

涡轮盘风冷过程数值模拟研究

Simulation of Wind Chill Process for Turbine Disk

邹金文^{1,2}, 刘 东³, 柳百成¹, 沈厚发¹

(1 清华大学, 北京 100084; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095; 3 西北工业大学, 西安 710072)

ZOU Jin-wen^{1,2}, LIU Dong³, LIU Bai-cheng¹, SHEN Hou-fa¹

(1 Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 采用商用 CFD 分析软件 Fluent 对涡轮盘固溶处理后的风冷过程进行了数值模拟研究, 定量分析了盘件内温度、冷速等参数的分布情况。模拟结果显示, 单风扇风冷过程中盘件沿径向和周向的温度分布较三风扇冷却方式均匀。两种形式风冷过程的风场结果表明, 单风扇冷却时盘件表面的冷却速度较高。

关键词: 涡轮盘; 热处理; 模拟

中图分类号: TF125; TG156 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)10-0007-04

Abstract: The wind chill process for FGH96 turbine disk was simulated and studied by using the commercial CFD software. The distribution of parameters such as temperature and cooling rate were analyzed quantitatively. The results showed that the temperature distribution in radial and circumferential directions of disk was more homogeneous in the case using single fan than that in the case using three fans. The results of wind field showed that the cooling rate when using single fan was higher.

Key words: turbine disk; heat treatment; simulate

涡轮盘是航空发动机的关键热端部件之一^[1,2]。FGH96 合金是第二代损伤容限型粉末高温合金, 适合制造高推重比的发动机涡轮盘。FGH96 粉末涡轮盘在制造过程中, 热处理是关键热工艺之一, 合理的热处理工艺可以有效发挥材料潜力。涡轮盘热处理过程中最重要的环节就是固溶处理后冷却速度的控制。固溶处理后冷却过程中温度场的均匀性和冷却速度大小直接决定第二相 γ' 的大小、形态及分布, 进而决定合金的综合性能。另外, 应避免盘件在冷却过程中由于大的温度梯度产生高的应力集中, 造成盘件变形或开裂等冶金质量问题。

本研究应用流-固耦合有限元方法对 FGH96 合金涡轮盘固溶处理后的风冷过程进行了数值模拟, 定量分析了不同风冷方案对涡轮盘内温度、冷速、以及温度均匀性的影响, 为合理确定涡轮盘风冷方案和风冷参数提供依据。

1 数值模型

1.1 控制方程及数值解法

涡轮盘冷却过程中包含了盘件内部的热传导、热

对流以及热辐射等复杂的热交换过程^[3,4]。本研究采用数值方法, 建立外部流场和盘件固体区域的一体化数值计算模型。固体区域热传导能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \vec{v} \cdot \nabla(\rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; h 为显焓; k 和 T 分别为导热率和温度; S_h 为体积热源项, 本文中取零。

涡轮盘与外部环境之间的热辐射计算采用离散坐标模型(DO 模型)^[5], 离散坐标模型把沿 s 方向的辐射传播方程看作场方程, 这样辐射传播方程写为:

$$\nabla \cdot (I(r, s) \vec{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(r, s) = \alpha_n \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\alpha}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (2)$$

式中: \vec{r} 和 \vec{s} 分别为位置向量和方向向量; \vec{s}' 为散射方向; α_n 和 σ_s 分别为吸收、折射和散射系数; I 是与位置 and 方向有关的辐射强度; T 为当地温度; Φ 和 Ω' 为相位函数和空间立体角; α 是斯蒂芬-波耳兹曼常数。

流场区域控制方程为 N-S 方程, 基于有限体积法, 对控制方程进行时间和空间上的离散, 动量和能量方程离散均采用二阶迎风格式, 并采用压力隐式分裂算子(PISO)格式进行压力-速度耦合计算。

对湍流的模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 湍流动量方程

和扩散方程分别为:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: G_k 代表平均速度梯度对湍流动能产生项的贡献; G_b 代表浮力对湍流动能产生项的贡献; Y_M 代表可压缩湍流的脉动膨胀对总耗散率的贡献; $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为模型常量; σ_k 和 σ_ϵ 是分别对应于 k 和 ϵ 的湍流 Prandtl 数。

1.2 计算网格

Fluent 计算可以采用结构网格或非结构网格。为减少网格数目, 增加精度, 对固体及流体域进行分割以生成结构化网格。数值计算中, 近涡轮盘表面适当加密网格, 而在远的区域则采用较粗的网格。整个计算域网格数目约为 80 万左右。图 1 为涡轮盘表面及内部的计算网格。

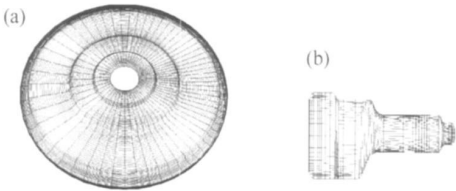


图 1 计算网格 (a) 涡轮盘表面网格; (b) 剖面网格
Fig. 1 Meshes in simulation (a) meshes in surface of turbine disk; (b) meshes in section

1.3 边界条件

风冷过程数值模拟的流场计算域取以涡轮盘为中心的圆柱形区域(见图 2), 总体求解域直径为涡轮盘直径的 20 倍。单风扇冷却方案中, 盘件绕对称轴转动, 所以计算区域取完整的柱形区域; 三风扇冷却方案中, 风扇沿周向对称布置, 计算域只需取 1/6 即可。

数值计算边界条件包含以下几种:

(1) 压力边界条件。计算域外侧为压力出口条件, 出口压力设定为环境压力 101325Pa, 同时需要指定回流温度为常温 15℃。

(2) 壁面条件。涡轮盘表面和风扇涵道为壁面边界条件。在数值计算中, 所有壁面均是耦合壁面, 涡轮盘表面灰度值 0.6。

(3) 风扇条件。风扇边界条件用以模拟风扇吹风, 给定方向和压升, 由风扇参数计算出主流区域风速为 10m/s。

另外, 三风扇冷却方案中还需设定对称边界条件,

即沿对称面法向的任意标量物理量 φ 的梯度为零, 即对称面上通量为零:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

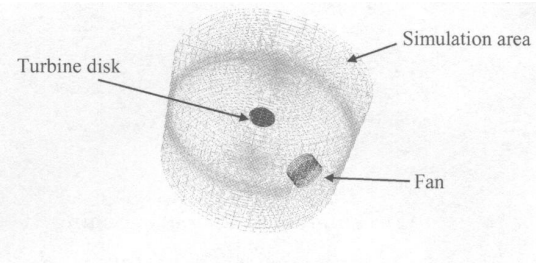


图 2 风冷计算边界条件
Fig. 2 Boundary conditions in simulation

1.4 FGH96 材料热物性参数及冷却介质参数

FGH96 涡轮盘材料密度 $\rho = 8320 \text{ kg/m}^3$; 盘件表面灰度均取 0.6; 空气密度满足理想气体定律, 粘性由 Sutherland 定律计算。表 1 给出了 FGH96 合金不同温度下的弹性模型, 图 3 给出了 FGH96 合金不同温度下的热导率、比热容以及线膨胀系数。

表 1 FGH96 弹性模量
Table 1 Elastic modulus of FGH96

| $T/^\circ\text{C}$ | 20 | 450 | 650 | 750 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| E/GPa | 211.0 | 193.7 | 170.8 | 163.5 |

2 计算结果及分析

2.1 计算方案

图 4 所示为两种风冷方案中风扇布局示意图。其中, 单风扇方案即单个风扇吹风, 盘件以 5r/min 的速度旋转(见图 4a); 三风扇方案即三个风扇吹风, 风扇沿涡轮盘周向 120° 均布, 吹风时盘体不动(见图 4b)。

2.2 计算结果与分析

为了研究涡轮盘沿径向温度场的变化, 本研究在涡轮盘迎风面中心线上截取五个采样点(见图 5)。采样点的坐标依次为: A(51.5, 62.5), B(113, 62.5), C(252, 62.5), D(330, 62.5)和 E(341, 62.5), 单位 mm。图 6 给出了两种方案下 5 个采样点位置以及内外壁温度随时间的变化曲线。从图 6a 可以看出, 两种方案中盘件 5 个采样点位置处的温度在风冷过程中逐渐下降, 并且, 越靠近盘件中心的采样点温降幅度越小, 反之, 越盘件外沿部位的采样点温降幅度越大。例如, 单风扇方案中, 采样点 A 的温度基本没有降低, 而采样点 E 处的温度则由开始的 1150℃ 降至 910℃, 温降达 240℃。从图还可以看出, 两种方案中, 5 个采样点温

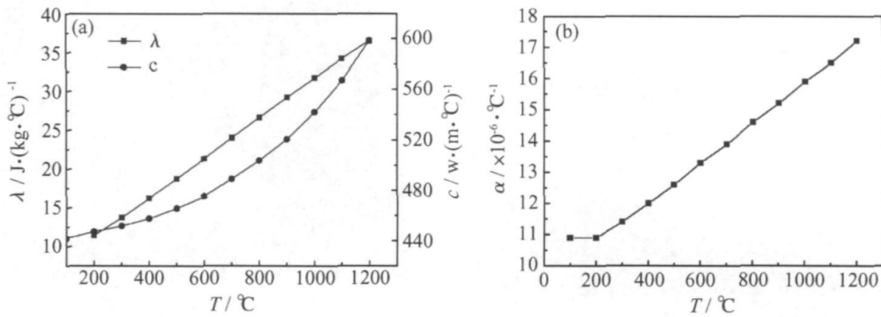


图 3 FGH69 合金热物理参数随温度变化曲线 (a) 热导率和比热容; (b) 线膨胀系数
Fig. 3 Thermal parameters vs temperature curves
(a) heat conductivity and specific heat capacity; (b) linear expansion factor

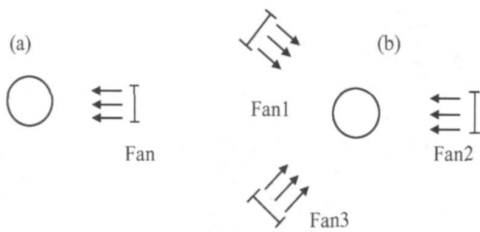


图 4 风冷方案示意图 (a)单风扇;(b)三风扇
Fig. 4 Sketch map of schemes for cooling process
(a) single fan; (b) three fans

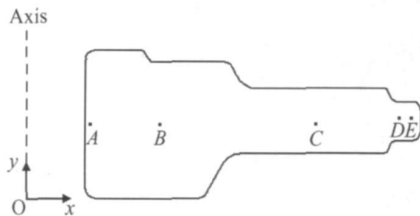


图 5 采样点位置示意图
Fig. 5 Sketch map of the measured points

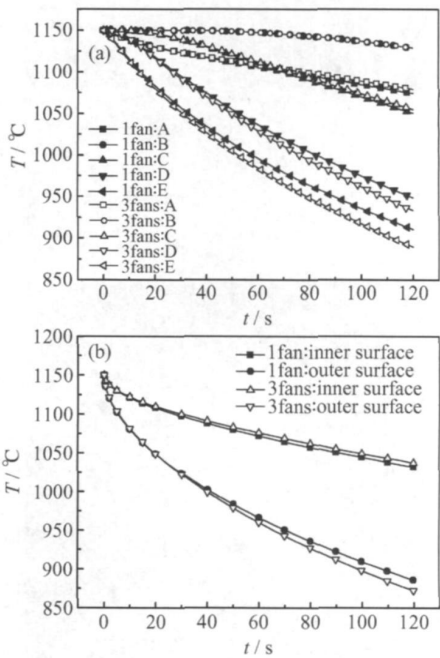


图 6 典型位置温度随时间变化曲线
(a) 径向采样点; (b) 内外壁表面

Fig. 6 Temperature vs time curves of typical points
(a) typical measured points in radial direction;
(b) inside and outside surfaces of the wall

度随时间的变化规律类似,尤其是采样点 A 的温度变化曲线几乎重合。但是,随着采样点位置向盘件外沿移动,相同采样点在两种方案中的温度变化曲线差异越来越大。例如,在 120s 时,单风扇方案中采样点 E 的温度为 910℃,三风扇方案中采样点 E 的温度已降至 889℃,相差 21℃。

从图 6b 可以看出,两种方案下采样点及内外表面的温度下降规律类似,只是单风扇方案中盘件内外壁温度分散程度比三风扇方案中的要大。时间 $t=120\text{s}$ 时,单风扇方案中盘件内表面平均温度(1037.22°C)比三风扇方案中盘件内表面平均温度(1031.97°C)高,相差约 5°C ;而两方案中盘件外表面平均温度分别为 871.98°C 和 885.76°C ,相差约 14°C 。

可见,在单风扇方案中,盘件内外壁表面以及采样

点的温度差较三风扇方案中的要小,温度的均匀性好。

图 7 所示为 $t=120\text{s}$ 时两种方案下,盘件上下表面及周围部分计算域内的风场云图。从图可以看出,采用单风扇方案,盘件上下表面大部分风速均在 8m/s 以上。而在三风扇方案中,虽然风扇个数有所增加,但由于三个方向上的大部分气流叠加后互相抵消,使得盘件上下表面附近区域的风速仅为 $2\sim 3\text{m/s}$,内外壁表面处风速较高也只有 5m/s 。由于风速大小直接决定盘件冷却速度大小,因此,单风扇方案可使盘件获得较高的冷却速度。

为了研究不同风冷方式盘件各部位沿周向温度分

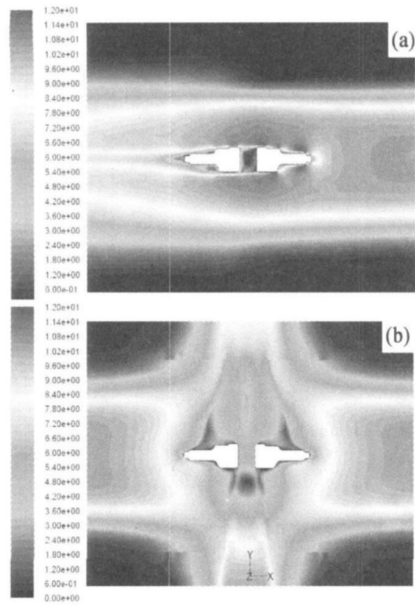


图 7 盘件表面及周围计算域内风场分布
(a)单风扇;(b)三风扇
Fig. 7 Distribution of wind field in surfaces and surrounding (a)single fan; (b)three fans

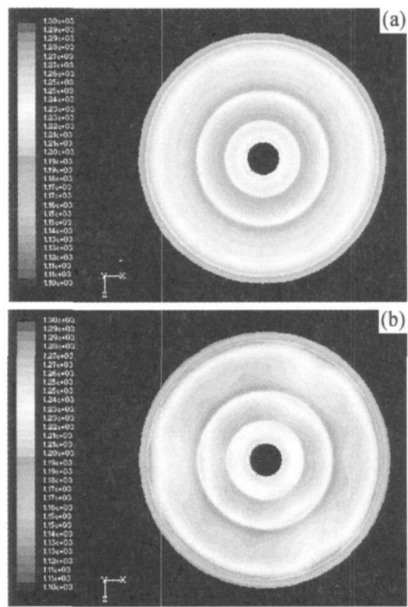


图 8 盘件表面温度分布 (a)单风扇;(b)三风扇
Fig. 8 Temperature distribution in surfaces
(a)single fan; (b)three fans

布的均匀性,图 8 给出了 120s 风冷后两种方案中盘件表面温度分布云图。从图 8 可以看到,单风扇方案中由于冷却过程中盘体旋转,因而盘件的周向温度均匀性明显优于三风扇方案。三风扇方案中,盘件不同的周向位置的温度分布存在周期性差异,迎风位置温度最低,风扇间隙位置温度略高。图 9 为三风扇方案中

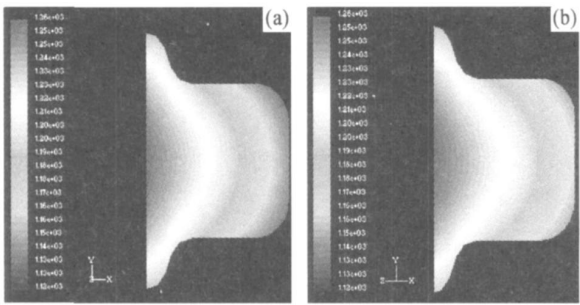


图 9 试样环温度分布图 (a)单风扇;(b)三风扇
Fig. 9 Temperature distribution in sample ring
(a) single fan; (b) three fans

盘件迎风位置及风扇间隙位置试样环温度分布局部放大图,可以明显看出这两个位置温度场分布的差异。

3 结论

(1) 采用一个风扇同时旋转盘体的冷却方案,冷却效果优于三风扇吹风的方案,并且可提高涡轮盘在冷却过程中周向温度分布均匀性,同时单个风扇的方案减少冷却设备,宜优先采用。

(2) 直接风冷时盘件内孔表面温度下降较慢,而轮缘外环表面温度下降太快,整个盘件存在较大的温度梯度,需要对冷却方案加以改进。

(3) 采用数值模拟方法研究涡轮盘温度场的变化规律,分析冷却方案的可行性,并在此基础上对方案加以改进,是既经济又实用的方法。

参考文献

[1] GUIDE J Y. N18 powder metallurgy for disks development and applications[J]. J Mat Eng and Performance, 1993, (2): 551- 556
[2] 邹金文. 热处理对 FGH95 合金组织的影响研究[J]. 钢铁研究学报, 2003, 7: 531- 535.
[3] WALLIS RA, BHOWAL P R. Modeling the heat treatment of superalloy forgings[J]. JOM, 1989, (2): 35- 39.
[4] OH S I. Finite element analysis of metal forming processes with arbitrarily shaped dies[J]. International Journal of Mechanical Science, 1982, 24: 285- 291.
[5] RATHBY G D, CHUI E H. A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media [J]. J Heat Transfer, 1990, 112: 415- 423.

收稿日期: 2009-02-10; 修订日期: 2009-08-15
作者简介: 邹金文(1966—), 女, 研究员, 博士生, 主要从事粉末高温合金材料、制造技术及应用研究, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱 (100095), E-mail: zoujw03@ mails. tsinghua. edu. cn