

全国火力发电工人通用培训教材



汽轮机设备运行

高级工

山西省电力工业局 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍汽轮机运行高级工工作中涉及到的一些运行操作的理论基础和几个运行专题。全书共 11 章,包括汽轮机热应力、热膨胀和热变形,寿命管理,启动与停止,新机组启动与试运行,调峰运行,机炉协调控制,热力特性试验,汽轮发电机组异常振动的分析处理,变速给水泵运行,离心泵试验,离心泵的经济调度与参数调整等内容,对提高运行人员技术水平具有一定的指导作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备运行:高级工/山西省电力工业局编.-北京:中国电力出版社,1997

全国火力发电工人通用培训教材

ISBN 7-80125-213-6

I. 汽… II. 山… III. 汽轮机运行-技术工人-技术培训-教材 IV. TM311.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 14401 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市京东印刷厂印刷

各地新华书店经售

1997 年 2 月第一版 1997 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 12.5 印张 274 千字

印数 0001—5140 册 定价 14.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

由山西省电力工业局组织编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》，发行、使用已历时 10 余年。其间，《学徒工初级工》各分册分别重印 5 至 9 次，《中级工》各分册分别重印 4 至 7 次，发行量很大，深受全国电力系统广大读者的欢迎，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平要求，取得了显著的社会效益。为此，这两套培训丛书在全国电力普及读物评优中，荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

10 余年来，由于改革开放的不断深入发展，我国的电力工业有了很大的发展，现已普遍进入大机组、大电网、高参数、超高参数、高电压、超高电压和高度自动化的发展阶段，对电业生产人员的素质提出了更高的要求。继 1991 年 12 月原能源部颁发的《电力工人技术等级标准》之后，1995 年 9 月电力工业部、劳动部又颁发了《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》。因此有必要根据电力生产的新情况和电力工人技术等级标准的新要求，对上述两套培训教材进行修订并增补高级工培训教材。经山西省电力工业局和中国电力出版社通力合作，并在全国电力工人技术教育研究所的支持下，现编写、出版了这套《火力发电工人

培训教材》。本套丛书的内容覆盖了火力发电 16 个专业对初、中、高级工的技术要求，每个专业分初级工、中级工、高级工三个分册出版，共计 48 个分册；每一分册中又以各专业的不同岗位工种设“篇”，共覆盖了 40 余个工种。

在编写本套丛书的过程中，首先根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从火电生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的火力发电工人培训教材，深信是紧扣新的工人技术等级标准的实用性教材。

火力发电工人培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法；教材以 300MW 机组及其辅机为主，兼顾 600MW 和 200MW 机组及其辅机的内容，因而有相当的先进性和普适性，适应于“九五”期间主要机型的技术要求。与每一专业对应的初、中、高级工三个分册，自成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。有些习题，如操作题、读绘图题、设计试验题等，主要用以培养和巩固必备的技能。鉴于全国电力系统各基层单位、部门培训力量和师资水平并不平衡，学员水平也参差不齐，所以有必要为每一分册编写相应的《教材使用说明和习题解

答》，这将在本套丛书出版后陆续推出。

《汽轮机设备运行》分初、中、高级工三册出版，全书由山西省电力试验研究所傅正祥统一制定编写提纲并进行统稿，山西省电力工业局李嘉琦主审。

本书是《汽轮机设备运行》高级工培训教材，由傅正祥任主编，参加编写的有：沈有望（编写第一、二、三章），马庆中（编写第四章），傅正祥（编写第五、八章），贺桐榆（编写第六章），代正仁（编写第七章），孟江丽（编写第九、十、十一章）。

在中电联教培部为本套教材组织的审定会议上，本书由上海石洞口发电厂陈兴兴技师、吉林热电厂赵宪文高级工程师、上海闵行发电厂虞硕亮工程师审定，并被推荐为全国火力发电工人通用培训教材。

在编写这套《全国火力发电工人通用培训教材》的过程中，得到了电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书进行了审定，提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或需修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1996年11月

目 录

序

前 言

第一章 汽轮机的热应力、热膨胀和热变形	1
第一节 汽轮机起停和变工况时的传热现象	1
第二节 金属部件的温度分布	4
第三节 热应力	7
第四节 热膨胀	19
第五节 热变形	26
复习题	30
第二章 汽轮机的寿命管理	33
第一节 高温金属的材料特性	33
第二节 汽轮机寿命	46
第三节 汽轮机残余寿命	52
第四节 汽轮机寿命管理	58
第五节 引进型 300MW、600MW 机组寿命管理	63
复习题	68
第三章 汽轮机的启动与停止	70
第一节 汽轮机优化起停	70
第二节 汽轮机中压缸启动	77
第三节 汽轮机强制冷却系统和停用后的保护	81
第四节 引进型国产 300MW、600MW 汽轮机 运行特点	94
第五节 超临界压力机组运行特点	105
复习题	109
第四章 新机组启动及试运行	112

第一节	新机试运前的准备工作	112
第二节	新机起动前的检查试验	116
第三节	分部试运及冲转前的试验	118
第四节	机组整套试运行	134
复习题		146
第五章	火电机组调峰运行	148
第一节	概述	148
第二节	变负荷调峰运行方式	151
第三节	两班制调峰运行方式	154
第四节	少汽无负荷运行方式	159
第五节	各种调峰运行方式的分析比较	164
第六节	调峰运行对汽轮机辅助设备的影响	170
复习题		176
第六章	机、炉协调控制	180
第一节	机、炉协调控制的必要性	180
第二节	机、炉协调控制系统	183
第三节	协调控制系统的运行	186
第四节	引进 300MW、600MW 机组协调控制系统	190
复习题		197
第七章	汽轮机热力特性试验	199
第一节	热力特性试验概述	199
第二节	热力试验的准备工作	200
第三节	测量仪表及测量方法	207
第四节	现场试验和试验结果的计算方法	214
复习题		238
第八章	汽轮发电机组异常振动的原因及处理	242
第一节	概述	242
第二节	汽轮发电机组振动状态的评定	
	——振动标准问题	247

第三节	临界转速及其振动特点	256
第四节	现场常见的振动现象及其原因分析	264
第五节	汽轮发电机组的轴系扭振	281
第六节	汽轮发电机组的振动监督	284
复习题		289
第九章	变速给水泵的运行	294
第一节	给水泵变速性能与输出阻力特性	294
第二节	给水泵汽轮机滑压运行的适应性和热经济性	299
第三节	给水泵变速调节及其动态分析	304
第四节	引进的 300MW 和 600MW 机组给水泵的运行	317
复习题		329
第十章	离心式水泵的试验	331
第一节	离心式水泵的试验目的及方法	331
第二节	试验的测量及仪表	333
第三节	凝结水泵、疏水泵和循环泵试验的特点	341
第四节	给水泵的特性试验	343
第五节	试验数据的整理和计算	351
复习题		359
第十一章	离心泵的经济调度和参数调整	361
第一节	水泵工况变化时对其性能的影响	361
第二节	离心式水泵的经济调度	371
第三节	泵叶片的切割与加长	376
第四节	用去掉一级叶轮的方法降低压头	380
复习题		382

第一章 汽轮机的热应力、热膨胀和热变形

第一节 汽轮机起停和变工况时的传热现象

蒸汽在汽轮机内膨胀做功，将热能转变成机械能，同时又以对流传热的方式，将热量传给汽缸、转子等金属部件的表面。热量在汽缸内以导热的方式从内壁传到外壁，最后经保温层散到大气；热量在转子内以导热方式从转子表面传到中心孔，通过中心孔散给周围空间。由于热量在金属内导热需要一定的时间，因而在汽缸内、外壁间以及转子表面和中心孔间形成温差。

汽轮机在蒸汽参数不随时间变化的稳定工况下运行时，汽缸、转子等金属部件内的温度分布是不随时间变化的。对于汽缸来说，蒸汽以对流方式传递给汽缸内壁的热量，就等于汽缸从内壁传导到外壁的热量，也即等于最终从保温层扩散到大气中的热量。这种热量的传递方式是稳定的，因此称为稳态传热过程。同样，对于汽轮机转子，在汽轮机蒸汽工况稳定的条件下，其温度分布也是不随时间而变的。

在汽轮机起停和工况变化时，由于掠过汽缸、转子等金属部件的蒸汽温度变化，汽缸和转子表面的温度首先发生变化，随后，整个金属部件的温度分布将发生变化。在汽轮机的起动和加负荷过程中，由于蒸汽温度比金属部件温度高，蒸

汽将热量传给金属部件，使其温度升高；而在停机和减负荷过程中，蒸汽温度低于金属部件温度，使其冷却，温度下降。

一般情况下，汽轮机内的传热过程主要有两种，一种是蒸汽与金属表面之间的热量传递，称之为换热；另一种是热量在金属部件内部的传递，称之为导热，整个传热过程则称之为热传导。换热过程的剧烈程度取决于换热系数大小，而导热过程的快慢则主要取决于金属材料的热导率。换热系数越大，热导率越小，在金属部件内形成的温差也就越大。

蒸汽与金属部件之间的换热方式主要为对流换热，其中还涉及到有物态变化时的对流换热，特别是凝结换热。

一、凝结换热

一般来说，当蒸汽与温度低于蒸汽压力对应的饱和温度的金属表面接触时，在金属表面容易发生凝结换热现象，蒸汽放出汽化潜热，凝结成液体。汽轮机冷态启动时，汽缸、转子等金属部件的温度很低，蒸汽容易在金属表面凝结，并形成水膜。这层水膜把蒸汽与金属表面分开，蒸汽凝结时放出的热量要通过水膜才能传给金属表面，这种凝结方式，称为膜状凝结。如果蒸汽凝结时在金属表面形不成水膜，则这种凝结方式称为珠状凝结（汽轮机转子以一定转速旋转，由于离心力作用，形不成水膜），珠状凝结的放热系数比膜状凝结的放热系数要大得多，约大 15~20 倍。

由于凝结换热非常剧烈，很容易在汽轮机金属部件内形成很大的温差。为了减小这个温差，大型汽轮机在冲转前多采用盘车预热的方式，即在汽轮机启动前盘车时，通入低压低温蒸汽，使汽缸、转子预热，然后再通入较高参数的蒸汽，冲动转子。

二、对流换热

当汽轮机部件金属表面温度达到对应蒸汽压力下的饱和温度时，蒸汽对金属表面的放热总是以对流方式进行的。蒸汽的对流换热系数比凝结放热系数小得多。

在汽轮机起动或变工况过程中，蒸汽对汽缸和转子等部件的对流换热系数不是一个常数，它随蒸汽的流动状态以及蒸汽的温度、压力、流速的变化而变化。一般来说，随着汽轮机负荷的增加，蒸汽压力的提高，放热系数是不断增加的。比如对于汽轮机调节级处，放热系数可以从冲转时的数十 $W/(m^2 \cdot K)$ 到额定负荷时的数千 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

在汽轮机轴封处，由于蒸汽流速高，蒸汽的放热系数也大，起动时这些部分会发生强烈的热交换，使部件产生较大的温差。

对于某种确定类型的汽轮机，由于其结构、材质、部件的尺寸已确定，因此在金属部件上引起的温差，只与蒸汽和金属之间单位时间的换热量成正比，即单位时间蒸汽与金属间的换热量愈大，在金属部件内产生的温差也愈大。当蒸汽与金属间单位时间内的换热量过大时，在金属部件内部引起的温差会急剧增加，这时金属部件受到热冲击。在汽轮机冷态起动时的凝结放热阶段，在冲转时蒸汽温度过高与金属温度不匹配时，在汽轮机极热态起动时以及甩 1/2 以上负荷工况下，都会使汽轮机金属部件受到热冲击。

对于不同型式的转子，其传热特性不同，在相同的蒸汽参数变化条件下，转子的径向厚度越大，其热量传递越慢，产生的温差越大，也就是说，对相同直径的转子，中心孔径越大，即转子厚度越小，其传热过程越快，产生的温差越小，但中心孔的存在会使中心孔面的离心应力增大。焊接转子，如

石洞口二厂 ABB 生产的 600MW 汽轮机转子, 由于各部金属较薄, 因此具有传热快热应力小的特点。有些引进型的汽轮机, 在监视汽轮机转子温差 (热应力) 时使用了积分温度的概念, 例如神头二厂引进的前捷克斯洛伐克生产的 500MW 汽轮机, 就使用了转子表面积分温度和中心孔积分温度, 积分温度实际上是根据汽轮机蒸汽工况及转子尺寸换算出来的、代表转子表面实际温度的一种参数。

第二节 金属部件的温度分布

对于现代大型汽轮机, 容易产生较大的温差和热应力的部件是汽轮机高中压转子和汽缸。因为这些部件较厚, 同时还要承受较大的温度变化, 比如高压缸调节级和中压缸第一级处等部位, 蒸汽温度很高, 当工况变化时, 蒸汽温度的变化范围大, 因而汽缸和转子内部容易形成很大的温差, 这些部位常称为临界点或危险点。在汽轮机起停和变工况时, 只要监视这些部位的温差不超过最大允许值, 其他部位的温差也就不会超限。

一般来说, 转子或汽缸内外壁温差的大小取决于以下几个因素: 转子或汽缸的几何尺寸, 材料的热导率, 蒸汽温度变化速率和温度变化范围以及蒸汽和金属表面之间的换热系数。对于确定形式的汽轮机, 由于部件的几何尺寸及材质已确定, 金属部件温差的大小仅取决于运行条件。如果蒸汽温度变化愈剧烈, 温度变化范围愈大, 则产生的温差也越大。

图 1-1 给出了某汽轮机当蒸汽温度以温升率 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 变化时, 调节级处高压转子金属温度随时间的变化关系。假

定在初始点金属部件温度分布均匀一致，且与蒸汽初始温度相同，在整个温升阶段蒸汽温度以均匀速率上升。在起始阶段，蒸汽与转子表面直接接触，使其温度随蒸汽温度迅速上升。由于热量在转子内部传导需要一定时间，转子中心孔面的温度总要滞后一段时间才开始上升，因而转子表面和中心孔面间就形成了温差。该温差随着整个温升过程持续增大，在经过一定的时刻后，该温差达到最大，此后虽然金属温度随蒸汽温度的升高而升高，但内外壁面温差保持最大且不变化，通常称温差达到最大值的时刻为准稳态点。

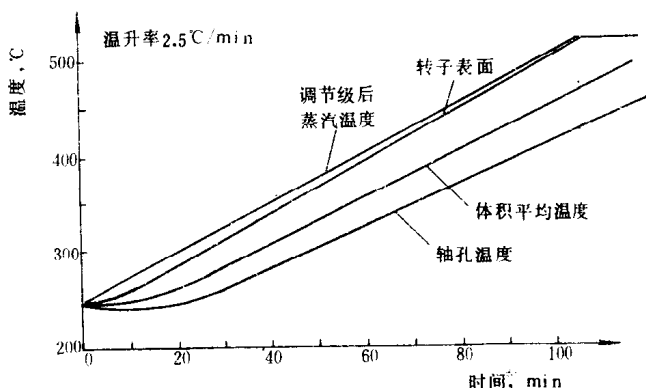


图 1-1 某汽轮机高压转子
温度分布随时间变化曲线

对于一般的汽轮机转子，当蒸汽温升率不变时，进入准稳态点的时间大约为 80~100min。但对于汽轮机的实际起动工况，由于蒸汽温度变化速率不会是常数，因此往往不会达到准稳态工况。当汽轮机起动结束后，转子内外壁温差逐渐减小，经过一段时间后，如不考虑转子本身散热的影响，内

外壁温度相等，且接近蒸汽温度，此时汽轮机进入稳定工况运行。

图 1-2 给出了某汽轮机高压转子前汽封处横截面上温度 t_M 和热应力 σ 沿径向的变化曲线。

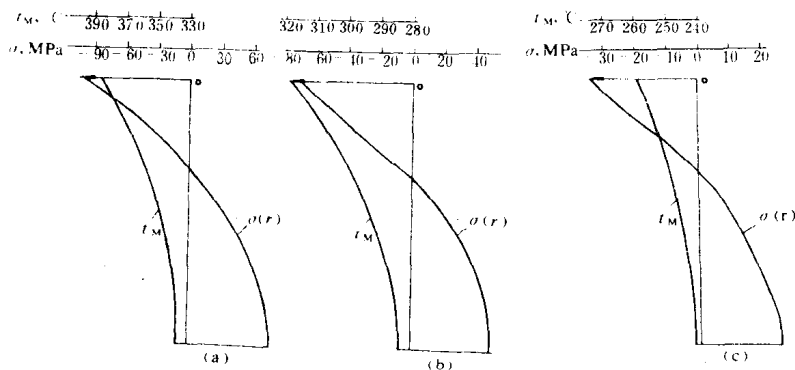


图 1-2 某汽轮机高压转子横截面
热应力径向变化曲线

(a) 温升率 $3.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，金属初始温度 300°C ， $\tau=30\text{min}$ 时；

(b) 温升率 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，金属初始温度 200°C ， $\tau=60\text{min}$ 时；

(c) 温升率 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，金属初始温度 200°C ， $\tau=60\text{min}$ 时

图 1-3 给出了某汽轮机转子纵剖面段内温度分布情况。

在大型汽轮机的冷态起动过程中，往往要安排暖机，即保持机组在某一转速或某一负荷下稳定运行一段时间。暖机的主要目的是：①减小汽轮机转子和汽缸内外壁温差；②使转子、汽缸加热均匀充分，减小汽轮机胀差；③使汽轮机转子加热均匀并保证整体温度水平在转子材料的脆性转变温度以上，从而防止转子脆性断裂。

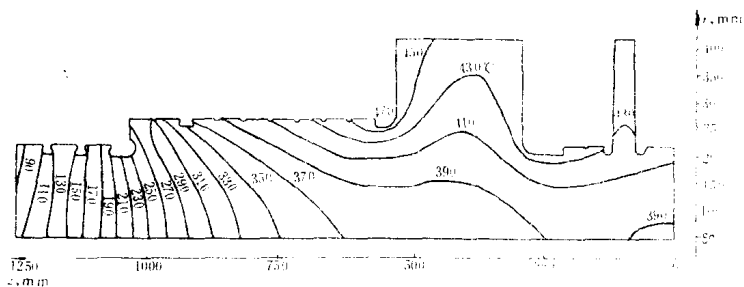


图 1-3 某汽轮机转子纵剖面温度分布

第三节 热 应 力

一、热应力的概念

由于温度的变化引起的物体变形称之为热变形。如果物体的热变形受到约束，则在物体内部就会产生应力，这种应力称为热应力。

当温度变化时，如果物体内部各点的温度变化是均匀的，并且其变形不受约束，即可以自由膨胀或收缩，则物体只存在热变形，而不产生热应力。图 1-4 (a) 示出了一条直径为 d 的细圆钢棒，其长度为 l ，初始温度为 t_0 ，如果使其均匀受热，温度升至 t ，则其热膨胀值为：

$$\Delta l = \alpha_l l (t - t_0) \quad (1-1)$$

式中 α_l ——钢材的线膨胀系数， $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

其应变值为：

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha_l (t - t_0) \quad (1-2)$$

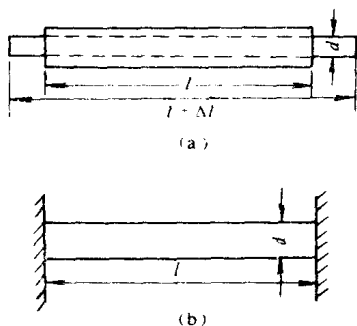


图 1-4 约束对受热物体变形的影响

(a) 自由膨胀; (b) 刚性约束

如果钢棒的这一热膨胀值 Δl 不受到约束, 则钢棒内不会产生热应力。但如果钢棒的两端受到刚性约束, 如图 1-4 (b) 所示, 即热膨胀值 Δl 膨胀不出去, 则在钢棒内部便产生了热应力, 在发生塑性变形之前, 热应力值的大小服从虎克定律, 即

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha_l(t - t_0) \quad (1-3)$$

式中 E ——钢材的抗拉弹性模量, Pa。

如果物体受热膨胀受到约束, 则物体内将产生压应力; 如果物体冷却收缩受到约束, 则物体内将产生拉应力。当物体内部加热或冷却不均匀, 温度分布不均匀时, 物体即使不受到外部约束, 其内部也会产生热应力。高温区产生压应力, 低温区产生拉应力, 汽轮机转子和汽缸的热应力主要是由于温度分布不均匀引起的。

二、汽轮机起停和工况变化时转子和汽缸的热应力

在汽轮机启动及工况变动时, 由于掠过转子和汽缸表面的蒸汽温度是不断变化的, 这就引起转子和汽缸内部温度分布不均匀且随工况而变化。正是由于这种不均匀的温度分布, 使得转子和汽缸内部产生了热应力。假定对某一较短的轴段, 不考虑轴向的热量传导, 则知道转子内部的温度分布后, 即可计算出其热应力:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_i E}{1 - \mu} \left(\frac{r^2 - r_1^2}{2r^2} \bar{t} - \frac{1}{r^2} \sum_i t_i r_i \Delta r \right) \quad (1-4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_i E}{1 - \mu} \left(\frac{r^2 + r_1^2}{2r^2} \bar{t} + \frac{1}{r^2} \sum_i t_i r_i \Delta r - t \right) \quad (1-5)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_i E}{1 - \mu} (\bar{t} - t) \quad (1-6)$$

式中 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z ——转子内任一点处的径向、周向和轴向热应力；

μ ——泊松比；

$\bar{t}$ ——体积平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ， $\bar{t} = \frac{1}{v} \sum_i t_i \Delta v_i$ ；

r_1 、 r_2 ——内半径和外半径。

显然在任意点处： $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\theta$ ；在中心孔或大轴表面： $\sigma_r = 0$ ， $\sigma_z = \sigma_\theta$ 。

对汽缸的热应力，也可用上述方法计算。

由热应力算式可知，在汽轮机部件材料一定时，热应力大小只与金属部件内的温度分布有关。温度分布越不均匀，产生的热应力值越大。而金属部件的温度分布取决于材质、换热剧烈程度、蒸汽温升率。蒸汽温升率越大，金属部件内的温度分布越不均匀，造成的温差越大，产生的热应力也越大。当热应力超过一定值后，会使金属部件产生塑性变形，从而引起较大的疲劳损伤。

对于汽轮机转子来说，在机组起停或变工况条件下，高、中压缸的进汽部位要发生较大的温度变化，往往在调节级后或调节级前汽封处产生最大的热应力，对于冲动式机组，由于调节级前后离心应力也较大，因此在变工况条件下热应力与离心应力合成可能使总应力大大升高；对反动式机组来说，由于其转子结构上的特殊性，其最大热应力点与离心应力点