

基于不同启动方式的1 000 MW超超临界汽轮机 高温部件低周疲劳损耗研究

崔传涛,刘岩,初希,李国庆

(中电华创电力技术研究有限公司,江苏苏州215123)

摘要:为了解汽轮机寿命损耗情况,对汽轮机高温部件寿命影响因素进行分析。基于低周疲劳理论,建立汽轮机高温部件寿命损耗分析模型,采用定量计算方法分析1 000 MW超超临界机组冷态、热态启动方式下高温部件温度偏差变化情况,计算各边界条件下高温部件等效热应力及寿命损耗,并进行敏感性分析。结果表明:汽轮机低周疲劳寿命损耗率对高温部件温度偏差较为敏感,随着温度偏差的升高,汽轮机寿命损耗率大幅升高;相同的温度偏差出现在不同温度区间时,对汽轮机寿命损耗的影响亦不同,高温区间的温度偏差对寿命损耗率影响较大。汽轮机高温部件寿命评估可以为机组启动期间升温速度控制提供技术支持,降低汽轮机寿命损耗,提高机组运行安全性。

关键词:汽轮机;高温部件;热应力;寿命;低周疲劳

中图分类号:TK262

文献标识码:B

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.003

[引用本文格式]崔传涛,刘岩,初希,等.基于不同启动方式的1 000 MW超超临界汽轮机高温部件低周疲劳损耗研究[J].热能动力工程,2023,38(8):21-26. CUI Chuan-tao, LIU Yan, CHU Xi, et al. Research on low cycle fatigue loss of high temperature components of 1 000 MW ultra-supercritical steam turbine based on different start-up modes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 21-26.

Research on Low Cycle Fatigue Loss of High Temperature Components of 1 000 MW Ultra-supercritical Steam Turbine based on Different Start-up Modes

CUI Chuan-tao, LIU Yan, CHU Xi, LI Guo-qing

(China Power Hua Chuang Electricity Technology Research Co., Ltd., Suzhou, China, Post Code: 215123)

Abstract: In order to understand the life loss of steam turbine, the influencing factors of the life of high temperature components of steam turbine were analyzed. Based on the theory of low cycle fatigue, life loss analysis model of high temperature parts of steam turbine was established, quantitative calculation method was used to analyze the change condition of the temperature deviation of high temperature components of 1 000 MW ultra-supercritical unit under cold state and hot state startup modes, high temperature components equivalent thermal stress and life loss were calculated under each boundary condition to carry out the sensitivity analysis. The results show that the low-cycle fatigue life loss rate of the turbine is sensitive to the temperature deviation of the high-temperature components, and the life loss rate of the turbine increases significantly with the increase of the temperature deviation; when the same temperature deviation occurs in different temperature intervals, the influence on the life loss of the turbine is also different, and the temperature deviation in the high temperature interval has a great influence on the life loss rate. Life evaluation of high-temperature components of steam turbine can provide technical support for temperature

收稿日期:2022-09-07; 修订日期:2022-10-10

基金项目:国家电力投资集团公司2021年科技项目(ZGDL-KJ-2021-017)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of State Power Investment Group Corporation in 2021 (ZGDL-KJ-2021-017)

作者简介:崔传涛(1982-),男,中电华创电力技术研究有限公司高级工程师。

rise rate control during unit start-up, reduce turbine life loss, and improve unit operation safety.

Key words: steam turbine, high temperature components, thermal stress, life, low cycle fatigue

引 言

随着新能源电力系统不断推进,燃煤发电机组启停更加频繁,机组启停过程中高温部件因温度偏差产生交变热应力而造成寿命损伤,影响机组安全运行^[1-2]。因此,有必要对机组不同启动方式下汽轮机高温部件低周疲劳损耗进行研究,定量分析温度偏差对寿命的影响,为机组安全运行提供数据参考。

行业内相关研究文献通过有限元模拟计算温度场及应力场,分析汽轮机转子寿命损耗情况^[3-4],仿真计算具有重要的参考价值,但未进行定量分析,亦未考虑温度偏差对汽轮机调门、外缸等高温部件寿命损耗的影响。

为定量研究机组不同启动方式对寿命损耗的影响,本文结合 1 000 MW 机组启动案例,根据高温部件温度偏差变化,通过计算热应力、应变及致裂周次,获得低周疲劳寿命损耗率。汽轮机寿命损耗计算有助于加强预期寿命管理,减少寿命损耗,提高机组运行安全性^[5-6]。

1 汽轮机寿命理论

1.1 低周疲劳理论

汽轮机设计寿命一般为 30 年,根据制造厂提供的寿命管理曲线,寿命损耗分配 80% 左右,其余 20% 以备突发性事故。汽轮机寿命管理普遍采用无裂纹寿命的概念。无裂纹寿命是指从机组正式投入运行到出现第 1 条宏观裂纹为止总的运行时间^[7-9]。汽轮机寿命分配取决于汽轮机的结构和使用特点、启停次数、启停方式、工况变化及甩负荷带厂用电的次数等,需要根据不同机型及其运行方式进行分配^[10-12]。研究表明,低周疲劳是导致汽轮机高温部件产生裂纹的主要原因。

热应力是指温度改变时,物体由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束,使其不能完全自由胀缩而产生的应力,又称变温应力。引起热应力的根本原因是温度的变化。

机组启动过程中,汽轮机高温部件表面温度高、

内部温度低,在表面产生压应力、内部产生拉应力;机组停运过程中,高温部件表面产生拉应力、内部产生压应力;高温部件表面承受压应力、拉应力的交变循环热应力^[13]。机组启动过程中蒸汽温度变化过快或受到热冲击,易导致循环应力峰值接近甚至超过材料的屈服强度,发生塑性形变及疲劳寿命损耗。因此,机组启动过程中汽缸、转子等核心高温部件的寿命损伤与启动方式密切相关。

1.2 热应力计算

机组启动时,汽轮机转子、阀门等高温部件处于表面持续加热、热量向内部传导的换热状态。由于厚壁金属部件自身内部温度梯度的存在,从而产生热应力。根据热弹性理论,厚壁部件的名义热应力为:

$$\sigma_{th} = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \times (T_m - T_{surf}) \quad (1)$$

式中: σ_{th} —名义热应力,MPa; α —线膨胀系数, K^{-1} ; E —材料弹性模量,MPa; T_m —质量加权平均温度,K; T_{surf} —转子外表面温度,K; μ —材料泊松比。

在热应力计算基础上,根据应力-应变曲线计算材料应变:

$$\varepsilon = \frac{(1 + \mu)\sigma_{th}}{1.5E} \quad (2)$$

式中: ε —材料应变。

根据材料应变与疲劳寿命之间的 $\varepsilon - N$ 曲线,计算得到致裂周次 N ,进而计算寿命损耗率:

$$d = \frac{1}{2N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: d —低周疲劳寿命损耗率,%; N —低周疲劳致裂周次。

2 高温部件温度变化趋势

机组启动过程中对汽轮机高温部件寿命的影响主要取决于蒸汽温度的变化幅度,温度波动使部件内部产生交变热应力,造成材料强度下降。

以某 1 000 MW 机组冷态启动、热态启动数据为例,分析机组启动过程中高温部件表面和内部的温度变化,并评估对汽轮机转子、汽缸、阀门造成的寿命损耗。以 24 h 为温度监测周期,分析部件温度

变化情况,通过计算部件内外温度差值,定量分析不同启动方式对汽轮机寿命的影响。

2.1 汽轮机高压转子

高压转子冷态启动转子体温度、转子表面温度及温差变化情况如图 1 所示。机组冷态启动情况下,汽轮机高压转子温度由 85 ℃ 升高至 580 ℃,转子表面温度高于转子体温度。温度升高幅度较大时,转子体温度与转子表面温度差值升高,启动过程中出现 4 次温差明显波动,最大温差为 57 ℃。

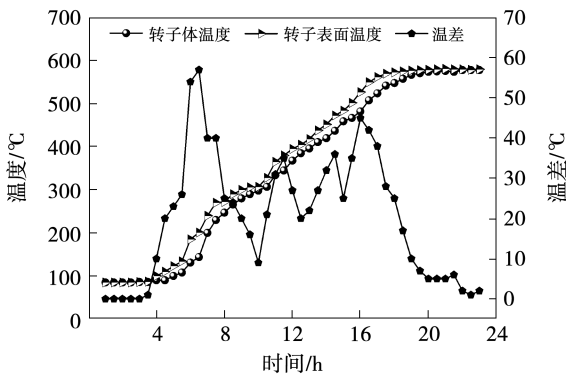


图 1 高压转子冷态启动温度变化情况

Fig. 1 Change of cold starting temperature of high pressure rotor

高压转子热态启动转子体温度、转子表面温度及温差变化情况如图 2 所示。

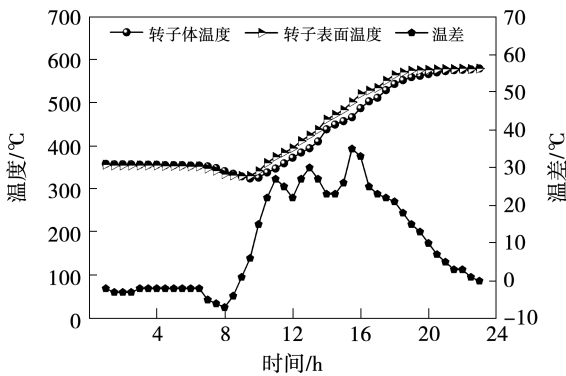


图 2 高压转子热态启动温度变化情况

Fig. 2 Change of hot starting temperature of high pressure rotor

机组热态启动情况下,汽轮机高压转子温度由 356 ℃ 升高至 580 ℃,大部分时间转子表面温度高于转子体温度,当温升缓慢时会出现转子表面温度

低于转子体温度的情况。高压转子温升时间较短,转子体温度与转子表面温度差值出现 3 次明显波动,最大值为 35 ℃。

2.2 汽轮机中压转子

中压冷态启动转子体温度、转子表面温度及温差变化情况如图 3 所示。机组采用中压缸进汽冷态启动,汽轮机中压转子温度由 75 ℃ 升高至 580 ℃,转子表面温度高于转子体温度。启动过程中分阶段升温,当温度升高幅度较大时,转子体温度与转子表面温度差值升高,启动过程中出现 3 次温差大幅度波动,最大温差为 83 ℃。

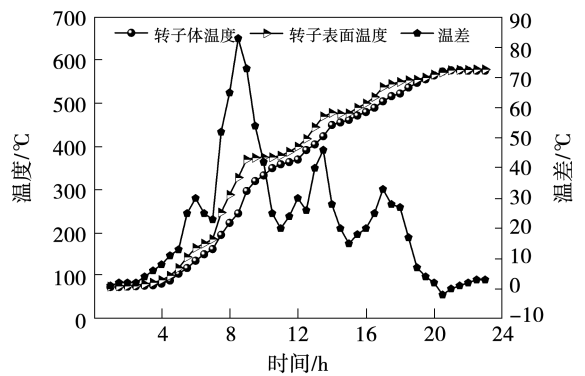


图 3 中压转子冷态启动温度变化情况

Fig. 3 Change of cold starting temperature of medium pressure rotor

中压转子热态启动转子体温度、转子表面温度及温差变化情况如图 4 所示。

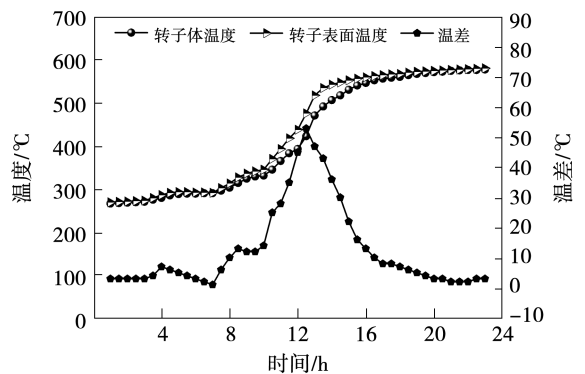


图 4 中压转子热态启动温度变化情况

Fig. 4 Change of hot starting temperature of medium pressure rotor

机组采用中压缸进汽热态启动,转子温度由

265 ℃ 升高至 580 ℃, 转子表面温度高于转子体温度。中压转子温升时间较短, 转子体温度与转子表面温度差值最大值为 53 ℃。

2.3 高压主汽门

高压主汽门冷态启动壳体 100% 深度、高压主汽门壳体 50% 深度金属温度及温差变化情况如图 5 所示。机组采用冷态启动, 汽轮机高压主汽门温度由 40 ℃ 升高至 590 ℃, 主汽门壳体 100% 深度金属温度高于壳体 50% 深度。启动初期温度升高幅度较大, 出现主汽门壳体温度偏差陡增现象, 过程中出现 5 次温度差值突增现象, 最大温差为 65 ℃。

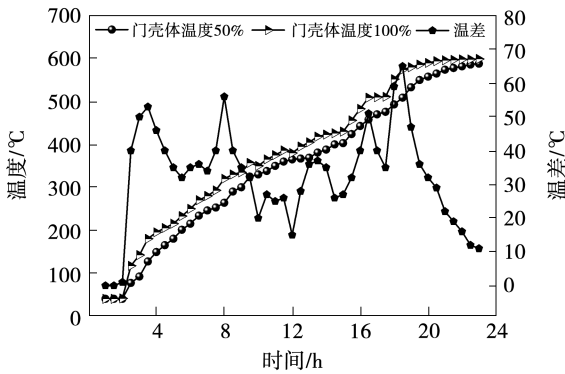


图 5 高压主汽门冷态启动温度变化情况
Fig.5 Change of cold starting temperature of high pressure main valve

高压主汽门热态启动壳体 100% 深度、高压主汽门壳体 50% 深度金属温度及温差变化情况如图 6 所示。机组采用热态启动, 高压主汽门温度由 40 ℃ 升高至 590 ℃, 主汽门壳体 100% 深度金属温度高于壳体 50% 深度金属温度。启动初期温度升高幅度较大, 出现主汽门壳体温度偏差陡增现象, 过程中出现 4 次温度差值波动现象, 最大温差为 49 ℃。

2.4 高压外缸

高压外缸冷态启动 100% 深度、高压外缸 50% 深度金属温度及温差变化情况如图 7 所示。机组采用冷态启动, 汽轮机高压外缸温度由 100 ℃ 升高至 525 ℃, 外缸 100% 深度金属温度高于 50% 深度金属温度。启动初期温度升高幅度较大, 出现外缸温度偏差陡增现象, 过程中出现 4 次温度差值突增现象, 最大温差为 65 ℃。

象, 最大温差为 54 ℃。

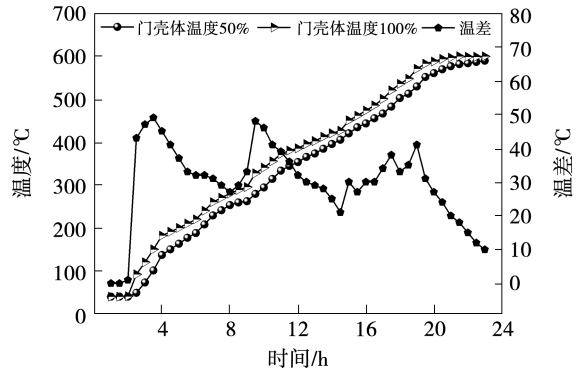


图 6 高压主汽门热态启动温度变化情况
Fig.6 Change of hot starting temperature of high pressure main valve

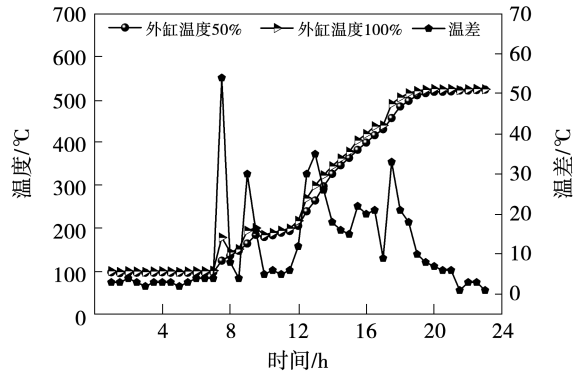


图 7 高压外缸冷态启动温度变化情况
Fig.7 Change of cold starting temperature of high pressure outer cylinder

高压外缸热态启动 100% 深度、高压外缸 50% 深度金属温度及温差变化情况如图 8 所示。机组采用热态启动, 高压外缸温度由 100 ℃ 升高至 525 ℃, 外缸 100% 深度金属温度高于 50% 深度金属温度。启动初期温度升高幅度较大, 出现外缸温度偏差陡增现象, 过程中出现 5 次温度差值波动现象, 最大温差为 43 ℃。

需要说明的是, 汽轮机冷态、热态启动过程中, 各高温部件温度监测周期为 24 h, 反映了不同启动方式、多次机组启动过程中温度变化情况, 起始时间并未绝对统一, 且暖机时间存在区别, 主要是监测机组启动过程中高温部件不同部位温度差值变化情况。

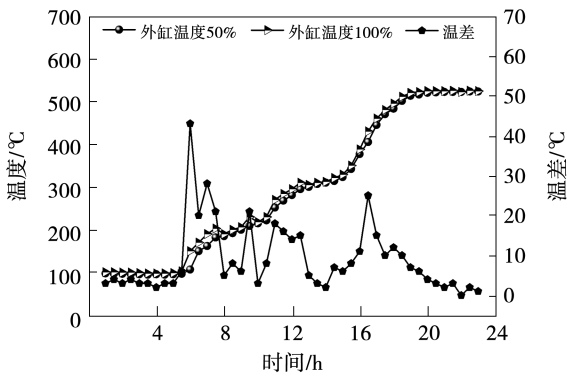


图 8 高压外缸热态启动温度变化情况

Fig. 8 Change of hot starting temperature of high pressure outer cylinder

3 寿命影响分析

3.1 寿命损耗计算

根据机组不同启动方式下高温部件温差变化情况,选取部件最大温差,通过式(1)计算高温部件名义热应力。机组启动过程中,部件内外温差出现多次波动,承受多次交替热应力。根据机组启动方式及部件类型的区别,分别计算多次交替热应力,得到等效热应力。

在已知高温部件等效热应力基础上,通过式(2)计算高温部件应变变量 ϵ 。根据材料对称循环下的应变-寿命曲线即 $\epsilon-N$ 曲线计算得到致裂周次 N ,进而计算机组单次启动的低周疲劳寿命损耗。计算结果如表 1 所示。

表 1 热应力计算结果

Tab. 1 Thermal stress calculation results

部件	启动方式	最大温差/ °C	等效热应力/ MPa	寿命损耗率/ 10 ⁻⁶
高压转子	冷态	57	416.60	463
	热态	35	250.50	3
中压转子	冷态	83	636.80	692
	热态	53	406.60	218
高压主汽门	冷态	65	523.50	7 616
	热态	49	367.70	133
高压外缸	冷态	54	460.90	205
	热态	43	363.50	8

可以看出:(1) 相比于热态启动,冷态启动对汽轮机低周疲劳寿命损耗更大;(2) 根据机械工程手册推荐的寿命分配数据,机组冷态启动的寿命损耗率为 0.05%/次,热态启动为 0.01%/次,不同高温

部件计算结果未超过机械工程手册推荐值;(3) 在机组启动过程中,避免升温速率过高、合理控制高温部件温差,可以有效降低汽轮机低周疲劳寿命损耗。

3.2 寿命损耗影响因素

机组启动过程中,高温部件内外温差变化对汽轮机低周疲劳寿命损耗有重要影响。以中压转子冷态启动过程为例,定量计算中压转子温度偏差对汽轮机寿命损耗率的影响,结果如表 2 所示。

表 2 中压转子冷态启动温差影响分析

Tab. 2 Analysis of influence of cold starting temperature difference of medium pressure rotor

最大温差/°C	计算热应力/MPa	寿命损耗率/10 ⁻⁶
45	133.74	57
50	160.71	122
55	176.79	412
60	192.86	1 219
65	208.93	3 374

可以看出,随着中压转子内外温差升高,转子计算热应力、汽轮机低周疲劳寿命损耗率同步升高,转子温度由 45 °C 升高为 50,55,60 和 65 °C 时,汽轮机寿命损耗率分别升高 113%, 617%, 2 022% 和 5 771%。汽轮机寿命损耗受部件温差影响较为明显,在机组启动过程中应控制升温速率,使部件温差低于 50 °C。

机组启动过程中,不同阶段温度提升速率有所区别,同一温度偏差出现在高温区和低温区对汽轮机低周疲劳寿命损耗亦不同。以高压转子冷态启动为例,计算最大温差在不同温度区间对汽轮机低周疲劳寿命损耗率的影响,结果如表 3 所示。

表 3 高压转子冷态启动 50 °C 温差时影响分析

Tab. 3 Analysis of influence of cold starting temperature difference of 50°C of high pressure rotor

温度/°C	计算热应力/MPa	寿命损耗率/10 ⁻⁶
100	163.83	55
200	162.96	76
300	161.51	109
400	158.67	152
500	153.71	204

可以看出,高压转子相同温差分别出现在 100 ~ 500 °C 区间时,高压转子热应力降低、汽轮机低周疲劳寿命损耗率升高。当转子温度由 100 °C 升高至 200, 300,400 和 500 °C 时,汽轮机寿命损耗率分别提升

39%、98%、177%和272%。在机组启动过程中,应控制高温区升温速率,避免汽轮机寿命损耗过大。

4 结 论

以1 000 MW 机组高压转子、中压转子、高压主汽门和高压外缸为研究对象,基于机组冷态启动和热态启动情况下各高温部件温度偏差,定量分析汽轮机低周疲劳寿命损耗,并进行数据对比分析,得出结论:

(1) 机组启动过程中,高温部件温度偏差与升温速率成正比例关系,机组热态启动时升温时间较短、高温部件温度偏差较小;机组不同启动方式的升温阶段,高压主汽门和高压外缸升温速率较大,存在温度偏差陡增现象。

(2) 各高温部件均是冷态启动比热态启动对汽轮机低周疲劳寿命损耗影响大。机组启动过程中,避免升温速率过大、合理控制高温部件温度偏差,可以有效降低汽轮机低周疲劳寿命损耗。

(3) 随着高温部件内外温差升高,热应力、低周疲劳寿命损耗率同步升高,汽轮机寿命损耗受部件温差影响较为明显。在机组启动过程中应控制升温速率,将部件温度偏差控制在50℃以内。

(4) 高温部件同一温度偏差出现在不同温度区间时对寿命损耗影响亦不同。随着温度区间的升高,部件热应力降低、汽轮机低周疲劳寿命损耗率升高。在机组启动过程中,应控制高温区升温速率,避免汽轮机寿命损耗过大。

受机组启停次数、启动方式及深度调峰运行方式等因素的影响,机组实际计算寿命损耗值与设计分配值有偏差。定期核算汽轮机寿命损耗是必要的,以便进行优化调整,合理控制高温部件温度偏差,减少部件寿命损耗,保证机组安全经济运行。

参考文献:

[1] 王旭荣,李福尚,张亚夫.超临界机组参与一次调频对汽轮机寿命影响的研究[J].热能动力工程,2014,29(4):367-373.
WANG Xu-rong, LI Fu-shang, ZHANG Ya-fu. Study of the influence of the participation of a supercritical unit in the primary frequency modulation on the service life of a steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(4): 367-373.

[2] 陈坚红,阮伟,任浩仁.冷态启动温升率对汽轮机转子寿命影响的研究[J].动力工程,1997,17(6):12-16.
CHEN Jian-hong, RUAN Wei, REN Hao-ren. Influence of tempera-

ture rise rate on rotor life of steam turbine at cold start [J]. Power Engineering, 1997, 17(6): 12-16.

- [3] 张大雾,王礼海,管伟诗.300 MW、600 MW 火电汽轮机的寿命管理[J].汽轮机技术,2001,43(6):375-376.
ZHANG Da-wu, WANG Li-hai, GUAN Wei-shi. Life management of 300 MW/600 MW fossil turbine [J]. Turbine Technology, 2001, 43(6): 375-376.
- [4] 李国庆,崔崇,何青.正暖和倒暖启动对汽轮机组寿命的影响研究[J].发电技术,2019,40(6):580-586.
LI Guo-qing, CUI Chong, HE Qing. Study on effect of forward warming and backward warming start on turbine unit lifetime [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(6): 580-586.
- [5] 安骏.600 MW 机组汽轮机的寿命管理研究[J].华东电力,2005,33(7):64-67.
AN Jun. Life management of 600 MW steam turbines [J]. East China Electric Power, 2005, 33(7): 64-67.
- [6] MITROVIC D, ZIVKOVIC D. Computation of working life consumption of a steam turbine rotor [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(1): 1-6.
- [7] KANNAN R, LEONG K C, OSMAN R. Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(3): 702-715.
- [8] MERCKLING G. Long-term creep rupture strength assessment: development of the European collaborative creep committee post-assessment tests [J]. Pressure Vessels and Piping, 2008, 85: 2-13.
- [9] BAGAVIEV A, ULRICH A. Life assessment of turbine components based on deterministic and probabilistic procedures [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(10/11): 855-859.
- [10] 唐红芳.汽轮机寿命在线监测与管理技术研究[D].北京:华北电力大学,2004.
TANG Hong-fang. Research on on-line monitoring and management technology of steam turbine life [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [11] 王尧明.国产300 MW 汽轮机转子寿命分配与管理研究[D].武汉:武汉大学,2004.
WANG Yao-ming. Research on life distribution and management of domestic 300 MW turbine rotor [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [12] 杨文松.某核电站1#机组汽轮机转子轴的寿命评估及螺位错与塑性变形区之间的相互作用[D].上海:上海交通大学,2007.
YANG Wen-song. The life evaluation of the high pressure rotor of the No. 1 steam turbine of a nuclear power station and the interaction between a screw dislocation and a plastic zone of arbitrary shape [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [13] 韩炜.1 000 MW 超超临界汽轮机转子寿命研究[D].北京:华北电力大学,2013.
HAN Wei. Research on the life of 1 000 MW ultra supercritical steam turbine rotor [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

(丛敏编辑)