

静叶斜置对高参数汽轮机再热后 第一级叶栅冲蚀的影响

蔡柳溪¹, 王顺森¹, 毛靖儒¹, 丰镇平¹, 张俊杰², 徐亚涛²

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 100025, 北京)

摘要: 在高温、高速加速冲蚀试验结果所建立的叶栅材料冲蚀率模型和粒子反弹模型的基础上, 利用三维数值计算法模拟、分析了静叶斜置对超临界及超超临界汽轮机再热后第一级叶栅冲蚀特性的影响. 结果表明: 再热后第一级静叶斜置角度为 30° 时, 静叶压力面最大冲蚀失重减小了约 30%, 吸力面尾缘的冲蚀破坏明显减轻, 级效率仅下降 0.1%; 进一步增大斜置角度, 再热后第一级叶栅抗磨性能提升并不明显, 级效率下降了 1%; 减小斜置角度会使静叶压力面最大冲蚀失重增加 23%, 叶栅抗磨性能显著降低. 该研究结果可为减轻再热后第一级叶栅的冲蚀破坏提供技术依据.

关键词: 再热后第一级; 固体颗粒冲蚀; 静叶斜置; 冲蚀失重; 数值模拟

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0012-04

Influence of Oblique Stator on Erosion Characteristics of Solid Particles in the First Reheat Stage Blades of a Supercritical Steam Turbine

CAI Liuxi¹, WANG Shunsen¹, MAO Jingru¹, FENG Zhenping¹, ZHANG Junjie², XU Yatao²

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100025, China)

Abstract: From the blade material erosion models and the particle rebound models produced by the high temperature and high speed accelerated erosion test results, the simulations and analyses were performed on the influence of the oblique stator on the erosion characteristics of solid particles in the first reheat stage of an ultra-supercritical steam turbine by the 3D numerical computing method. The results show that when the oblique angle of the oblique stator in first reheat stage is 30 degrees, the maximum weight loss on the vane pressure surface drops by about 30% and the erosion damage to the trailing edge on the vane suction surface also decreases obviously, and the stage efficiency decreases by only 0.1%. The further increase in the oblique angle may enhance the blade anti-wear property slightly but reduce stage efficiency by 1%. However, the decrease in the oblique angle will increase the maximum weight loss on the vane

收稿日期: 2011-11-30. 作者简介: 蔡柳溪(1985—), 男, 博士生; 毛靖儒(通信作者), 女, 研究员.

网络出版时间: 2012-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120416.1733.0>

pressure surface by 23%, leading to a significant reduction in the blade anti-wear property. The results of this study will provide a technical basis for reducing the erosion on first reheat stages.

Keywords: first reheat stage; solid particle erosion; oblique stator; erosion weight loss; numerical simulation

超临界与超超临界汽轮机的调节级和再热后第一级叶栅容易受到来自锅炉管道内壁剥落的高硬度氧化铁颗粒的冲蚀^[1-2]. 叶片冲蚀将导致汽轮机通流效率降低, 功率下降, 检修周期缩短, 维护费用上升. 已有研究表明, 固体颗粒冲蚀(Solid Particle Erosion, SPE)可使再热后第一级叶栅寿命缩短至一到两个大修周期^[3], 并使机组效率降低约 0.3%^[4]. 因此, 减轻再热后第一级叶栅固体颗粒冲蚀是保持高参数发电机组效率和安全性的关键之一. 目前, 国内外学者对汽轮机再热后第一级叶栅的 SPE 问题进行了较深入的研究, 如: Khaimov 等^[3]指出, 通过增大动、静叶间隙可以减小静叶尾缘背弧的冲蚀, 同时设计出一套保护装置, 将集中在进气室底部的粒子及进入通流的粒子通过引入外置分离器进行气固分离, 并将除去粒子的干净蒸汽引入下级抽气, 但未给出装置对机组效率的实际影响; 戴丽萍等^[5]发现, 再热后第一级静叶压力面出口区域及动叶吸力面进口区域会受到氧化皮颗粒的直接撞击, 当机组负荷降低时, 静叶吸力面尾缘的冲蚀加重; 何阿平等^[6]指出, 上汽-西门子超超临界汽轮机在为中压缸径向进汽通道轴向转折过程中配置了一种独特的斜置静叶, 该静叶具有导流的作用且无径向漏汽, 结构合理、紧凑, 损失小, 使得叶栅的固粒冲蚀有所减轻; 李成勤等^[7]在研究上汽-西门子超超临界汽轮机中压缸第一级的斜置静叶时发现, 随着斜置角度的增大, 静叶出口气流速度降低, 出口气流角减小, 这有利于减轻再热后一级叶栅 SPE, 但未对静叶斜置与再热后第一级叶栅抗 SPE 性能做进一步的分析; 杨建^[8]指出, 在中压缸第一级配置斜置静叶可以改进压力和反动度沿叶高的分布, 有利于改善级的经济性, 但却未谈及静叶斜置对级的抗冲蚀性能的影响.

综合上述定性研究, 本文建立了静叶斜置

角度与叶栅冲蚀和叶栅效率的关系模型, 以期为提高再热后第一级叶栅的抗冲蚀性能提供依据.

1 计算方案及数值方法

1.1 计算方案

图 1 为再热后第一级静叶斜置叶栅的子午面示意图. 本文斜置的静叶模型如下述.

以护罩(shroud)线上动、静叶连接点 o 为圆心, 采用西门子静叶斜置技术, 顺时针旋转第一级静叶及其相应的叶榖、护罩线, 使得斜置角度(叶片对称中心线与径向的夹角) $\gamma=30^\circ$. 弧段 S 近似为以 o 点为圆心、叶高为半径的弧线, 动、静叶的轮毂线光滑连接, 从而得到静叶斜置的再热后第一级叶栅的几何模型. 为了分析不同斜置角度对再热后第一级叶栅冲蚀特性及级效率的影响, 本文还计算了 $\gamma=15^\circ$ 和 $\gamma=45^\circ$ 的工况.

1.2 数值方法

通过商用软件 ANSYS-CFX 对连续方程、动量方程及能量方程进行了全隐式离散, 利用耦合求解器模拟了汽轮机叶栅流道内的三维定常可压缩黏性流动. 由于叶栅主流区存在着强流线弯曲、大应变率和局部强逆压梯度, 无法用标准 $k-\epsilon$ 模型反映雷诺应力的各向异性特性, 也难以准确体现平均涡量的影响, 所以本文气流场计算采用 RNG $k-\epsilon$ 模型, 近壁区处理采用 scalable 壁面函数法, 粒子运动模拟采用单向耦合的分散颗粒群模型, 动、静叶网格数均为 40 万左右.

边界条件: 在静叶栅进口给定总温和总压, 在动叶栅出口给定静压, 壁面采用无滑移条件, 动、静叶的周向边界采用周期性条件.

进口粒子参数设定: 粒子参数和尺寸是基于某电厂 800 MW 机组中压缸氧化皮颗粒实

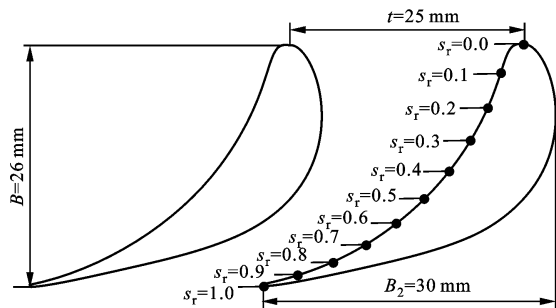


图2 再热后第一级静叶栅型线

再热后第一级静、动叶冲蚀失重沿流向的分布如图3和图4所示。从图中可以看出：再热后第一级静叶斜置 30° 时，静叶压力面和吸力面的冲蚀失重均有所降低，最大冲蚀失重降低了30%左右，而动叶压力面前缘的冲蚀失重有所增大；斜置角进一步增大，静叶压力面的冲蚀失重仅降低了3%；减小斜置角，静叶压力面的冲蚀失重增加了23%。

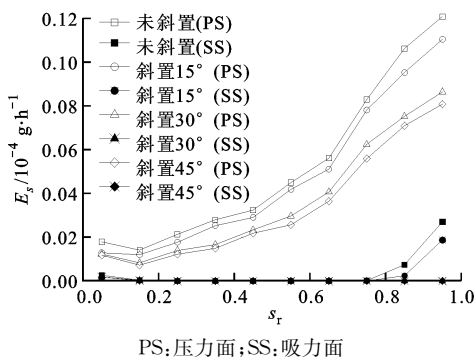


图3 再热后第一级静叶冲蚀失重沿流向的分布

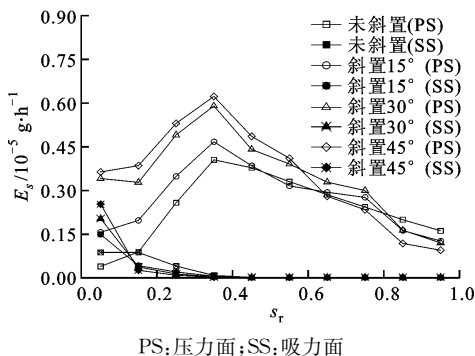


图4 再热后第一级动叶冲蚀失重沿流向的分布

冲蚀特性和级效率的影响

图5、图6分别为不同斜置角下静、动叶中叶展处叶片表面静压系数分布。从图中可以看出，不同斜置角下的静叶静压系数变化不大，动叶前缘载荷增大。图7为级反动度和级效率随静叶斜置角的变化。从图中可以看出：再热后第一级静叶斜置 30° 时，级效率降低了0.1%，级反动度增大了0.1；当斜置角增至 45° 时，级反动度增长缓慢，但级效率下降了1%；当斜置角减小到 15° 时，级反动度较 30° 降低了0.07，级效率提高了0.06%。图8为不同静叶斜置角下粒子直径 $d_p=40\mu\text{m}$ 的粒子撞击静叶压力面的速度分布。从图中可以看出，再热后第一级静叶斜置角为 30° 时，粒子撞击静叶栅压力面的速度降低了约20%，这正是静叶压力面侧冲蚀失重降低的直接原因。

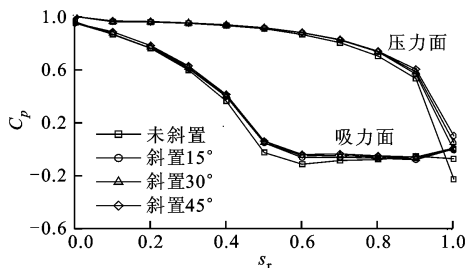


图5 静叶中叶展处叶片表面静压系数沿叶型分布

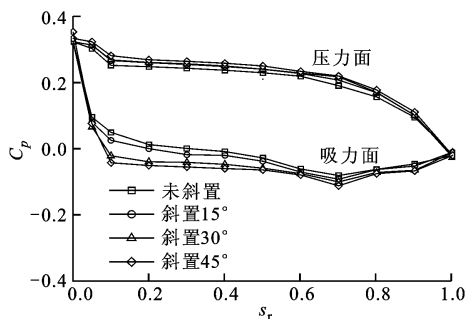


图6 动叶中叶展处叶片表面静压系数沿叶型分布

综合上述分析，当再热后第一级静叶斜置 30° 时，级反动度增大，静叶通道内的焓降减小，蒸汽流速降低，蒸汽对氧化皮颗粒的加速作用减小，颗粒撞击叶栅的速度和强度降低，所以静叶压力面的冲蚀失重明显减小。静叶斜置的同时，动、静叶轴向间隙有所增大，撞击动叶前缘

2.2 静叶斜置对再热后第一级叶栅

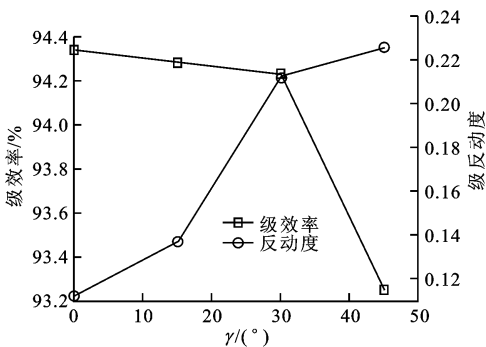


图7 级反动度和级效率随静叶斜置角度的变化

轮机来说,当再热后第一级静叶斜置时,级反动度和动、静叶轴向间隙增大,粒子撞击静叶尾缘的强度降低,这有助于提高该级抗冲蚀性能.斜置角增大,级效率下降,这不利于机组的经济运行.本文研究发现,当再热后第一级静叶斜置 30° 时,级抗冲蚀性能和级效率处于优势组合,机组运行能兼顾经济性和安全性,是一种较为良好的设计方案.该研究结果可为减小再热后第一级叶栅的冲蚀破坏作用提供技术依据.

(下转第 107 页)

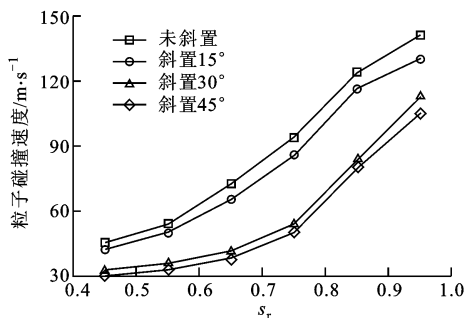


图8 不同斜置角度下 $d_p=40\ \mu\text{m}$ 的粒子撞击静叶压力面的速度分布

后反弹回静叶吸力面尾缘的大颗粒的数量减少,所以该区域的冲蚀破坏明显减轻.与此同时,由于动叶流道焓降增加,动叶中粒子撞击速度有所提高,动叶冲蚀失重相应增大.在电厂的实际运行中,由于静叶尾缘很薄,而动叶压力面冲蚀最严重的部位相对较厚,所以静叶尾缘的冲蚀破坏是再热后第一级叶栅 SPE 的主要问题.再热后第一级静叶斜置 30° 能明显减小该级静叶出汽边的冲蚀破坏作用,且级效率仅降低 0.1% .当斜置角增至 45° 时,叶栅抗冲蚀性能提升得很有限,但级效率明显下降.斜置角度减至 15° 时,叶栅抗冲蚀性能显著下降.

3 结 论

本文基于高温、高速加速冲蚀试验结果建立了叶栅材料的冲蚀率模型和粒子反弹模型,利用三维数值计算方法模拟、分析了超超临界汽轮机再热后第一级静叶斜置对叶栅冲蚀特性和级效率的综合影响.对超临界和超超临界汽