

用于汽轮机叶片的钛合金材料—Ti—6Al—4V

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049) 屠 珊 毛靖儒 孙 弼

摘 要: 增大汽轮机的单机功率, 就要求增大其末级通流部分尺寸和叶片的抗腐蚀性能。现在的铬钢叶片难以满足这些需要, 因而要广泛研究、开发和利用钛合金叶片。本文概述了钛合金叶片的性能及其应用。

关键词: 汽轮机; 末级叶片; 钛合金

中图分类号: TK265 文献标识码: A

1 前言

目前, 发电及各种动力装置的容量正在急速扩大, 汽轮机单机容量也要相应地增大, 这就必须要增大各级叶片的容量或出力。增大叶片容量的方法约有: 加长叶片(增大通流面积)和提高机组转速(增大叶片承受能力)。对于电站汽轮机, 受频率限制, 难以改变转速, 只能增加叶片长度; 对于工业汽轮机, 可同时采取改变转速和增长叶片的做法。无论哪一种方法, 都会使作用在叶片上的离心力增大, 导致叶片的工作应力增大。这对于汽轮机高应力工况下的末级叶片来说尤为严重。

同时, 低压蒸汽轮机叶片断裂已成为早期投运的火电机组最主要事故停机原因。它占机组停机率的 20%~25%, 其中约有 1/3 与腐蚀及冲刷磨损因素有关^[1]。叶片断裂主要发生在末级和次末级。这些级叶片的工作蒸汽处于湿蒸汽的状态, 蒸汽中的杂质如氯化物、氢氧化物和硫化物等杂质会析出并凝集, 影响叶片材料的抗腐蚀疲劳强度。用一般的 12%Cr 和 13%Cr 马氏体钢普通叶片材料, 在有腐蚀性氯化物、硫酸盐等环境中, 会导致叶片表面点蚀、叶根和叶顶或围带和拉金间产生应力腐蚀。为了满足大功率汽轮机发展的要求, 广大科技人员一直在努力研究、开发钛合金叶片。

2 钛合金的性能

钛是一种低密度金属, 它的密度是 $4\,429\text{ kg/m}^3$

约为钢密度 $7\,750\text{ kg/m}^3$ 的 60%。在 50 年代中期, 钛用于宇航和航空工业中, 六七十年代开始了商业应用。纯钛的强度并不高, 但在加入铝、钒、钼等金属成分后, 钛合金达到了与高强度钢相比的强度等级。钛合金除了密度低而强度高的特点外, 还具有较低的弹性模数, 因而与钢相比, 钛合金具有更高的韧性。另外, 钛合金的耐腐蚀疲劳强度不太会受周围环境的影响, 具有高抗腐蚀性能, 可以用来解决汽轮机中叶片腐蚀问题。这些特点都是历来汽轮机所用叶片材料不具备的。

用于汽轮机叶片材料的钛合金 Ti—6Al—4V 已成功使用了二三十年, 它具有良好的综合性能, 在运行中已积累了大量的经验。

2.1 Ti—6Al—4V 的金相组织

用做叶片的 Ti—6Al—4V 钛合金材料, 通常被制成 $(\alpha+\beta)$ 型的双相组织^[1]。加工过程和热处理方式的变化可以使 Ti—6Al—4V 合金产生各种不同的金相组织。从各方等大 α 相伴随晶间 β 相直至全部层状 $(\alpha+\beta)$ 相和在层状 $(\alpha+\beta)$ 相基体上的各方等大 α 晶粒的特殊金相结构。金相组织对 Ti—6Al—4V 合金的机械性能特别是弹性模数有重要影响。对于叶片来讲, 控制弹性模数很重要, 因为叶片的振动频率是随之而变的。模数主要由轧制的方向和温度确定。垂直于基面方向的弹性模数最大, 而平行于基面方向的弹性模数最小。Ti—6Al—4V 合金的最佳状态是有着混合 BT 基体的细粒两种形态结构。

Ti—6Al—4V 的热处理——退火, 相对来说较简单, 却能导致极大的结构稳定性, 热处理后强度水平更高。

2.2 Ti—6Al—4V 的性能

2.2.1 机械性能

Ti—6Al—4V 经退火后的标准屈服强度是 930 MPa, 比 12%Cr 不锈钢高出 50% (见图 1)。但是, Ti—6Al—4V 韧性较低, 延伸率的标准值是 15%, 约

为铝的 10%，比 12%Cr 钢也小些^[4]。

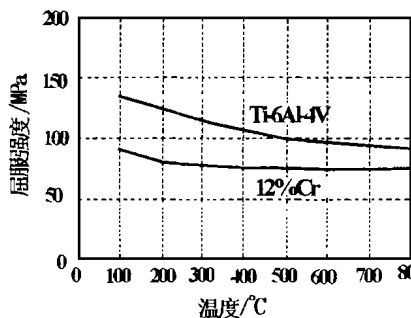


图 1 屈服强度比较

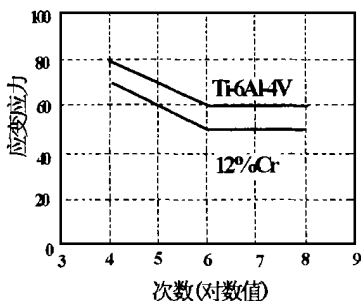


图 2 疲劳强度比较

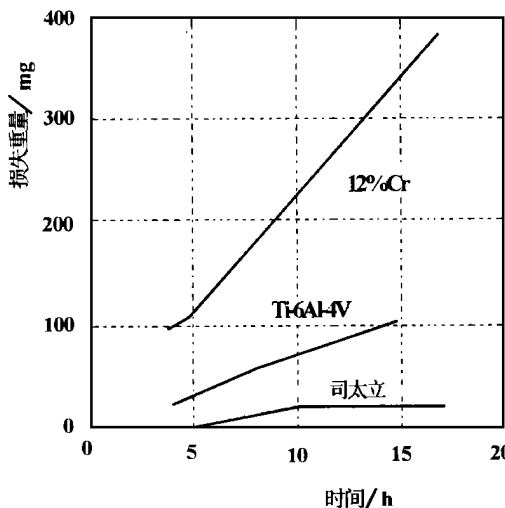


图 3 三种材料抗蚀性能比较

2.2.2 疲劳特性

Ti-6Al-4V 在表面无应力条件下，疲劳强度为 413MPa，比 12%Cr 钢高出 25%^[2]（见图 2）。

2.2.3 抗腐蚀性

Ti-6Al-4V 在低压缸有氯化物、氢氧化物和硫化物等的工作环境中不会产生点蚀^[1]。对于海水冷却的电厂，钛表面是否会吸氢而产生氢腐蚀和氢脆的问题早已引起

国外的重视，在 70 年代末 80 年代初，已有大量的研究与应用报告，总结积累了一些经验数据。国内一些电厂在借鉴国外经验数据的基础上，在实施阴极保护过程中也取得了自己的安全运行的现场数据。

2.2.4 抗水蚀性

实验室的试验表明，Ti-6Al-4V 比 12%Cr 钢的水蚀情况好得多。虽然司太立合金的抗蚀性能更好，但 Ti-6Al-4V 的防水蚀性能已经足够（见图

3）。

2.2.5 阻尼/振动特性

汽轮机叶片常用材料 12%Cr 钢和 13%Cr 钢，在一般的温度区域内是衰减特性最好的材料。衰减性就是叶片自身使振动衰减的能力。共振叶片产生振动应力与叶片的对数衰减率成反比。由于一般汽轮机叶片在运行中受各种激振力的影响，所以在设计中要采取措施，防止其发生共振。因而材料的阻尼也是一个重要的问题。钛合金叶片材料的阻尼，按其所受载荷的大小，在 12%Cr 不锈钢叶片材料阻尼的 20%~40% 范围内变动^[4]。这样，当叶片处在共振频率附近时，就会发生破坏。

为提高 Ti-6Al-4V 合金的减振性，冷却条件可采用急冷处理的方法。(α+β)型钛合金在(α+β)型钛合金在(α+β)区域且大于 500 °C 的温度范围内加热保温后急冷会使其减振性能大幅度增加，但它的热稳定性差。研究表明，V、Mo 都是使金相稳定的元素，加入 V、Mo 后，若 (V+Mo) >> 6%，可获得内耗大、热稳定性好的钛合金。典型的成分是：Ti-6Al-4V-3Mo^[3]。

2.2.6 可锻性

钛合金材料必须在低温下锻造，以避免金相结构变化而导致韧性降低。这就需要更大延压等级的锻压机。另一个问题是锻造时表面污染，须使用防护气体罩，锻造后要酸洗以除去污染。虽然增加了些困难，但锻造钛合金叶片是不成问题的。

2.2.7 切削性

钛合金叶片机械加工比钢合金叶片稍困难一些，因为钛合金弹性模数低，挠性增加，所以加工时带来一些问题。

2.2.8 可焊性

钛合金焊接比较困难，要用惰性气体保护装置，增加了成本和时间，但焊接仍然是可能的。

2.3 Ti-6Al-4V 的成本

Ti-6Al-4V 材料的成本是铬钢材料的好几倍。但原材料成本仅占整个叶片成本的一小部分。虽然钛合金在锻造、切削等方面较困难而实际额外增加了一部分费用，钛合金叶片的价格是普通钢叶片的 2~3 倍^{[1][2]}，但钛合金的重量只有钢的 60%。

3 钛合金叶片的应用

由于钛合金比铬钢具有更好的强度—重量比，

末级叶片长度比钢叶片可增加 40%，因而透平效率可提高 1%；对于核电机组可提高效率更多，可达 2%^[1]。另外，钛合金在腐蚀性环境中抗蚀性能好。国外已将钛合金用于制作末级长叶片。前苏联最早应用，已将钛合金叶片用于 800 MW 或更大功率的透平产品上。德国、瑞士、美国、日本等也竞相应用且有较快发展。西屋公司早在 1972 年就完成了整级钛合金叶片的安装，末级叶片 585 毫米已广泛应用于 100 MW 机组中，随后又将 725 毫米钛合金叶片用于低压透平中^[1]。日本三菱重工已锻造出 1016 毫米的钛合金叶片^[4]。更长的钛合金叶片正在研制中。

虽然钛合金有前述众多优点，制作和成本也不造成特别大的问题，但是，钛合金叶片可能会遇到的一个问题是钛合金的阻尼系数比钢的低。虽然材料阻尼只占系统阻尼的一部分，但钛合金叶片的机械阻尼也较低（日立公司近年来通过拉金处的凸台和叶顶处围带的持续接触来提高机械阻尼，该方法行

之有效^[5]，使提高钛合金叶片的机械阻尼成为可能）。因此，在采取措施提高钛合金的材料阻尼和系统阻尼之后，钛合金叶片将会有广阔的应用前途。

参考文献

- [1] 彭逢楚译. 用于蒸汽轮机叶片的 Ti—6Al—4V 合金材料. 国外透平——叶片材料专辑. 德阳: 东方汽轮机厂. 1985, 25.
- [2] T. M. 拉斯特, B. B. 赛施, R. E. 瓦尔耐. 钛合金汽轮机叶片的运行经验. 美国西屋公司汽轮机技术文集. 上海: 上海汽轮机厂. 1982.
- [3] 马辉, 王曼惠. 汽轮机末级长叶片用钛合金的减振研究探讨. 汽轮机技术, 1994, 36(4): 250~253.
- [4] 伊藤英勇, 通渡健明, 藤田民雄, 荒木良一郎. 汽轮机用钛经验—介绍神户制钢所加古川制铁厂 5 号机(5 万千瓦)机组实况. 火力原子力发电, 1980, 31(9): 49~62.
- [5] Kuniyoshi Tsubouchi, Yoshio Shikano, Naoaki Shibushita Shigeyoshi Nakamura Performance improvement of steam turbines International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, TAIES 97, 1997.

(渠 源 编辑)

(上接 314 页)

混合燃料在炉内燃尽所需的时间延长；无烟煤在燃烧过程中不断爆裂的特性和矽石着火更加缓慢的影响，使混合燃料在燃烧过程中粒径分布再次相对拉宽；低位热值的降低和较大的重度使大风量运行和多排渣成为必然。从火用的角度而言，矽石的火用值低于无烟煤，所以掺矽石燃料的能级下降。因此，为保证热效率，必须控制加矽比例。

从锅炉稳定燃烧和系统正常运行角度看，由于燃料量的增加（飞灰和排渣也增加）及水分和硫分的变化，使得燃料运输系统和除灰系统、锅炉本体、烟道及引风机的磨损和腐蚀加剧。矽石在高温下粘结性与无烟煤的差异及着火更加缓慢的特点，和因共生硫铁矿的因素造成炉膛内 FeS 的产生，使得燃烧控制难度加大。所以，为保证锅炉稳定燃烧和系统正常运行，也应该控制加矽比例。

4 风室静压和料层厚度的变化情况

混合燃料比之于无烟煤燃烧，需加大给料量，结合混合燃料灰分大不易燃烧的因素，决定了炉渣量的增加，这必然导致料层厚度 h 的增加，对于风室静压 Δp ，有：

$$\Delta p = r \times h_{\text{固定床}} \times (1 - \varepsilon_{\text{固定床}}) = r \times h_{\text{沸腾床}} (1 - \varepsilon_{\text{沸腾床}})$$

又因为分别破碎的混合燃料相对于原煤，重度 r 增加，几何粒径 d 分布的加宽使固定床空隙率 ε_0 下降，这都导致 Δp 的增加。了解料层厚度和风室静压的变化，有助于指导锅炉的正常运行。同时对工作在 Q_1

H 曲线下降段的送风机而言，这相当于增加了管道阻力，使得风机的运行工况点向高压风低风量的方向移动。所以，应该从原有风机的出力是否满足运行要求的角度来考虑加矽的比例。

5 混矽燃烧的除尘和脱硫

混矽燃烧使烟尘排放量和烟尘中硫份的增加，这必然使除尘和脱硫系统的负荷增加，加速了对设备的磨损和腐蚀。在除尘和脱硫为同一环节的工艺流程，如除尘脱硫麻石塔，因为亚硫酸钙的形成及灰水的沉淀，加速了除灰水管和除尘脱硫麻石塔的堵塞，容易影响除尘和脱硫的效果，造成锅炉正压运行，缩短运行周期。

6 结论

(1) 一般而言，对原有的沸腾床锅炉可以掺烧矽石，达到国家资源综合利用的要求。

(2) 在掺烧矽石时，为保证锅炉的正常运行，应该对原煤和矽石分别破碎和筛分。

(3) 在达到国家资源综合利用认证要求的前提下，从系统的角度考虑，应该控制加矽比例，必要时需要对不能满足运行要求的辅机进行改换。

(4) 对高硫份无烟煤掺烧矽石所进行的炉外烟气除尘脱硫，应该在工艺上把除尘和脱硫两个环节分开，以保证系统较长的运行周期。

(何静芳 编辑)

Chen Ze, Wu Laigui (Guangdong Provincial Electrical Power Bureau, Shenzhen, Guangdong, China, Post Code 5181202) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 309 ~ 311

This paper focuses on the specific features of the operation, maintenance and shutdown of a bypass stack-less gas and steam turbine combined cycle power plant. Discussed is the main difference among such a power plant, a thermal power plant, and other combined cycle power plants fitted with a bypass stack. In addition, some experiences gained during the bypass stack-less power plant's operation, maintenance and shutdown have been summed up, providing a useful guide for relevant designers and operating workers alike. **Key words:** absence of bypass stack, combined cycle power plant, power plant operation and maintenance

集中供热系统中的分户供热和热量计算 = **Heat Supply on a Household Basis and Metering of the Heat thus Supplied in a Central Heat Supply System** [刊, 汉] / Xu Fuchang (Qingdao Architectural Engineering Institute, Qingdao, Shandong, China, Post Code 266033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 312 ~ 313, 321

The author proposes a heating system design scheme incorporating such functions as heat supply on a household basis and metering of the heat thus supplied on a household basis. Meanwhile, an effective metering of the heat supplied can be implemented by the use of a simple hot-water meter. **Key words:** heat supply on a household basis, metering of heat supplied on a household basis, regulation of heat supplied, design scheme

无烟煤沸腾床锅炉掺烧煤矸石的分析 = **An Analysis of the Burning Process in a Fluidized-bed Boiler Firing Anthracite Mixed with Gangue** [刊, 汉] / Hu Rongquan (Songzao Mining Bureau Power Plant, Chongqing, Sichuan, China, Post Code 401445) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 314, 319

An analysis was conducted of a fluidized-bed boiler firing anthracite mixed with gangue. The analysis covers the following aspects: rational distribution of mixed fuel particle diameter, the quantity of gangue to be mixed with the anthracite and the resulting bed-material layer thickness, air chamber static pressure, dust removal and desulfurization, etc. The results of the analysis may serve as a guide for achieving the comprehensive utilization of resources during the construction of small-sized thermal power stations in the neighborhood of a high sulfur-content anthracite mine. **Key words:** fluidized bed boiler, anthracite, analysis

小型燃气锅炉尾部烟道的腐蚀机理及预防 = **Mechanism of the Boiler-Tail Flue Corrosion of a Small-sized Gas-fired Boiler and Proper Measures Taken to Cope with such Corrosion** [刊, 汉] / Zhao Yan, Lu Guangfa (Heilongjiang Machinery Building School, Harbin, China, Post Code 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 315 ~ 316

Described in this paper is the corrosion phenomenon occurring at the tail-portion flue of a gas-fired boiler. The cause of this corrosion is analyzed and some measures to cope with it are proposed from the viewpoint of boiler structure and operation management, thus providing some useful hints for boiler designers and operation/management personnel. The measures proposed can be likewise applied to oil-fired boilers. **Key words:** gas-fired boiler, boiler flue corrosion, preventative measures

用于汽轮机叶片的钛合金材料—Ti-6Al-4V = **Titanium Alloy Ti-6Al-4V, a Metal Used for the Fabrication of Turbine Blades** [刊, 汉] / Tu Shan, Sun Bi, Mao Jingru (College of Energy Sources and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 317 ~ 319

The uprating of a steam turbine power output will necessitate the increase in area of the turbine last-stage flow path and an enhancement in blade corrosion-resistance. The chrome alloy steel blades currently in use can hardly meet the relevant requirements. Hence, it is essential to conduct a comprehensive research for the application of blades made of titanium alloys. The present paper gives a brief description of the properties and the use of titanium alloy blades. **Key words:** steam turbine, last-stage blade, titanium alloy