

汽轮机静叶尾部喷射除湿方法的数值研究

李意民¹, 王保明², 周忠宁¹, 张国杰¹

(1. 中国矿业大学 电力工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 华电郑州机械设计研究院有限公司, 郑州 450046)

摘 要:基于 ICMCFD 软件, 针对汽轮机末级流道的湿蒸汽问题, 提出了一种可用于设计末级静叶除湿结构的数值方法。对第 20 级流道中相变过程进行数值模拟, 并设计了不同宽度缝隙的尾部喷射除湿结构。流道中的自发凝结过程, 能很好地结合经典成核理论和液滴生长模型进行阐述。另外, 尾部喷射除湿结构能够有效除湿。在缝宽为 0.4 mm 时, 达到最佳除湿效果。

关键词:汽轮机; 静叶; 湿蒸汽; 凝结; 除湿; 液滴; ICMCFD 软件; 数值模拟

中图分类号:TK 263.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2017)11-0001-04

0 引言

蒸汽膨胀做功过程中, 会产生大量湿蒸汽。湿蒸汽对级的工作非常不利, 它不仅降低了级效率, 而且严重腐蚀动叶片。合理的静叶除湿结构, 能够除去湿蒸汽中大部分水滴。然而, 湿蒸汽的研究涉及复杂的自发凝结现象, 如何设计除湿结构一直困扰着广大科技工作者。

汽轮机内部湿蒸汽流动是非常复杂的两相流动问题。研究湿蒸汽的难点在于: 蒸汽的湿度沿级的圆周方向和半径方向均不是均匀分布的; 水滴和蒸汽相互之间会有传热和传质, 涉及复杂的相变问题等。湿汽测试技术^[1]促进了汽轮机内部除湿的研究, 但是, 测量技术还无法完全精确地测量一些重要参数, 如水滴半径、水滴数目等。所以, 更深层次探讨湿蒸汽产生机理还缺乏试验数据, 对于设计除湿结构不具有实际指导意义。

随着经典成核理论和液滴生长模型的提出和验证, 出现了有关数值模拟的研究方法。早期的数值研究侧重点主要在湿蒸汽相变模型的验证和完善方面。自 1960 年以来, 由于 Laval 喷管结构简单, 易于开展研究, 很多学者选用 Laval 喷管进行湿蒸汽相变理论的验证和完善^[2-5]。20 世纪 70—90 年代, 各国学者开始在实际工作中的短直叶片上进行低压凝结流动试验, 并且发展出了二维和准三维叶栅凝结流动的数值模拟方法^[6-8]。随着蒸汽相变理论的成熟, 数值方法成为研究透平湿蒸汽两相流动的主要手段^[9]。

本文主要介绍了汽轮机中凝结流动的数值方法, 对液滴尺寸、成核率等数据进行了分析。另外,

在叶片尾部设计了一种喷射除湿结构, 并分析了该结构的除湿效果。数值计算结果表明, 该除湿结构能有效除湿。这种设计思路和过程, 可为以后各类除湿结构的设计提供参考。

1 湿蒸汽相变过程及原理

蒸汽的相变过程主要有 2 个阶段: 第 1 阶段, 饱和蒸汽越过饱和线后发生凝结, 产生大量细小液滴作为凝结核心; 第 2 阶段, 蒸汽不断膨胀, 凝结核心不断长大。在数值计算过程中, 这 2 个过程是通过经典成核理论和水滴生长模型来描述的。

1.1 经典成核理论

经典均质成核理论基本思路如下, 纯净蒸汽在流动过程中, 如果没有外来杂质提供凝结核心, 并且远离固体表面, 那么蒸汽在越过饱和和气相线时, 不能立即发生凝结。这是由于, 气体分子作用力使得凝结产生障碍, 湿蒸汽会按照过热蒸汽的性质继续膨胀成为过饱和蒸汽, 这种过饱和状态是一种不稳定状态。当蒸汽膨胀到一定程度, 也就是达到一定过饱和程度时, 气体分子发生聚团, 从而形成大量极其微小的水滴, 这时凝结过程会释放潜热, 系统又恢复到平衡状态。

在经典成核理论中, 非平衡凝结过程中的质量生成率 Γ 是由成核和水滴生长 (或消亡) 共同决定的^[8]。它们的质量增加总和为质量生成率, 因此 Γ 可写为

$$\Gamma = \frac{4}{3} \pi \rho_l I r_*^3 + 4 \pi \rho_l \eta \bar{r}^2 \frac{\partial \bar{r}}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: ρ_l 为液滴密度; I 为液滴成核率; r_* 为临界成核率半径; η 是单位体积内的液滴数目; $\bar{r}$ 为液滴平均半径; t 为时间。

考虑到非等温效应的影响, 采用了 Kantrowitz 对

经典成核理论修正后的成核率 I 的表达式^[6]为

$$I = \frac{q_c}{1 + \theta} \left(\frac{\rho_v^2}{\rho_l} \right) \sqrt{\frac{2\sigma}{M_m^3 \pi}} e^{-\left(\frac{4\pi r_0^2 \sigma}{3k_b T} \right)}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{2(\gamma - 1)}{\gamma + 1} \frac{h_{lv}}{RT} \left(\frac{h_{lv}}{RT} - \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

式中: q_c 为凝结系数(一般取值为 1); θ 为非等温效应系数; ρ_v 为蒸汽密度; ρ_l 为液体在温度 T 下的密度; σ 为液滴表面张力; M_m 为单个水分子质量; k_b 为 Boltzmann 常数; γ 是比热容比; h_{lv} 为压力 p 下的相变潜热; R 为气体常数。

1.2 液滴生长模型

在形成凝结核心后, 核心小液滴和周围蒸汽不断发生传热传质。当液滴半径大于临界曲率半径时, 液滴会长大; 当液滴半径小于临界曲率半径时, 液滴会蒸发。临界曲率半径的表达式为

$$r_* = \frac{2\sigma}{\rho_l R T \ln S}, \quad (4)$$

式中: S 为过饱和度。

过饱和度是气体实际压力和平衡相变时的饱和压力之比, 表达式为

$$S = \frac{p(T_1)}{p_{\text{sat}}(T_2)}, \quad (5)$$

式中: T_1 为混合汽的温度; T_2 为该压力下水蒸气饱和温度。

过冷度表征气体越过饱和状态的程度, 表达式为

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (6)$$

液滴生长还涉及两个机理, 第 1 个是从蒸汽凝结过程中的质量传递, 第 2 个是以潜热的形式在液滴和蒸汽间进行的热传递。这种能量传递关系式, 由 J. B. Young 率先提出^[5], 可写成

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{p}{h_{lv} \rho_l} \frac{\gamma + 1}{\sqrt{2\pi RT}} C_p (T_0 - T_1), \quad (7)$$

式中: p 为压力; C_p 为等压热容; T_0 为液滴温度。

2 数值计算

2.1 原型叶片流动

在汽轮机中, 湿蒸汽发生凝结相变最显著的地方在静叶流道, 所以, 本文主要对静叶除湿结构进行研究。为了模拟出与实际情况相符的数值结果, 本文采用 50 MW 汽轮机低压缸中的末级叶片作参考^[10], 选用第 20 级静叶片作为研究的原型叶片。取 50% 叶高处流道作为原型叶栅, 热力参数和部分几何尺寸见表 1。

绘制几何模型, 流道的周期性边界距离为叶片平均节距 65 mm。之后导入 ICMCFD 中划分叶栅

表 1 热力参数及部分几何参数

参数	数值
进口几何角 $\alpha/(^\circ)$	85.0
出口几何角 $\beta/(^\circ)$	76.6
安装角 $\varphi/(^\circ)$	52.0
进口速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	58
进口压力 p_1/kPa	78
进口温度 T_1/K	366
出口压力 p_2/kPa	49

网格, 特别注意周期性边界和边界层网格的划分。尾缘半径特别小(半径为 0.8 mm 的圆弧), 所以需对此处网格加密, 几何结构和网格划分如图 1 所示。将不同疏密网格导入 Fluent 中进行计算, 总的网格节点数大约 3 万时, 网格疏密对计算结果无影响。

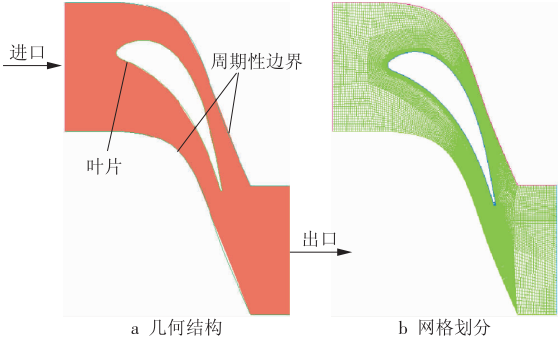


图 1 原模型几何结构及网格

对湿蒸汽凝结流动计算时, 必须基于密度求解器。打开多相流选项, 加入湿蒸汽相变模型。按照表 1 设置边界条件, 进口静压力设置为 78 kPa, 保证进口的蒸汽过热, 总温度为 366 K。设置残差后进行数值计算, 并对出口压力和部分湿蒸汽参数进行监测。在计算大约 25 000 步时, 压力和湿蒸汽参数的残差为 10^{-4} , 可认为计算收敛。

2.2 带喷射缝的叶片流动

喷射除湿结构是在尾部处设计一段喷射缝, 从叶片内部向流道喷射过热蒸汽, 过热蒸汽可以加热液滴使液滴蒸发, 使水滴尺寸减小, 以达到抑制自发凝结的目的。喷射蒸汽开设原则主要有 2 个: 第一, 喷射气流不影响原气流的出口角, 不能扰乱原气流; 第二, 尾缘半径很小, 不能将缝宽设计太大, 要保证不改变原叶型型线。

为了简化模型, 没有绘制出空心叶片, 仅在尾迹处绘制出了部分喷射流道。在 ICMCFD 中, 对尾迹喷射流道进行加密处理, 和外部网格连接成整体。对于喷射缝隙结构, 流道壁面与外部叶片型线平行。本叶片尾缘是由直径为 0.8 mm 圆弧组成, 所以缝隙宽度不得超过这一值。设计的缝隙宽度依次为 0.2, 0.3, 0.4 mm, 模型的几何结构和网格划分如图

2 所示。为了比较除湿效果,计算的边界条件和原型叶片保持一致。为了达到除湿的目的,喷射的蒸汽必须过热,不同缝宽的结构均采用进口压力 101 kPa,总温 400 K。对以上 3 种不同缝宽的叶片进行数值计算。

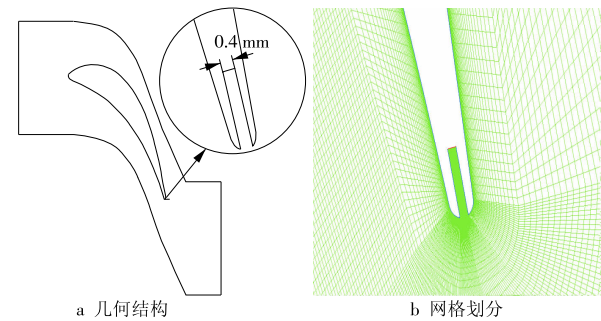


图 2 除湿几何结构和网格划分

3 结果分析

3.1 原型叶片自发凝结现象

分析整个叶栅流道内的凝结流动状况,流道内湿蒸汽液相参数云图如图 3 所示。从图 3a 和图 3b 可以看出,随着过冷度的增大,在叶片的吸力面上沿轴向约 80% 的位置处,也就是流道喉部,有大量的凝结核心出现,过冷度数值最大的区域也就是成核率较大的位置。从图 3b 和图 3c 中可以看出,在凝结成核区域,液滴生长最快。

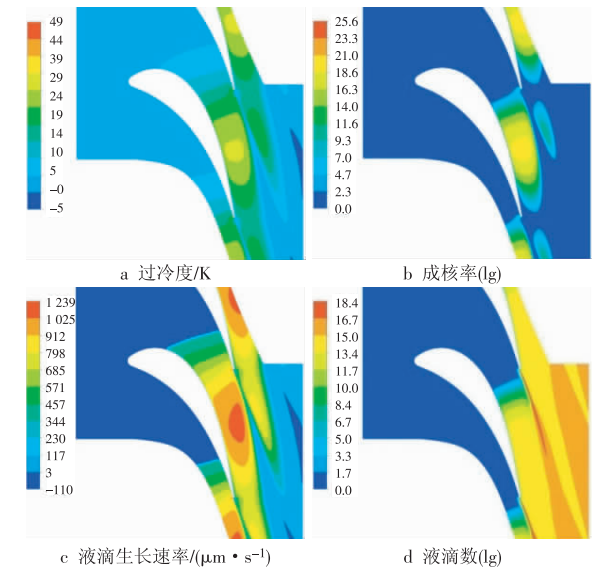


图 3 湿蒸汽液相参数

选择流道中心位置处的数值结果定量分析流道内数值解。周期性边界是很有代表的数值结果点,它处在压力面和吸力面正中间,可以用这一曲线代替中心线。绘制出中心线各点的液相参数分布曲线,如图 4 所示。

经典成核理论中对蒸汽相变的描述是这样的:游离气态分子必须克服吉布斯自由能的障碍才能凝

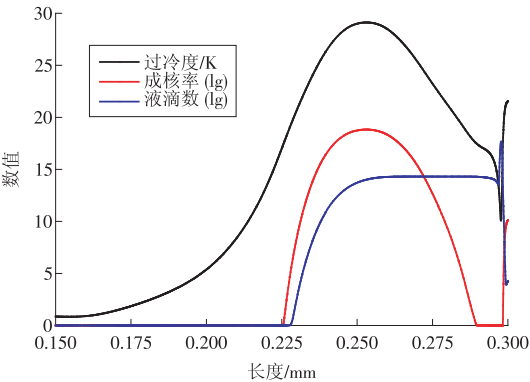


图 4 中心线液相参数分布曲线

结。蒸汽膨胀过程中,在到达饱和状态后不会立刻出现液滴,蒸汽会继续膨胀,温度不断降低,当蒸汽状态达某一过冷温度时,蒸汽会迅速凝结出大量细小液滴,这时的气态分子能量较低,能克服障碍而凝结。

从图 4 中可以看出:在过冷度大于 0 时,也就是越过饱和线的状态,并没有液滴产生;在中心线置 0.225 m 处,过冷度为 17 K,这时开始有液滴核心产生;在过冷度达到最大值,图 4 中在 0.250 m 处时为 29 K,成核率最大,此时会出现大量液滴,释放出大量热量。可以看出,液滴都是在一瞬间生成的,这个成核率最大的点也就是过冷度最大的点,可称这一状态点为 Wilson 点^[11]。此后,由于成核而释放出的气化潜热使混合气流温度升高,从图 4 中可以看出,过冷度逐渐减小,成核率也随着减小,最终成核率趋于 0,液滴数目也不再增多。

当蒸汽成核之后,液滴核心和周围蒸汽就会发生质量传递和热传递,也就是液滴生长模型。比较图 3a 和图 3c 可知,过冷度最大区域也是生长速率最快的位置,这块区域蒸汽偏离饱和点较多,液滴生长也就最快。

3.2 喷射缝隙除湿特性的分析

混合湿蒸汽中液滴所占的质量分数叫做湿度,它是衡量湿蒸汽状态的一个重要参数。蒸汽在叶片流道喉部产生凝结核心,增加了液滴数量;混合湿蒸汽流动过程中具有一定过饱和度,液滴核心不断长大,增加液滴尺寸。液滴数量和尺寸共同决定了混合湿蒸汽中液滴的质量分数,也就是湿度。从图 3d 可以看出,随着气流的导向作用,不断长大的液滴在叶栅尾迹处有一条细长的集中区,湿度较大的位置也就在此处。因此,设计了尾部喷射缝隙的除湿方法。

不同喷射缝隙宽度的叶片尾部湿度云图如图 5 所示。可以看出,原型叶片尾部有一条细长的区域湿度较大。随着喷射缝隙的逐渐增大,叶栅尾迹处的湿度明显减小,在缝宽达到 0.4 mm 时,湿度已经

5.3 巷道表面位移

从图 4 所示的巷道围岩表面位移曲线可以看出:硐室左帮部巷道移近量稳定在 10 mm 左右,右帮部巷道移近量最大为 16 mm,顶板下沉量稳定在 3 mm,巷道底鼓量为 19 mm 左右。由此可见,巷道移近量主要表现为底鼓量。考虑到移近量检测误差的影响,支护后巷道围岩未受到明显影响,无明显变形,围岩变形得到有效控制,支护效果较好。

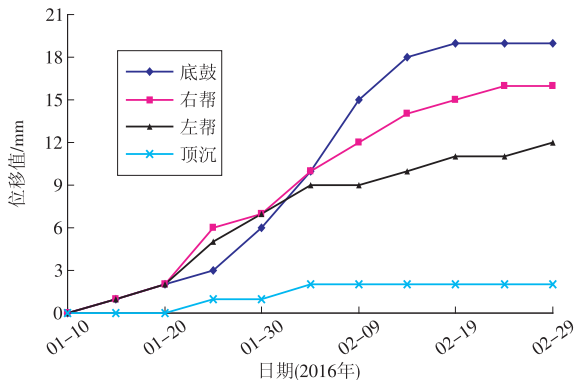


图 4 巷道围岩表面位移曲线

5.4 巷道顶板离层

从图 5 所示的顶板离层监测曲线可以看出:观测点处巷道浅部基点检测离层值为 1.8 mm 左右,深部基点检测离层值为 2.0 mm 左右,总离层值为 4.0 mm 左右。由此可以看出,二次锚网支护技术能够有效控制硐室变形及顶板岩层离层,硐室支护稳定可靠。

5.5 支护效果分析

采用高强锚杆、高强度螺母、调心垫等新材料和扭矩倍增器,同时采用二次锚网喷支护技术,巷道变形量较小,顶板、两帮变形量只有 16 mm 左右,顶板总离层值不超过 4 mm。可见,使用高预紧力锚杆锚索支护系统及配套新材料能够有效地控制巷道变形,避免了围岩变形过大带来的喷浆开裂现象,支护效果良好。

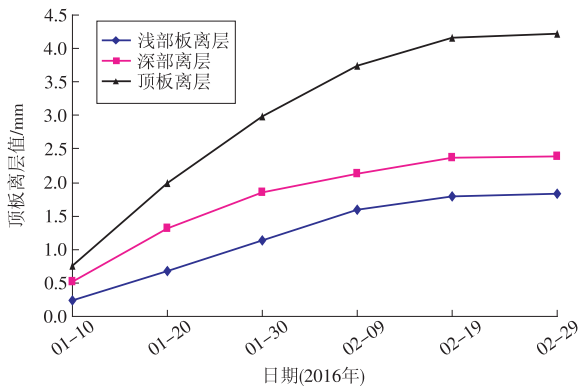


图 5 顶板离层监测曲线

6 结论

针对小纪汗煤矿特殊的煤层裂隙发育地质条件,主排水泵房大断面硐室采用以高预应力和预应力扩散为核心的支理论,二次锚网喷 + 锚索复合支护技术采用新型锚杆支护材料,配套护表构件,满足了硐室支护要求;采用扭矩倍增器和液压锚索张拉机具等新设备,保证了锚杆和锚索支护的支护质量,形成了适合小纪汗煤矿水泵房大断面复杂巷道的支护系统,有效控制了硐室围岩变形与破坏。此支护方案与混凝土砌碛方案相比,工期可缩短约 2 个月。

参考文献:

[1] 冯志棠. 建筑工程深基坑开挖与支护施工工艺研究[J]. 中国高新技术企业, 2014(11): 80-81.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

刘建林(1984—),男,陕西榆林人,工程师,从事矿井通风、采掘管理方面的工作(E-mail: xkliujianlin@126.com)。

研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2002.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

李意民(1959—),男,贵州贵阳人,教授,博士,博士生导师,从事流体机械节能方法方向的研究工作(E-mail: liyimin@cumt.edu.cn)。

王保明(1966—),男,河南周口人,高级工程师(教授级),工学博士,从事流体机械自动化方向的研究工作(E-mail: wangbaoming85@126.com)。

(上接第 4 页) 2941-2956.

[8] ISHAZAKI K, IKOHAGIT, DDIGUJI H. A high-resolution numerical method for transonic non-equilibrium condensation flows through a steam turbine cascade[C]//In proceedings of the 6th international symposium on computational fluid dynamics, 1995: 479-484.

[9] 丰镇平,李亮,李国君. 汽轮机湿蒸汽两相凝结流动数值研究的现状与进展[J]. 上海汽轮机, 2002, 6(2): 1-10.

[10] 肖增弘,王雷. 汽轮机课程设计[M]. 北京:中国电力出版社, 2012.

[11] 张冬阳. 非平衡态湿蒸汽流动快速准确数值模拟方法