学免免 www.xuetutu.co

第54卷第6期 2012年12月

1 000MW 火电机组锅炉给水泵汽轮机 两种通流设计分析

孔建强,李健生,马晓飞

(杭州汽轮机股份有限公司,杭州 310012)

摘要:汽轮机按工作原理区分有冲动式和反动式两种型式,介绍应用于1000MW等级火电机组配套的半容量锅炉给水泵汽轮机基于冲动式和反动式两种设计理念衍生出的不同产品,并以实际工程项目为例,分析对比其通流设计、主要性能、配置特点及目前的应用情况,对两种方案热效率、控制策略、叶片强度和安全等方面的技术特点进行讨论和分析。

关键词:锅炉给水泵汽轮机;通流设计;冲动式;反动式

分类号:TK262

文献标识码:A

文章编号:1001-5884(2012)06-0408-04

Analyzed of the Two Kinds of Flow Path Design for 1000MW Turbo
Generator Unit Feedwater Pump Turbine

KONG Jian-qiang, LI Jian-sheng, MA Xiao-fei

(Hangzhou Steam Turbine Company Limited, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Steam turbines are broadly classified into two types of impulse and reaction according to the working principle. This article introduces different products of half capacity boiler water – feed pump turbines based on both design concepts of impulse type and reaction type which applied to 1000MW grade thermal power units. It analyses and compares their flow design, main performance, configure feature as well as the situation of their applications at present. It discusses and analyses the technical feature of two different ways on their efficiency, control strategy, blade strength and safety and other aspects.

Key words: boiler feedwater pump turbine; flow path design; impulse type; reaction type

0 前 言

本世纪初期,杭汽成功开发了300MW、600MW 大型火电机组配套用半容量锅炉给水泵汽轮机,并持续在这一辅机领域内维持较大的市场份额。随着火电装备制造水平的提升及对节能环保要求的不断提高,火力发电机组也日益向更高参数、更大容量发展,近几年投运的单机容量为1000MW 机组明显增多,该容量等级机组对配套的锅炉给水泵驱动用汽轮机的设计和制造提出了更高要求。近年来,杭汽为1000MW 等级火电机组配套用半容量锅炉给水泵汽轮机陆续生产制造了两种类型的机组。一种是冲动式机组(同类机组华能玉环电厂一期曾从日本进口),其通流结构是基于三菱重工技术设计制造的;另一种是反动式机组(与上海外高桥二期900MW 超临界燃煤机组配套锅炉给水泵汽轮机类似),其通流结构和配置是基于杭汽反动式汽轮机系列设计技术制造的。本文围绕着两种机型的不同通流结构设计,分析比较其主要技术特点及目前的应用情况。

1 基本设计参数和通流数据

以国电泰州项目1000MW 火电机组半容量锅炉给水泵汽轮机(基于三菱重工技术,以下称冲动式机组)和新密电厂二期采用的按杭汽反动式系列技术设计的1000MW 火电机组半容量锅炉给水泵汽轮机(以下称反动式机组)为例,其基本设计参数和通流数据如表1所示。

2 热力设计分析

2.1 进汽与调节方式

冲动式机组进汽采用的是喷嘴调节,通过8个阀碟控制8组喷嘴,蒸汽切换时通过另外的高压喷嘴组实现汽源内部切换;而反动式机组进汽采用的是节流调节,不设调节级,通过节流调节阀实现内缸的压力控制,汽源通过管道调节阀进行外部切换。

喷嘴调节方式的效率损失主要是部分进汽弧段损失,未 全部开启时的调节阀节流损失(单个阀碟)以及调节级叶片

收稿日期:2012-04-06

作者简介:孔建强(1970-),男,浙江桐乡人,硕士学历,高级工程师,曾主持300MW、600MW、1000MW等级火电半容量给水泵汽轮机开发项目,以及国家重点项目100万吨/年等级乙烯装置、100万吨/年等级PTA装置用工业汽轮机的国产化开发设计工作。现任杭州汽轮机股份有限公司副总工程师、工业透平研究院院长。

表1										
项目	当 量	机型	类	别	执行标	<i>7</i> 1±:	外形尺寸 ×宽×高)	ー 轴承函 mn		
国电泰州 項 目	1 000MW 火电半容量	HMS500D		·动式 菱 重工技术)	JIS	4 958	×5 500 ×3 56	0 260	0 内切换	
新密电厂	1 000MW 火电半容量	WK63/71		.动式 式系列技术)	API61:	2 6 100	×5 152 ×6 40	0 3 76	4 外切换	
项目	额定进汽参数	女	定排汽参数 kPa(a)	最大运行背 kPa(a)	压 设计 ¹ kW			车续功率 kW	额定工况内效率 %	
国电泰州 項 目	0.800MPa(a)/349	9.0℃	5.2	14.7	13 9	15 57	49 22	2 000	83.0	
新密电厂 二期工程	1.105MPa(a)/393	3.2℃	6.6	40	15 1	40 57	20 20	600	83.0	
项目	调速范围 * r/min	叶片级数	p 	根形式		末级叶片环 形面积,m ²	排汽方式	转子重量 t	轴振动保证值 mm	
国电泰州 項 目	2 850 ~ 6 300	6 级(1 调节 2 压力级 +3 化	T .	从树型	500	2.1049	单流	5.4	0.05	
新密电厂 二期工程	3 000 ~6 000	24 级(9×2 压 +3×2 低压	т т	型和叉型	303	2 ×1.129	双流	8.2	≤0.036	

^{*} 调速范围设定与水泵选型相关

的鼓风和斥汽损失。节流调节方式的效率损失来自于节流 损失。

一般意义上,节流调节方式在最大工况点的内效率会优于喷嘴调节,但在变工况特别是小工况情况下,节流损失将会比较严重,效率下降幅度将大于喷嘴调节。冲动式机组采用的8组低压喷嘴加一组高压喷嘴,在低压阀全开时部分进汽度约为80%,各类进汽损失此刻降到了最低;对于反动式机组的节流进汽调节来说,由于给水泵汽轮机汽源参数的固有特点,在机组带部分负荷时给水泵汽轮机的进汽压力也会相应降低,使得部分工况下采用节流调节引发的节流损失得到了缓解。因此,这两种技术的汽轮机在进汽与调节方式上对效率产生的影响大致相当。

2.2 排汽能力分析

冲动式机组末级叶片环形面积约为2.1m²,其φ2.8m的圆形排汽口面积为6.2m²;反动式机组末级叶片环形面积约为2.3m²,其两个2×3.2m的方形排汽口面积为6.4m²,均略大于冲动式机组,总体来说两者的排汽能力相当。但冲动式机组为单流排汽,对比反动式机组的双分流排汽,其在排汽管线的设计、安装方面更具有优势。

2.3 低压叶片漏汽损失方面

冲动式机组的叶片设计均带有不同形式的叶顶围带(图1 所示为末级叶片阻尼围带)。而反动式机组的所有低压叶片均为拉筋结构,无叶顶围带(图2 所示为反动式机组低压叶片结构)。从定性的角度分析,围带可以与叶片构成封闭的槽道,可减少叶顶漏气损失。由于锅炉给水泵汽轮机的工作汽源大多为0.8 MPa(a)~1.2 MPa(a),压力较低,因此低压级组占到的可用焓降比重较大,自带围带结构可减少的漏气损失会相当可观,这在热力设计上更具优势。

2.4 热力性能对比

2.4.1 设计点比较

冲动式机组设计功率为13915kW,最大连续功率22000 kW,功率裕度58%;反动式机组设计功率为15140kW,最大

连续功率20 600kW,功率裕度36%。采用节流调节的反动式机组在保证相似出力能力的同时在设计点取得了和冲动式机组同等的内效率。鉴于节流调节的特点,反动式机组在叶片效率方面略优于冲动式机组。

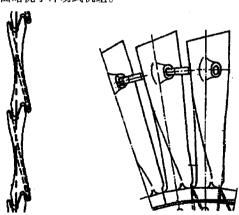


图1 末级叶片阻尼围带 图2 2.4.2 各工况效率数据对比

图 2 反动式机组低压叶片结构

从表2对比可以看出,采用节流调节的反动式机组在负荷较高时的效率优于冲动式机组,但在主机负荷下降较多时,冲动式机组的喷嘴调节方式更具效率优势。

2.5 汽源配备方式

给水泵汽轮机通常采用四段抽汽作为工作汽源,部分工况由于参数变化过大会出现蒸汽不足的问题,因此,通常会设置备用汽源以保证汽轮机出力。

冲动式机组配备有单独的热备高压喷嘴组,在低压蒸汽不足时,备用汽源直接通过高压喷嘴进入汽轮机并在轮室混合(内切换),备用蒸汽作为"补充蒸汽"形式,与正常工作蒸汽同时作为工作汽源;正常运行期间,只采用四段抽汽,热备的高压喷嘴组仅在特殊情况下投运,且不能单独进行工作(如图 3 所示)。

反动式机组配备有外部切换阀,在低压调阀接近全开尚

66.1

30%

·	\	-**		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		LAZZILL DOLOL	\
	冲动式(基于三				反动式(按杭汽反动	可式系列技术设计)
工况	进汽*	轴功率**	内效率	工况	进汽*	轴功率**	内效率
vwo	1.14/357.2	15 860	83.5	vwo	1.24/392.2	17 843	84.7
100%	1.11/357.9	13 022	82.4	100%	1.10/392.2	15 499	83.2
80%	0.89/359.8	8 862	80.5	75%	0.96/394.3	11 254	80.8
50%	0.59/368.1	3 811	72.9	50%	0.68/398.8	9 779	82.1

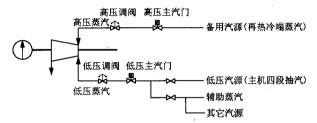
30%

表 2 冲动式机组(印度项目)与反动式机组(新密电厂二期)各工况下内效率数据

71.6

*由主机抽汽参数确定; **由水泵特性参数确定

0.38/356.2



2.573

图 3 冲动式"内切换"调节方式示意图[1]

不能满足水泵拖动功率要求时,位于备用蒸汽管道上的切换 阀开启,将正常工作蒸汽切出工作流程,汽轮机完全采用备 用蒸汽工作并用切换阀控制汽轮机转速,备用蒸汽可以单独 工作(如图 4 所示)。切换设备在功率不足时自动切换,切换 后完全采用备用蒸汽可以达到 VWO 工况功率、转速需求;但 外切换无法采用四段抽汽和备用蒸汽同时工作。

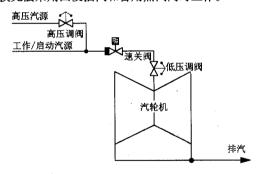


图 4 反动式"外切换"调节方式示意图

冲动式机组的内切换主要难点在于高压喷嘴及调节级的强度设计,不同汽源同时进入汽轮机引起的热冲击将严重 损害转子等部件寿命,以及不能单独采用备用蒸汽工作的问题,优势在于切换蒸汽作为"补汽"形式,在汽源蒸汽不足时能够迅速补充,快速完成切换;外切换对多类工况运行的适应能力更强,但因为完全切除了正常工作汽源,对备用蒸汽的需求量较大,特别是在高负荷切换时,有时因备用蒸汽管网来不及补充蒸汽而不能完成切换。

3 叶片材料及强度

3.1 叶片应力水平

末级叶片最大拉应力方面:

冲动式机组末级叶片高度为 500mm,最大叶顶直径为 1 866mm,最大叶顶线速度为615.5m/s,已超过当地音速;反动式机组末叶片高度为 303mm,最大叶顶直径为1 335mm。

两种机型汽轮机的允许调速范围大致相同,运行时叶片底部截面拉应力与转速的平方、叶高和平均半径成正比。按此分析,冲动式机组叶片拉应力最高值约为反动式机组叶片应力最高值的两倍左右。

3 873

0.43/389.3

汽流弯应力方面:

底部截面弯矩

$$M_0 = \frac{L \sqrt{P_u^2 + P_a^2}}{2}$$

式中,L为叶高; P_u 为汽流力圆周方向分力; P_a 为汽流力轴向分力。

圆周方向分力

$$P_u = \frac{1000N_u}{uZ_2\varepsilon}$$

式中, N_u 为级的轮周功率;u 为平均圆周速度; Z_2 为动叶只数; ε 为部分进汽度。

轴向分力

$$P_a = \frac{G}{Z_2 \varepsilon} (c_{1a} - c_{2a}) + (p_1 - p_2) u$$

式中,G为质量流量; c_{1a} 、 c_{2a} 分别为叶片进出口汽流轴向分速度; p_1 、 p_2 分别为叶片进出口汽体静压力。

两种机型的总轴功率基本一致,冲动式机组为6级叶片,反动式机组为24级叶片,故平均的级轮轴功率比4:1;平均圆周速度比为1.38:1;冲动式机组末级叶片共76只,反动式机组为39只;冲动式机组的质量流量2倍于反动式机组单边质量流量;如果忽略汽流力沿叶型变化等次要因素带来的影响,从应力水平分析上可以得出:两者的汽流弯应力大小基本相当。受叶片高度影响,冲动式机组的叶片底部弯矩1.6倍~1.7倍于反动式机组的叶片。

3.2 动叶片材料及其力学性能

冲动式机组的动叶片材料主要有 2Cr12NiMol W1V、1Cr12Mo 和 17 - 4PH(国内牌号 0Cr17Ni4Cu4Nb),反动式机组的动叶片材料主要有 2Cr12MoV 和 2Cr13,动叶片材料化学成分如表 3 所示。

2Cr12NiMo1W1V 与 2Cr12MoV 同属高温叶片材料,工作 区最高温度 400℃。在该温度下:

 $2\text{Cr}12\text{NiMo}1\text{W}1: \sigma_{0.2} = 683\text{MPa}; 2\text{Cr}12\text{MoV}: \sigma_{0.2} = 423\text{MPa}_{0.2}$

0Cr17Ni4Cu4Nb 与 2Cr13 同属低温长叶片材料,工作区 最高温度 100℃。在该温度下:

0Cr17Ni4Cu4Nb; $\sigma_{0.2} = 670MPa$; 2Cr13; $\sigma_{0.2} = 510MPa$ 。 从数据对比可以看出, 冲动式机组动叶片材料力学性能

表 3		单位:%				
材料名称	С	Si	Mn	P	S	Ni
2Cr12NiMolW1V	0.20~0.25	≤0.50	0.50 ~ 1.10	≤0.030	€0.025	0.50 ~ 1.00
2Cr12MoV	0.18 ~ 0.24	0.10~0.50	0.30 ~0.80	≤0.030	≤0.025	0.30 ~ 0.60
0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.055	≤1.00	≤0.50	€0.030	≤0.025	3.8~4.5
2Cr13	0.16 ~ 0.24	≤0.60	≤0.60	≤0.030	≤0.025	≤0.60
化学成分,%	Cr	Мо		W	V	Cu
2Cr12NiMolW1V	11.00 ~ 12.50	0.90 ~ 1.2	5 0.90	0 ~ 1. 25	0.20 ~ 0.30	≤0. 30
2Cr12MoV	11.00 ~ 12.50	0.80 ~ 1.2	0		$0.25 \sim 0.35$	≤ 0. 30
0Cr17Ni4Cu4Nb	15.00 ~ 16.00	W.	Nb + Ta	0.15 ~ 0.35		$3.00 \sim 3.70$
2Cr13	12.00 ~ 14.00	_		_	_	≤0. 30

普遍在叶片材料的1.6倍~1.7倍,材料应用水平较优,这也 是其设计高转速长叶片汽轮机的重要基础。

3.3 叶根形式

冲动式机组采用的是枞树型叶根,而反动式机组采用了倒T型和叉型叶根。

枞树型叶根是一种高承载能力的叶根,其特点是装配和 更换方便,在长期运行过程中展现出良好的可靠性和安全 性;缺点是外形复杂,装配面多,要求有很高的加工精度和材料性能。

倒 T 型叶根结构简单,加工装配方便,结构可靠,但叶根 承载面积小,并且倒 T 型装配空间要求相对较小,适用于整 锻转子多级叶片结构。叉型叶根适用性好,加工方便,便于 拆换,同等尺寸下承载能力低于枞树形叶根。

从技术层面上讲, 枞树型叶根更为先进, 但在满足应用的条件下, 采用简单的叶根形式反而是恰当和可靠的。

3.4 末级叶片防水蚀处理

叶片水蚀与排汽干度、末叶级前压力、工作转速和末叶顶高等参数有关,一般可采用水蚀系数的方式来评估湿蒸汽对叶片可能造成的损害。当水蚀系数小于0.3时,可认为水蚀情况不严重,叶片无需特别处理;而水蚀系数大于0.7时,叶片进汽边需要作硬化处理;水蚀系数越大,水蚀情况将越严重。

由于两种技术的锅炉给水泵汽轮机在设计点效率基本相同,在同等进汽条件下,排汽含湿量也基本相等。假设末叶级前压力相等,则冲动式机组的水蚀系数是反动式机组的1.4倍左右。根据计算,反动式汽轮机的最大水蚀系数约为0.5,则冲动式机组最大水蚀系数在0.7左右,在末级叶片进汽边进行硬化处理后,该数值仍在可接受范围内。

冲动式机组对末级叶片的硬化采用的是焊接司太立合金的方法,而反动式汽轮则是采用叶片表面激光淬硬法。

4 两种机型的具体应用

继国内首台基于三菱重工技术设计制造的1000MW 火电半容量锅炉给水泵汽轮机在泰州电厂顺利投运以来, 杭汽陆续为北仑、北疆等电厂提供了近50台该型汽轮机的配套, 并在近期出口印度市场。国内首台基于杭汽反动式汽轮机系列设计技术制造的1000MW 火电半容量锅炉给水泵汽轮机用于常熟电厂, 同类机型机组已陆续为美国 BECHTEL 公司、韩国斗山重工所提供配套, 用于驱动同等级火电机组锅炉给水泵。

5 结 论

基于三菱重工技术设计制造和基于杭汽反动式汽轮机系列设计技术制造的两种不同类型的1000MW等级火电半容量锅炉给水泵汽轮机在热力性能上基本相当,相比较而言,三菱通流设计较多地运用了先进的设计手段,整机显得轻巧,但使用材料要求较高,加工、制造和装配要求也都较高。而基于杭汽轮技术设计制造的通流级数较多,体积较大,但在加工、制造和装配方面较为简单,且在强度方面留有更大的安全裕度。

杭汽目前的汽轮机产品仍以反动式工业汽轮机为主,在保有反动式汽轮机技术特点的同时,可以取长补短,借鉴冲动式技术的优点来优化完善产品设计,如更高性能的叶片材料、更先进的叶根形式、长扭叶片阻尼围带、切换形式等。

参考文献

[1] 黄之浚,曹李农. 1000MW 超超临界火电机组锅炉给水泵汽轮机的控制[J]. 热力透平,2007,36(2):191-194;201.

(上接第 407 页)

- [29] 杨卫娟. 电站锅炉变负荷引起的水冷壁渣层热应力和吹灰在 线模糊优化运行的基础理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
- [30] Prasad. G, Swidenbank E. A Neural net model based multivariable long range predictive control strategy applied in thermal power plant control [C]. Energy Conversion, IEEE Transaction on, 1998, 13(2):485-492.
- [31] Carlos E. Romero, Ying Li, Nenad Sarunac. Modification of boiler
- operating conditions for mercury emissions reductions in coal fired utility boilers [J]. Fuel, 2006, 85:204 212.
- [32] Hwa Woon Byeon, James L. Ulrey. Designing a standard thermal power plant for daily startup/shutdown: the HP Bypass control and safety function [J]. ISA Transactions, 1997, 36(1):71-77.
- [33] Dragan R, Tucakovic a, Vladimir D. Thermal hydraulic analysis of a steam boiler with rifled evaporating tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31:509-519.