

日本地热电站汽轮机建造的基本原则

[苏] 马库欣A. H.等

日本首批地热电站是1966年建成的松川（22兆瓦）及1967年建成的小竹（12.5兆瓦）地热电站。由于七十年代出现的那场震撼整个资本主义世界的能源危机，在许多国家（其中包括日本），开展了积极的地热能源利用。自1974年以来的十年间，日本又建成并投入营运五座地热电站，其功率共计180兆瓦。

在此期间日本积极参与世界上其它国家（为美国、墨西哥、萨尔瓦多、印尼、菲律宾、肯尼亚、冰岛、葡萄牙）地热电站的建造并为他们制造专用设备。

日本专家仔细地收集并积累了地热电站建设和运行的经验，进行了各种各样的研究，对在用设备实施了定期检查。由于日本拥有情报资料和经验，使其在地热电站主要设备和辅助设备，尤其在汽轮机研制方面，成为世界上占领先地位的国家之一（见表1）。

表1 1984年全世界地热电站汽轮机生产情况

生产国	功率(兆瓦)	所占百分比
日本	4265.3	77.91
东芝制造厂	2362.3	43.15
三菱重工	1377.8	25.16
富士	499.0	9.10
川崎	26.2	0.5
其它国家	1154.5	22.09
全世界	5419.8	100

在广泛收集世界各国地热电站事故的情报资料基础上进行分析研究，其结果作为汽轮机加工工艺的基础。事故原因的资料统计结果示于图1。从图1a可见，汽轮机是地热电站中最易损坏的设备，从运行记录看，其事故最多（见表2）。因此，制订了一些在汽轮机设计和加工中，为保证其可靠和有效运行必需引起注意的主要的、特殊的要求。

本文根据1985年苏联电力工业部代表团赴日考察资料编写。黄征信译自“Теплоэнергетика” 1986. №6
李乡复校

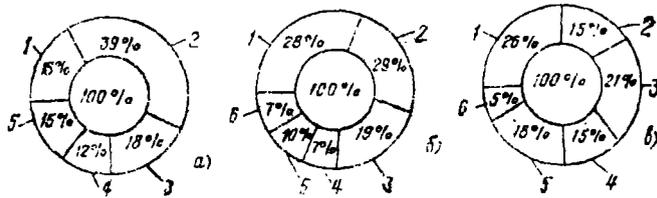


图 1 世界地热电站事故统计数据

a—事故对象：1—集汽系统；2—汽轮机；3—汽轮机蒸汽管道；4—凝汽系统；5—冷却系统。b—地热电站各系统的事故原因：1—侵蚀；2—腐蚀；3—硬的微粒沉积；4—腐蚀疲劳；5—由腐蚀裂纹引起的应力降低；6—其它原因。c—汽轮机事故原因：1—侵蚀；2—腐蚀；3—硬的微粒沉积；4—腐蚀疲劳；5—由腐蚀裂纹引起的应力降低；6—其它原因。

表 2 地热汽轮机事故原因

国家及其地热电站	汽 轮 机 动 叶 片	喷咀装置	转 子	壳 体
日本： 松川	第一级侵蚀，第四、第三级破损；微粒的影响。	第一、第二级有沉积物。		
小竹	第一级叶片破损。			
小沼	第一级叶片破损，叶片锁口破损。			
鬼首	有沉积微粒的第一级叶片破损。	第一级盐脱落。	腐蚀。	
ホシバル	靠近第三级的内壳破损。			
冰岛：克拉弗拉	第二、第三级侵蚀			
菲律宾：季维	内壳第四级叶片和第五级叶片破损			
迈克林格·本亨			第一级轮盘破损	
萨尔瓦多：阿胡阿恰潘	侵蚀		叶片因侵蚀引起振动	
墨西哥：塞拉普里斯托 阿祖弗列斯	末级侵蚀 第一级侵蚀	盐脱落(16%) 盐脱落	锈蚀	
美国：格伊泽尔斯	第一、第二级破损			
新西兰：瓦伊拉克伊	末级侵蚀		转子与隔板腐蚀	外壳破损，隔板腐蚀。
意大利：洛尔杰列洛	第一级破损，叶片锁口件腐蚀	盐脱落	腐蚀	侵蚀

地热电站汽轮机制造的特点，首先取决于工质——天然蒸汽的特性。尽管这种载热体化学组成不同，但对决定汽轮机设计和运行特性的所有地热载热体的质量要求是共同的。下面列举地热蒸汽最常见的特性：

1. 地热载热体的腐蚀强度取决于蒸汽中含有硫化氢氯离子，碳酸气、碳酸盐及硫酸氢盐离子、氨气、铵及硫酸盐离子。载热体中的这些杂质导致地热电站的重要部件，尤其是汽轮机的腐蚀，使叶片疲劳强度下降及生成裂纹。

2. 地热载热体中有小于10微米（译者注：原文MKM）硬的尘状微粒。通常在缝隙狭窄处和在主停汽阀前装有滤网。但是10微米左右的微粒还是可以顺利地通过这些防护装置。这些微粒之所以形成，是因为汽水混合物中含有大量的化合物如SiO₂、CaCO₃、Fe等等，这些混合物经分离器后随蒸汽带入汽轮机。在岩层渗滤过程中，当热传递给蒸汽时就带入了岩石微粒；地热电站蒸汽流通部分的腐蚀和侵蚀的产物便随蒸汽进入汽轮机。

3. 汽轮机内蒸汽的高湿度也是地热载热体的特点。地热汽轮机蒸汽的初始参数低于通常汽轮机的蒸汽初始参数。低的初始压力意味着蒸汽的比容大，在汽轮机内工作焓降小，耗汽量就增加；相当大的一部分焓降在汽轮机通流部分处于饱和和线下工作。

上述地热载热体的特点（有侵蚀气体，蒸汽中有尘状微粒，湿度高）是制造地热汽轮机所遇问题的主要根源。有鉴于此，日本专家建立了一种研制汽轮机的通用方法（见图2），这种方法考虑了上述因素的影响且可能解决那些对汽轮机构件带来不良影响的问题。

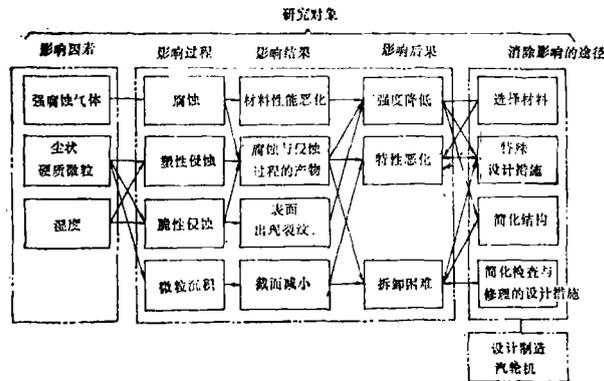


图2 日本厂家的地热电站汽轮机制造战略

1. 蒸汽中强腐蚀气体的存在，加速汽轮机内的腐蚀过程，其结果是工作叶片表面状态变坏且生成腐蚀产物微粒。叶片工作表面变坏本身就导致汽轮机工作可靠性降低，正如硬的未被捕获的腐蚀产物的形成一样，使汽轮机特性变得更坏并难于维修。

2. 蒸汽中有硬的尘状微粒存在，加速在汽轮机零部件中的侵蚀和沉积过程。这种

过程所产生的结果是侵蚀产物硬微粒形成，叶片表面出现裂纹和蒸汽通流截面变小。其后果是汽轮机工作的可靠性降低，原有的工作特性变坏并使其零部件修理复杂化。

3. 湿度的影响促使汽轮机零部件被侵蚀，导致汽轮机工作可靠性和效率降低。

本文提出的方法包括为消除这些因素对地热汽轮机工作可靠性产生有害影响的建议。

解决这些问题的第一种途径，是在设计汽轮机时注意选材。选材是在大量机组运行考验的基础上进行的。例如在日本的松川和鹿子田，墨西哥的塞拉普里斯托，菲律宾的季维等地热电站就进行过大量运行考验。在运行考验过程中，金属材料在试验系统内直接经受当地地热载热体的考验，同时对在当地运行的电站装置的运行经验进行分析。

图3示出不同材料由于腐蚀使强度极限下降的测试研究结果。从图上可见，含镍量大的钢，其强度明显下降。显微结构研究表明，在这种情况下，不但观察到材料的腐蚀缺陷（麻点），也观察到材料内部结构的重建情况。从图上看，3.5Ni-13/4Cr-0.5Mo-0.1V钢不能用作汽轮机转子材料而Cr-Mo-1/4V钢却完全适合且通常采用这种材料。汽轮机壳体用碳钢。

地热电站汽轮机就其参数而言，相当于热电站低压汽轮机。但因热电站低压汽轮机转子用的是高镍钢，把它用作地热电站汽轮机转子材料是不可能的，这是因为这种材料在侵蚀介质中强度明显降低。

在侵蚀介质中，材料性状的第二个特点是材料的工作循环数与疲劳强度的关系特性（图4）。

对通常的热电站介质，从图4中可以看到疲劳强度极限达到的数值（图示水平直线部分）。在地热介质侵蚀的情况下，材料疲劳强度大大降低，这种降低的趋势直到极限状态而无法克服。在周期性负荷变化的构件设计时应引起关注。

另一个解决问题的途径是采用专门的结构措施。这种结构要使汽轮机内部不致沉积尘粒，而脱落的尘粒又易于清除，从而减轻叶片与转子的负载。

第三种途径是最大限度地简化结构（形状简单，减少连接件数量），这样就能更有效地提高汽轮机的可靠性。对称地从汽轮机壳体两侧布置蒸汽入口，避免采用以前那种在主管道与壳体间设置的送风冷却结构——过去为此曾专门研究了补偿器性能、变形成和壳体负载。这些都是汽轮机结构简化的例子。

第四种促使地热汽轮机工作可靠性提高的途径是保证拆装、检查和维修简便。积存尘粒处要设计成易于清除的结构。螺栓头易受蒸汽侵蚀，应以保护罩罩住防止螺栓头边棱被侵蚀。在适当位置应有检查孔、口。

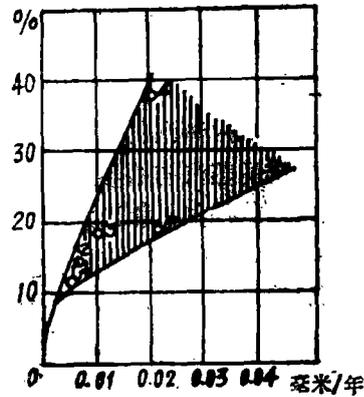


图3 汽轮机各种材料的腐蚀与强度下降度的关系曲线

材料成分：1. 15Cr-1.7Mo； 2. 12Cr-1Mo-1W； 3. 12Cr； 4. 3.5Ni-13/4Cr-0.5Mo-0.1V； 5. 1Cr-1Mo-1/4V； 6. 12Cr-0.2Al。

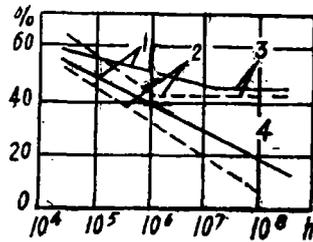


图4 汽轮机各种材料工作循环数与材料强度下降的关系

材料成分: 1. 12Cr; 2. 3.5Ni-13/4Cr-0.5Mo-0.1V; 3. 热电站汽轮机材料; 4. 地热电站汽轮机材料

采用上述措施设计汽轮机, 就可获得地热电站所需的、运行可靠的设备。日本东芝工厂对地热电站汽轮机主要部件采取以下特殊设计。

转 子

由于转子在具有侵蚀性的汽流中高速转动, 这就需要采用单一金属材料 and 减少离心负载。东芝工厂采用整锻转子, 避免焊接及不同材料的联接, 从而防止收缩变形并提高强度。采用清除了对侵蚀气体敏感的成分的铬钼钢来制备转子锻坯。在非破坏性检验(用高灵敏度超高频检查)之后, 进行毛坯切削加工。这样做的原因有二: 因为蒸汽容积流量大且应力有时高达材料屈服点的60%, 所以转子需要有长叶片; 甚至很小的腐蚀源就可能导导致应力集中, 故为提高可靠性, 转子表面的缺陷应该最小。为此, 要采取特殊的结构措施, 并保证在工件加工时特别小心。

叶片及喷嘴装置

叶片装置用三元流动方法进行计算, 这就可以确立叶片无冲击环流的条件。为了叶片除湿和清除尘粒的需要, 预先采取了相应的结构措施——叶片顶端有槽, 而槽中收集起来的尘粒就容易被离心力抛入周边的口袋形灰槽中, 灰槽下部为防止侵蚀, 用钢板保护。叶片采用具有防震高稳系数和具有防腐蚀、侵蚀高稳定性的铬钢。叶片应设计得能在弯曲和扭曲应力条件下工作。在叶片加工时, 应顾及由于侵蚀介质的存在而降低的强度(见图4)。喷嘴叶片比工作叶片受害少些, 但由于其表面受到侵蚀, 故采用铬钢制造。因为允许喷嘴叶片用底焊修补, 故其叶型应能保证甚至在喷嘴由于侵蚀而变薄的情况下可靠工作。

壳 体

壳体由钢板焊接而成，有上下两部分，分内壳和外壳。外壳是碳钢的，其整个下半部含轴承座。外壳内部以厚肋片和圆支撑加强，使能承受由于冷凝真空引起的负载。内壳上半部装有卸载隔板，该隔板由在角柱上的薄铅板组成。内壳接受热膨胀并允许自由地作轴向、径向位移。

内壳的袋形槽收集（尤其是收集低压段的）尘粒、水滴和侵蚀气体。

汽轮机控制系统及其设备

采用液压——机械系统控制大型汽轮机。这种系统对地热小功率汽轮机来说，与杠杆机械系统相比明显提高汽轮机工作的可靠性。液压——机械系统借助于安装在液压缸上的收纳口实施打开与关闭控制阀。

调 节 阀

地热汽轮机通常在基本工况工作。此时调节阀几乎是全开的。在这种情况下，节流配汽更为合算。有4个61cm（24英寸）阀。当负荷很小时，为保证工况有良好的稳定性，第一个阀先于其余三个阀打开投入工作。

停汽阀旁通

当阀全闭时，部分启动汽流通过 $\phi 250\text{mm}$ 的旁通阀。当汽轮机工作时，所有调节阀完全打开。《速度/负荷》转换手柄置于95%额定转速（下限）处。当来自阀井的蒸汽耗量突然变化时，由于蒸汽含有大量混合物、微粒等杂质，必须在慢慢增加转速时防止负荷突变。当汽轮机在低负荷和低速运转时，靠旁通阀实施汽轮机特性调节。

主停汽阀

主停汽阀是两个 $\phi 850\text{mm}$ 的提升阀。其作用是当发生事故时截断汽流。蒸汽混合物微粒粘上阀杆就可能引起事故。因此，在主停汽阀与调节阀间装设两个带逆止阀的阀门。这两个阀有液压传动装置。回汽阀全开信号使主停汽阀完全打开。为防止在假动作时汽轮机停机，每一个阀都有电动连锁装置。东芝工厂掌握了地热电站功率范围甚广的大功率汽轮机制造技术。1974年在浑川（北海道）建成了地热载热体双循环的试验电站，载热剂初始温度近 140°C ，总功率为1兆瓦。为了在勘探和掌握地热地质情况期间供电给用户，正批量生产集装箱型易于运输的5兆瓦电站装置（总重50吨）。东芝工厂设计的最大

（下转第39页）

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| [11] 《动力》(日)1984, №168, P34~44 | [17] 《省 エネルギー》(日)1986, №8, P13~15 |
| [12] 《超临界机组译文集》1985, P1~57 | [18] 《动力》(日)1983, №11 |
| [13] 《动力快讯》1984, №11 | [19] 《OHM电气杂志》(日)1986, №1 |
| [14] 《国外动力建设》(俄)1983, №2, P6~7 | [20] 《日立评论》1986, №1 |
| [15] 《电气评论》(日)1985, №6 | [21] 《火力原子力发电》1980, №12 |
| [16] 《OHM》(日)1985, №12 | [22] 《电气评论》(日)1985, №1 |

NEW FEATURES IN THE DEVELOPMENT OF THERMAL POWER PLANT ENGINEERING IN JAPAN

Le Yongzhuo
(Dongfang Boiler Works)

Abstract

This paper gives a short description of the development of electric power industry in Japan. A change of development priority from oil-firing power stations to nuclear and coal-firing thermal power ones has been illustrated in this paper by giving specific examples. Some highlights of the thermal power plant development features in Japan are presented.

Key words: thermal power plants, Japan, development, technical information.

(上接54页)

地热汽轮机的功率为124兆瓦。四台这样的机组已安装在美国的格伊泽尔斯地热电站。在美国有该厂生产的11台装置在运行, 每台单机功率大于100兆瓦。

按东芝工厂专家们的意见, 建设地热汽轮机装置这样的任务, 要比制造、组织生产核电站和核电站汽轮机复杂得多。对核电站和电站汽轮机设计和制造而言, 只需考虑补充一些综合的、特殊的数据即可, 而这些数据可以在广泛的实机和实验室试验的基础上获得。东芝工厂对材料探索研究了近12年, 结果解决了长寿命的、可靠的地热汽轮机的建造问题。

必要的研究的提出本身就是有益的。除了团体性的科研中心外, 制造厂也研究这些问题, 但在制造厂里进行的是旨在寻求零件加工的原则性解决办法的研究。《西方工厂》的三个主要分厂之一制造核电站和核电站设备也包括地热汽轮机设备。该厂有5000名职工, 其中1000人在设计处工作, 该处有自己的计算中心(50人)。该厂的试验大楼(约250人)包括材料研究室, 通流部分研究室, 部套、零部件结构研究室, 生产工艺研究室以及新型动力设备(联合循环、燃料成分等等)研究室。

目前该厂保证在一年半内生产并供应新的、针对用户给定的载热体特性设计的、在具体运行条件下有高度工作可靠性的地热电站汽轮机装置。

(参考文献略)