶栅流场二次流的影响,指出叶根倒角的存在使得端壁损失增加从而导致转子效率下降;李文娇等人^[5]以跨声速离心叶轮为研究对象,开展了等倒角半径以及变倒角半径对压气机内、外特性影响的研究,结果发现主叶片半弦长后叶根区域的倒角半径值是影响压气机气动性能的关键;康顺等人^[6]以高、低压比的离心叶轮为研究对象,开展了数值模拟与实验数据的对比研究工作,结果表明倒角特征的存在减小了流道的通流面积,在全工况范围内使得叶轮效率、压比均有所下降;Meyer等人^[7]以压气机平面叶栅为研究对象,通过实验研究倒角特征对叶栅气动性能的影响,结果表明倒角半径与压气机能量损失呈正相关关系;黄志浩等人^[8]以微小型离心压气机为研究对象,开展了叶根倒角对压气机流场和气动性能影响的研究,结果表明叶根倒角角度对叶根区域的流场影响很大,倒角角度变大有利于提高根部区域的流通能力,减小二次流损失,提高压气机效率;张旭阳等人^[9]以Langston叶型为研究对象,开展了变径倒

角结构对二次流影响的研究,结果表明均匀变化的变径倒角有利于减弱叶片前缘马蹄涡强度、抑制二次涡系的发展;崔伟伟等人^[10]以NASA的Rotor67转子为研究对象,开展了叶根倒角对压气机角区分离和工作裕度影响机制的研究,结果表明叶根倒角的存在抑制了叶片吸力面侧气流的分离、使得该区域效率得以提升,但也使得转子提前失速,工作裕度明显降低;王文涛等人^[11]以某CDA叶型的压气机平面叶栅为研究对象,结合实验和数值模拟方法开展了不同倒角布局对压气机角区流动和损失影响的研究,结果表明倒角特征的存在使得叶栅角区流动和损失变化显著。

以上研究结果均表明倒角特征的存在影响了旋转机械的气动性能,选取合适的倒角布局一定程度上可以抑制气流分离、减小损失。在研究过程中国内外研究者着重分析了倒角特征对气动性能的影响,对决定倒角特征的两个参数进行单因素分析研究较少。从离心压缩机气动性能优化设计方面考虑,进行单因素分析有利于在压气机优化设计中合理选择优化变量,另外进一步明确倒角特征对结构强度的影响对结构设计也具有重要意义。本文以某工业闭式大流量离心压缩机基元级为研究对象,通过数值模拟方法研究倒角特征对气动性能及结构强度的影响规律,并同步开展寿命分析。

1 研究思路及计算设置

1.1 几何模型及研究方案

离心压缩机整级包含离心叶轮(叶片数为16片)、无叶扩压器、弯道和回流器(叶片数为15片)。无倒角时设计工况下绝热效率为0.88,总压比为1.783,流量系数为0.15。整级模型如图1所示,离心压缩机主要结构参数见表1。

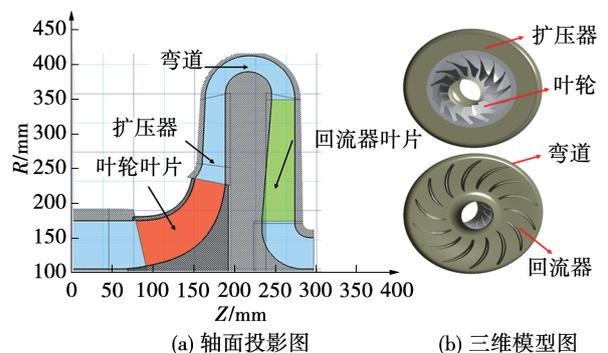


图1 整级结构

Fig.1 Full stage structures

表 1 主要设计参数取值
Tab. 1 Main design parameters

几何参数	数值
叶轮侧进口轮盖直径 D_{s1} /mm	350
叶轮侧进口轮毂直径 D_{h1} /mm	200
叶轮侧出口宽度 b /mm	50
叶轮侧出口直径 D_{outlet} /mm	500
回流器侧出口轮盖直径 D_{s2} /mm	300
回流器侧出口轮毂直径 D_{h2} /mm	200

如图 2 所示,倒角特征由两个参数决定:倒角半径和倒角角度(倒圆外切线与轮毂壁面的夹角),倒角圆弧与壁面仅满足一个相切约束,从保证结构端面完整性考虑一定程度上可避免在加工过程中造成端壁过切。

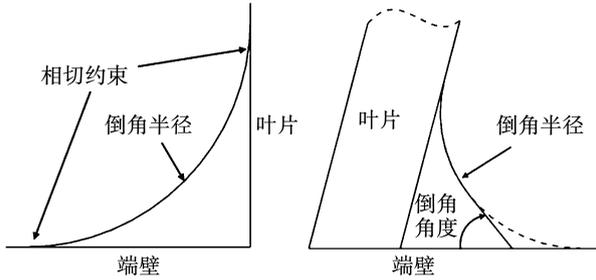


图 2 倒角方案
Fig. 2 Chamfering scheme

根据决定倒角尺度的两个结构参数进行以下方案的设计,其中倒角角度由 30° 均匀增至 90° , 间隔 15° 倒角半径由 4 mm 每隔 1 mm 增至 7 mm。根据设计方案确定研究框架如图 3 所示。

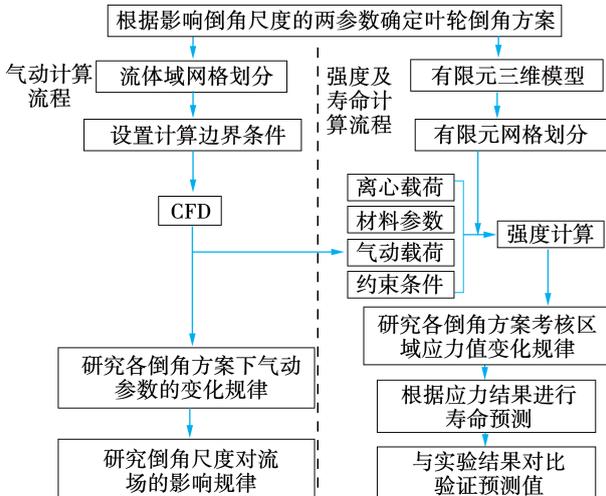


图 3 压缩机气动及疲劳寿命计算流程
Fig. 3 Calculation process for aerodynamic and fatigue life of compressor

1.2 计算设置及流体域网格划分

数值模拟应用 NUMECA 软件进行计算,计算边界条件设定为入口轴向进气,总温为 303 K 及总压为 101 kPa,出口采用流量边界条件。动静交界面设定为混合平面,壁面为绝热无滑移,叶轮转速为 11 600 r/min。选择 Spalart-Allmaras 湍流模型进行全三维定常流动计算,其在叶轮机领域被广泛采用,具有很好的模拟精度^[12-13],收敛标准为残差 $< 10^{-6}$ (或效率/压比曲线出现周期性波动),且进出口质量流量相对误差 $< 10^{-3}$ 。采用 AutoGrid5 模块对整级流道进行结构化网格划分,当网格数目达 140 万时,效率与压比随网格数目增加不再发生明显变化,最终根据图 4(a) 选取单通道网格总数 180 万进行后续计算,固体壁面的 y^+ 值分布如图 4(b) 所示,可以看出其值全部位于 $0 \sim 6$ 范围内 (Spalart-Allmaras 模型要求 $1 < y^+ < 10$), 满足所选湍流模型要求。

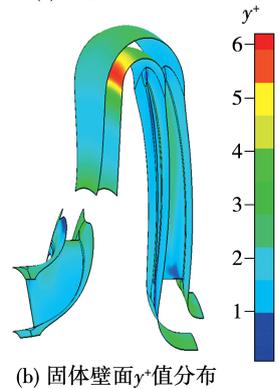
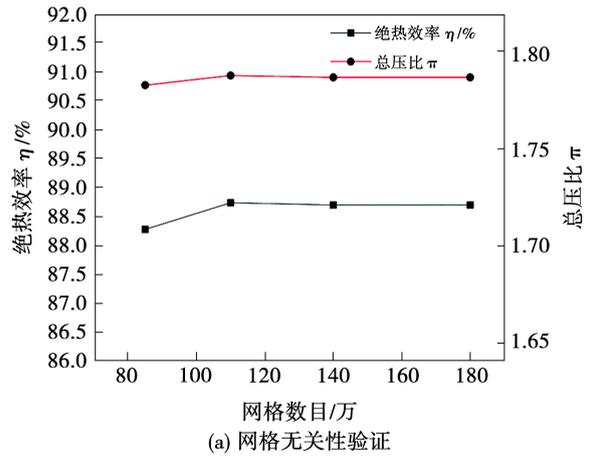


图 4 计算验证
Fig. 4 Calculation validations

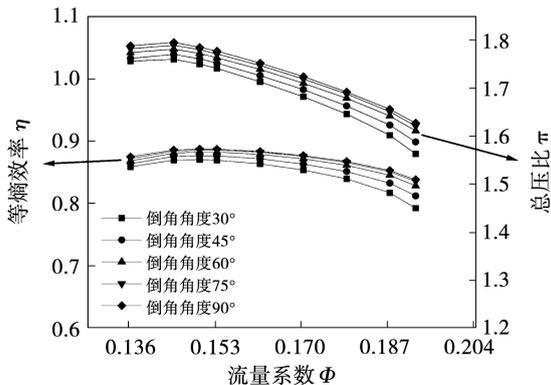
2 气动结果分析

离心压缩机的效率、压比是判断其气动性能的关键指标,根据影响倒角尺度的参数,分别在等倒角

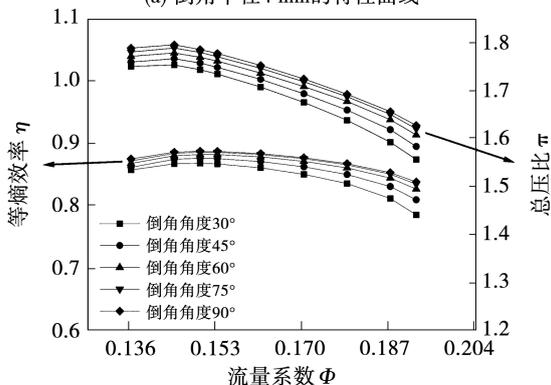
半径和等倒角角度下对其变化规律进行研究,计算涵盖从小流量点(流量系数为 0.136)至大流量点(流量系数为 0.193)的范围。

2.1 等倒角半径下气动结果变化规律

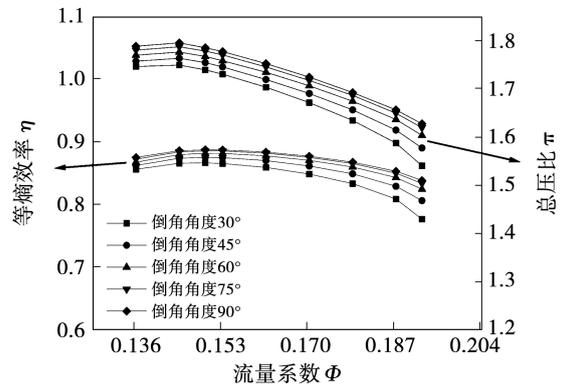
图 5 是等倒角半径、不同倒角角度下等熵效率及总压比 - 质量流量特性曲线(倒角角度 90° 相当于无倒角,各倒角半径在倒角角度为 90° 时均表示相同设计方案)。从图 5 可以看出,在同一倒角半径下,随着倒角角度的增加离心压缩机的等熵效率、总压比随之提高,呈现出正相关关系。图 6 给出了同一倒角半径下压缩机最大倒角角度 75° 与最小倒角角度 30° 时的等熵效率,压比之差随流量系数的变化趋势,由图 6 可知等熵效率减小幅度、总压比减小幅度随着流量系数的增加而增大;各倒角半径下在小流量点等熵效率减小幅度在 1.5% 左右,而在大流量点等熵效率减小幅度可达 5% 左右,在小流量点总压比减小幅度在 0.03 左右,而在大流量点总压比减小幅度可达 0.07 左右;在每一工况点,两者的变化趋势均随着倒角半径的减小而减小,通过计算结果说明倒角特征对离心压缩机气动性能的影响不能忽视。



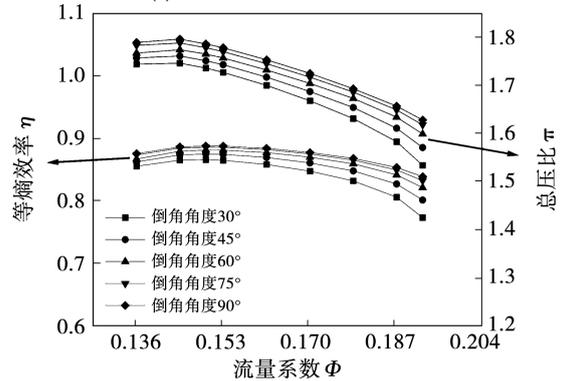
(a) 倒角半径 4 mm 的特性曲线



(b) 倒角半径 5 mm 的特性曲线



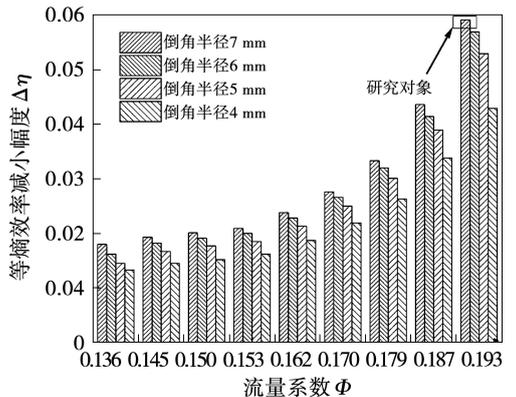
(c) 倒角半径 6 mm 的特性曲线



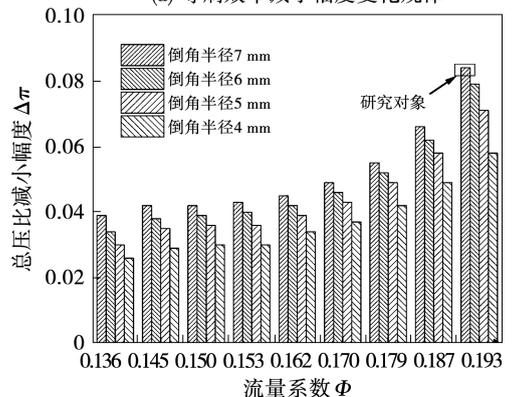
(d) 倒角半径 7 mm 的特性曲线

图 5 压缩机外特性曲线

Fig. 5 External characteristic curve of compressor



(a) 等熵效率减小幅度变化规律



(b) 总压比减小幅度变化规律

图 6 气动参数变化规律

Fig. 6 Variation of aerodynamic parameters

根据图 6 可知两者变化趋势均随流量系数的增加而增加,为更为显著地观察出变化原因,选取图中研究对象展开研究。图 7 中 7 mm - 30°表示倒角半径 7 mm、倒角角度 30°,7 mm - 90°表示倒角半径 7 mm、倒角角度 90°。由于倒角特征位于叶片的叶根和叶顶区域,故选取此区域叶高截面并结合其它区域叶高截面进行流场分析。通过图 7(a)可以看出在有倒角特征的情况下,在叶轮侧叶片吸力面中部及接近叶片尾缘区域熵增明显,并且随着叶高增加熵增区域也明显增大;由图 7(b)可以看出,随着倒角角度的减小在叶片吸力面侧接近尾缘区域流动分离现象加剧;由图 7(c)总压分布可以看出在叶轮侧叶片前缘至叶中区域压力分布基本一致,但在叶片尾缘至叶轮出口区域段压力明显降低;由图 7(d)出口截面压力分布可以看出,在同一倒角半径下,随着倒角角度的减小在轮毂、轮盖位置低压区域明显增大。这也说明倒角特征的存在增加了流动损失,使得压缩机效率下降、做功能力降低。

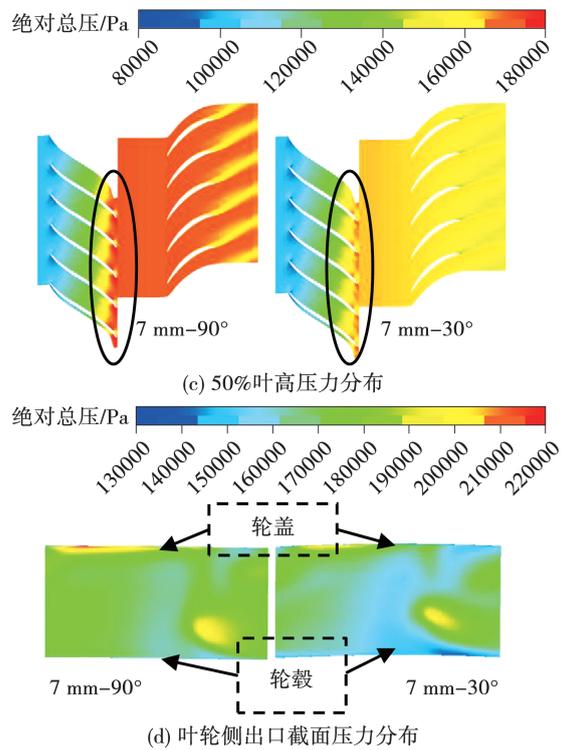
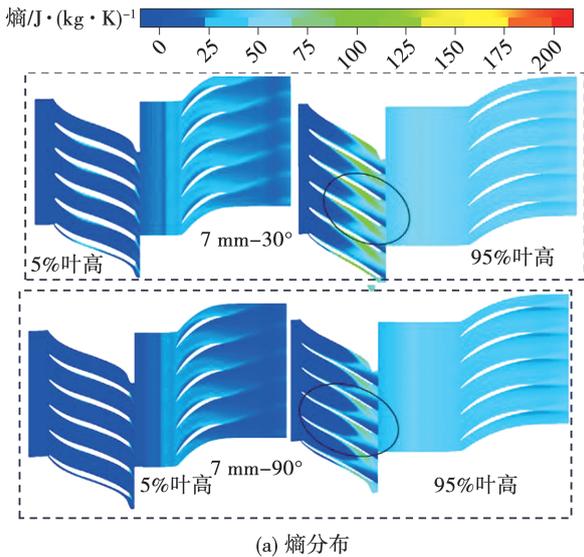
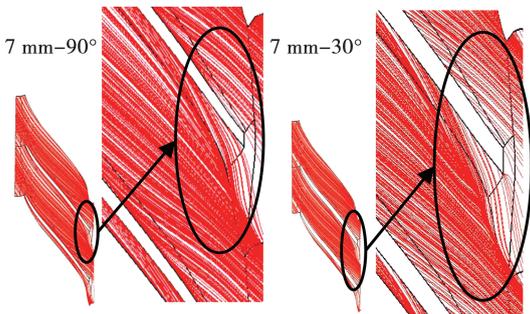


图 7 流场分布

Fig. 7 Distributions of flow field



(a) 熵分布



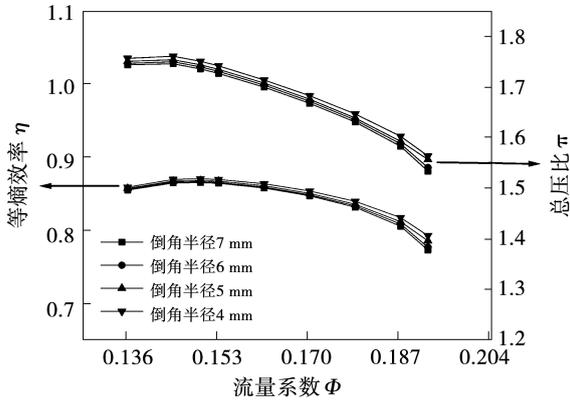
(b) 95%叶高流线分布

2.2 等倒角角度下气动结果变化规律

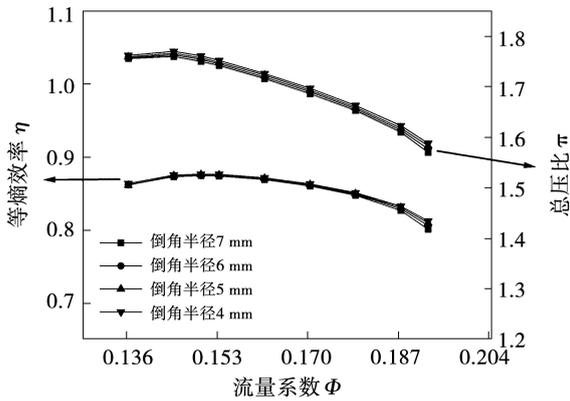
图 8 是在等倒角角度、不同倒角半径下等熵效率、总压比 - 质量流量特性曲线的计算结果,从图 8(a) - (d)可以看出在同一倒角角度下,随着倒角半径的增加压缩机的等熵效率、总压比随之减小,呈现出负相关关系。

图 9 给出了同一倒角角度下压缩机最小倒角半径 4 mm 与最大倒角半径 7 mm 时的等熵效率、压比之差随流量系数的变化趋势。由图 9 中可以看出随着流量系数的增加压缩机的等熵效率、总压比减小幅度明显增加,在大流量点等熵效率减小幅度最大达到了 2% 左右,总压比减小幅度最大达到了 0.03。总体上在每一工况点,两者的变化趋势均随着倒角角度的减小而增大。与 2.1 节等倒角半径下,倒角角度对气动性能的影响相比,倒角半径对气动性能的影响更小。

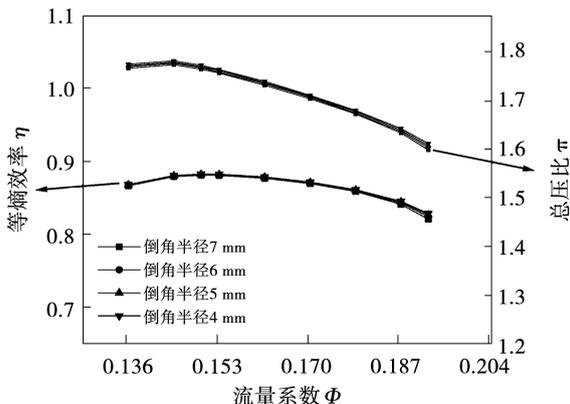
选取图中研究对象进行流场分析,通过图 10(a)熵分布可以看出在同一倒角角度下,随着倒角半径的增加在叶轮和回流器侧熵分布基本一致。由 10(b)总压分布可以看出在叶轮侧叶片前缘至叶轮出口区域压力分布也基本相同。由图 10(c)出口截面压力分布可以看出在同一倒角角度下,随着倒角半径的增加,在轮毂、轮盖侧低压区域仅有较小幅度增加。



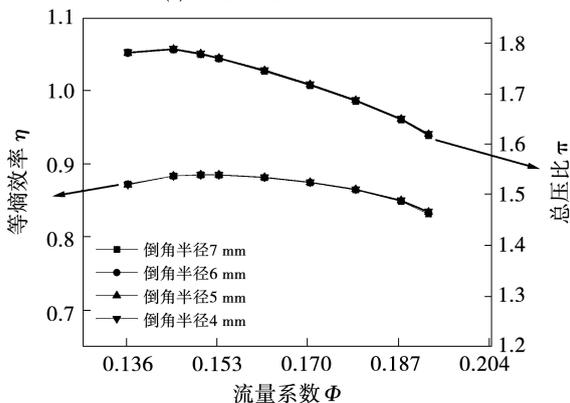
(a) 倒角角度30° 特性曲线



(b) 倒角角度45° 特性曲线

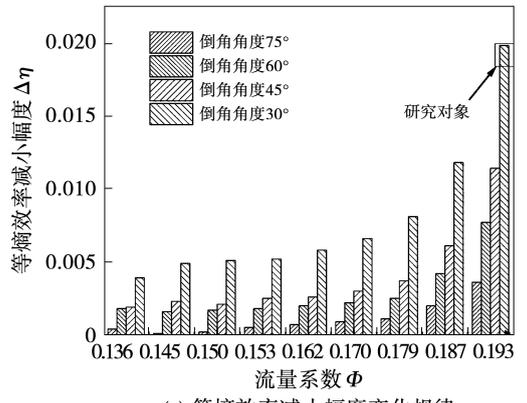


(c) 倒角角度60° 特性曲线

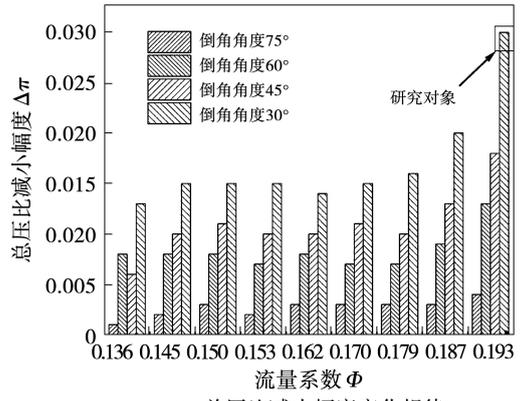


(d) 倒角角度75° 特性曲线

图 8 压缩机外特性曲线



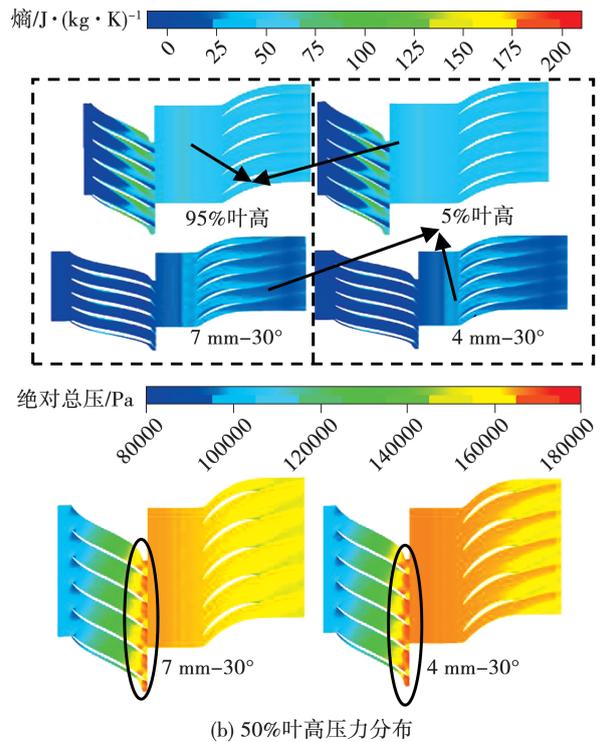
(a) 等熵效率减小幅度变化规律



(b) 总压比减小幅度变化规律

图 9 气动参数变化规律

Fig.9 Variation of aerodynamic parameters



(b) 50%叶高压力分布

Fig.8 External characteristic curves of compressor

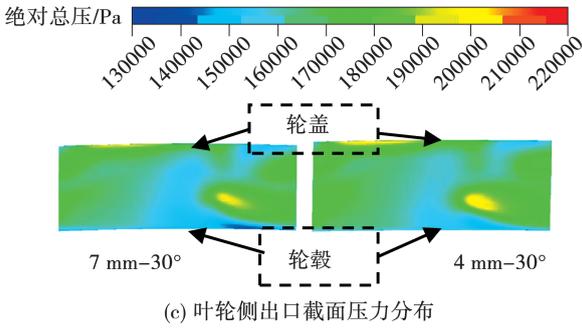


图 10 流场分布

Fig. 10 Distributions of flow field

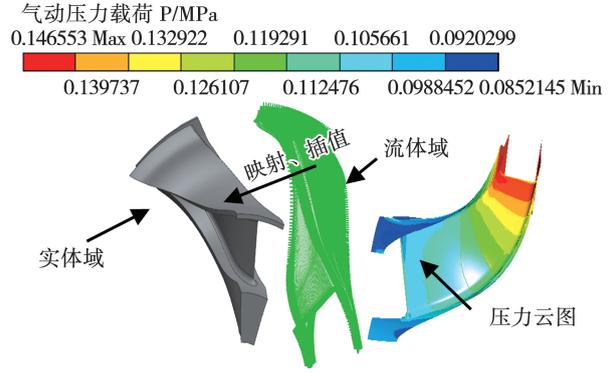


图 11 扇区模型及压力云图

Fig. 11 Sector model and pressure cloud map

3 强度分析与寿命预测

由于离心叶轮几何结构上具有旋转对称性的特点,且其载荷及约束条件也具有旋转对称性,因此利用扇区模型^[14]进行强度计算,计算软件选用 ANSYS,材料为 FV520B,其物性参数如表 2 所示。载荷条件为施加设计转速下的离心力载荷,轴面施加圆柱面约束,限制其轴向、切向自由度,径向自由度不加以限制。考虑到 0.15 基元级离心压缩机属于大流量系数范围^[15],在强度计算时施加压力载荷进行单向流固耦合计算,由于在转静子交界面采用混合平面法进行数据传输,导出的流体域压力值需通过映射及插值处理得到对应于叶片、轮毂及轮盖表面上的压力载荷,且在近设计工况(小流量点)下压缩机的总压比最大,因此压力载荷选取为近设计工况下的计算结果,计算结果由 CFX 进行输出。

表 2 材料物性参数

Tab. 2 Material property parameters

物性参数	数值
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850
弹性模量 E/Pa	2.1×10^{11}
泊松比 ν	0.3
屈服强度 σ_s/MPa	1 029
极限强度 σ_b/MPa	1 125

3.1 应力结果变化规律

为明确倒角尺度对强度的影响规律,选取叶轮出口叶根区域为考核对象,研究其在不同倒角方案下应力值的变化情况。图 11 为扇区模型及压力云图,表 3 是各方案考核区域应力值的结果。

表 3 考核区域应力值 (MPa)

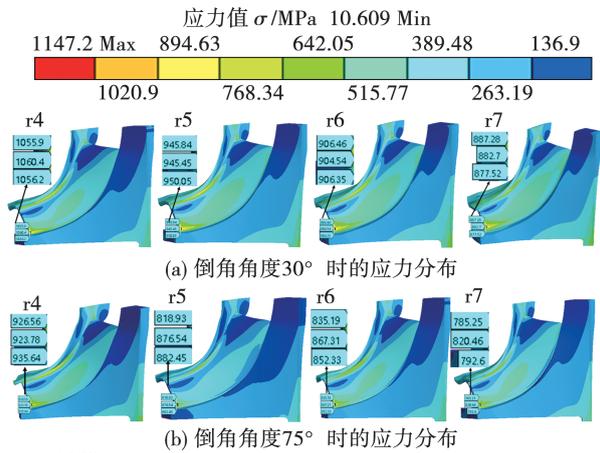
Tab. 3 Stress value of assessment area (MPa)

倒角方案	倒角	倒角	倒角	倒角
	角度 30°	角度 45°	角度 60°	角度 75°
倒角半径 4 mm	1060	1055	960	935
倒角半径 5 mm	950	949	947	882
倒角半径 6 mm	906	893	891	867
倒角半径 7 mm	887	866	861	820

根据图 12(a)、12(b)应力分布云图可以看出,在同一倒角半径下随着倒角角度的增大,轮盖及叶片上的应力分布基本相同,而轮盘侧低应力区域增大,在同一倒角角度下,叶轮应力分布随倒角半径变化不大;结合图 12(c)可以看出,考核区域应力值在同一倒角角度下,随着倒角半径的增大而减小,在同一倒角半径下,随着倒角角度的增大而减小,考核部位应力值与两者呈负相关关系;由表 3 可以得出,同一倒角角度下考核部位应力值减小幅度平均为 144 MPa,而同一倒角半径下考核部位应力值减小幅度平均为 74.75 MPa,因此在所选倒角半径和倒角角度范围内,倒角半径对考核部位应力幅值的影响程度要大于倒角角度造成的影响。

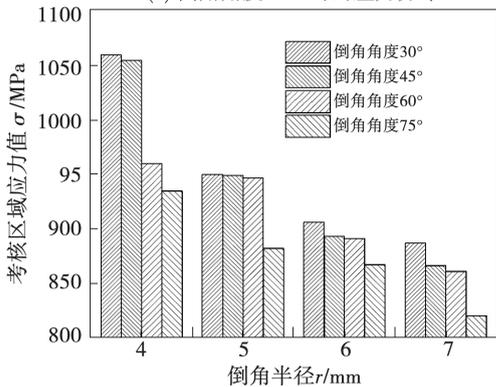
3.2 寿命预测及对比

低周疲劳中结构的应变多属于塑性应变范围,进入塑性段后,应力变化小,应变变化大,多使用 $\epsilon - N$ 曲线预测疲劳寿命;高周疲劳中结构的应变多属于弹性应变范围,应力变化较明显,一般使用 $S - N$ 曲线预测疲劳寿命。考虑到各倒角方案应力值大都低于材料的屈服强度,属于高周疲劳范畴,因此利用 $S - N$ 曲线估算考核部位寿命。



(a) 倒角角度30° 时的应力分布

(b) 倒角角度75° 时的应力分布



(c) 考核区域应力值随倒角尺度变化规律

图 12 应力值变化规律

Fig. 12 Variations of stress values

3.2.1 基于估算法的寿命预测

描述材料的 $S-N$ 曲线,根据参考手册^[16]可用公式(1)表达, m 、 C 值分别由公式(2)、公式(3)确定。

$$\sigma_{-1}^m N = C \tag{1}$$

$$m = \frac{3}{\lg 0.9 - \lg k} \tag{2}$$

$$C = \lg^{-1} \left[\frac{6 \lg 0.9 + 3(\lg \sigma_s - \lg k)}{\lg 0.9 - \lg k} \right] \tag{3}$$

N 表示循环周次。 k —与加载方式有关的系数。对于弯曲疲劳问题,实验结果表明 k 在 0.3 ~ 0.6 之间,一般取 $k = 0.5$;对于轴向拉压对称疲劳问题,实验结果表明 k 在 0.3 ~ 0.45 之间,一般取 $k = 0.35$;而对于对称扭转疲劳问题, k 在 0.25 ~ 0.3 之间,一般取 $k = 0.29$ 。考核部位处于多轴应力状态,偏于保守取值 $k = 0.29$,相应 $m = 6.099$; $C = 1.244 \times 10^{21}$ 。

叶轮工作载荷用应力比为零的载荷曲线表示, σ_{-1} 表示应力比 R 为 -1 时的应力值,利用 Goodman

曲线公式(4)计算得 σ_{-1} , 计算结果如表 4 所示。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} = 1 \tag{4}$$

式中: σ_a —应力幅值, MPa; σ_m —平均应力, MPa。

表 4 应力值 σ_{-1} /MPa

Tab. 4 Stress values σ_{-1} (MPa)

各倒角方案	倒角 角度 30°	倒角 角度 45°	倒角 角度 60°	倒角 角度 75°
倒角半径 4 mm	1 002.10	993.20	837.21	799.90
倒角半径 5 mm	822.11	820.62	817.63	725.33
倒角半径 6 mm	758.37	740.33	737.58	705.26
倒角半径 7 mm	732.11	703.94	697.35	645.10

3.2.2 基于 $S-N$ 曲线的寿命预测

参考文献[17]中关于材料的 $S-N$ 曲线描述如式(5)所示,图 13 是估算寿命值及与基于 $S-N$ 曲线寿命值的对比情况。估算法计算得到的寿命与材料的 $S-N$ 曲线基本吻合,采用估算法计算低于屈服强度的设计方案时最大偏差小于 3%,最小偏差仅为 0.09%,这也说明估算方法设定的参数值具有一定合理性,对类似结构及工作状况下压缩机的寿命预测具有借鉴意义。

$$\log(N) = -6.3639 \log(\sigma_{-1}) + 21.8573 \tag{5}$$

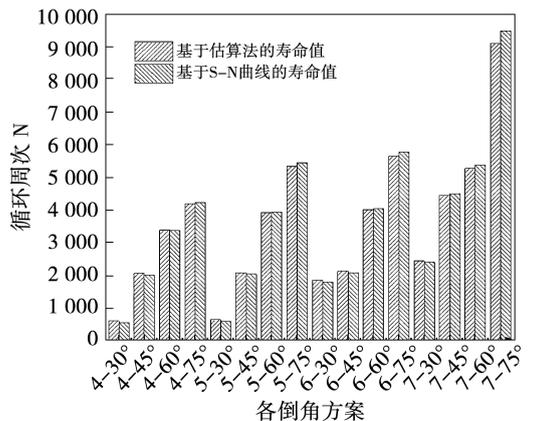


图 13 基于估算法和 $S-N$ 曲线寿命值对比

Fig. 13 Comparison of lifetime values based on estimation method and $S-N$ curve

4 结 论

以决定倒角尺度的两个结构参数(倒角半径和倒角角度)为变量,研究其对大流量离心压缩机气

动性能和结构强度的影响规律,并在此基础上对其寿命进行预估,主要结论如下:

(1) 通过对不同倒角方案的全三维稳态流动数值计算,发现,在选定的倒角尺度范围内,压缩机的等熵效率、总压比随着倒角半径的增加而减小,而随着倒角角度的增加而增大;等倒角半径方案下,在大流量点等熵效率减小幅度达 5% 左右,总压比减小幅度达 0.07 左右;等倒角角度方案下,在大流量点等熵效率减小幅度最大达 2% 左右,总压比减小幅度最大达 0.03 左右。

(2) 通过对各倒角方案进行单向流固耦合强度计算,结果发现考核区域应力值随倒角半径、倒角角度的增大而减小;等角度方案下应力值减小幅度平均为 144 MPa;而等半径方案下应力值减小幅度平均为 74.75 MPa。

(3) 选取考核区域应力值进行寿命预测,结果发现最小倒角尺度下寿命为 575 循环周次,而最大倒角尺度下寿命可达 9 486 循环周次;选取工程上的估算法计算得到的寿命,经与材料 $S-N$ 曲线结果对比,两者最大偏差为 3%,最小偏差仅为 0.09%。

参考文献:

- [1] OH J J. The effects of blade fillets on aerodynamic performance of a high pressure ratio centrifugal compressor[C]//International Compressor Engineering Conference: School of Mechanical Engineering, 2016.
- [2] 毛明明,宋彦萍,王仲奇. 倒角和间隙对跨音轴流压气机气动性能的影响[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 469-550.
MAO Ming-ming, SONG Yan-ping, WANG Zhong-qi. The influence of blade root fillet and blade tip clearance on the aerodynamic performance of a transonic axial compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(5): 469-550.
- [3] 高丽敏,蔡宇桐,李 萍,等. 叶根倒角对跨音轴流压气机气动性能的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 137-143.
GAO Li-min, CAI Yu-tong, LI Ping, et al. Influence of blade-root fillet on transonic rotor performance [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 137-143.
- [4] 王大磊,朴 英,陈美宁. 叶根倒角对轴流涡轮转子流场的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2075-2081.
WANG Da-lei, PIAO Ying, CHEN Mei-ning. Influence of the root fillet on the flow pattern of an axial turbine rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2075-2081.
- [5] 李文娇,杜礼明,关天民. 叶片根部倒角对离心叶轮气动性能

- 影响[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 59-66.
LI Wen-jiao, DU Li-ming, GUAN Tian-min. Influence of blade root fillet on aerodynamic performance of centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 59-66.
- [6] 康 顺,孙丽萍. 叶根倒角对离心叶轮气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(1): 41-43.
KANG Shun, SUN Li-ping. Influence of blade root chamfering on the aerodynamic performance of centrifugal impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(1): 41-43.
 - [7] MEYER R, SCHULZ S, LIESNER K. A parameter study on the influence of fillets on the compressor cascade performance [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 50 (1): 131-145.
 - [8] 黄志浩,刘景源. 叶根倒角对微小型离心压气机气动性能的影响[J]. 航空发动机, 2020, 46(2): 16-22.
HUANG Zhi-hao, LIU Jing-yuan. Effect of blade root fillet on aerodynamic performance of miniature centrifugal compressor [J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 16-22.
 - [9] 张旭阳,陈 榴,戴 韧. 叶根变径倒角的设计与流动分析 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(7): 52-59.
ZHANG Xu-yang, CHEN Liu, DAI Ren. Design of variable radius chamfer and analysis of flow at the root of the blade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(7): 52-59.
 - [10] 崔伟伟,刘付松,王兴鲁,等. 叶根倒角对轴流压气机转子两端区流动结构的影响研究 [J]. 热科学与技术, 2022, 21(2): 105-113.
CUI Wei-wei, LIU Fu-song, WANG Xing-lu, et al. Effect of blade root fillet on the flow structures near end wall of axial compressor rotor [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2022, 21(2): 105-113.
 - [11] 王文涛,王子楠,耿少娟,等. 叶栅倒角对压气机角区流动影响的数值模拟和实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 957-962.
WANG Wen-tao, WANG Zi-nan, GENG Shao-juan, et al. Numerical and experimental study of the influence of fillets on compressors corner flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 957-962.
 - [12] 孙志刚,何 平,李 文,等. Eckardt 叶轮数值计算与实验对比 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 767-770.
SUN Zhi-gang, HE Ping, LI Wen, et al. Numerical computation of Eckardt impeller and the comparisons with its experimental results [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(5): 767-770.