



# 高压汽轮机运行

北京电业管理局

北京热电厂

水利电力出版社





# 高 压 汽 轮 机 运 行

---

北京电业管理局 北京热电厂

---

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书着重从热应力、热膨胀和热变形的角度,介绍高压汽轮机组在额定参数下的启动、停机以及滑参数启停问题。书中对供热式、背压式和中间再热式汽轮机组的运行特点,也作了详细的介绍。最后列举了几类典型的汽轮机事故,供读者分析,查找原因。

本书供汽轮机司机、从事汽轮机运行工作的青年工人阅读,也可供汽轮机专业的学员和技术员参考。

## 高 压 汽 轮 机 运 行

北京电业管理局 北京热电厂

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

1976年10月北京第一版

1976年10月北京第一次印刷

印数 00001—20330册 每册 1.15元

书号 15143·3215

# 毛主席语录

什么“三项指示为纲”，安定团结不是不要阶级斗争，阶级斗争是纲，其余都是目。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

世上无难事，只要肯登攀。

## 前 言

伟大的无产阶级文化大革命和批林批孔运动，大大促进了我国工农业生产的发展，伟大领袖毛主席亲自发动和领导的反击右倾翻案风的斗争，正在成为我国生产力发展的强大动力。随着工农业生产的迅速发展，我国新建、扩建的高温高压发电厂越来越多，电力战线技术工人队伍迅速壮大。为适应电力工业发展的需要，我们为汽轮机司机、从事汽轮机运行工作的青年工人和学员编写了《高压汽轮机运行》一书。

本书主要介绍与汽轮机运行有关的问题，如高压汽轮机的热应力、热膨胀和热变形；高压汽轮机在额定参数下的启动、停机和滑参数启停；供热式、背压式和中间再热式汽轮机组的运行特点；机组本体、调速系统、油系统、凝汽器和加热器带负荷运行时的维护。最后列举了几个类型较为典型的汽轮机事故，供读者分析和查找原因。

本书初稿曾根据北京电业管理局和北京电力试验所审稿同志的意见和提供的资料修改。

定稿过程中，水利电力部生产司组织召开了三结合审稿会议。参加的单位有杨树浦发电厂、吴泾热电厂、朝阳发电厂、辽宁发电厂、吉林热电厂、石景山发电厂高井电站、陕西省电业管理局、西安热工研究所和北京电力学校等单位的工人、技术人员和汽轮机车间的领导以及北京热电厂的同志。在审稿会上，同志们不仅交流了运行经验，提出了修改和补充意见，而且亲自动手修改补充，把各单位在多年汽轮机运行实践中所积累的宝贵经验补充进来，使原稿内容增加了，重点突出了，概念明确了，适用范围更大了。对于他们这种协作精神和辛勤劳动，我们表示衷心的感谢。

由于政治水平、业务能力和实践范围的限制，书中还会存在不少缺点和错误。我们怀着对我国伟大的社会主义建设事业的负责心情，恳切希望广大工农兵读者对本书的缺点和错误提出批评，予以指正。

北京热电厂《高压汽轮机运行》三结合编写小组

1976.4.

# 目 录

## 前 言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第一章 概 述</b> .....               | 1  |
| 第一节 我国高压汽轮机的使用情况.....              | 1  |
| 第二节 高压汽轮机与中压汽轮机经济性的比较.....         | 2  |
| 第三节 高压汽轮机的特点.....                  | 3  |
| <b>第二章 高压汽轮机的热应力、热膨胀、热变形</b> ..... | 5  |
| 第一节 金属材料的机械性能.....                 | 5  |
| 第二节 水蒸汽和汽轮机金属之间的热交换特点.....         | 9  |
| 第三节 热应力.....                       | 10 |
| 第四节 汽缸的热膨胀.....                    | 17 |
| 第五节 汽缸和转子的相对膨胀.....                | 19 |
| 第六节 上下汽缸温差引起的热变形.....              | 23 |
| 第七节 法兰内外壁温差和汽缸内外壁温差引起的热变形.....     | 24 |
| 第八节 转子的热弯曲.....                    | 25 |
| 第九节 法兰加热装置的作用.....                 | 28 |
| <b>第三章 额定参数下的启动</b> .....          | 32 |
| 第一节 启动前的准备工作与暖管.....               | 33 |
| 第二节 启动.....                        | 39 |
| 第三节 额定参数下的热态启动.....                | 47 |
| <b>第四章 额定参数下的正常停机</b> .....        | 51 |
| 第一节 停机前的准备.....                    | 51 |
| 第二节 减负荷.....                       | 52 |
| 第三节 解列发电机和转子惰走.....                | 53 |
| 第四节 盘车及润滑油系统的运行.....               | 55 |
| 第五节 停机以后的维护和保养.....                | 57 |
| <b>第五章 滑参数启动和停机</b> .....          | 59 |
| 第一节 采用滑参数启停的机组系统的配置.....           | 59 |
| 第二节 冷态滑参数启动.....                   | 62 |
| 第三节 热态滑参数启动.....                   | 68 |
| 第四节 滑参数停机.....                     | 69 |
| 第五节 滑参数启动和停机的优缺点.....              | 73 |
| <b>第六章 供热和中间再热汽轮机的运行特点</b> .....   | 75 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一节 供热式汽轮机的运行特点                                                          | 75  |
| 一、供热式汽轮机的经济性    二、调整抽汽式汽轮机的运行    三、背压汽轮机的运行                              |     |
| 第二节 中间再热汽轮机的运行特点                                                         | 81  |
| 一、中间再热汽轮机的热力系统    二、中间再热汽轮机的启动特点    三、大型中间再热汽轮机低压差胀的控制    四、中间再热汽轮机的停机方式 |     |
| <b>第七章 高压汽轮机带负荷运行时的维护</b>                                                | 90  |
| 第一节 参数变化对汽轮机运行的影响                                                        | 90  |
| 第二节 监视段压力的监督和通流部分结垢的处理                                                   | 95  |
| 第三节 轴向位移的监督                                                              | 104 |
| 第四节 振动的监督                                                                | 106 |
| 第五节 变压运行                                                                 | 109 |
| 第六节 提高出力运行                                                               | 115 |
| <b>第八章 调速系统和油系统的运行</b>                                                   | 119 |
| 第一节 调速系统的运行                                                              | 119 |
| 第二节 油系统的运行                                                               | 124 |
| 第三节 油系统的防火                                                               | 127 |
| <b>第九章 凝汽器和加热器的运行</b>                                                    | 129 |
| 第一节 凝汽器真空的监督                                                             | 129 |
| 第二节 凝汽器的逆向冲洗和清扫                                                          | 135 |
| 第三节 凝汽器铜管的清洗                                                             | 137 |
| 第四节 凝汽器铜管泄漏的监督和检漏的方法                                                     | 138 |
| 第五节 加热器的运行                                                               | 139 |
| <b>第十章 汽轮发电机氢冷和水冷装置的运行</b>                                               | 143 |
| 第一节 氢冷和水冷汽轮发电机的特点                                                        | 143 |
| 第二节 氢冷汽轮发电机的运行                                                           | 145 |
| 第三节 双水内冷发电机启停、运行及故障处理                                                    | 154 |
| <b>第十一章 运行事故举例</b>                                                       | 160 |
| <b>附 录</b>                                                               |     |
| 1.按压力排列的水的饱和状态参数                                                         | 169 |
| 2.焓-熵图                                                                   |     |

# 第一章 概 述

## 第一节 我国高压汽轮机的使用情况

解放前我国电力工业被帝国主义和国民党反动派所垄断，成为对我国劳动人民进行压迫和掠夺的工具。旧中国的电力工业存在着明显的殖民地和半殖民地的特征。那时发电设备要从许多国家进口。因此规格混乱，仅频率就有25周/秒、50周/秒和60周/秒几种。不仅如此，设备的配件、材料的供应也需要依靠外国。发电厂的设计、安装和检修，都要由外国制造厂和经售外国机器的洋行经办。技术上也是陈旧落后的。至于高压汽轮机，使用的就更少。解放前，我国仅在上海杨树浦发电厂有一台15千瓩的高压前置式汽轮机。

新中国建立以来，在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国的工农业生产朝气蓬勃，蒸蒸日上，正在迅速向前发展。作为国民经济先行官的我国电力工业，也以解放前无可比拟的速度前进，展现了一派生机勃勃的新面貌。

解放后的头十年内，我国投入运行的发电设备的总容量就增加了2.4倍。仅在1958年投入运行的发电容量就几乎相当于我国解放前六十八年的装机总容量。1958年我国运行着的高压汽轮机的容量，占全部火电容量的20%。解放前我国没有热电厂。到1958年我国运行着的供热机组的容量已占火电容量的四分之一，其中高温高压的供热机组占很大的比重。在大跃进的1958年，由我国自己制造的高压25千瓩凝汽式汽轮机投入了运行；接着在1959年我国制造的高压50千瓩凝汽式机组和高压25千瓩供热式机组也陆续投入了运行。

1960年苏联修正主义领导背信弃义撕毁合同、撤退专家，他们妄图使我国电力工业陷于瘫痪。他们的代理人并且扬言，我们只能造25、50千瓩的汽轮机。但是我国电力工业战线的广大工人、干部和技术人员，在党和毛主席的领导下，特别是经过无产阶级文化大革命，发扬了大无畏的革命精神，独立自主，自力更生，使我国电力工业走上了更加宽阔的道路。现在完全由我国自己设计、制造和安装的高压汽轮机在全国已普遍采用，国产100千瓩高压机组和125千瓩中间再热机组已成为各电网的主力机组。高温高压带有中间再热的200、300千瓩的汽轮机也分别在1972和1974年先后投入运行，更大型的机组正在设计制造之中。这不仅进一步鼓起我国人民的斗志，而且也给敢于蔑视中国人民的现代修正主义者以迎头痛击。我们坚信，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国的电业工人将会为我们伟大的社会主义祖国作出更大的贡献，使我国的电力工业以更加雄伟的步伐继续前进。

图1-1是国产N200-130/535/535型中间再热汽轮机的纵剖面图。图1-2为国产N125-135/550/550型中间再热汽轮机的纵剖面图。



## 第二节 高压汽轮机与中压汽轮机经济性的比较

目前我国火电厂采用的新蒸汽参数，在中温中压机组中以35绝对大气压、435°C较为常见；在高温高压以上的机组中以90绝对大气压、535°C和135绝对大气压，535~550°C较为常见。近几年来，高温、高压、大容量的机组在我国使用的越来越普遍。

在其它国家尚有采用超临界压力的机组，其新蒸汽参数一般在240~250绝对大气压、535~570°C左右。

汽轮机的新蒸汽压力和温度提高后，其经济性显著提高。下表是中压与高压及以上机组经济性比较表。

| 比 较 项 目     | 新 蒸 汽 参 数<br>(绝对大气压, °C) | 35, 435 | 90, 535 | 135, 535<br>(一级中间再热) | 165, 535<br>(一级中间再热) |
|-------------|--------------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|
| 锅炉损失(%)     |                          | 11      | 10      | 9                    | 8                    |
| 汽轮机机械损失(%)  |                          | 1       | 0.5     | 0.5                  | 0.5                  |
| 发电机损失(%)    |                          | 1       | 0.5     | 0.5                  | 0.5                  |
| 管道系统损失(%)   |                          | 1       | 1.0     | 0.5                  | 0.5                  |
| 汽轮机排汽热损失(%) |                          | 61.5    | 57.5    | 52.5                 | 50.5                 |
| 总 损 失 (%)   |                          | 75.5    | 69.5    | 63                   | 60                   |
| 发电效率(%)     |                          | 24.5    | 30.5    | 37                   | 40                   |

由上表最后一栏可以看出，随着蒸汽参数的不断提高，发电效率已突破40%的大关，而且还在不断增加。

通常使用最多的汽轮机是凝汽式汽轮机。凝汽式汽轮机的主要热损失是冷端损失，即排汽在凝汽器中凝结成水时，潜热（汽化热）被冷却水吸收并带走而造成的损失。这样损失掉的热量大大超过了被汽轮机利用而作功的热量。无论是高压或中压凝汽式汽轮机，当凝汽器真空相同时，由于排汽凝结而造成的单位蒸汽流量的热量损失也相同（一般在550大卡/公斤左右）。进入汽轮机的新蒸汽参数越高，蒸汽所含有的热量也越多，但是排汽损失变化不大。因此当新蒸汽参数提高后，转变为机械能的热量相对增多，汽轮机的效率也相应提高。高温高压电厂的发电煤耗在400克/瓩·小时以下，而在中温中压电厂，煤耗则在500克/瓩·小时左右。虽然高温高压电厂的厂用电比中温中压电厂要高约1%左右，但扣除后，高温高压电厂的经济性仍要比中温中压电厂高许多。

然而新蒸汽参数不是可以无限提高的。当新蒸汽温度达570°C以上时，由于钢材在高温下的长期性能及焊接技术尚未被完全掌握，设备的可靠性大为降低，并且由于要使用价格昂贵的奥氏体钢材，也大大增加了设备的投资。

若只提高新蒸汽压力，而不提高新蒸汽温度，则汽轮机的效率提高较少。同时会使汽轮机后部低压段的蒸汽湿度增大，从而使后部叶片受冲蚀，影响机组的安全运行。为了提高汽轮机热效率和解决蒸汽压力提高后汽轮机低压部分湿度增加的问题，目前超高压机组普

遍采用一级甚至两级中间再热。中间再热就是把在汽轮机内已经部分作功膨胀降低了汽压和汽温的蒸汽，再次引入锅炉的再热器，重新予以加热。蒸汽温度提高后，引进汽轮机的中低压部分继续作功。这样，增大了每公斤蒸汽流经汽轮机时的可用焓降，从而提高了热效率。如国产125千瓩中间再热机组，其热效率比中压机组约提高50%，比初参数为90绝对大气压、535°C的机组约提高7%。如上所述，采用中间再热后由于汽轮机低压部分的蒸汽湿度得以降低，有利于大型机组的设计制造。

两级中间再热的机组，其设备和系统比较复杂，但是经济性提高不多，因此一般只在300或500千瓩以上机组或燃料价格高的地区机组上采用。我国自行设计和制造的125千瓩、200千瓩和300千瓩机组均采用一次中间再热。

### 第三节 高压汽轮机的特点

与中低压汽轮机相比较，高压汽轮机有一些特点，必须予以重视。高压汽轮机使用很高的新蒸汽参数，经常出现金属厚壁单向加热或冷却的情况，容易产生较大的温差，因而各部件受到较大的热应力作用。

由于高压汽轮机的工作温度高、汽缸较多，因此从冷状态加热到工作温度时汽缸和转子的绝对膨胀值很大。如国产中压12千瓩单缸背压机，总长4.2米，额定负荷时最大膨胀值为7毫米，而国产125千瓩双缸机组，总长13.5米，高中压缸膨胀值达20毫米，包括低压缸膨胀值在内则达30毫米以上。但是为了使机组有较高的经济性，又必须把汽轮机的动静部分的轴向和辐向间隙设计得尽可能地小，轴向间隙一般1毫米多，辐向最小间隙一般只有几十丝<sup>①</sup>，而在高温下间隙的变化幅度较大。所以高压汽轮机在加热和冷却不均匀、汽缸和转子出现温差致使膨胀存在差别时，发生动静部分之间碰触的可能性较大。并且高压汽轮机前轴封段长度较大，一般在1米左右，这一段汽缸（包括猫爪）和转子加热和冷却条件相差很大，与中压汽轮机相比，由此造成机组轴向间隙减小的可能性很大。

为使设备在较高参数下工作时金属部件有足够的强度，高压汽轮机的汽缸和法兰、螺栓等设计制造的都十分厚重。以一台100千瓩机组的高压汽缸为例，汽缸壁厚达120毫米，法兰水平宽度和厚度分别达320和400毫米。因此高压汽缸都很庞大，相对来说，高压汽轮机的转子做得比较轻巧，其重量仅为汽缸重量的1/4左右。这样就使高压汽轮机部件金属厚壁单向加热和冷却不容易一致，从而造成部件的变形和动静部分之间轴向和辐向的间隙减小。同时高压汽轮机高压转子产生热弯曲的可能性大，也给机组振动、轴向和辐向间隙的改变带来不良的影响。

此外高压汽轮机一般是多缸，因此轴系复杂，这也给机组的振动和轴向间隙的改变带来不利的影响。

这些区别于中压和低压汽轮机的主要特点，使高压汽轮机启动和停机时的矛盾复杂起来。

---

① 1丝即1丝米，为1毫米的百分之一，即100丝=1毫米。

实践指明，启动过程中，高压汽轮机各金属部件从较低温度状态变化到额定压力和温度下的状态；停机过程中，又从额定压力和温度状态变化到压力和温度较低的状态。在这两个不同的过程中，由于汽轮机的转子由静止变化到在额定转速下转动，或由额定转速下转动变化到静止，机组各部件的应力状态和相互配合关系都经历了很大的变化。因此，运行人员对每一机组的启动和停机具体过程必须有较为明确的了解，以便正确使用设备。否则不仅工作被动，严重者甚至会造成设备损坏，使机组立即不能运行，或降低机组运行的经济性，并成为下次事故的祸根。对这点必须予以充分的注意。

## 第二章 高压汽轮机的热应力、热膨胀、热变形

高压汽轮机在启动和停机过程中，它的各部件，如蒸汽管道、蒸汽室、汽缸、法兰、转子、螺栓等，由于所处的条件不同，新蒸汽对他们的加热或冷却速度也不同。因而各部件之间，或者部件本身各部分沿金属壁厚度方向上产生了明显的温差。高压汽轮机各部件之间的相对位置是有限制的，温差的出现就导致膨胀不均，因而造成热应力；同时温度差也使各部件产生不协调的热膨胀和热变形。这些现象对高压汽轮机的启动和停机都有直接的影响。

为了让司机同志们深刻掌握高压汽轮机的运行特点，本章首先对高压汽轮机常用金属材料的机械性能，热应力、热膨胀和热变形及其对高压汽轮机启动、停机和带负荷运行的影响，分节加以讨论。

### 第一节 金属材料的机械性能

高压汽轮机的高温部分必须由合金钢制成。如通过540°C蒸汽的导汽管常用12Cr1MoV或10CrMo910等合金钢，转子常用25Cr1Mo1V或20Cr3MoWV合金钢，汽缸常用20CrMoV铸钢，汽缸法兰螺栓常用25Cr2Mo1V等合金钢。各种钢材都具有特定的物理、化学、机械性能；对于汽轮机运行人员来说，首先应该知道的是金属材料的机械性能。

下面介绍有关金属材料机械性能的基础知识。

金属构件在受到外力作用后，无论外力多么小，构件都要发生变形。外力停止作用后，如果构件仍能恢复到原来的形状和尺寸，则这种变形称为弹性变形。

当外力增大到一定程度，则外力停止作用之后，金属构件就不能恢复到以前的形状和尺寸。这时构件的变形称为塑性变形，也叫作永久变形。产生塑性变形时，构件内部金属晶粒在外力作用下沿一定平面产生了滑移，晶粒之间产生了相对移动。

金属构件在受外力作用而变形的同时，其内部各部分晶粒之间也产生相应的力，称为应力，常用外文符号 $\sigma$ 表示。应力以单位截面积上所承受的力来表示。应力的性质决定于受力情况，比如构件受到外力的拉伸作用时，内部产生拉伸应力，受到外力压缩作用时，其内部产生压缩应力。因为受力情况不同，还有弯应力、剪应力、扭应力等。

金属材料在弹性变形范围内，它的伸长或缩短的数值与原长度的比，即 $\frac{\Delta l}{l}$ 叫做相对伸长或相对缩短， $\frac{\Delta l}{l}$ 称为应变，用 $\delta$ 表示。应变 $\delta$ 与应力 $\sigma$ 成正比关系，以数学形式表示如下：

$$\sigma = E\delta$$

$E$ 称为弹性模数,不同的金属材料具有不同的弹性模数。弹性模数 $E$ 反映了材料的固有特性,表示在拉伸或压缩时材料对变形的抵抗能力。同一材料的弹性模数 $E$ 随温度不同而有变化,也就是说同一种材料在不同温度下,它的机械性能不一样。 $E$ 一般用公斤/毫米<sup>2</sup>表示。

下面用金属在受拉伸力作用时的变形图来说明纵向应变(拉长或缩短)与正应力之间的关系。

图2-1是金属材料在受拉伸力作用时的变形图,纵坐标表示应力 $\sigma$ ,横坐标表示应变 $\delta$ 。这张图是用柱形拉杆在拉力机上做拉伸试验中得出的。

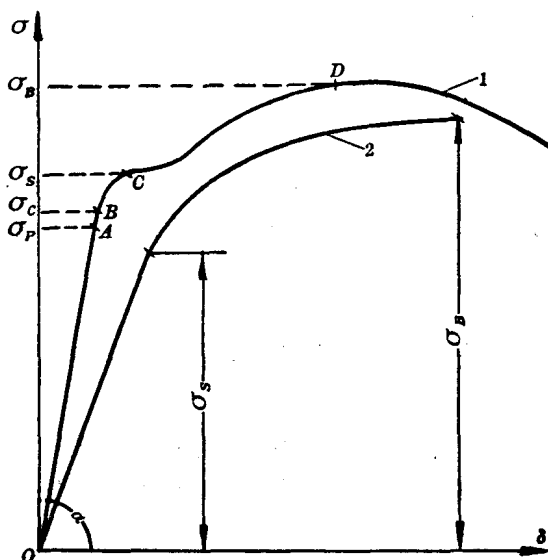


图 2-1 金属拉伸变形示意图

图中曲线1,由O到A为一直线,表示正应力与纵应变成正比。在这个范围内,纵应变的增加很慢。对应于A点的应力 $\sigma_P$ 称为比例极限。

在图2-1中,  $\tan \alpha = \frac{\sigma}{\delta} = E$ 即为该材料的弹性模数。

当应力超过比例极限以后,应变的增加较前稍快,拉伸图出现弯曲部分,当应力超过对应于B点的应力时,材料就失去弹性而开始发生永久变形,也叫塑性变形。这时如将拉力移去后,拉杆不能完全恢复到原来形状,故对应于B点的应力 $\sigma_C$ 称为弹性极限,但由于A、B两点相距很近,实用上常认为两者相合。即认为弹性极限与比例极限是一致的。

当应力继续增加至C点后,虽然应力不再增加,应变仍然继续增大,这种现象称为材料的屈服,而对应于C点的应力 $\sigma_S$ 则称为屈服极限。

如应力再增加,材料又略呈弹性,但应力增加较小,而应变增加较大,相应的曲线比较平坦,直到D点应力到最大极限。D点以后即使应力减小,应变仍继续增加直到拉杆断裂,D点处的应力 $\sigma_B$ 为强度极限。

对于合金钢的拉伸图则如曲线2。在这条曲线上没有明显的屈服极限,拉伸图上由直



线立即转为曲线,在这种情况下,通常以发生永久变形为拉杆原长度的0.2%时的应力为屈服极限,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

在拉伸或压缩的同时,材料不但有纵向变形,同时横向也发生变形。当纵向有伸长时,横向就有收缩。反之纵向缩短,横向必然胀大。在弹性变形范围内,横向应变 $\delta_1$ 与纵向应变 $\delta$ 之比的绝对值为一常数 $\mu$ ,即:

$$\mu = \left| \frac{\delta_1}{\delta} \right|$$

常数 $\mu$ 称泊松比。泊松比表明了这种材料在一个方向受力时垂直方向所引起的弹性变形规律。知道了 $\mu$ 以后,就可以计算构件拉伸或压缩时体积的改变。对于不同材料,其泊松比 $\mu$ 各不相同,其值须由试验加以确定。 $\mu$ 是无因次的数,就是说它没有单位。

还有几个说明塑性的特性,稍作介绍于下。

冲击韧性 $\alpha_K$ :表示材料受冲击时吸收机械能的能力,也即表示为毁坏试件所费的功与试样凹口处横断面积之比,以公斤·米/厘米<sup>2</sup>表示。从冲击韧性可以显示出金属在宏观结构和显微结构中存在的多种缺陷,如金属的过热、偏析、内部空隙和裂纹等,而这些缺陷是一般特性所不能表示出来的。

伸长率 $\delta$ :是指试件拉断时其长度的增量和原来试样长度的比,以%表示,并将试样长度 $l$ 与直径 $d$ 之比值写在注脚上,一般取 $\frac{l}{d} = 5$ 的试样,以 $\delta_5$ 表示。

断面收缩率 $\psi$ :是指试件拉断时其横断面积的减小值与原来截面积之比,以%表示。

上面所说的伸长率和断面收缩率表明材料的塑性,表示该材料是否善于变形而不致毁坏的特性。

下表列出汽轮机常用金属材料的机械性能。

碳钢和多种常用合金钢的机械性能表

| 钢 种       | 机 械 性 能<br>温 度<br>(°C) | $\sigma_{0.2}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\sigma_B$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\alpha_K$<br>(公斤·米/厘米 <sup>2</sup> ) | $\delta_5$<br>(%) | $\psi$<br>(%) | $E \times 10^{-4}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) |                             |
|-----------|------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| 20号碳素钢    | 20                     | 27                                      | 48                                  | 14                                    | 30                | 62            |                                             |                             |
|           | 200                    | 23                                      | 44                                  | 17                                    | 26                | 63            |                                             |                             |
|           | 300                    | 18                                      | 45                                  | 19                                    | 27                | 66            |                                             |                             |
|           | 400                    | 15                                      | 36                                  | 13                                    | 26                | 78            |                                             |                             |
|           | 500                    | 13                                      | 22                                  | 8                                     | 26                | 76            |                                             |                             |
| 25Cr1Mo1V | 20                     | 53~59                                   | 69~74                               | 2~10                                  | 15~19             | 41~64         |                                             | 用于高压转子、主汽门、调速汽门、阀头、门套等      |
|           | 450                    | 44~49                                   | 56~69                               | 12                                    | 16~18             | 59~63         |                                             |                             |
|           | 500                    | 43~47                                   | 51~55                               | 10~12                                 | 17~18             | 64~68         |                                             |                             |
|           | 550                    | 41~45                                   | 47~49                               | 10~11                                 | 17~21             | 69~73         |                                             |                             |
| 25Cr2MoV  | 20                     | 81~102                                  | 90~107                              | > 5                                   | 16~19             | 60~64         | 2.17                                        | 用于高压汽缸螺栓、螺帽                 |
|           | 500                    | 59                                      | 64                                  | —                                     | 19                | 75            | 1.8                                         |                             |
|           | 550                    | 50                                      | 56                                  | —                                     | 19                | 78            |                                             |                             |
| 25Cr2Mo1V | 20                     | 78                                      | 89                                  | 12                                    | 17                | 69            | 2.21                                        | 用于高压汽缸、主汽门、流量孔板、法兰、导汽管法兰的螺栓 |
|           | 500                    | 66                                      | 71                                  | 17                                    | 18                | 66            | 1.9                                         |                             |
|           | 550                    | 61                                      | 68                                  | 14                                    | 17                | 78            | 1.83                                        |                             |

续表

| 机械性能<br>钢种 | 温度<br>(°C) | $\sigma_{0.2}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\sigma_B$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $a_K$<br>(公斤·米/厘米 <sup>2</sup> ) | $\delta_5$<br>(%) | $\psi$<br>(%) | $E \times 10^{-4}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) |                           |
|------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------|---------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| 20CrMoV 铸钢 | 20         | 32~48                                   | 50~69                               | 2~11                             | 14~24             | 35~55         | 2.0                                         | 用于高压汽缸、高压喷嘴箱等             |
|            | 500        | 26~38                                   | 44~52                               | 7~10                             | 13~16             | 46~62         | 1.74                                        |                           |
|            | 550        | 22~39                                   | 32~47                               | 7~8                              | 12~21             | 60~81         |                                             |                           |
| 15Cr11MoV  | 20         | 58                                      | 74                                  | 12                               | 19                | 66            | 2.2                                         | 用于高压喷嘴、弧段、高压叶片、主汽门、调速汽门杆等 |
|            | 550        | 45                                      | 54                                  | —                                | 16                | 66            | 1.7                                         |                           |
| 12Cr1MoV   | 20         | 30~38                                   | 51~54                               | 16~20                            | 31~39             | 71~73         |                                             | 用于主蒸汽管、导汽管                |
|            | 520        | 19~33                                   | 40~46                               | 11                               | 22~24             | 75~76         |                                             |                           |
|            | 560        | 18~28                                   | 37~39                               | 11~13                            | 25~28             | 77~81         |                                             |                           |
| 1Cr13      | 20         | 41                                      | 61                                  | 11                               | 22                | 60            | 2.2                                         | 用于中低压叶片                   |
|            | 400        | 37                                      | 50                                  | 20                               | 16                | 58            | 1.9                                         |                           |
|            | 500        | 28                                      | 37                                  | 24                               | 18                | 64            | 1.8                                         |                           |
| 2Cr13      | 20         | 52                                      | 72                                  | 6~17                             | 21                | 65            | 2.2                                         | 用于中压级叶片等                  |
|            | 400        | 40                                      | 55                                  | 20                               | 18                | 66            | 2.0                                         |                           |
|            | 450        | 38                                      | 49                                  | 24                               | 17                | 57            | —                                           |                           |
|            | 500        | 36                                      | 44                                  | 25                               | 32                | 75            | 1.8                                         |                           |

金属材料在重复应力的作用下,虽然应力数值远比强度极限为小,但是仍能使金属材料遭受破坏。这种现象称为金属的疲劳。高压汽轮机汽缸等部件的裂纹往往是重复热应力作用的结果。但是当应力小于某一数值  $\sigma_r^0$  时,虽然外力反复作用,金属材料也不至破坏,这一应力则称为疲劳强度极限。对于钢材,把能够承受  $10^7$  即 1 千万次反复作用而不发生破坏的应力作为它的疲劳强度极限。

高压汽轮机的金属材料是在 500°C 或更高的温度下工作的,这时金属材料的机械性能,如弹性极限  $\sigma_e$ 、屈服极限  $\sigma_s$ 、强度极限  $\sigma_B$ 、弹性模数  $E$ 、泊松比  $\mu$  等发生相当大的改变。不但温度本身与材料的物理性能和机械性能变化有关,而且工作时间的长短也会影响材料的性能。在高温下钢材的蠕变、松弛和持久强度,尤其应引起严重的注意。

处于高温和稳定应力的作用下,即使金属材料的应力远远低于室温下的屈服极限,也能产生缓慢的塑性变形。这种现象称为蠕变,如碳钢温度超过 300~350°C 时发生蠕变。因此蠕变极限的指标需要说明温度、时间和变形率。在火电厂设备设计中,都采用在规定温度下 100000 小时使变形达 1% 的应力作为蠕变极限。在一定的应力和温度下,蠕变速度不是均衡的,蠕变发展到某一程度后会突然迅速进行,导致部件很快发生破裂。火电厂设备决不可在蠕变发展到这种程度的情况下运行。同样的金属材料,同样的应力,工作温度越高,蠕变越快。不同的金属材料蠕变情况相差很大。比如 20 号碳钢在 450°C 蠕变极限只有 4.5 公斤/毫米<sup>2</sup> 左右。高压汽轮机所使用的合金钢的抗蠕变性能就好得多,如 12Cr1MoV 在 480°C 蠕变极限为 19 公斤/毫米<sup>2</sup>。

高压汽轮机的新蒸汽管道都装设监视管段和蠕变测点,以便定期检查其蠕变情况。发现蠕变超过规定或金属强度和金属组织发生问题时,须及时处理,否则可能导致管壁的破裂。

机械部件在高温和某一初始应力的作用下,随着时间的推移应力自行缓慢降低的现象称为松弛。比如汽轮机汽缸法兰大螺丝或主汽门法兰螺丝,在安装时有一定的紧力,螺栓也有一定的弹性变形(伸长)。运行一段时间后,虽然总的变形基本上没有变化,但是一部分弹性变形转化为塑性变形,因而螺栓紧力减小,以至法兰结合面有可能漏汽,这种现象就是松弛。高压汽轮机对紧力要求较高,所以一般都选择抗松弛性能较好的合金钢作为零件材料。

机器的零件、构件、部件在外力作用下所产生的应力,到屈服极限时就会产生塑性变形,达到强度极限时,就要破坏。所以我们决不能让应力超过屈服极限,更不能达到强度极限。为了保证机器的安全可靠地工作,就一定要使产生的应力比屈服极限小。但如果小得太多,又会造成不必要的浪费。所以要在既考虑安全,又不造成浪费的情况下合理地使用材料。因此必须给每一种材料规定出它所能容许承受的最大应力,这个应力叫做许用应力,用符号 $[\sigma]$ 来表示。对塑性材料,许用应力的公式如下:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0.2}}{K}$$

式中 $K$ 就是安全系数。它是与材料的好坏、冶炼方法、机件重要程度、计算误差、载荷特性等等有关。通常,对于一些重要的零件和部件的安全系数或许用应力的数值,都由各部门加以规定,并列入技术规范中。

## 第二节 水蒸汽和汽轮机金属之间的热交换特点

汽轮机运行时水蒸汽和汽轮机金属之间总是存在着热交换。蒸汽与金属壁面接触时其相互间的热交换称为对流换热,或简称放热,其中包括蒸汽流动所产生的对流换热作用和蒸汽分子之间的导热作用。汽轮机在启动和停机过程中处于不稳定的传热状态,这时单位面积对流换热的换热量 $q$ (大卡/米<sup>2</sup>·小时)与蒸汽温度 $t_1$ 和金属表面温度 $t_b$ 之差成正比,即:

$$q = \alpha(t_1 - t_b)$$

式中的比例系数 $\alpha$ 表示对流换热强度的大小,叫作放热系数,其单位为大卡/米<sup>2</sup>·小时·°C。 $\alpha$ 的大小取决于蒸汽的性质和流动情况。

由上式可知,换热量的大小随蒸汽与金属表面温差的增大而增加,随放热系数的增大而增加。

蒸汽的放热系数主要由蒸汽的流动速度、随压力和温度而改变的蒸汽比重(单位容积的重量)决定。在通常的汽轮机流速范围内,流速越大,放热系数越高。而流速相同时,高压蒸汽和湿蒸汽的放热系数较大,可分别达到1500~2000大卡/米<sup>2</sup>·小时·°C和3000大卡/米<sup>2</sup>·小时·°C。而低压微过热蒸汽放热系数就较小,约为150~200大卡/米<sup>2</sup>·小时·°C。汽轮机启停过程中,蒸汽的流速和比重都有较大的变化,放热系数也会有较大的变化。放热系数大时,传热量大,将加剧金属部件加热或冷却的不均匀性,造成金属壁内外温差过大。因此汽轮机启动停机过程中须通过改变蒸汽压力、温度和流速来控制蒸汽与金属壁的

换热量。

蒸汽加热金属时还有另外一个值得注意的特点，即凝结放热。在一定的压力下热的蒸汽接触到冷的金属壁时，如果金属壁的温度低于该压力下蒸汽的饱和温度，蒸汽将在金属壁上凝结，放出汽化潜热，蒸汽中的热量主要以凝结放热的形式传给金属壁。这时的传热温差可大致看作蒸汽饱和温度与金属壁面温度之差。蒸汽凝结放热的放热系数很高，可达15000大卡/米<sup>2</sup>·小时·°C以上，并且蒸汽压力越高放热系数越大，因此传热量大，金属被剧烈地加热，金属壁面温度很快就上升到该蒸汽压力下的饱和温度。比如加热蒸汽压力为10绝对大气压，其饱和温度为179°C，金属壁原来温度为20°C，则当加热开始后的瞬间，金属壁面温度将可能达到该蒸汽压力下的饱和温度179°C。如果是通常汽轮机金属壁的单向加热的情况，壁两侧将造成很大的温度差。为不使金属壁加热过于剧烈，一般在凝结放热阶段需控制蒸汽流量。当然凝结放热开始后金属壁面将形成一层水膜，水膜会使放热系数减小，对金属壁面继续剧烈被加热起到一定的阻碍作用。当被加热的金属壁温度达到该蒸汽压力下的饱和温度时，蒸汽凝结放热阶段也就结束，而转入以对流放热为主的换热过程。

汽轮机金属本身的换热过程是热传导过程，或称为导热过程。汽缸和其它部分金属被蒸汽加热时，当金属外壁温度仍接近于周围空间温度的时候，被内壁吸收的热量，在金属中传导，用于提高金属本身的温度，并不通过外壁和保温层向空间散热。而当外壁温度开始升高，并与保温层及周围空间形成温差时，则蒸汽给予金属的热量除大部分为金属吸收用于提高自身温度外，还有一小部分热量自外壁向空间散出。随金属温度水平的提高，向空间散出的热量逐渐增多。上述过程称为不稳定的导热过程。汽轮机金属被加热开始的一段时间，由于金属外壁温度较低，并且由于保温层的存在，向外散出的热量很少，所以仍可看作换热的热量全部使金属温度升高。而当金属壁达到某一平均温度水平时，比如汽轮机带稳定负荷运行后，蒸汽和金属温度都基本稳定，这时蒸汽给予金属的热量又全部由外壁经保温层传向周围空间，金属本身则不再吸收热量。这时的传热过程是稳定的导热过程。在稳定导热过程中，单位面积所传导的热量 $q$ 与两侧温差成正比，与金属壁厚度成反比，即：

$$q = \lambda \frac{t_n - t_w}{\delta}$$

式中  $t_n$ 、 $t_w$ ——分别为金属壁内侧和外侧温度，°C；

$\lambda$ ——导热系数，大卡/米·小时·°C，它随金属性质不同而不同。汽轮机使用碳钢和合金钢，其导热系数一般为30~50大卡/米·小时·°C；

$\delta$ ——金属壁的厚度，米。

### 第三节 热 应 力

在高压汽轮机运行中，造成设备损坏事故的重要原因之一，就是热应力。如汽缸裂纹、大型汽轮机转子在热应力的反复作用下的损坏等。因此高压汽轮机运行人员必须对热应力及其产生的原因有明确的概念。为此本节着重讨论两种热应力，即金属壁的热应力和