

基于 Ansys 软件的重型燃气轮机叶片蜡模蠕变规律研究

张俊文¹, 赵代银², 李定骏², 张琼元², 张杰¹

(1. 四川大学 高分子科学与工程学院, 四川成都 610065;

2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 四川德阳 618000)

摘要: 熔模精密铸造蜡模在存放过程中, 会因重力作用而发生蠕变, 致使自身尺寸精度降低, 进而导致叶片的整体尺寸精度也随之下降。因此, 研究蜡模在存放过程中的蠕变规律并降低其蠕变变形对于叶片的尺寸精度控制具有重要意义。本文首先使用DMA对填充蜡试样进行了蠕变试验, 获得了时间硬化蠕变方程。之后, 采用有限元分析软件Ansys对试验过程进行了模拟, 并与试验结果对比, 验证了蠕变方程的准确性。最后, 对不同存放方式下的蜡模蠕变过程进行了模拟, 获得了蜡模在不同存放方式下的蠕变随时间变化规律。结果表明, 采用竖直悬挂方式存放的蜡模蠕变要略小于采用竖直放置方式。而采用竖直放置方式存放蜡模时, 为保证蜡模尺寸精度, 应尽量避免蜡模偏离竖直方向。

关键词: 透平叶片; 蜡模; 蠕变; 有限元模拟; Ansys

重型燃气轮机作为高效的能源转换设备, 广泛应用于发电、工业驱动和海上平台等领域^[1-2]。其制造涉及高温高压环境下的精密设计和多学科技术, 具有极高的技术复杂性和制造难度, 被誉为工业制造皇冠上的明珠^[3-4]。而其中又以透平叶片等高温部件的材料及制造要求最为严苛。因透平叶片需长期在高温环境中保持高强度的工作, 若叶片的制造精度达不到要求, 则会使得燃气轮机的性能大幅下降, 进而影响工作效率^[5-6]。因此在制备透平叶片的各阶段中, 对于叶片的误差控制有极高的要求。

目前, 透平叶片的制备主要通过熔模铸造过程实现。该过程主要包括蜡模制备、蜡模组树、陶瓷型壳制备、脱蜡、型壳焙烧、浇注以及后处理等主要阶段^[7-9]。研究表明, 在上述阶段中, 蜡模制备、型壳制备以及铸件浇注对铸件误差的形成具有较大影响^[10-11]。其中, 蜡模的尺寸超差对于铸件最终尺寸超差的影响占到了40%以上^[12]。可见, 对蜡模尺寸误差的精确控制对于叶片的最终尺寸精度具有重要影响。

一般而言, 蜡模制备完成后, 并不会直接进入下一阶段, 而是会在一定的温度和湿度条件下存放一段时间, 即蜡模存放过程^[13]。在重力的长时间作用下, 该过程有可能会使蜡模的形状和尺寸发生一定变化, 影响蜡模的精度。通常情况下, 该过程与蜡模制备过程中产生的尺寸误差需通过采用专用的工装进行机械矫正。而随着计算机模拟软件在加工成形领域的广泛应用, 越来越多的研究倾向于对蜡模的成形过程进行模拟, 并依据模拟结果对工艺参数和模具结构进行优化, 以达到控制蜡模尺寸精度的目的^[14-19]。相较于传统的工装矫正方法, 该方法成本更低且更为通用。但是, 目前的模拟研究主要是针对蜡模的成形过程, 而同样对蜡模尺寸精度有着重要影响的蜡模存放过程还没有相应的有效研究。

针对蜡模在存放过程中由于重力作用而产生的蠕变变形, 本文使用了Ansys有限元分析软件进行模拟, 并通过蠕变试验建立了填充蜡的稳态蠕变方程。随后对采用

作者简介:

张俊文(1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为基于计算机模拟预测并减少透平叶片蜡模的变形。E-mail: 2259793320@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

08-1058-07

收稿日期:

2025-03-13 收到初稿,
2025-05-08 收到修订稿。

不同存放方式的蜡模在不同存放条件（时间、角度）下的蠕变过程分别进行了模拟，获得了不同条件下的蜡模蠕变变形规律，可为蜡模的放置提供参考。

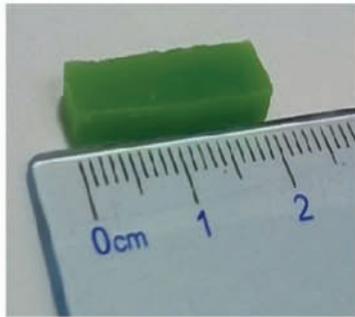
1 蠕变试验

1.1 试验材料

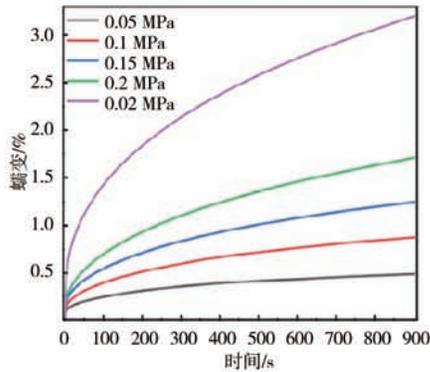
试验材料为英国某公司生产的叶片专用中温填充蜡。

1.2 试样制备

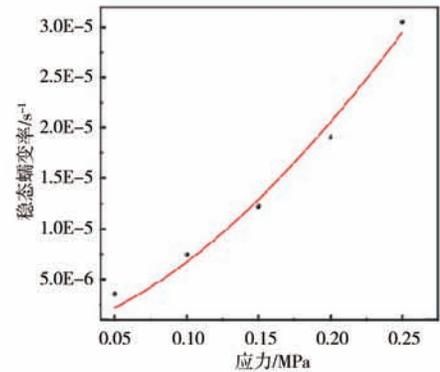
利用压制成型的方法将填充蜡颗粒压制成长20 mm、宽4 mm、厚3 mm的长方体试样，如图1（a）所示。压制条件：先在70 ℃温度下热压5 min，再常温冷压1 min，最后脱模取出试样。



(a) 简易试样示意图



(b) 蠕变曲线



(c) 稳态蠕变率随应力变化的拟合曲线

图1 蠕变试验
Fig. 1 Creep test

如图1（c）所示的稳态蠕变率随应力变化的拟合曲线。

$$\varepsilon = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot t^{C_3} \cdot e^{-C_4 T} \quad (C_1 > 0, -1 < C_3 < -0.5) \quad (1)$$

式中： ε 为稳态蠕变率， σ 为等效应力， t 为时间， T 为绝对温度， C_n （ $n=1\sim 4$ ）为硬化回归系数^[20]。

依据拟合曲线结果，可以获得各硬化回归系数（ C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ）的值（表1），将其带入方程（1）

1.3 试验结果

采用Q800动态力学分析仪进行单轴蠕变试验，测试试样在不同应力作用下的蠕变以获得蠕变方程。试验条件：试验温度和应力作用时间分别设置为25 ℃和900 s，所用应力大小分别为0.05 MPa、0.1 MPa、0.15 MPa、0.2 MPa、0.25 MPa。

试验所得蠕变曲线如图1（b）所示，从图中可以看出填充蜡的蠕变曲线表现出典型的蠕变特征。由于试验时间较短，蠕变随时间变化主要分为两个阶段。第一阶段为初始蠕变阶段，该阶段持续时间较短，应变率较大，变形较快；第二阶段为稳态蠕变阶段，应变随时间均匀增加，变形逐渐趋于稳定，应变率降低。

根据图1（b）中不同应力条件下的蠕变曲线和时间硬化（Time Hardening）蠕变方程式（1），获得了

就可获得该材料的时间硬化蠕变方程。该曲线与原始数据的相关系数 R^2 为0.986 37，接近于1，表明拟合曲线与原始数据具有较好的相关性。

除了硬化回归系数外，要完成蜡模的蠕变模拟过程，还需要输入材料的密度、弹性模量以及泊松比等性能，相关数据如表1所示。

表1 填充蜡材料参数
Tab. 1 Parameters of filler wax

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	模量/MPa	泊松比	C_1	C_2	C_3	C_4
984.2	200	0.4	0.16	1.62	-0.72	433.38

2 透平叶片蜡模蠕变规律的数值模拟分析

2.1 蠕变方程试验验证

为了验证所得蠕变方程参数的准确性，在相同条

件下，对1.2所述试样分别进行了蠕变试验和蠕变模拟仿真。试验参数设置如下：试验温度为25 ℃，蠕变时间为14 400 s，应力大小设置为0.05 MPa。在Ansys中也输入相同的条件进行模拟。

试验和模拟所得蠕变曲线如图2所示,从图中可以看出,在蠕变较小时,两曲线之间的差距很小。即在0~0.007之间,两曲线的吻合度很高,模拟结果可以很好地反映实际情况。而随着时间的增加,二者之间的差距变大,试验完成时,二者之间的误差约为20%。因此,在蠕变较小时,模拟结果与实际情况十分吻合,具有较高的准确性。当蠕变较大时,虽然模拟结果与试验结果存在一定的误差,但也能在一定程度上反映实际情况。

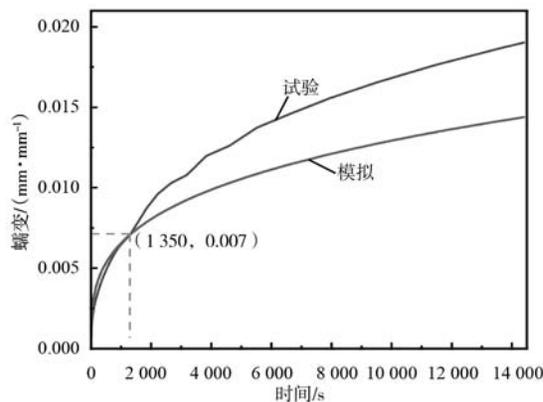


图2 试验和模拟的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves for experiment and simulation

2.2 模型的网格、载荷以及约束设置

图3为透平叶片蜡模模型的网格、载荷以及约束示意图。图3(a)为蜡模模型的网格示意图,网格边长设置为2 mm。在本文中,对竖直放置和竖直悬挂两种常见蜡模存放方式在不同存放时间下的蠕变过程进行了模拟,其载荷与约束设置如图3所示。

图3(b)为蜡模竖直放置时的载荷和约束示意图,其叶根顶部平面与桌面接触,并使得叶片整体竖直,与桌面呈90°夹角。约束为设置于叶片叶根顶部平面(区域B)的固定约束,载荷则为竖直向下的重力(A)。图3(c)为蜡模竖直悬挂时的载荷和约束示意图,叶根顶部平面固定,叶片整体悬空,叶片长度方向与重力方向重合。载荷和约束设置与竖直放置时相同,而模型则旋转180°,使叶根朝上。在模拟过程中,存放时间分别设置为12 h、24 h、36 h、48 h、60 h和72 h。

同时,还应考虑到蜡模竖直放置时会有角度误差,而角度误差对于蜡模的蠕变大小可能也会有较大影响。因此,对不同放置角度下蜡模的蠕变过程也进行了模拟,存放时间设置为12 h。

2.3 模拟结果及分析

图4(A~F)分别为蜡模竖直放置时间为12 h、



(a) 网格

(b) 竖直放置时的约束和载荷

(c) 竖直悬挂时的约束和载荷

图3 透平叶片蜡模模型三维结构图

Fig. 3 Three-dimensional structure of the wax pattern model of turbine blade

24 h、36 h、48 h、60 h和72 h时的蠕变形变量等值线图。从图中可以看出,形变量最大的区域出现在叶片叶身的底部平台区域,主要表现为蜡模的整体长度缩短。随着存放时间的增加,蜡模的形变量逐渐增大,到72 h时,蜡模的蠕变形变量为0.121 58 mm,相比于12 h时的0.073 793 mm,增大了65%。

图5为蜡模竖直放置时,蠕变随时间变化的曲线图。蠕变为形变量(ΔL)与蜡模初始长度(L_0)的比值($\Delta L/L_0$)。与形变量的变化趋势类似,随着时间的增加,蠕变也在不断增大。当存放时间为72 h时,蠕变最大为0.001 88,要小于0.007,说明整个模拟过程中的蠕变较小,模拟结果可以较为精准地反映实际情况。

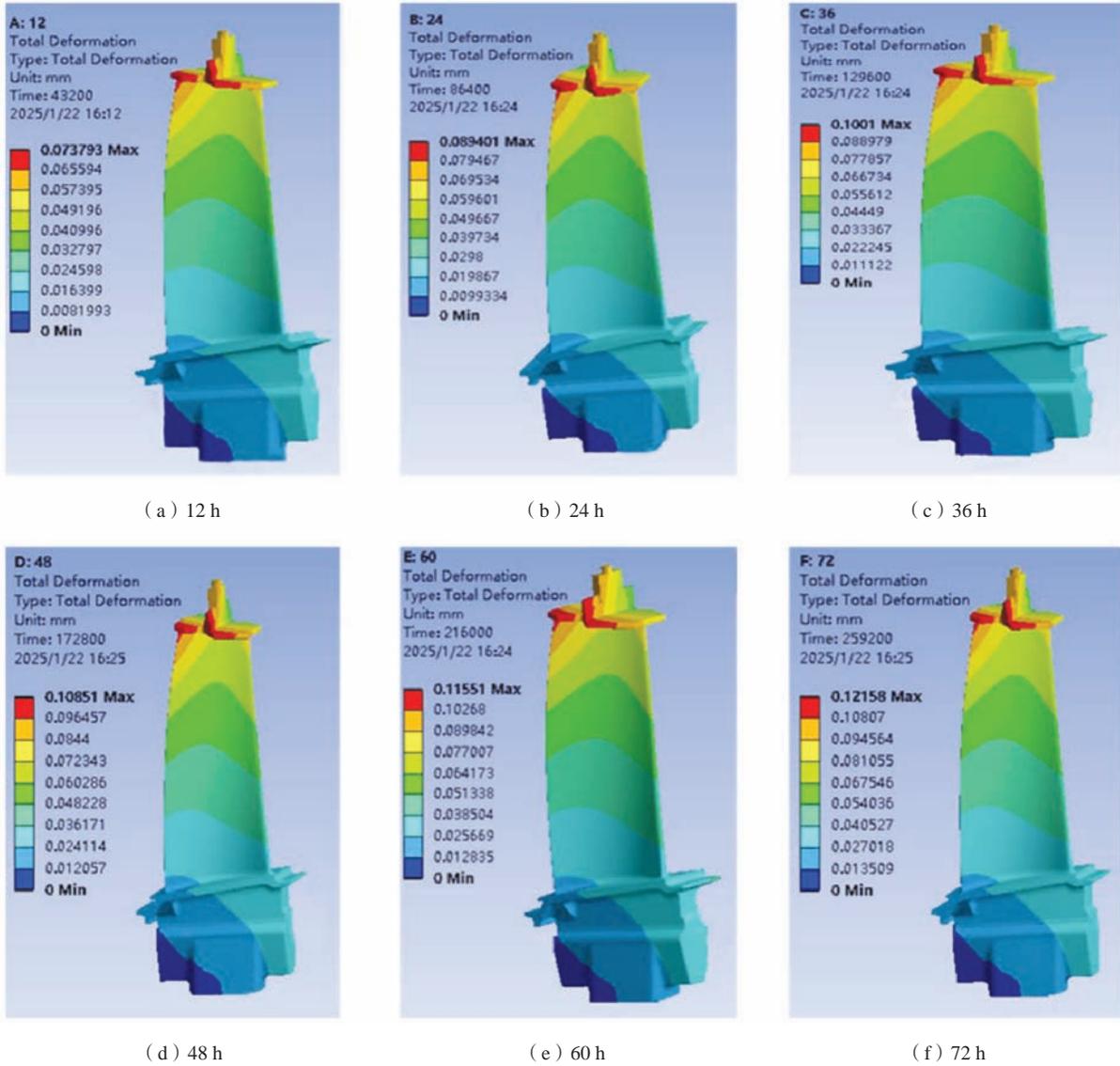


图4 蜡模竖直放置时的蠕变形变量等值线图

Fig. 4 Contour plots of creep deformation for vertically placed wax patterns.

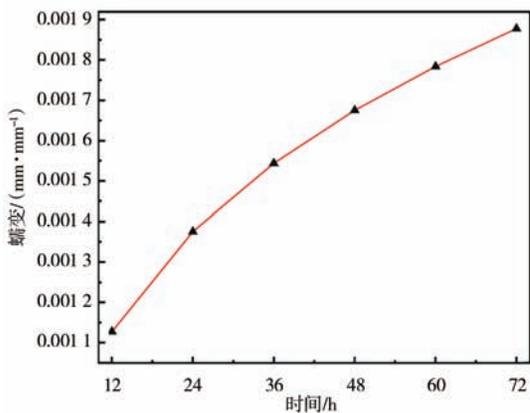


图5 蠕变随时间变化的曲线图 (竖直放置)

Fig. 5 Plot of creep as a function of time (vertical placement)

图6为蜡模竖直悬挂时的蠕变形变量等值线图，可以看出，与竖直放置时类似，形变量最大的区域同样位于叶身的底部平台区域，且随着时间的增加，形变量也逐渐增大。但由于放置方向相反，蜡模的变形方向也随之相反，竖直悬挂时蜡模的整体长度会由于变形而增加。

进一步对比图4和图6，当采用竖直悬挂方式时，蜡模在存放时间为12 h和72 h时的蠕变形变量分别为0.072 912 mm和0.119 31 mm，略小于采用竖直放置方式时（同存放时间）的蠕变形变量；且随着时间的增加，二者形变量之间的差值也在逐渐增加，从12 h时的0.000 881 mm增加到了72 h时的0.002 27 mm。这说明相比于竖直放置存放，竖直悬挂存放要更有利于减少蜡

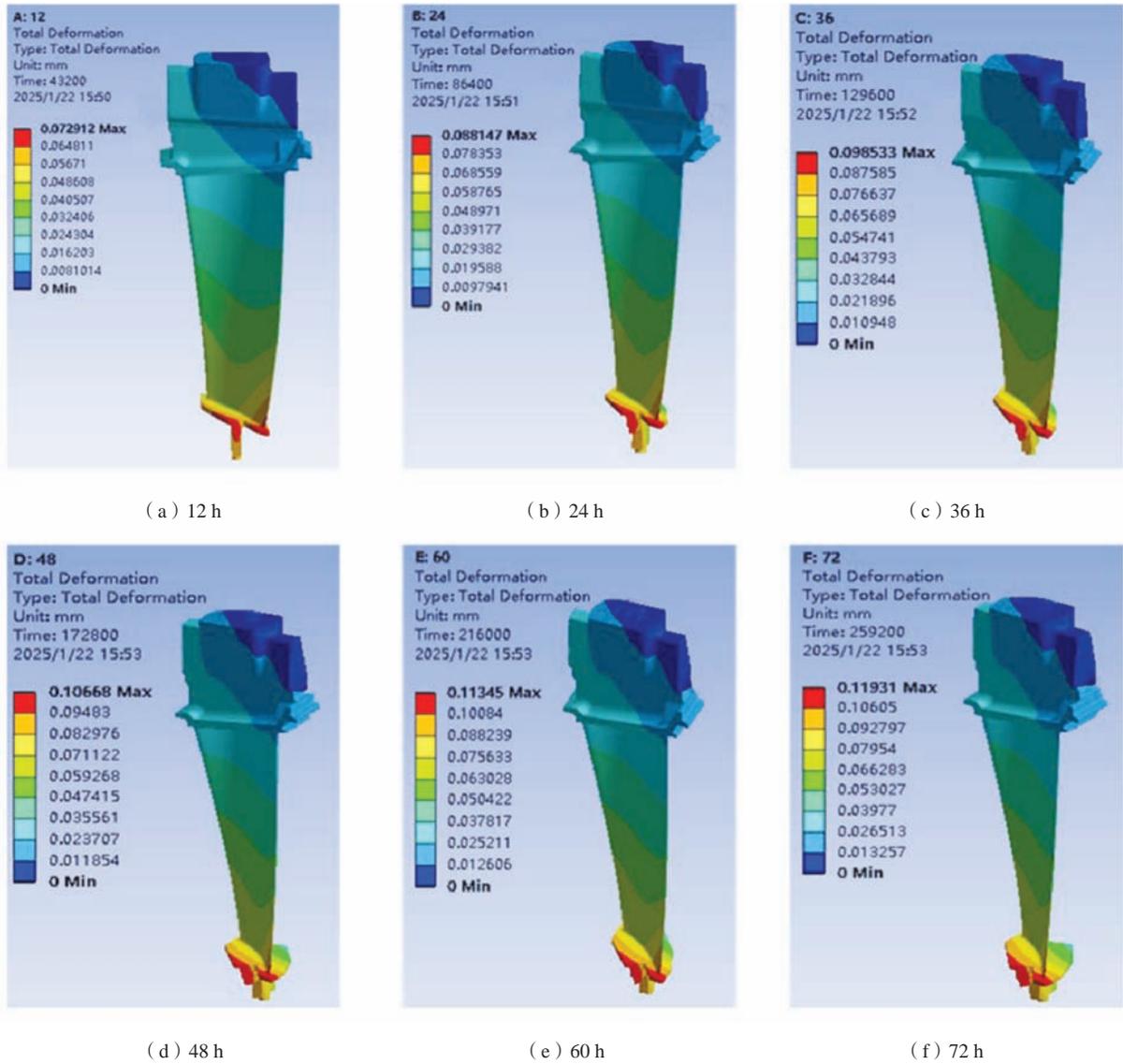


图6 蜡模竖直悬挂时的蠕变形变量等值线图

Fig. 6 Contour plots of creep deformation for vertically suspended wax patterns.

模存放阶段由于蠕变所产生的变形。

图7为蜡模竖直悬挂时的蠕变随时间变化图，图中除蠕变与图6略有区别外，曲线大概趋势与图5曲线基本一致。且蠕变最大值未超过0.007，表明该模拟结果的数据可靠性较高。

当选择竖直放置方式存放蜡模时，由于蜡模均由人工放置，很有可能会存在一定的角度误差。因此，对于不同角度放置的蜡模蠕变过程也进行了模拟。图8 (a)为蜡模的载荷及坐标轴示意图（以45°为例）。图8 (b)为模拟所得的蜡模在X、Y和Z轴方向上的蠕变形变量随角度变化的曲线图。当放置角度为0°时，Z轴方向的形变量的绝对值为0.073 793 mm，X和Y轴方向的形变量均等于0，此时蜡模由于蠕变而产生的变形仅为收

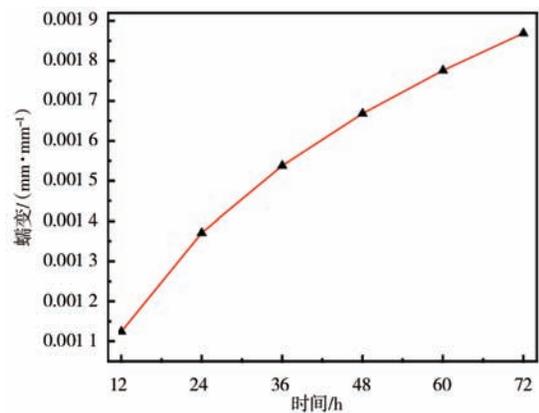
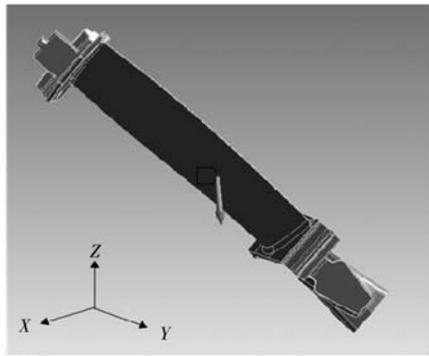
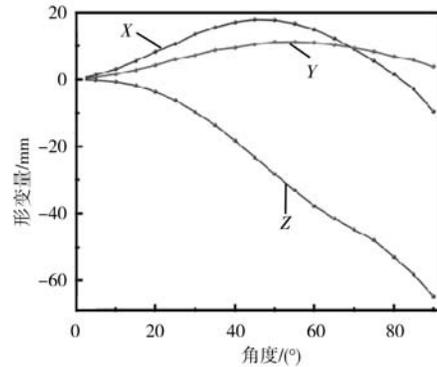


图7 蠕变随时间变化的曲线图（竖直悬挂）

Fig. 7 Plot of creep as a function of time (vertical suspension)



(a) 蜡模45°放置时的坐标轴和载荷示意图



(b) 蜡模在不同方向上的蠕变形变量随角度变化的曲线图

图8 蜡模在不同角度下的蠕变行为

Fig. 8 Creep behavior of wax pattern at different angles

缩变形。当角度逐渐增大时，蠕变从主要使蜡模收缩逐渐转变为使蜡模弯曲，且弯曲程度逐渐增大，当角度为45°时，Z向变形的绝对值为23.247 mm。

从图8(b)中还可得知当放置角度略微增大，蜡模的形变量便迅速增加。因此，为了探究蜡模的蠕变形变量与放置角度之间的关系，对二者进行了拟合，拟合方程为：

$$y = a \cdot x^b \quad (2)$$

式中： a 和 b 为常数， x 和 y 分别表示放置角度和形变量。

拟合所得曲线如图9所示，并获得了 a 和 b 的值，分

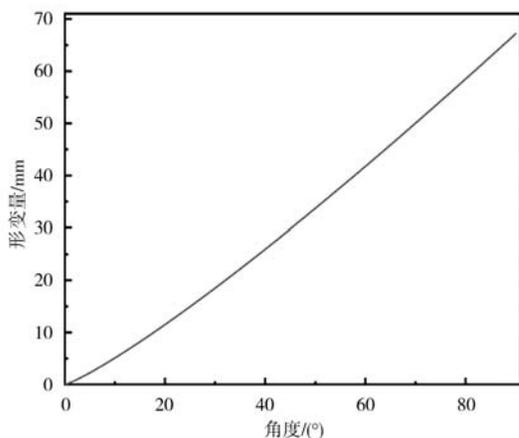


图9 蠕变形变量随蜡模放置角度变化的拟合曲线

Fig. 9 Fitted curve of creep deformation versus placement angle for wax patterns.

别为0.341 45和1.173 8，相关系数 R^2 为0.995 28。依据所得方程和产品尺寸公差（ ± 0.25 mm），可以计算得到形变量恰好为尺寸公差时的放置角度，角度约为1°。这表明当放置角度仅为1°时，仅蜡模存放过程产生的形变量便已达到产品尺寸公差极限。因此，为了保证蜡模的尺寸精度，当采用竖直放置方式存放蜡模时，应尽量避免蜡模偏离竖直方向。依据角度为1°时的形变量和蜡模初始尺寸获得了该角度的蠕变为0.000 34，要远小于0.007。因此，可依据该模拟结果来指导蜡模摆放。

3 结论

(1) 通过简易试样在不同应力作用下的蠕变试验，建立了时间硬化（Time Hardening）蠕变方程，获得了模拟所需的硬化回归系数以及相关的材料性能。

(2) 对比了长时间应力作用下，通过模拟和试验分别获得的蠕变结果。结果表明，当蠕变较小时（ <0.007 ），模拟结果与试验结果吻合度较高，模拟结果可以很好地反映实际情况。

(3) 使用Ansys软件对两种蜡模存放方式的蠕变过程进行了模拟，结果表明，采用竖直悬挂法的蜡模蠕变要略小于采用竖直放置法。因此，为了尽量减少蜡模在存放过程中的蠕变变形，竖直悬挂法显然为更优的选择。而当采用竖直放置法时，为了保证蜡模的尺寸精度，应尽量避免蜡模偏离竖直方向。

参考文献：

- [1] 帅三三, 李石磊, 玄伟东, 等. 重型燃气轮机涡轮叶片材料及制造技术研究进展 [J]. 热力透平, 2022, 51 (3): 161-169.
- [2] 孔胜国. 大尺寸燃气轮机叶片的熔模铸造工艺 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1138-1141.
- [3] 赵代银, 杨功显, 曾洪, 等. 注塑成型软件在燃机叶片蜡模成型过程中的应用 [J]. 东方汽轮机, 2016 (4): 46-49.
- [4] 伍赛特. 重型燃气轮机研究现状与技术发展趋势展望 [J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32 (2): 65-67.

- [5] 崔慧然, 冯相如, 任建伟. 燃气轮机涡轮叶片制造工艺现状及发展方向 [J]. 铸造, 2022, 71 (2): 143-150.
- [6] 谭巍, 金文光. 重型燃机涡轮叶片精铸工艺研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 377-380.
- [7] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (9): 38-52.
- [8] KUMAR P, AHUJA I, SINGH R. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting—a review [J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2012, 3 (3-4): 204-227.
- [9] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (11): 2332-2348.
- [10] 赵恒义. 熔模铸造废弃型壳再生利用技术进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (12): 1711-1716.
- [11] 陈冰. 熔模铸件的尺寸稳定性和精度 [J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (1): 53-56.
- [12] 张振宇, 梁补女. 制模过程中影响铸件尺寸精度的因素 [J]. 机械研究与应用, 2002 (2): 15-16.
- [13] 刘畅辉. 复杂薄壁件熔模铸造误差流建模与稳健控制方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [14] 周乐尧, 汪东红, 刘淑梅, 等. 大尺寸燃气轮机叶片蜡模注射成型与尺寸精度控制 [J]. 铸造, 2023, 72 (6): 641-647.
- [15] 韩昌仁, 柴增田, 王贵. 熔模精密铸造蜡模充型过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (3): 38-39.
- [16] ZHANG D H, JIANG R S, LI J L, et al. Cavity optimization for investment casting die of turbine blade based on reverse engineering [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48: 839-846.
- [17] DONG Y, ZHANG D, BU K, et al. Geometric parameter-based optimization of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57: 1245-1258.
- [18] SABAU A S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37: 131-140.
- [19] BONILLA W, MASOOD S, IOVENITTI P. An investigation of wax patterns for accuracy improvement in investment cast parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18: 348-356.
- [20] 陈欣然. 基于ansys软件的沥青混合料蠕变变形规律研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4 (18): 15-16.

Research on Creep Behavior of Heavy-Duty Gas Turbine Blade Wax Pattern Based on Ansys Software

ZHANG Jun-wen¹, ZHAO Dai-ying², LI Ding-jun², ZHANG Qiong-yuan², ZHANG Jie¹

(1. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Dongfang Electric Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:

During the storage process, wax patterns will creep due to the effect of gravity, leading to dimensional inaccuracy in both wax patterns and subsequent turbine blades. Therefore, investigating the creep behavior of wax patterns during storage process and reducing their creep deformation are of critical importance for controlling the dimensional accuracy of turbine blades. In this paper, creep tests were first performed on wax-filled specimens using a DMA and Time Hardening creep equation was derived. Subsequently, finite element analysis software Ansys was employed to simulate the experimental process. The simulation results were compared with experimental data to validate the accuracy of the creep constitutive equations. Finally, the creep process of the wax patterns under different storage methods was simulated, and the creep change with time of wax patterns under different storage methods were obtained. The results show that the creep of the wax patterns stored in vertical hanging method is slightly less than that in vertical placement method. When storing the wax patterns in vertical placement method, in order to ensure the dimensional accuracy of the wax pattern, the axis of it should be kept parallel to the vertical direction as much as possible.

Key words:

turbine blade; wax pattern; creep; finite element simulation; Ansys