

透平和 分离器中的 双相流

英国中央电业研究实验室 编
比利时冯·卡门流体力学研究所



**Two-Phase
Steam Flow
in Turbines
and
Separators**

原 序

本书是将一九五四年五月在冯·卡门 (von Karman) 流体力学研究所开设的透平两相流课程讲稿收编而成的一本专著。该课程 (讲义系列 70) 是在流体力学组主任 J. Chauvin 教授的赞助下举办的。课程各讲, 分别由欧洲和美国的专家编稿, 主要以学生、科学工作者以及从事透平装置设计、开发、研究和运行等方面的工程技术人员为对象。但是关于湿蒸汽的凝结过程和气体动力学的两章内容应对在两相流方面进行研究工作的人员具有普遍意义。本书所说“湿蒸汽”一词是指一种两相混合物, 其中液相以不同形式悬浮于汽相之中。在大透平的低压部分以及水冷反应堆系统核透平的高压部分, 出现了干蒸汽连续介质中水蒸汽的部分凝结而形成的水分。水分的出现以热力过程效率的降低和各种侵蚀及腐蚀问题的产生为其标志。这些及其它方面的问题在本书中是从由凝结过程的基本理论直到现代透平的运行经验这样广泛的角度上加以论述的。在为本课程进行准备时, 我们对 G. Gyarmathy 博士所提的宝贵建议表示感谢。G. C. Gardner 先生在通知很迟的情况下准备了水分离原理方面的内容, 在此一并致谢。对下列单位的合作与支持深表谢忱: BBC、Brown Boveri 有限公司、C. A. Parsons 有限公司、中央电业研究实验室 (CEGB)、Kraftwerk Union 公司、RWTH 蒸汽及燃气透平研究所 Aachen 及 Westinghouse 电气公司。

课程指导 M. J. Moore

VKI 协调主任 C. H. Sieverding

目 录

第一章 基本概念 G. Gyarmathy	7
1.1 有关蒸汽湿度问题的简史	1
1.2 湿蒸汽透平技术现状	6
1.2.1 常规低压冷凝透平	6
1.2.2 核能高压湿蒸汽透平	11
1.3 湿蒸汽的性质	23
1.3.1 成分, 蒸汽压力	23
1.3.2 蒸汽和水的物理数据	24
1.3.3 湿蒸汽的结构	32
1.3.4 过饱和及过冷	35
1.4 湿蒸汽的性态	40
1.4.1 水蒸汽/水珠混合物的热力学	40
1.4.2 湿蒸汽内的传热	43
1.4.3 水蒸汽/水珠混合物力学	48
1.4.4 通道壁上的液体运动	58
符号名称	61
下标	63
上标	63
缩写	63
参考文献	64
第二章 湿蒸汽气动力学及湿蒸汽透平中的能量损失	
M. J. Moore	66
2.1 蒸汽的状态方程组	66
2.1.1 过热蒸汽和过饱和蒸汽方程组	66

VI

2.1.2 湿蒸汽方程组	70
2.2 弛复	71
2.2.1 一般系统	71
2.2.2 湿蒸汽的热弛复	74
2.2.3 水珠的惯性弛复	76
2.2.4 弛复时间的典型值	77
2.3 湿蒸汽的一元流方程组	78
2.3.1 连续方程	79
2.3.2 液相的动量方程	81
2.3.3 气相的动量方程	82
2.3.4 能量方程	82
2.3.5 状态方程	83
2.3.6 补充方程	84
2.3.7 稳定流的无因次方程组	85
2.3.8 流动方程组的应用	87
2.3.9 流动计算实例	90
2.4 有自发凝结的一元流	92
2.4.1 流动方程组	92
2.4.2 跨音速解	93
2.4.3 凝结时的突然放热	96
2.5 湿蒸汽流计算实例	100
2.5.1 高压多级透平中的凝结	100
2.5.2 跨音速低压叶栅	101
2.5.3 二元流场中的凝结	103
2.6 湿蒸汽中的音速	104
2.7 湿蒸汽中的冲波	109
2.8 透平中的湿汽损失	115
2.8.1 经验方法	115
2.8.2 理论方法	116

2.8.3 等熵湿蒸汽级	117
2.8.4 级的功损失系数	121
2.8.5 级功损失的组成	122
2.8.6 过冷损失和成核损失	131
2.8.7 损失计算实例	133
符号名称	135
下标	137
上标	137
单位	137
参考文献	138
第三章 流动水蒸汽中的凝结 G. Gyarmathy	140
3.1 引言	140
3.1.1 历史的回顾	140
3.1.2 基本概念	142
3.1.3 拉伐尔喷管中的稳定汽流	145
3.2 喷管中的实验证据	153
3.2.1 所用的试验设备	153
3.2.2 喷管中的凝结现象学	157
3.2.3 实验数据梗概	162
3.3 凝结过程的理论阐述	174
3.3.1 成核理论	175
3.3.2 水珠生长理论	183
3.3.3 具有凝结过程的一元流	190
3.4 外来核的影响	201
3.5 叶栅和透平中的凝结	203
3.5.1 实验证据	204
3.5.2 理论解释	205
符号名称	211
下标	212

VI

上标	213
参考文献	213
第四章 湿蒸汽测量	216
4.1 湿蒸汽测量装置述评 M. J. Moore	216
4.1.1 压力测量	216
4.1.2 温度测量	225
4.1.3 速度测量	226
4.1.4 不稳定流的测量	238
4.1.5 湿度测量	245
4.1.6 水珠大小的测量	261
4.2 在两相流中测量水珠尺寸和湿度的一种散射光探测器 A. Ederhof	277
4.2.1 散射光探测器的测量原理	277
4.2.2 光散射探测器的标定	279
4.2.3 应用举例	279
符号名称	287
下标	288
参考文献	289
第五章 湿蒸汽透平的实验性研究 A. Smith	291
5.1 水分对级效率的影响	291
5.2 去湿装置	301
5.3 侵蚀防护	319
符号名称	326
参考文献	327
第六章 湿蒸汽透平的运行经验 W. Engelke	329
6.1 侵蚀-腐蚀	329
6.1.1 侵蚀-腐蚀的原因	329
6.1.2 侵蚀-腐蚀的估算	330
6.1.3 预测和测量的符合	335

6.2 低压叶片的侵蚀	337
6.2.1 侵蚀的原因	337
6.2.2 侵蚀系数	338
6.2.3 不同机组的侵蚀举例	341
6.2.4 750毫米低压叶片上侵蚀方面的经验	342
6.2.5 设计原则	343
6.3 甩高负荷后的超速	353
6.3.1 计算方法	353
6.3.2 试验结果	354
6.3.3 防止过度超速的方法	354
参考文献	356
第七章 外部水分离器	357
7.1 网筛式和波纹板式分离器的工作原理 G. C. Gardner	357
7.1.1 基本概念介绍	357
7.1.2 部分分离效率	358
7.1.3 突破特性	370
7.2 外部水分离再热器 R. L. Coit, P. D. Ritland, T. J. Rabas及 P. W. Viscovich	380
7.2.1 MSR 的物理特点	382
7.2.2 MSR 设计的进展	387
7.2.3 运行经验	392
7.2.4 未来的 MSR	413
符号名称	415
下标	416
参考文献	416

第一章 基本概念

G. Gyarmathy

1.1 有关蒸汽湿度问题的简史

湿蒸汽问题几乎和透平本身同时诞生，为什么呢？

从蒸汽透平的早期开始，设计者就力求提高蒸汽循环的热效率。最有指望提高效率的办法是将新鲜蒸汽的压力和温度提高到与合理价格下的最佳制造材料相适应的程度。不久就发现，对高应力部套的温度所规定的极限是相当严格的，而与锅炉中和透平进口处的压力有关的极限则可以借改进设计来提高。

如图 1.1.1 a 及 b 所示，在不变的新鲜蒸汽温度 T_0 下，增加新鲜蒸汽压力 p_0 将使循环的平均加热温度 $\bar{T}$ 提高，这也意味着卡诺循环效率的改善。

然而对于 p_0 的提高也还是有限制的。出人意料的是，对新鲜蒸汽压力的限制并不是锅炉或透平的高压高温部套所规定的，而是提高 p_0 后透平出口的湿度 $1 - X_e$ 将达到无法容忍的程度。

随着出口湿度的增加，就遇到两个具体问题。首先，透平低压端的叶片上发现了严重的侵蚀。低压转子叶片在工作几个月或几年后就损坏了，即变得粗糙，出现凹坑，甚至断裂。为了防止严重的侵蚀损伤，有必要将出口湿度限制在 12% 以下。虽然多年来在设计和结构上已做了相当的改进，但这一限制至今仍然有效。这些改进措施包括叶片淬火或加

司太立合金护条以及汽缸壁上开设疏水槽等。由于有侵蚀所规定的12%的限制，湿度就和材料的抗温性能同样成为提高蒸汽动力厂热效率的严重的限制因素。

其次，虽然不是最关键的，人们发现在湿蒸汽区内工作

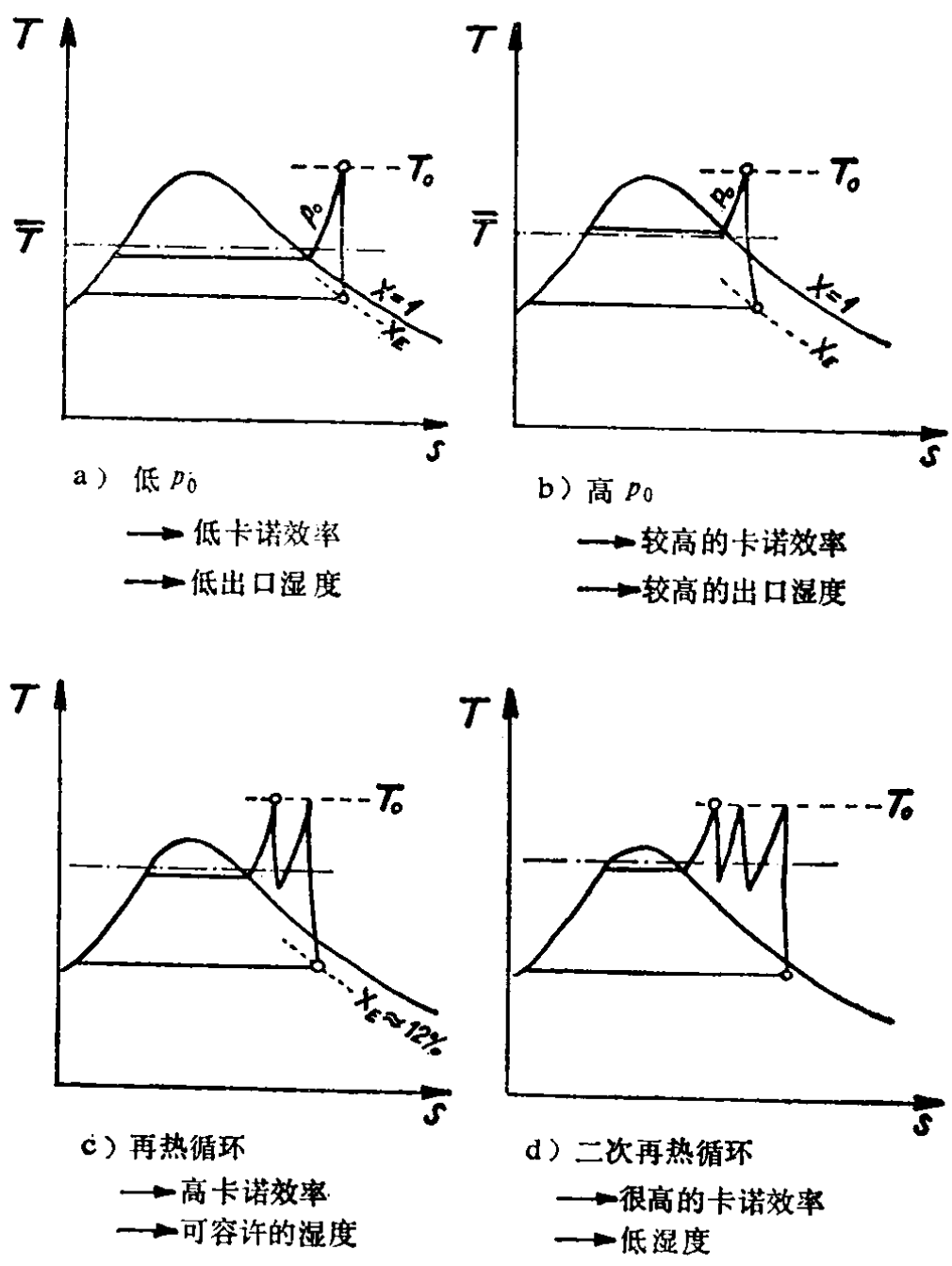


图1.1.1 带或不带再热的常规蒸汽透平循环的温-熵图

的透平级，其气动效率大大低于干蒸汽级。K. Baumann 早在 1910 年就确定，级内出现 1 % 的湿度可能使效率降低大约 1 % (Baumann 法则)。这一损失减少了提高新鲜蒸汽压力所获得的增益，但幸而尚未完全抵消它。

在某些应用场合中，例如在锅炉必须紧凑的船舶推进装置中，常用饱和蒸汽驱动透平。地热动力厂的新鲜蒸汽以往和现在都是湿蒸汽。在这些实例中，侵蚀问题对透平设计就更加具有决定性的意义了。

在 Stodola 的著作中〔1-1〕就已经记录了人们在初期对湿蒸汽(问题)所给予的极大重视。后来，当材料规定的温度极限和锅炉压力极限随着冶金和设计工作的进展而进一步提高时，对出口湿度的严格限制使蒸汽的中间再热(图 1.1.1 c)成为必要的，这样就大大增加了蒸汽动力厂的复杂性。然而中间再热也意味着 $\overline{T}$ 和卡诺循环的效率的进一步提高。50年代建成了二次再热的动力厂(图 1.1.1 d)，湿蒸汽问题的最终答案似乎呈现了。的确，有了二次再热后，对 p_0 的限制就由高压部件的设计来规定而不再由湿度规定了。最佳的循环效率选择通常使透平的出口湿度仅为 6 ~ 10%，这一湿度对于当时研制出来的叶片材料和叶片护条来说是可以很好地控制的。

六十年代初期，随着装置容量的增大和叶片速度的相应增加，叶片侵蚀的问题再度引起人们的注意〔1-2〕。与此同时，二次再热系统由于经济上的原因不能完全代替一次再热系统这一点已很明显，因此高的出口湿度仍旧是必然的结果。关键的问题是，适用于早期设计的湿度经验极限对于具有较高的叶顶速度 (≥ 550 米/秒) 和在叶顶区出现超音速汽流的先进设计是否仍然适用。

另外一项激发人们对湿蒸汽兴趣的开发是高压饱和蒸汽的轻水冷却核反应堆的发展。透平的低压部分 (LP) 虽然和常规设计基本相似, 但在高压部分 (HP) 却出现了新问题。压力为 45~65 巴的饱和甚至略有湿度的蒸汽进入第一高压段后必须膨胀到 15% 或更大的湿度, 相应于 5 巴左右的压力。再这样膨胀下去, 最后将导致在真空端的湿度达到 25% 左右, 显然这是不能接受的。因此, 核动力厂目前解决问题的办法是在高压和低压透平之间加一个水分离器, 通常与再热器连在一起, 使蒸汽过热到足够的温度以保证低压出口水蒸汽湿度 X_e 为允许值 (见图 1.1.2 a)。在这种有再热器的透平中, 水分离的目的主要是为了谋求高的循环效率。然而在某些场合也用不过热的水分离 (图 1.1.2 b)。在这些情况中, 低压透平内的湿度问题需要特别注意, 而水分离器的主要作用就是防止侵蚀了。现在有几种互相在竞争的分选方法, 但是关于相对优点的最后评价还不易得出。这方面的问题放在第七章中详细讨论。

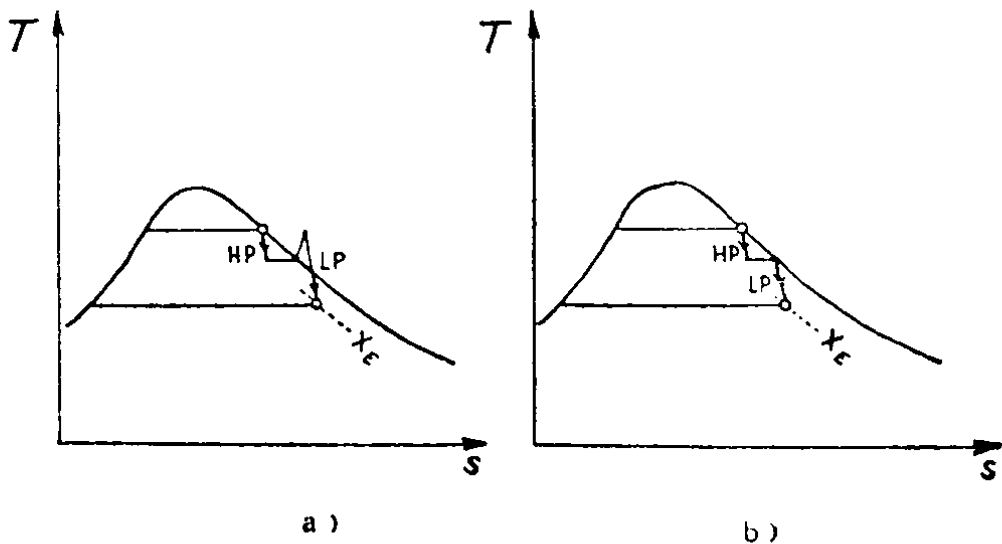


图1.1.2 原子能蒸汽透平循环的温-熵图
a) 中间水分离和蒸汽过热 b) 仅有中间水分离

六十年代以来，各国进行了大量研究工作，对湿蒸汽的热力学和流动现象方面加深了认识。但是尽管做了各种努力，我们仍然不能从理论上解释和预见湿蒸汽透平和有关设备中所观察到的全部现象。

在详细讨论特定的问题之前，先看一下对蒸汽透平发展有影响的某些经济方面的动向。已经知道，电耗量过去每十年增加一倍，可以预见到，下一个年代将会以差不多的速度继续增加。电网功率的增长促使公共事业公司充分利用增加单机功率以降低单位（即每 1 万千瓦）装置制造成本的好处（图 1.1.3）。结果使透平的单机最大功率从 1950 年 20 万千瓦增加到 1970 年的 80~120 万千瓦（图 1.1.4）。

在透平中限制功率增加的部分是末（低压）级。叶片设计不断向更大的通流量的方向发展，亦即向跨音速流动，增加叶片长度，提高叶顶速度的方向发展。这些发展都和湿蒸汽问题密切相关。

除了增加大透平的容量外，改进透平效率也有可观的经济利益。关于这一点可用一些数据加以说明。目前对于核能透平，由于透平效率不高而少发出的每 1 千瓦功率一般是受损 400~500 美元。因此一台 100 万千瓦的透平，那怕效率降低只有

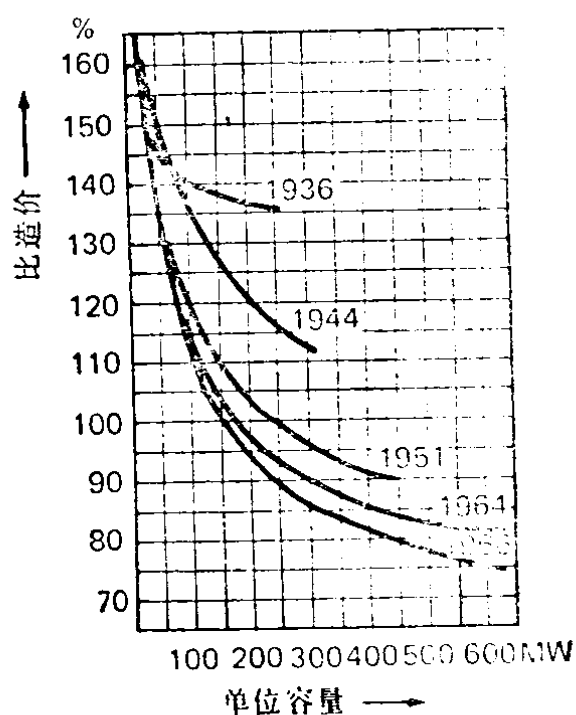


图1.1.3 动力厂制造成本趋向^{〔1-2〕}

0.1%，就有相当于 400000~500000 美元的损失。对化石燃料动力厂的受损要少些(约少一半)，但其总数仍是十分可观的。

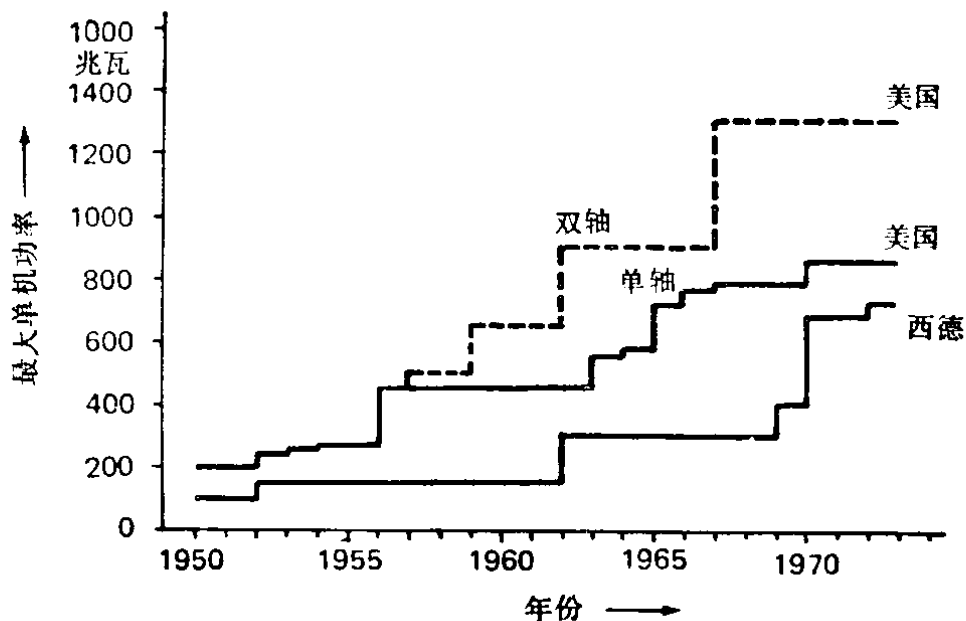


图1.1.4 透平发电机单机容量的发展趋向〔1-8〕

鉴于这些数字，对透平进行改进的刺激还是很大的。但是，另一方面，完成新设计和使新部件趋于成熟所需的开发时间和开发费用都已大为增加。对大型动力装置可靠性的严格要求使人们更加谨慎。因此制造厂被迫地严格审核其各种开发计划，而将其中最希望的进行下去。

对问题的正确理解显然是重要的，因为正确的理解有利于从不同的方案中进行选择，避免失败和加速进展。希望本课程对此有所促进。

1.2 湿蒸汽透平技术现状

1.2.1 常规低压冷凝透平

1.2.1.1 概述

无论是对化石燃料透平或对核动力厂透平来说，低压

(LP) 冷凝透平都是它的最昂贵的组成部分。制造厂对此已有一套用于不同排汽截面的标准设计。化石燃料动力厂的典型工作示意图和有关的膨胀曲线示于图 1.2.1。高压 (HP) 及中压 (IP) 透平以过热蒸汽膨胀, 但低压透平的最后几级是以湿蒸汽工作的。

需要有几个平行低压分流来处理象最后几级中那样的巨

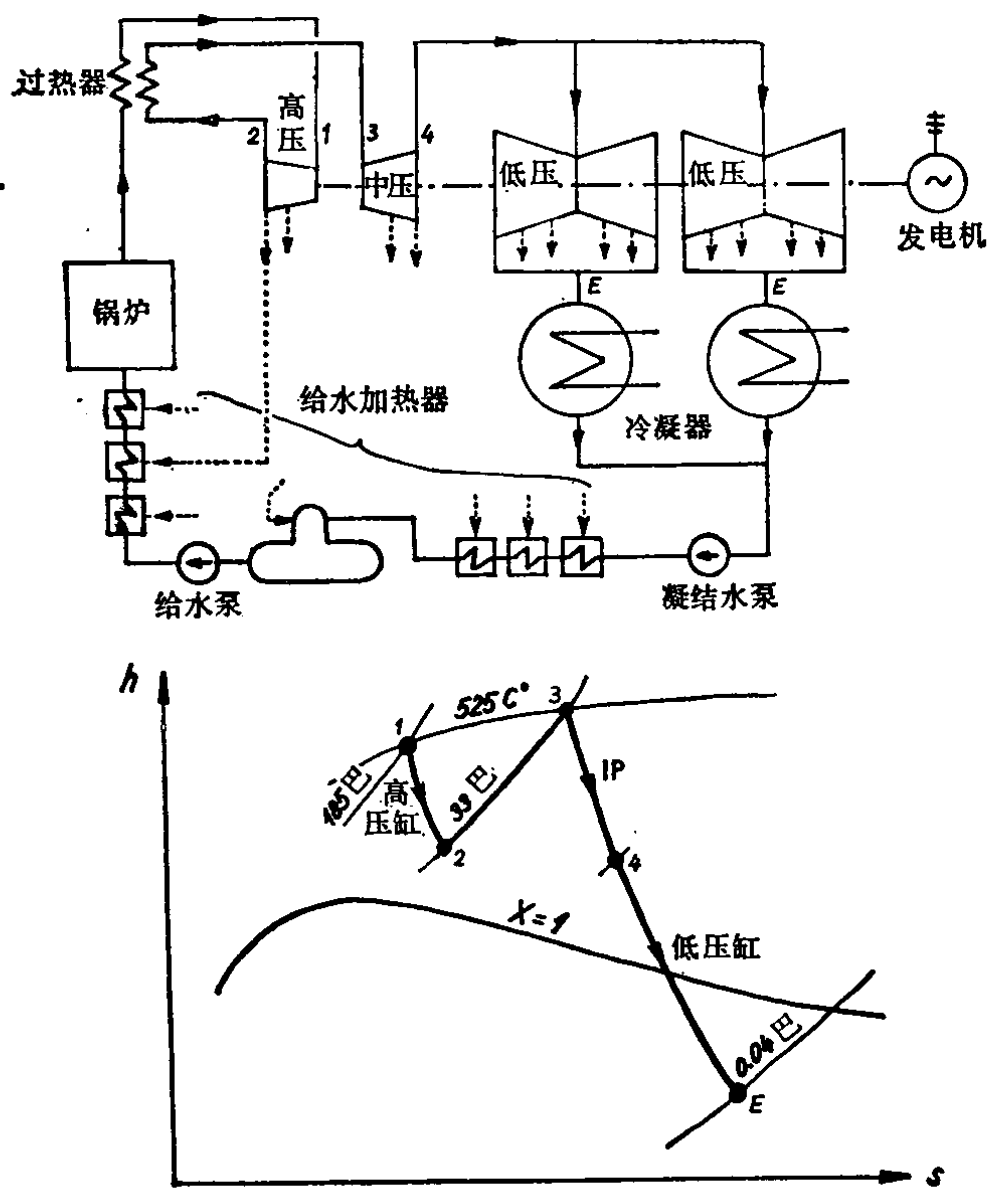


图1.2.1 典型的常规蒸汽透平动力厂的示意图和膨胀曲线

大容积流量。除了末级设计中所要考虑的一些因素外，分流的数目主要受两个因素的支配：单机功率和背压。现代从冷凝器的通流冷却（TFC）过渡到冷却塔（CT）冷却，导致了冷凝器平均压力的稳定增加，如图 1.2.2 所示。在中等背压（如 0.08 巴）下，每 2.5~3.0 万千瓦需要 1 平方米的排汽面积。低压分流的数目和大小与冷凝器压力及透平输出功率之间的关系如图 1.2.3 所示。

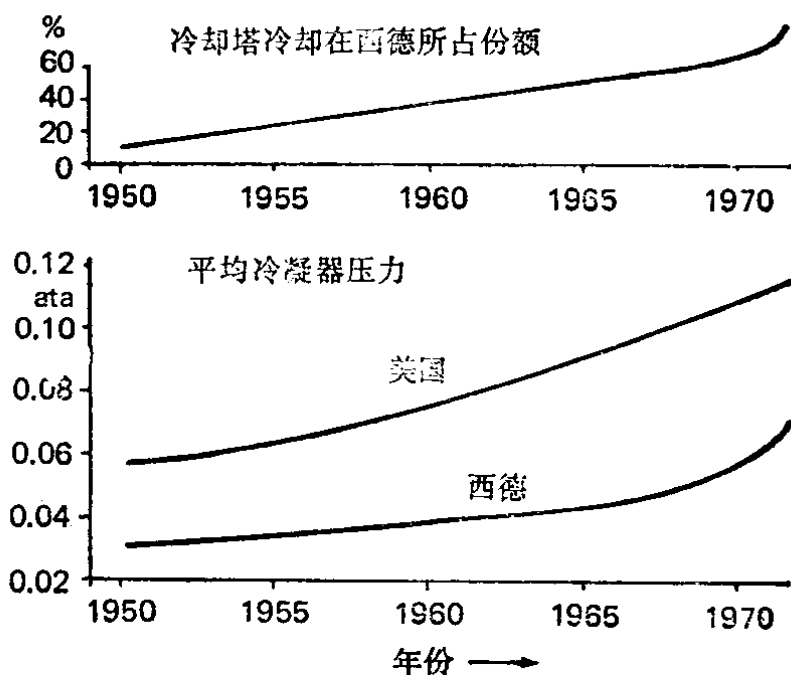


图1.2.2 背压趋势^[1-3]

1.2.1.2 低压透平的设计；膨胀线

图 1.2.4 所表示的是两个低压透平的截面图。目前用于 3000 转/分透平低压末级的一些标准设计的代表性数据列于表 1.2.1。

末级的等熵焓降和叶片长度的关系见图 1.2.5。现代五级低压透平中具有代表性的膨胀线如图 1.2.6 所示。可以看到，最后两级完全工作于湿蒸汽区，进入末级转子叶片的蒸

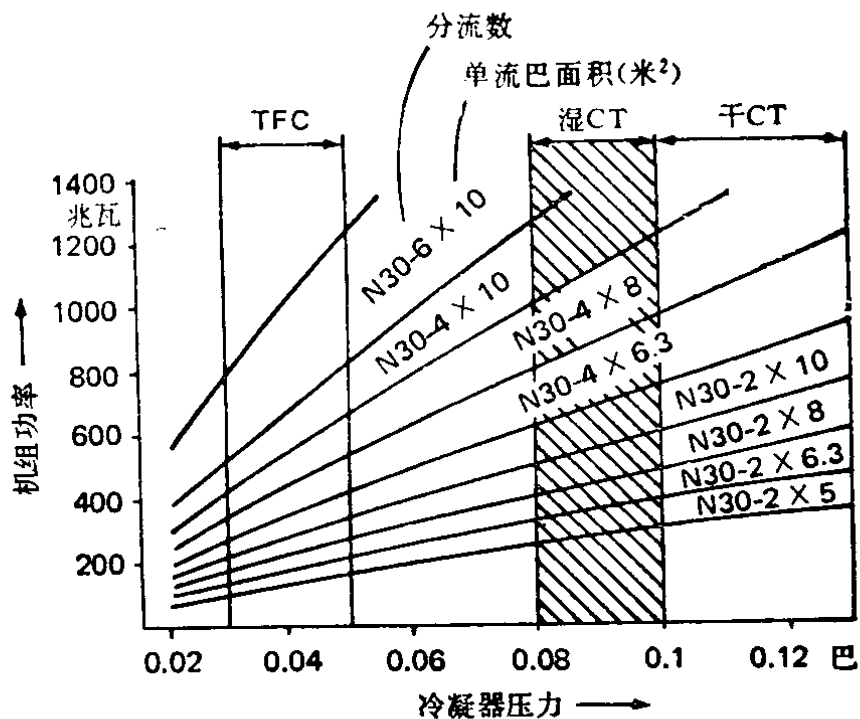


图1.2.3 一般所需的低压分流数目和大小

汽湿度约为 8 %。

表1.2.1 低压末级的典型数据

型 式	A	B	C	D
叶高 (毫米)	670	790	870	960
根径 (毫米)	1680	1590	1740	1900
排汽面积 (米 ²)	5	6	7	8.5
叶端速度 (米/秒)	470	500	545	600

1.2.1.3 低压透平内湿度的影响和处理方法

由于叶顶速度和局部湿度都高，如不采取适当的防护措施，顶部的侵蚀是常见的(图 1.2.7)。制造厂一般将顶部 前缘淬硬，或用司太立护条保护。其它的防护方法包括从汽缸壁内的疏水孔 (图 1.2.8)或空心静叶片上的吸湿槽(图 1.2.9)排除水分。所谓 Baumann 级是一种不寻常的防侵蚀结构，如

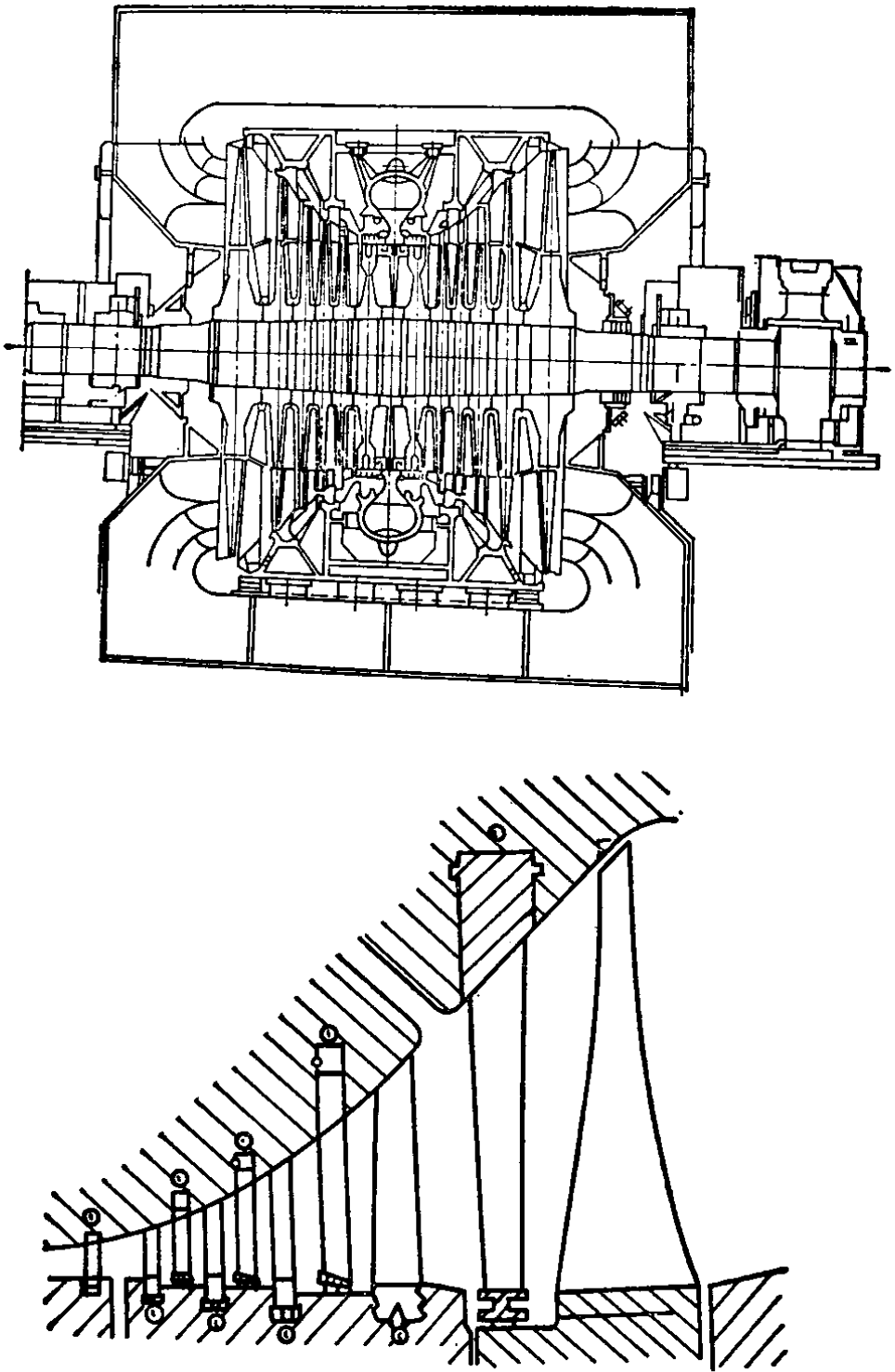


图1.2.4 低压透平的典型纵剖面〔1-5, 1-6〕