

# 年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用 汽轮机的研制\*

方 寅, 孙 烈, 张 科, 刘龙海  
(杭州汽轮机股份有限公司, 浙江 杭州 310022)

**摘要:** 针对年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的国产化问题, 依托天津石化实例应用汽轮机的研制开发项目, 介绍了年产百万吨乙烯装置用汽轮压缩机组国产化研制论证立项的背景和过程, 结合国内首台套该用途汽轮机研制方案的确定和实施, 详述了该用途汽轮机的主要技术参数、结构配置、技术特点、需遵循和执行的国际标准, 以及研制过程中需要解决的关键问题、方案难点和采取的对策措施, 最后简述了该汽轮机国产化研制中获得的3个创新专利成果。研究结果表明, 本研究实现了该用途汽轮机的完全国产化。

**关键词:** 汽轮机; 裂解气压缩机; 国产化; 乙烯装置

**中图分类号:** TK262; TH122      **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2012)10-1154-05

## Development of steam turbine for cracking gas compressor with annual output of one million tons of ethylene device

FANG Yin, SUN Lie, ZHANG Ke, LIU Long-hai  
(Hangzhou Steam Turbine Co. Ltd., Hangzhou 310022, China)

**Abstract:** Aiming at the localization of steam turbine for cracking gas compressor with annual output of one million tons of ethylene device, it was introduced that the background and process of the project based on the instance of the application of steam turbine research and development projects in Tianjin Petrochemical. Combined with conforming and implementation of the development scheme which relies on the first domestic set of steam turbine used in this condition, it was described in detail the main technical parameters, structure configuration, technical characteristics and the international standard needed to be complied with, as well as the key issues, research difficulties and the measures. In the end, the three innovation patents were introduced which were achieved during the process of the steam turbine's development of localization. The results indicate that the localization of the steam turbine is completely realized.

**Key words:** steam turbine; cracking gas compressor; localization; ethylene device

### 0 引 言

乙烯是发展合成橡胶、合成塑料、合成纤维的基础原料, 乙烯的产量是衡量一个国家石化工业发展水平的重要标志。因此乙烯装置在石化工业中具有特别重要的地位。

根据《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》(国发[2006]8号)的精神和要求, 国家确定把百万

吨级大型乙烯成套设备国产化作为重点推进的16个重点领域之一。为此, 国家对百万吨级大型乙烯装置关键设备国产化研制列入国家重大技术装备攻关项目。

长期以来, 年产百万吨级乙烯装置中, 核心设备三机(乙烯压缩机、丙烯压缩机、裂解气压缩机)的生产技术一直为世界少数几大公司垄断, 发展我国乙烯工业必须突破这道门槛。国家重大技术装备研讨论证会的结论之一, 就是国内已经基本具备研制乙烯装

收稿日期: 2012-05-19

基金项目: 浙江技术创新重点计划资助项目(浙经贸技术[2006]283号)

作者简介: 方 寅(1962-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事汽轮机开发方面的设计和研究. E-mail: fangy@htc.net.cn

置中核心设备三机的能力。最终国家确定天津、镇海、抚顺年产百万吨乙烯装置工程分别作为乙烯核心设备三机的国产化依托工程。

天津石化年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的研制开发项目,是杭州汽轮机股份有限公司继“九五”和“十五”以来成功开发出的大庆石化年产24万吨裂解气压缩机用汽轮机、燕山石化年产60万吨丙烯压缩机用汽轮机、上海石化年产70万吨乙烯三机压缩机用汽轮机、茂名石化年产80万吨乙烯裂解气压缩机用汽轮机的基础上,通过国家发改委多次组织召开的中石化、中石油、大专院校和有关企业的专家和学者参加的年产百万吨乙烯装置工程重大技术装备论证会研讨后,而被确定列入国家层面的国产化攻关研制开发项目。最终于“十一五”初期,公司正式签订了国内首台套天津石化年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的研制开发项目合同。

为此,本研究对该用途汽轮机的研制开发项目进行攻关,重点研究该大型工业汽轮机转子动力学的特性,以实现转子的综合指标振动值,满足国际上最新版的API612<sup>[1-3]</sup>标准以及用户提出的相关要求;开展对汽轮机支座、前后轴承座、汽缸和排汽缸等主要静体部件的研究,解决热胀间隙和支撑刚度等一系列问题;开展对汽轮机运行启动阶段可控性的研究和对大型汽轮机整体发运技术等课题的研究,达到完全掌握和拥有核心技术的国产化研制目标。

## 1 汽轮机的研制要求和标准

(1) 汽轮机的蒸汽参数如表1所示。

表1 蒸汽参数

项目	最小值	正常值	最大值
进汽压力/Pa(a)	10.1	10.7	11.6
进汽温度/℃	500	510	530
抽汽压力/MPa(a)	3.75	3.85	4.03
排汽压力/MPa(a)		0.013 5	
排汽温度/℃		51.83	

(2) 汽轮机的功率与转速如表2所示。

表2 功率与转速

项目	正常工况	额定工况	能力工况
功率/kW	50 202	61 245	62 000
转速/(r min <sup>-1</sup> )	4 125	4 234	4 234
转速变化范围/(r min <sup>-1</sup> )	3 387~4 446		

(3) 主要技术数据:

主蒸汽速关阀:2×Φ250,溢流阀:1×Φ250,抽汽速关阀:1×Φ400;

排汽接管口尺寸:2 780×1 356;排汽缸采用钢板

焊接的结构形式;

汽轮机轴承跨距为3 985;转子毛坯长为6 670,重约14 000 kg;

径向轴承:宽径比为 $B/D=0.5$ 的可倾瓦轴承;

汽轮机通流级数:1级调节级+20级压力级+3级低压级;

单独钢底盘尺寸:长6 440、宽5 000、高800,钢底盘重约28 000 kg。

(4) 主要结构配置。

该汽轮机是目前国内功率最大的抽汽凝汽式工业汽轮机,型号为EHNKS63/80/72<sup>[4]</sup>。汽轮机为双侧进汽,采用向上进汽、向下抽汽和向下排汽的结构布置方式。汽轮机的纵剖面图如图1所示,汽轮机三维轴测装配图如图2所示。

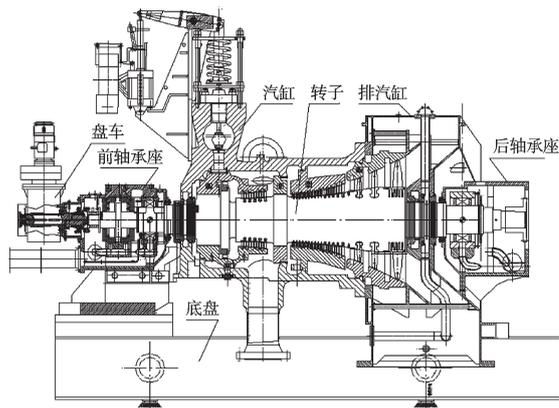


图1 汽轮机纵剖面图

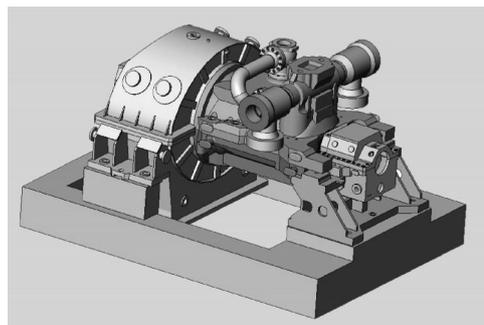


图2 汽轮机三维轴测装配图

该汽轮机的汽缸各有一个水平中分面和垂直法兰面,如图1、图2所示;其汽缸和排汽缸垂直法兰面的找中安装运用了有自主专利技术的滑块式接缸装置,如图3、图4所示。汽轮机的前、后轴承座和座架均采用钢板焊接结构形式,汽轮机前轴承座安装带有接地电刷和有专利技术的全自动电动盘车装置,同时在汽轮机后轴承座上再冗余一套常规的手动盘车装置。汽轮机的前、后径向轴承设计采用了非对称结构形式的可倾瓦轴承;推力轴承主副两侧使用了具有自动找平特性的可倾瓦结构形式。汽轮机转子输出端与驱动压缩机间的联轴器<sup>[5]</sup>采用了带有在线监测功率等功



图3 汽轮机上半接缸装配后的情况



图4 接缸装配后的局部放大图

能的膜盘式结构形式,以适应和满足年产百万吨级乙烯三机的高可靠性和经济性要求。

汽轮机的汽缸上装有疏水阀,需回收的各路疏水最后都集中到疏水膨胀箱。针对驱动大型乙烯压缩机启动时的特殊性,同时根据以往的实践经验,汽轮机的汽缸下半单独配置了有专利技术的温度补偿装置,如图5所示,以满足汽轮机启动时控制上、下汽缸的温差。汽轮机轴承座的油封环,带有充氮气的保护接口,并提供带阀的管线和法兰与用户配套交接。汽轮机带有冷凝系统和液位自动调节系统,并配有两级射汽抽汽装置以保证冷凝器能正常安全工作。汽轮机带有保温材料和配置大型金属罩壳,罩壳的设计不仅要满足降噪、隔音和隔热、防尘,还需满足通风、照明和检修维护方便。汽轮机设计带有单独的钢底盘,满足用户对汽轮机整体运输和安装的要求,以达到缩

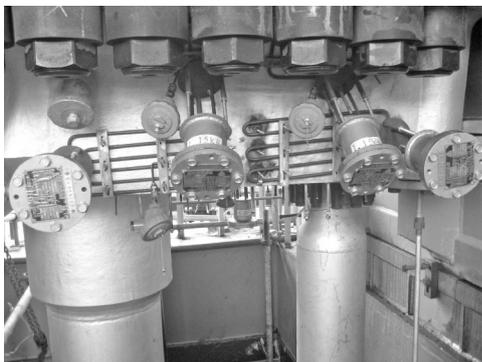


图5 温度补偿装置的电加热器安装

短整个年产百万吨乙烯装置工程建设周期的目标。

(5) 研制的标准。

该汽轮机的设计制造遵循和执行国际上最新版的API612标准,调节控制系统的设计制造执行NEMA SM23 D级标准<sup>[6]</sup>,机械振动、轴位移监测和轴承温度监控系统设计执行API670标准<sup>[7]</sup>,噪声控制执行API615标准<sup>[8]</sup>,联轴器设计执行API671标准<sup>[9-10]</sup>。

## 2 汽轮机的研制方案和难点

### 2.1 研制方案的目标

天津年产百万吨乙烯装置驱动裂解气压缩机用汽轮机是我国有史以来功率最大的驱动用工业汽轮机,同时该用途汽轮机又是整个乙烯装置流程中的核心关键设备。依据国家重大技术装备研讨论证会的结论之一,通过研究国外年产百万吨级乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机收集的数据、方案和实例产品,结合国情确定3条研制的原则目标,即:① 确保首台套研制汽轮机的可靠性;② 完全掌握和拥有核心技术的国产化研制;③ 按最新国际标准的要求进行研制,并力争在某些指标方面有所突破或者超越。

### 2.2 研制难点和对策措施

在项目研制过程中,本研究针对研制方案确定的原则、目标和要点,进行不断分解、细化和完善,并成立子课题组,负责具体落实研制攻关。以下是研制方案中部分重点研究的课题,以及这些课题研制的难点和采取的对策措施:

(1) 重点研究汽轮机转子动力学特性,确保转子的振动值满足API612以及用户提出的相关要求。在研制方案设计阶段,由于汽轮机转子及联轴器等尚无法最终确定具体尺寸,转子的理论振动响应计算仅是初步的结果。从振动响应计算报告数据结果分析,该汽轮机转子的2阶振动响应正好在运行转速附近,尽管放大系数在允许的范围内,但这是转子设计的危险信号和需要调整处理的关键环节。为此,本研究采取的对策措施是争取按以往设计经验能够控制的思路、条件和技术路径来解决该汽轮机转子动力学特性:

① 对汽轮机转子两端进行控制。针对转子输出端的联轴器,经过与用户、压缩机厂家和设计院的反复沟通和协调,本研究最终确定的形式为带实时监测扭矩功能的膜盘式结构联轴器,并且其半联轴器的重心为内置式的,而对转子另一侧与电动盘车联接的部件,除了满足特定功能外,尽可能减轻重量,并且重心为内置式。

② 不断完善转子振动计算模型,并且使用转子振动计算分析软件优化设计计算,力求转子振动计算模

型尽可能与实际转子相一致。

③ 根据转子振动计算的结果,结合径向轴承的间隙、瓦块数和支撑形式、顶轴方式、支承刚度和阻尼等因素,专门设计了非对称结构形式的可倾瓦轴承。

④ 提高汽轮机转子高速动平衡的精度要求,以确保转子动力学性能和制造质量。

(2) 对汽轮机支座、前后轴承座、汽缸和排汽缸等主要静体部件的研制攻关。在此,本研究主要定性地简述前支座、轴承座与汽缸的热胀间隙和排汽缸支撑刚度这两个难题的解决方式:

① 尽管焊接结构形式的前支座与轴承座已在低压进汽的汽轮机上应用,且比较成功。但在高参数进汽和更大规格型号的轴承座上还没有实际运行的经验。再考虑到该汽轮机的进汽温度很高,相应的汽缸绝对热胀值很大,轴承座的温度也比较高,对焊接前支座与轴承座的配合间隙设计选取是否合适和合理,就显得非常重要。因为相同温度下,钢的线胀系数比铁大,在同样温升时的膨胀量纲也较大。

在实际的研制过程中,本研究考虑过用传统和成熟的铸造结构和配合间隙,也进行过相关的调研和定性分析比较。通过参考国外大公司年产百万吨级乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机和其他类似工业汽轮机的支座与轴承座,以及API612条款对轴承座的明确要求(即不应使用铸铁的轴承座或轴承座支架),最终本研究采用了独特猫爪形式的焊接结构和配合间隙。实际运行结果表明,该方法满足和解决了该汽轮机前支座、轴承座与汽缸的热胀间隙难题。

② 通过已安装试车的汽轮机的现场运行情况表明,对于已经应用于汽轮机产品中的排汽缸和轴承座的刚度数据,存在实际刚度和理论计算刚度数据偏差较大的问题。分析和研究结果表明,该问题由以下原因引起:由于排缸结构非常复杂,相关联的边界条件多,理论计算时对焊缝和边界条件的选取与实际偏差较大,按理论刚度计算汽轮机振动响应的结果也就和实际数据存在较大偏离;排缸实际制造及焊接时,还不能够确保与图纸要求的完全吻合,造成排缸刚性数据和理论计算结果的偏离较大;该汽轮机的理论振动计算结果表明,转子对后轴承座的刚性数据相差比较敏感。如果实际刚度比理论计算值相差20%,则转子振动响应无法满足API612的要求。

因此本研究采取了以下措施:① 不断完善计算模型和研究计算方法中工程数据的选择与权重,尽量模拟实际汽轮机的状况,将偏离和偏差控制在允许的范围内;② 加强工艺过程控制,严格按排汽缸图纸制造,对重要部位焊缝100%拍片检查和对关键尺寸进行控

制;③ 通过汽轮机出厂前的空负荷机械运转试验,来验证排汽缸支撑刚度。

实际运行结果表明,该裂解气压缩机用汽轮机解决了排汽缸支撑刚度数据偏差较大的难题。

(3) 对汽轮机运行启动阶段可控性的研制攻关。该裂解气压缩机用汽轮机的进汽温度很高,达500℃以上(如表1所示)。针对“启动时如何控制上、下汽缸的壁温和温差,使汽轮机按可控的方式启动开车运行”的问题,本研究采用的措施如下:

① 根据汽轮机热力和强度计算的结果,在汽缸上、下半的适当位置,布置和安装温度监测探头,以实时地测量和监视汽缸上、下半的壁温和温差值。

② 针对带压缩机启动时的特殊性,并根据以往的经验,最终在汽缸下半配置了有专利技术的外缸温度补偿装置,以满足汽轮机运行启动阶段的要求(如图5所示)。

(4) 对大型汽轮机整体发运技术的研制攻关。因合同中明确要求,该汽轮机必须整体发运到天津用户现场。经过对运输方式,长、宽、高尺寸和重量的限制调研与必要勘察,在实际研制过程中,本研究主要采取如下措施:

① 将汽轮机开发形成的施工图,通过计算机配置的SolidWorks软件,进行零部件三维实体造型和虚拟装配设计(如图2所示);

② 根据整体运输的要求,有针对性地研发设计了汽轮机装运和运输的专用工具;

③ 通过对整体发运的运输线路、桥梁和高架道路等因素和实际状况的勘察数据的研究,详细制订了整体发运实施方案,并最终顺利发运到达天津石化现场。

### 3 3个创新专利成果

在天津石化年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的国产化研制过程中,涌现出了一批创新专利成果。下面简述该汽轮机有代表性的3个创新专利成果。

#### 3.1 滑块式接缸装置(专利号:ZL 2010 2 0188472.1)

该专利成果属于装配工艺范畴,特别适用于单件小批量生产制造模式的冷凝式工业汽轮机。研究人员利用该专利技术对汽轮机前缸和排缸垂直法兰面进行找中安装后,能确保汽轮机进行合理的热膨胀,装配精度高、测量方便、操作简单,能够缩短汽轮机接缸装配的周期。

该专利技术的创新点在于开创了多台汽轮机同时接缸的制造装配模式。

该装置的原理是用滑块零件定位在汽缸垂直法

兰面的圆孔中,排缸垂直法兰面的槽道按规定要求接缸装配后,确保槽道沿着滑块两侧的“L”形调整片,进行辐射线方向的热膨胀。汽轮机汽缸和排缸的上半接缸装配后的情况如图3所示,接缸装配后的局部放大图如图4所示。

### 3.2 汽缸下半缸温度补偿装置(专利号:ZL 2010 2 0111942.4)

该汽缸下半缸温度补偿装置由电加热器和防爆控制柜及其辅助设备组成,能够在防爆的环境条件下,长期安全和可靠平稳地工作。本研究具体主要解决了以下问题:

(1) 对上、下半汽缸进行合理的温度测点布置,解决了与电加热器的安装固定方式;

(2) 确定了电加热元件表面的最高控制温度和上、下汽缸温差数据范围,以便进行试验并验证数据的合理性和可操作性;

(3) 确定了电加热器的控制区域和总功率等。

该专利技术的创新点在于将汽轮机上、下半汽缸的温差数据控制在合理的范围内。

汽缸下半缸温度补偿装置的电加热器安装如图5所示。

### 3.3 电动盘车装置(专利号:ZL 2006 2 0104665.8)

该全自动电动盘车装置是针对天津石化年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的实际情况和工作条件而单独研制开发和设计的专利产品。

#### 3.3.1 参数和配置

(1) 输出转速为2 r/min;依据压缩机厂家提供的数据,最终确定该转速;

(2) 输出方向(从盘车装置看汽轮机)为顺时针;

(3) 盘车工作扭矩为为10 000 N·m,启动扭矩为15 000 N·m;

(4) 盘车输出轴布置与汽轮机转子同轴,如图1所示;

(5) 联接方式为:盘车装置壳体与汽机前轴承座端面法兰联接。

#### 3.3.2 主要技术特点

(1) 盘车能够自动投入和脱离,投入过程无障碍啮合;

(2) 低冲击结构和液压阻尼结构设计的组合,比同类进口产品冲击更小;

(3) 增加轴向安全结构,由各种原因引起盘车装置的离合器无法与汽轮机转子正常啮合而产生顶死现象时,起到保护汽轮机转子和盘车装置的作用;

(4) 防咬蚀的传动结构,便于远程在线控制;

(5) 适合于防爆场合长期工作和整体发运汽轮机

的要求。

该专利技术的创新点在于能够实现自动盘车。

## 4 结束语

该国内首台(套)年产百万吨级乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机,经过开发设计、加工制造、空负荷机械运转试验、包装整体发运、天津石化现场安装调试和一次投用开车成功,历时三年多的时间。

天津石化乙烯装置的用户对该汽轮机运行半年后的评价是:性能稳定、使用良好,各个系统达到乙烯装置生产与设计的要求,能够满足乙烯装置安全和环保要求,符合工艺条件。

综上所述,国家通过依托工程天津年产百万吨级乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的研制项目实施,不仅实现了首台套该用途汽轮机的研制目标,而且通过该核心设备的成功研制,积累了大量的工程经验,为后续研制工业应用中更大规模等级乙烯装置用汽轮机提供了技术保障。

### 参考文献(References):

- [1] American Petroleum Institute. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Steam Turbines—Special—Purpose Applications (API612—2003) [S]. American Petroleum Institute, 2003.
- [2] American Petroleum Institute. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Steam Turbines—Special—Purpose Applications (API612—2005) [S]. American Petroleum Institute, 2005.
- [3] ISO14661—2000. 国际标准中译本[S]. 2000.
- [4] Siemens AG. TEK—Richtlinie and TEB—Richtlinie[M]. Siemens AG, 1994.
- [5] 方寅,孙烈,陈金铨,等. 汽轮机转子输出端和联轴器的设计探讨[J]. 机电工程, 2010, 27(10): 16—20.
- [6] National Electrical Manufacturers Association. Steam Turbines for Mechanical Drive Service NEMA Standards Publication No. SM 23—1991(R1997, R2002) [S]. National Electrical Manufacturers Association, 2002.
- [7] American Petroleum Institute. Machinery Protection Systems (API670—2000) [S]. American Petroleum Institute, 2000.
- [8] American Petroleum Institute. Sound Control of Mechanical Equipment for Refinery Services (API615—1987) [S]. American Petroleum Institute, 1987.
- [9] American Petroleum Institute. Special—Purpose Couplings for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services (API671—2007) [S]. American Petroleum Institute, 2007.
- [10] ISO. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—flexible Couplings for Mechanical Power Transmission—special—Purpose Applications (ISO10441—2007) [S]. ISO, 2007.

[编辑:张翔]