

# 汽轮机叶片材料抗液滴冲击侵蚀性试验评价

张鹏程

(哈尔滨汽轮机厂有限责任公司 黑龙江哈尔滨 150000)

**摘要:** 该文研究了激光硬化条件下的 X5CrNiCuNb 16-4。除了液滴冲击速度和液滴冲击角腐蚀的影响外,还讨论了产生的表面锯齿状、材料降解程度以及材料损失梯度,并用于进一步推导。在高屈服强度刀片钢中,激光硬化的 X5CrNiCuNb 16-4 表现出最好的耐腐蚀性能,而 Ti6Al4V 表现出比所有测试钢合金更高的耐腐蚀性能。最后,从测试数据中推断出一个简化但功能强大的模型来估计替代钢和钛叶片材料相对于该文讨论的材料的液滴冲击抗腐蚀性能。

**关键词:** 汽轮机 叶片 侵蚀

中图分类号: U461

文献标识码: A

文章编号: 1671-3567(2021)02-0054-03

## Experimental Evaluation of Droplet Impact Erosion Resistance of Steam Turbine Blade Materials

ZHANG Pengcheng

(Harbin Steam Turbine Factory Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang Province, 150000 China)

**Abstract:** In this paper, X5CrNiCuNb 16-4 under laser hardening conditions was studied. In addition to the effects of droplet impact velocity and droplet impact angle erosion, the resulting surface jaggedness, degree of material degradation, and material loss gradients are discussed and used for further derivation. Among the high yield strength blade steels, laser-hardened X5CrNiCuNb 16-4 exhibited the best corrosion resistance, while Ti6Al4V exhibited higher corrosion resistance than all tested steel alloys. Finally, a simplified but powerful model is extrapolated from the test data to estimate the droplet impact corrosion resistance of alternative steel and titanium blade materials relative to the materials discussed in this paper.

**Key Words:** Steam turbine; Blades; Erosion

### 1 简介

借助侵蚀试验台研究了 5 种不同但高度相关的汽轮机叶片材料的液滴冲击侵蚀阻力。该钻机在凝汽式汽轮机的最后阶段适应湿度和液滴冲击速度条件,从而大大加速材料降解,以建立单调的饱和材料损失梯度的理想情况下,测试时间间隔为 50 h。确保评估方法的可重复性和再现性,以促进基于耐液滴冲击侵蚀

性的材料的代表性排名,这是耐用汽轮机叶片设计的关键材料特性。选择 3 种叶片钢(X20Cr13,一种类似于 X5CrNiMoCuNb 14-5 的钢,X5CrNiCuNb 16-4)和一个钛合金(Ti6Al4V)进行了测试和分析。此外,还为了能够对随后的磨损调查进行分类,为不涉及汽轮机腐蚀问题的读者提供一些特定于应用的背景信息。讨论了导致材料特定降解过程的物理现象以及触发科学努力补救或至少减轻侵蚀过程的动机,并简要回顾了

作者简介: 张鹏程(1988—),男,本科,工程师,研究方向为火电汽轮机设备。

历史。

一个世纪以来,末级汽轮机叶片的水滴冲击侵蚀一直是汽轮机和电力行业中众所周知的,有时甚至是加剧的现象。蒸汽膨胀到低压和低温以提高设备的热效率,这会导致蒸汽在饱和线以下膨胀,从而在流动中形成液滴。人们普遍认为,当汽轮机在湿蒸汽条件下运行时,这种液滴侵蚀是不可避免的。随着时间的推移,材料损失的程度可能会受到本文后面讨论的各种方法的积极影响。液滴冲击侵蚀导致叶片材料的损失,特别是在具有高冲击速度(450~600 m/s)的叶尖区域,这改变了空气动力学优化的叶片几何形状并显著扰乱了叶片轮廓周围的流动。这反过来对机器的性能产生不利影响,最终导致需要更换涡轮叶片。

过去几十年进一步发展了高效低压蒸汽轮机设计,显著增加了排气面积。这些导致高纵横比叶片具有接近750 m/s的巨大尖端速度,这可能导致液滴冲击侵蚀潜力增加。因此,在其他一些限制条件中,液滴冲击侵蚀可能被视为与蒸汽涡轮叶片相关的使用寿命。

此外,由于叶片前缘腐蚀的程度,出于热力学原因,主要与电厂的实际运行有关,因此几乎不可能从制造商的角度提出一个全面的、万无一失的叶片腐蚀保护概念。

现在概述导致液滴撞击侵蚀的有害水分的来源。在汽轮机的最后阶段,蒸汽在饱和线以下膨胀,其中一部分凝结成典型尺寸为0.2~2.0 m的初级液滴。这些初级液滴的碎片沉积在静止的导向叶片上,最终可能形成小溪或水膜。这些结构尺寸增大,向后缘移动,由于空气动力而变得不稳定,最终转化为直径达1 500 m的粗大二次液滴喷雾。这种喷雾在叶片后缘下游的尾流中传播。大水滴最终进入蒸汽速度较高的区域,在那里它们被进一步分解成较小的水滴,称为粗水滴,大约100 m。它们随着蒸汽逐渐加速,最终以小于但有时接近于旋转叶片圆周速度的冲击速度撞击下游旋转叶片。这种液滴撞击的结果可能是侵蚀,即叶片材料的结构损坏。

## 2 液体性质对侵蚀的依赖性

自从认识到导致叶片侵蚀的现象以来,已经采取

了几种缓解措施来最大限度地减少汽轮机叶片的侵蚀。这些包括简单的几何设计考虑,例如:增加定子和转子之间的轴向间距以允许液滴加速和破碎。定子叶片较薄的后缘被认为是有利的,因为它们从水膜中产生较小的初始次级液滴。叶片排之间的水分提取被认为是一种更复杂和更有效的方法,它通过在导叶表面提供吸入槽以及通过内部加热固定导叶来蒸发水膜和小溪流。后者是迄今为止已知的最有效的侵蚀缓解措施。此外,最重要的是,要注意确保叶片前缘更能抵抗腐蚀。激光处理、叶片材料的感应或火焰淬火以及用司太立或工具钢对叶片进行屏蔽,已被用于提高前缘的耐腐蚀性。

从历史上看,蒸汽轮机叶片的腐蚀成为科学关注的话题以及20世纪初的研究,当时蒸汽涡轮机旋转叶片的叶尖速度足以引起腐蚀。汽轮机叶片材料退化已被解释为所有可能的现象,包括化学侵蚀、氧化、蒸汽携带的固体颗粒(除了液滴撞击外)(Coles, 1904)。然而,在1920年代,已经进行了相关实验。水滴撞击蒸汽轮机叶片的侵蚀。1928年,库克提出了他著名的水锤方程,在该方程中,他估计了液态水柱撞击固体表面时产生的压力。在他的理论中,他表明液固冲击产生的压力足以引起汽轮机叶片的腐蚀。根据海曼,库克的水锤关系可以扩展如下:

$$P_{\text{impact}} = \rho_l c_l v_{\text{impact}} \cdot \left(1 + \frac{k \cdot v_{\text{impact}}}{c_l}\right) \quad (1)$$

式(1)中,液滴冲击压力 $P_{\text{impact}}$ 取决于液滴冲击速度 $v_{\text{impact}}$ ,液体密度 $\rho_l$ ,液体声速 $c_l$ ,它有一些限制,代表压缩液体中的冲击速度。从动量考虑得出的“经典”水锤压力,反映了冲击速度的变化性质。需要注意的是,冲击压力的大小与液滴大小无关,但其持续时间取决于液滴大小和几何形状。

在1960—1990年代期间,该领域进行了大量的科学研究液滴冲击侵蚀。基本发现是,当液滴撞击固体表面时,液滴内的接触点会产生压力波,该压力波会以声速在液滴内部传播。只要接触速度高于冲击速度,该冲击波就会与固体表面保持接触,并且液体在该冲击包络内保持压缩状态。后来,冲击速度超过了接触

边缘速度,冲击波从接触表面分离。此时,观察到横向喷射,其速度比冲击速度高许多倍。然后冲击压力达到最大值(大约是水锤压力的3倍)。在所有这些研究中,冲击速度、喷射时间和冲击压力仍然是感兴趣的话题。过去已经建造了各种专用的侵蚀试验台,研究了由反复液滴或喷射冲击引起的侵蚀。通常,这些实验表明液滴冲击侵蚀取决于冲击计数,因此是一个时间相关的过程。它从没有材料损坏或材料损坏非常轻微的所谓潜伏期开始,然后是侵蚀率迅速增加到最大值的加速期,然后是侵蚀率降低到最大侵蚀率的一部分的减速期(1/2~1/4),最后是稳定的终端侵蚀条件,其中侵蚀率几乎保持恒定。发现腐蚀速率对冲击速度很敏感,最好用幂律方程 $Re \sim Vn$ 来描述,其中据报道,对于韧性材料, $n$ 的值是4~5,而对于脆性材料, $n$ 的值是6~9。根据理论,较大的液滴会产生更多的侵蚀,而冲击角在垂直撞击目标表面时的侵蚀损伤方面最为显著。

此外,观察到液体性质对侵蚀的依赖性,因为侵蚀速率随液体密度以2次方至2.5次方变化,随液体粘度的倒数以1/2至3/4次方变化。冲击液体温度的升高通常会略微增加侵蚀。这种影响归因于不断变化的横向射流引起的表面剪切损伤增加。将侵蚀试验台的定义扩展到真实的蒸汽涡轮机,冲击计数主要与局部湿度值。液滴大小可能与静叶后缘直径和局部蒸汽密度有关,与局部蒸汽压力成正比。除了定子和转子之间的轴向间距,相对液滴冲击速度也可能与蒸汽密度有关。然而,更重要的是转子叶片尖端速度。与过去一样,转子叶片材料并没有发生很大的变化,所描述的多变量系统往往被浓缩为一组半经验特征数,这些数决定了必要的对策的数量和强度。这种纯粹的现象学方法基本上需要大量的机队经验作为成功的关键因素。从受压叶片材料的角度来看,似乎希望能够将特定材料的耐腐蚀性与一组明确定义的宏观机械性能相关联。发现硬度、回弹性、韧性、抗拉强度、延展性和应变能可以显著影响材料承受液滴冲击侵蚀的能力。然而,它们中没有一个被证明是单一的材料参数,与耐腐蚀性能唯一相关。硬度被证明是评估耐腐蚀性的最可靠的

材料特性。发现腐蚀一般随维氏硬度数的2到2.5次方变化。然而,对于不同类别的材料或冶金结构,这种简单的关系可能不成立。

考虑到侵蚀是一个复杂的过程,涉及许多不同的参数和物理过程,因此提出了标准化的抗侵蚀性,其定义为“测试材料的体积损失率除以指定参考的体积损失率材料进行了类似的测试和类似的分析”。硬度为170 HV的奥氏体不锈钢、308型不锈钢和其他一些材料已被用作参考材料。然而,它们都没有被广泛接受。许多作者提出了定义材料抗侵蚀性的理论参数。但是这些参数并不能解决问题,因为它们要么太难评估,要么无法预测经验观察到的依赖关系。一些作者试图将耐腐蚀性与疲劳强度联系起来,尽管重复的应力脉冲可能被认为在侵蚀和疲劳中都很常见,但将疲劳强度与抗侵蚀性相关联的想法并没有得到普及。试图找到抗侵蚀性对表面微观结构的依赖性。发现光滑表面比粗糙表面更耐腐蚀,而具有小晶粒尺寸的表面具有更多固有的耐腐蚀能力。原子间结合强度以及表面缺陷的大小和分布被发现在抗侵蚀性中起着重要作用。

### 3 结语

尽管许多科学家已经尝试从经验和理论上预测汽轮机叶片的侵蚀,但没有一个是能够全面解决问题。请记住,许多参数会影响汽轮机叶片的腐蚀,并且这些参数也可能相互依赖,因此预测汽轮机叶片腐蚀是一个尚未解决的严峻挑战。当考虑到各个汽轮机的不同运行条件时,侵蚀的预测变得更加复杂。

### 参考文献

- [1] 肖增弘,李洋,马振杰,等.汽轮机供热改造后导汽管变形的数值研究[J].汽轮机技术,2016,58(6):418-420.
- [2] 刘涛.汽轮发电机组振动故障诊断模型构建及运用[D].广州:华南理工大学,2020.
- [3] 王树民,宋畅,张满平,等.汽轮发电机组高位布置技术研究及工程设计[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7643-7652.
- [4] 王洪栋.1000MW核电半速汽轮机高中压缸负荷分配技术及应用[J].山东电力技术,2013(6):63-66.