

考虑接触热阻的非连续转子快速启动热分析

徐 宁^{1,2}, 王庆超¹, 王震林¹, 刘占生¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶重工集团公司 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 哈尔滨 150078)

摘 要: 针对燃气轮机转子非连续性的结构特点,通过考虑粗糙表面的接触热阻,建立了螺栓联结结构的热-结构耦合分析模型。研究了快速启动过程中轮毂间接触面上的温度分布及最大应力的变化规律,并分析了表面粗糙度和预紧力等接触参数对接触面间的温度分布、拉紧力及最大应力的影响。结果表明:热冲击下粗糙表面间的接触热阻对接触面的温度分布及最大应力影响明显,接触参数对螺栓联结结构的温度场、应力场及热变形特性影响较大。研究成果可为燃气轮机转子设计、热致振动分析及故障诊断提供理论依据。

关 键 词: 非连续转子; 接触热阻; 螺栓联结结构; 快速启动; 热-结构耦合

中图分类号: V231.9; O343.3; TK472

文献标志码: A

Thermal analysis for fast start up of non-continuous rotor considering thermal contact resistance

XU Ning^{1,2}, WANG Qingchao¹, WANG Zhenlin¹, LIU Zhansheng¹

(1. School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Boiler and Turbine Institute,

China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150078, China)

Abstract: The thermal-structure coupling analysis for bolted connection was modeled according to the structural features of non-continuous rotor, taking thermal contact resistance of rough surface into account. The time-varying relationship of temperature distribution and maximum stress during the fast start-up of the turbine was investigated. The influence of contact properties, such as roughness and pre-tightened force, on temperature distribution, tensioning force and maximum stress was analyzed. Results indicated that, the thermal contact resistance had great influence on temperature distribution of contact surface and maximum stress of bolted connection under the thermal impact, the contact property had influence on temperature distribution, deformation distribution and maximum stress. The research provides theoretical basis for the design of gas turbine, contributing to the analysis of thermally induced vibration and fault diagnosis.

Key words: non-continuous rotor; thermal contact resistance;

bolted connection structure; fast start up; thermal-structure couple

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 青年科学基金(11602071)

作者简介: 徐宁(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事燃气轮机结构设计、强度振动及转子动力学方面的研究。

引用格式: 徐宁,王庆超,王震林,等. 考虑接触热阻的非连续转子快速启动热分析[J]. 航空动力学报,2017,32(12):2896-2902. XU Ning, WANG Qingchao, WANG Zhenlin, et al. Thermal analysis for fast start up of non-continuous rotor considering thermal contact resistance[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2896-2902.

非连续性结构被广泛用在燃气轮机转子中,多数燃气轮机转子具有螺栓联接结构,其转子的各级轮毂和转轴通过多个周向均布的螺栓拉紧固定在一起工作。在热载荷作用下,热变形对螺栓联接结构有重要影响。如英国罗-罗(R-R)公司某型航空发动机在试验中出现了由于热变形导致发动机螺栓联接结构预紧力不足,导致发动机气流压力和温度突变,转子发生分离现象;美国海军 LM2500 型燃气轮机在运行工况快速变化时,由于转子部件热膨胀不一致,导致已经热变形的转子再启动时产生较大的振动,同时较大的热载荷使得紧配螺栓的接触面出现位移及脱离,破坏了转子对中度及不平衡等级,产生刮磨损害^[1]。显然,燃气轮机转子间的螺栓联接及其接触问题,是非连续性转子的热特性和动力学特性的研究重点。

接触热阻(或接触热导率)是粗糙表面的重要接触特性,这方面研究曾经一直是传热学界的热点,目前已经引起其他领域学科的关注^[2]。国外学者对螺栓联接结构的接触热阻特性研究有:通过有限元法分析螺栓联接受到热载荷后,由于接触热阻的影响导致其机械性能和热性能的变化,并提出用来计算螺栓联接的机械应力和热应力的简便热接触系数经验公式^[3-4];或采用迭代法研究螺栓联接结构的接触阻热^[5]等。拉紧力作为螺栓联接中重要的接触参数对接触特性及转子动力学特性影响较大,可以认为在拉紧力足够大的时候,螺栓联接转子则可视作整段的连续性转子^[6];而当拉紧力不够时,燃气轮机的各工况温度和压力都将受到松弛轮毂的影响^[7]。目前,国内在接触热阻对非连续性转子的影响方面研究不足,缺乏考虑接触参数及快速启动热冲击载荷对转子螺栓联接结构的影响研究,各科研单位在燃气轮机方案设计时也多忽视了非连续性结构间的接触特性的影响。

加拿大 Waterloo 大学的 Yovanovich 的研究小组在粗糙表面的传热研究做了大量的理论和实验工作^[8-12],为接触热阻研究奠定基础。本文考虑实际燃气轮机转子非连续结构联接的接触特点,根据 Yovanovich 关于接触热阻的研究理论^[8]引入了转子非连续结构的接触热阻分析模型,建立转子非连续结构的热分析模型,研究燃气轮机转子在快速启动过程中,热冲击对螺栓联接结构的热特性和接触特性的影响规律,并考虑机械-热接触耦合作用,分析热冲击条件下接触参数对非

连续结构的温度场分布特性、应力场变化和热变形特点等的影响规律。为合理制定燃气轮机转子的设计方案、掌握控制非连续转子热致振动现象机理提供借鉴。

1 粗糙表面的接触热阻模型

粗糙表面的接触将会对热导率产生一个阻抗作用。接触热阻或接触热导率是一个复杂的问题,它与接触压力、粗糙表面的形貌、材料属性和空隙之间的物质等等有关。许多接触热导率模型曾被提出并通过试验验证。文献[8]中的简单形式分析模型

$$h_c = 1.25k_s \frac{m}{\sigma} \left(\frac{p_c}{h_c} \right)^{0.95} \quad (1)$$

式中 k_s 是实体导热系数, σ 是表面粗糙度, p_c 是名义接触压力, h_c 称为接触微硬度,它与材料有关。粗糙表面的有效边界近似为: $0.216 \mu\text{m} < \sigma < 9.6 \mu\text{m}$, m 是粗糙表面的有效平均表面坡度值,近似等于

$$m = 0.125(\sigma \times 10^6)^{0.0402} \quad (2)$$

因此接触热导率可以通过式(2)及给定的 σ 、 p_c 和有关的材料属性获得。注意该模型也包括了接触空隙间的气体导热率,气体的导热率对于整个接触导热率的影响很小。

对于两个表面粗糙度不同的一致性螺栓联接,其表面粗糙度以及绝对平均粗糙斜度可以参照下式进行计算:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (3)$$

其中 σ_1 和 σ_2 是接触表面各自的表面粗糙度, m_1 和 m_2 是各自接触面的表面的有效平均表面坡度值,本文将主要采用该式来研究表面粗糙度和接触热阻之间的相互作用。

2 有限元模型以及边界条件

本文研究对象为燃气轮机轮毂间的典型螺栓联接,如图 1 所示。该结构较为复杂,不仅轮毂与法兰之间存在接触,螺栓与法兰表面,螺栓与螺栓孔之间也存在接触现象。因此接触热阻不仅存在于轴向方向上,在螺栓孔位置上也有所体现,这将对螺栓孔附近的温度分布以及相应的应力分布带来影响^[13-14]。本文考虑接触热阻在转子启动过程中的影响,以该结构进行热-结构耦合分析模型,来研究转子非连续结构的温度、应力分布及变化规律。

分析模型选为某一级的轮毂处螺栓联接,由

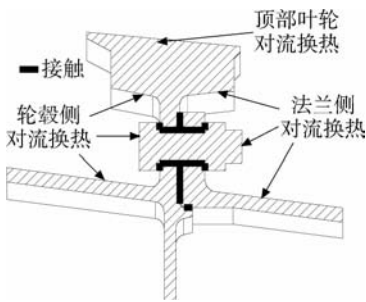


图 1 螺栓联接结构接触及边界条件示意图
Fig. 1 Schematic plot for contact of bolted connection and its boundary condition

于轮毂与法兰均为周期性对称结构,因此采用对称的扇区进行分析。结构中轮毂为高温侧,法兰盘为低温侧,边界条件分别为低、高温气流的对流换热,如图 1 所示。轮缘顶部也为对流换热,气流温度沿轴向线性变化。其余部分为封闭空腔,在转子启动过程中可视为绝热边界。

轮毂处的表面传热系数计算采用下面的经验公式确定:

$$h = Nu \cdot \frac{\lambda_c}{R_b} \tag{4}$$

$$Nu = \begin{cases} 0.675Re^{0.5} & Re < 2.4 \times 10^5 \\ 0.0217Re^{0.8} & Re \geq 2.4 \times 10^5 \end{cases} \tag{5}$$

顶部叶轮边缘的传热系数计算参照文献[15],由于计算过程较为繁琐,这里不再赘述。螺栓联接几何模型以及网格模型如图 2 所示。

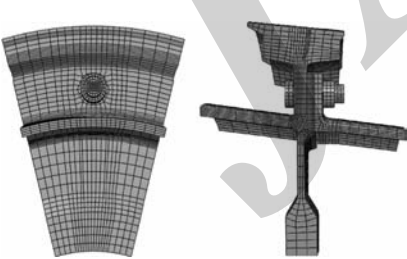


图 2 螺栓联接几何模型以及网格模型
Fig. 2 Geometry and mesh of bolted connection

3 转子启动过程分析

3.1 启动过程温度变化

非连续性转子启动过程中,转子由冷态开始,受到热冲击逐渐升温,由于各个部分升温速度不同膨胀量不同,结构会在热冲击、离心力以及螺栓约束力下产生变形。在非连续性转子中,影响温度分布的主要因素是轮毂与法兰连接的接触热

阻,进而影响结构的热变形,改变应力,因此需要首先考察启动过程中接触表面的温度以及温差分布。

图 3 为接触表面点温度随时间变化图,在 0~100 s 内,由于启动初始时法兰与轮毂温度较低,高温气体将迅速加热使得轮毂温度升高。随后由于轮毂温度逐渐升高,温差减小,因此热流减小,升温速度减慢。经历大约 1 000 s,接触面基本达到热稳定,温度以及接触面温差基本保持恒定。

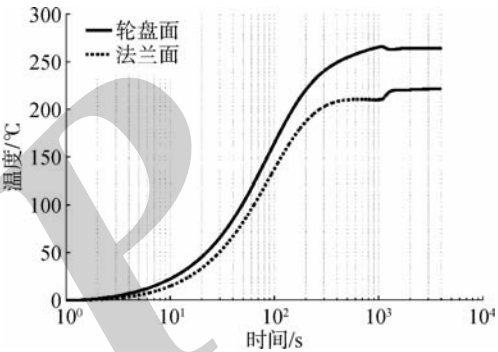


图 3 接触表面温度随时间变化
Fig. 3 Temperature on contact surface change with time

由于接触面是一个有螺栓联接的平面,某一点的情况难以反映整个接触面温度的变化规律,因此分别选取启动过程中 1.7、135、400 s 以及 1 000 s 时刻,研究此时轮毂与法兰表面的温度分布以及温差和接触压力的关系,如图 4 所示。

从图 4 可知,转子在启动初始时期,轮毂与法兰温度很低,气流温度较高,热量通过气流传递给结构表面,并通过轴向和径向向结构内部进行传热。由于内壁面为近似的封闭腔体,没有热量来源,热量来自于其他部分的传热,因此启动初期轮毂与法兰在靠近内壁面接触面上的温度都较低,温差基本为零。从图 4(e)上也可看出,接触压力集中在螺栓周围,虽然该处表面的温差有明显减小,但初始时候轮毂与法兰的温度都较低,接触热阻作用不明显。

启动 135 s 后轮毂与法兰的表面温度逐渐升高,由于轮毂处气流温度要高于法兰处,因此轮毂面升温速率要高于法兰,故接触表面温差也在逐渐增大。此时温差较小的区域开始向螺栓孔附近集中,表明接触热阻对温差影响较为明显。由于发动机转子的内腔没有热气流直接流过,因此升温较慢。对比图 4(e)与图 4(f)也可以看出,接触压力集中区逐渐向外侧移动,这表明启动初期法

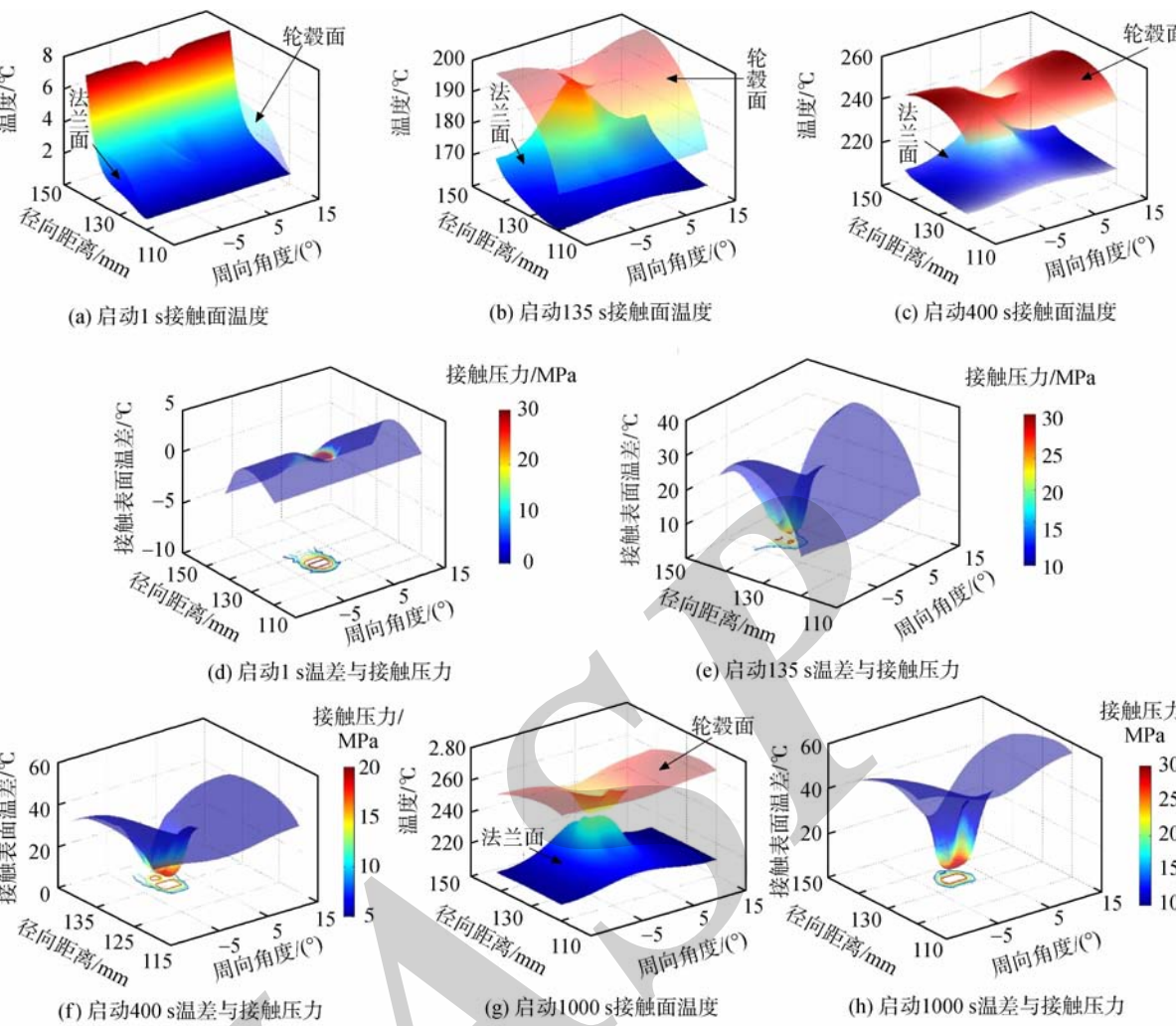


图 4 不同启动时刻接触面温度及接触压力分布

Fig. 4 Distribution of contact area temperature and contact pressure at different start up times

兰与轮毂外侧受气流加热,温度较高,接触侧温度较低,因此热量传递方式是从外至内,轴向温度梯度在接触面两侧符号相反,使得轮毂与法兰的热变形不一致,因而接触位置发生变化。启动 400 s 后,轮毂与法兰温度都已经较高,此时热量主要由轮毂侧向法兰侧传递,不一致的热变形减小。启动 1000 s 后,整个结构基本达到热稳定,最小温差出现在接触应力最大的位置,即螺栓联接附近,最大温差出现在远离螺栓联接的中部位置。

3.2 启动过程应力变化

非连续转子由于螺栓联接的存在,整个启动过程中应力大小与位置都有着较大的变化,应力最大的位置主要在轮毂侧螺栓孔侧壁面,如图 5 所示,下面考察启动过程中该点的应力变化情况。

从图 6 可以看出,最大应力随时间表现为先增大再减小,最后达到稳定。该点应力较大的原因是由于轮毂受热产生如图 5 所示热变形,因此

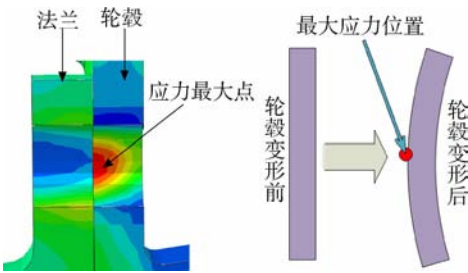


图 5 最大应力及轮毂变形示意图

Fig. 5 Schematic plot of hub deformation and maximum stress

在变形外侧产生较大应力。将最大应力点应力随时间变化规律与图 5 所示轮毂变形量对比发现,该应力与变形的规律是一致的;同时对比图 6 与图 3 可以看出,应力最大的时刻恰好是接触面温度升高最快的时刻,表明该最大应力主要是结构热变形所引起的。

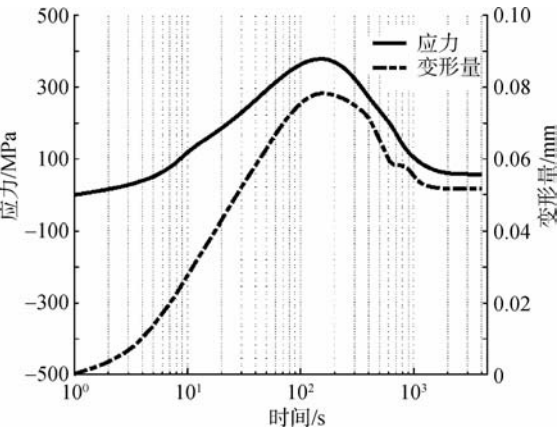


图 6 最大应力点应力与变形随时间变化关系
Fig. 6 Stress and deformation of maximum stress point change with time

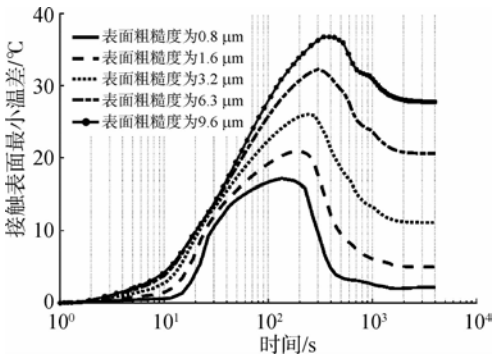


图 8 不同表面粗糙度下接触表面最小温差变化
Fig. 8 Minimum temperatures difference on contact surface change with different surface roughnesses

4 接触特性影响分析

4.1 表面粗糙度的影响

在非连续性转子中,影响结构性能的两个主要因素分别是表面粗糙度以及螺栓的拉紧力。表面粗糙度影响了非连续轮毂与法兰之间的接触热阻,从而影响结构温度以及螺栓拉紧力变化规律。而预紧力直接决定了初始接触压力的大小,从而影响了结构的温度以及拉紧力。因此需要研究表面粗糙度以及螺栓预紧力对结构温度以及拉紧力的影响规律。

如图 7 和图 8 所示,接触表面的最大温差位置变化规律与最小温差位置变化规律类似,存在接触温差先增加后降低的情况,且表面粗糙度越大,接触表面的最大温差也越大。稳定时温差与表面粗糙度关系也近似于线性,由于三维结构中存在径向和周向导热,温差有所降低。

为研究表面粗糙度对螺栓拉紧力的影响,将

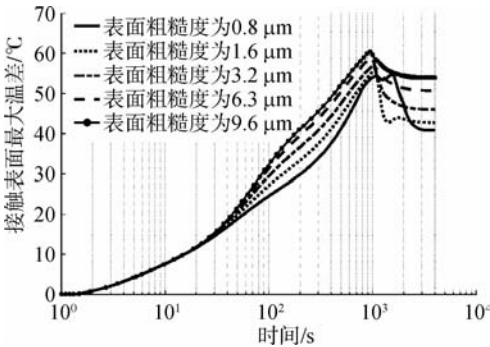


图 7 不同表面粗糙度下接触表面最大温差变化
Fig. 7 Maximum temperatures difference on contact surface change with different surface roughnesses

螺栓拉紧力做了无量纲处理。从图 9 可以看出,在各个表面粗糙度条件下,螺栓的最终拉紧力均小于初始的预紧力。各个表面粗糙度下螺栓拉紧力变化规律基本一致,在热稳定后,不同表面粗糙度下螺栓拉紧力趋于一致。

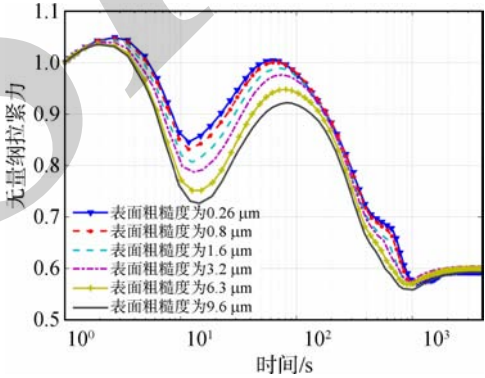


图 9 不同表面粗糙度下拉紧力随时间变化
Fig. 9 Tension force change with time with different surface roughnesses

0~10 s 内转子转速由 0 r/min 上升到 8 000 r/min,螺栓在离心力作用下与螺栓孔发生接触,抵消部分螺栓力,因此拉紧力出现下降。在 10~100 s,螺栓拉紧增加是由于轮毂与法兰的非一致热变形使得接触面出现分离的趋势,螺栓作为约束受到了额外的拉紧力。此后轮毂与法兰的温度梯度趋于一致,螺栓受到的额外拉紧力降低,因此螺栓拉紧力减小。

从图 10 可以看出,最大应力随表面粗糙度的增加而增大,由于表面粗糙度的增加会使得接触面温差增加,高温侧温度升高,低温侧温度降低,由温差引起的热变形量增加,使得最大应力升高。

4.2 螺栓预紧力的影响

除了表面粗糙度以外,影响表面接触热阻的

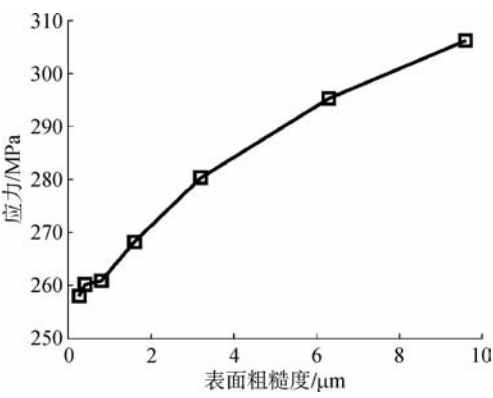


图 10 最大应力随表面粗糙度变化

Fig. 10 Maximum stress change with surface roughness

另一个因素是名义接触压力,这里主要是螺栓的预紧力。因此需要研究不同预紧力下接触表面的温度分布以及螺栓拉紧力变化。

从图 11 可以看出,接触面最小温差随着预紧力的增加逐渐减小,减小幅度随预紧力增加而减小。接触面最大温差随预紧力增加没有明显的改变,这表明在螺栓联接中,预紧力仅影响螺栓附近的接触压力,因此在远离螺栓的位置上,预紧力对接触压力影响不大,因此最大温差没有显著改变。

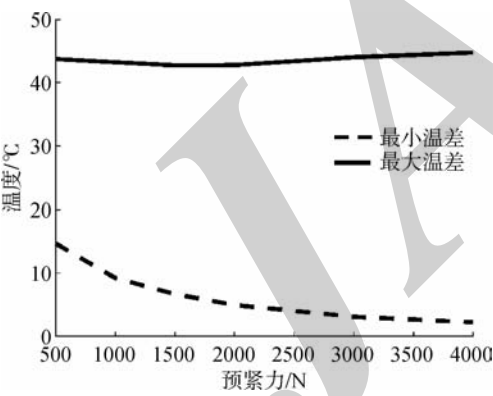


图 11 接触表面温差随预紧力变化

Fig. 11 Temperature difference on contact surface change with pre-tightening force

图 12 可以看出,不同预紧力下螺栓拉紧力变化趋势相似,在热稳定时,各个预紧力下的螺栓拉紧力也都小于预紧力,表明启动之后螺栓拉紧力会减小。从时间变化上来看,预紧力较小时,螺栓对法兰和轮毂的约束力较小,温度变化引起的变形较大,螺栓拉紧力变化较为剧烈,螺栓拉紧力可达到预紧力的 1.6 倍。预紧力较大时,螺栓约束了法兰和轮毂由于温度不同所引起的变形,螺栓的接触状态较为稳定,因此螺栓拉紧力变化幅值较小。

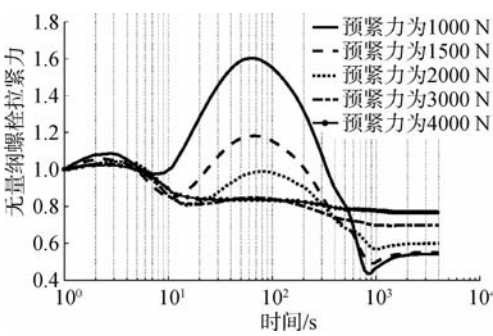


图 12 不同预紧力下螺栓拉紧力随时间变化

Fig. 12 Bolt tension force change with time under different pre-tightening forces

在达到热稳定时,无量纲螺栓拉紧力随着预紧力的增加而增加,这表明预紧力越大,受热后螺栓拉紧力减小的幅度也就越小,如图 13 所示。

从图 14 可以看出,螺栓处的最大应力随预紧力呈现先增大后减小的趋势,这表明预紧力对应力的影响较为复杂。一方面预紧力可以减小接触

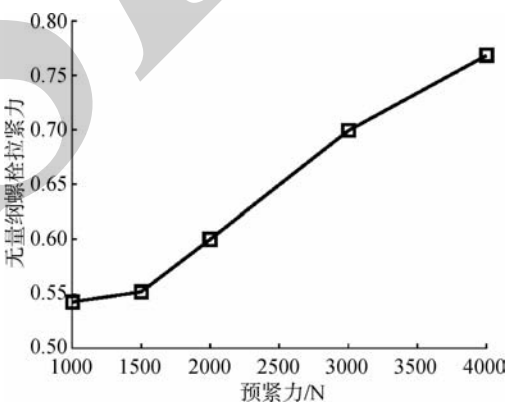


图 13 热稳定时预紧力与拉紧力关系

Fig. 13 Relation of pre-tightening force and tension force under thermal steady state

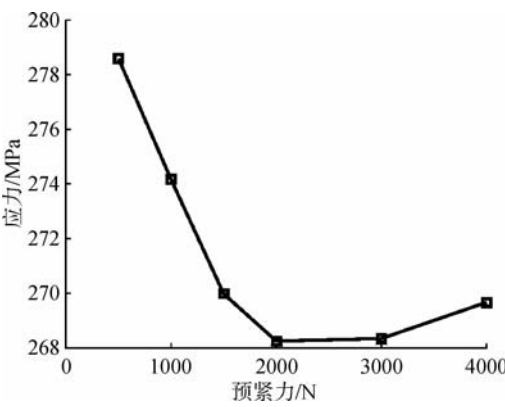


图 14 预紧力与最大应力关系

Fig. 14 Relations of pre-tightening force and maximum stress

热阻,减小接触面的温差从而使得热变形产生的热应力减小;另一方面,螺栓预紧力约束了结构在热载荷作用下的自由变形,从而使得螺栓附近的机械应力增大,因而总应力增大。

5 结 论

本文根据燃气轮机转子非连续性结构特点,在考虑了粗糙表面接触热阻的情况下,研究了典型的螺栓联结结构在转子快速启动过程中接触表面的温度分布及最大应力的变化规律;同时分析了表面粗糙度及预紧力对接触表面温度及拉紧力的影响规律,结论如下:

1) 在转子启动过程中,接触面上的温度逐渐升高,温度升高速率随着轮毂与空气温差的减小而减小;接触面上的接触压力是影响温差分布的主要原因,接触压力越大,温差越小;最大应力的变化与温度变化趋势一致,表明转子启动过程中的应力主要是热应力。

2) 表面粗糙度对接触表面的温差有着明显的影响,表面粗糙度越大,接触面上的最大最小温差都将减小;不同表面粗糙度下,螺栓拉紧力均小于预紧力,但变化不明显;表面粗糙度越大,启动过程中结构的最大应力也将增大。

3) 预紧力对接触面上的最小温差有着明显影响,预紧力越大,最小温差越小,但对接触面上的最大温差影响不明显。此外随着预紧力的增加,无量纲螺栓拉紧力将增加,启动过程中螺栓拉紧力的波动也将减小;预紧力对启动过程的最大应力也有影响,当预紧力较小时,增加预紧力可以减小启动过程中的最大应力。当预紧力较大时,增加预紧力将使得启动过程中的最大应力增加。

参考文献:

- [1] THOMPSON B D, GROBLER J. Development US Navy gas turbine vibration analysis expertise; LM2500 vibration and trim balance[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo; Turbine Technical Conference and Exposition, Copenhagen, Denmark; American Society of Mechanical Engineers, 2012:243-253.
- [2] 王安良,赵剑锋.接触热阻预测的研究综述[J].中国科学(技术科学),2011,41(5):545-556.

WANG Anliang, ZHAO Jianfeng. Review of prediction for

thermal contact resistance[J]. Science China(Technologica), 2011, 41(5):545-556. (in Chinses)

- [3] FUKUOKA T. Finite element analysis of the thermal and mechanical behaviors of a bolted joint[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(4):402-407.
- [4] FUKUOKA T, NOMURA M, SHINO K. Analysis of heat flow around bolted joints and variations of axial bolt force[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers; Part A, 2007, 131(6):171-176.
- [5] THOMPSON M K. A multi-scale iterative approach for finite element modeling of thermal contact resistance[D]. Cambridge:Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [6] LU M, GENG H, XU G, et al. Analytical and experimental study of dynamic characteristics of rod fastened rotor-bearing system under preload saturation[R]. ASME Paper GT2003-95397, 2003.
- [7] ALBAN C, TOLSTYKH M, HILTY D, et al. Characterizing compressor rotor unclamp in a gas turbine engine[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo; Turbine Technical Conference and Exposition, Copenhagen, Denmark; American Society of Mechanical Engineers, 2012: 1083-1087.
- [8] YOYANOVICH M M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(2):182-206.
- [9] YOYANOVICH M M, CULHAM J R, TEERTSTRA P. Calculating interface resistance[J]. Electronics Cooling, 1997, 3(2):24-29.
- [10] YÜNCÜ H. Thermal contact conductance of nominally flat surfaces[J]. Heat and mass transfer, 2006, 43(1):1-5.
- [11] BAHRAMI M, YOYANOVICH M M, CULHAM J R. Thermal joint resistances of conforming rough surfaces with gas filled caps[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3):318-325.
- [12] SRIDHAR M R, YOYANOVICH M. Review of elastic and plastic contact conductance models; comparison with experiment[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1994, 8(4):633-640.
- [13] ZHANG Y, DU Z, SHI L, et al. Determination of contact stiffness of rod-fastened rotors based on modal test and finite element analysis[J]. Planta, 2010, 132(9):275-282.
- [14] HE P, LIU Z, WANG G, et al. Rotor dynamic analysis of tie-bolt fastened rotor based on elastic-plastic contact[R]. ASME Paper GT2011-45796, 2011.
- [15] 丁有宇,周宏利.汽轮机强度计算[M].北京:水利电力出版社,1985.

(编辑:王碧珩)