

冶金动力职业技能培训系列教材


# 余压发电站运行与维护



YUYA FADIANZHAN YUNXING YU WEIHU

河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编  
张卫 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

冶金动力职业技能培训系列教材

# 余压发电站运行与维护

河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编  
主编 张子卫  
参编 毕红恩 张福兴 张国英  
藏 书 早



机械工业出版社

本书为高炉煤气余压发电工人培训教材，全书共八章。前三章介绍高炉煤气余压发电基本知识及工艺原理、透平主机、发电机工作原理及发电系统，第四章介绍自动控制系统的工作原理和操作要点，第五章介绍配套系统运行操作与维护，第六章介绍高炉煤气余压发电点检、维护与检修，第七章介绍 TRT 机组重大事故处理原则与步骤，第八章介绍 TRT 安全运行知识及典型事故案例分析，最后附有复习题及参考答案。

本书可供从事高炉煤气余压发电的工人培训使用，也可供技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

余压发电站运行与维护/张卫主编. —北京: 机械工业出版社, 2010.11

冶金动力职业技能培训系列教材

ISBN 978-7-111-32245-0

I. ①余… II. ①张… III. ①煤气机—发电  
IV. ①TM611.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 201677 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕德齐 责任编辑: 郑 铨

版式设计: 张世琴 责任校对: 樊钟英

封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm·5.75 印张·150 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32245-0

定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010)88379772

社服务中心: (010)88361066

网络服务

销售一部: (010)68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

# 丛 书 序

河北钢铁集团邯郸分公司（原邯钢）始建于1958年，邯钢动力厂长期从事氧气、氮气、氩气、氢气和压缩空气的生产输送，高炉煤气余压发电，220kV、110kV、35kV输变电、继电保护试验，电机、变压器的修理试验等工作。长期的工作实践，使邯钢动力厂积累了雄厚的技术力量和丰富的实践经验。

近年来，伴随着邯钢的产业结构调整、生产规模扩大、装备更新换代，动力厂以实现企业的可持续发展为目标，一手抓装备的更新改造，一手抓员工素质的提高。2002年以来，动力厂始终把员工职业技能的培训和提高作为本单位最重要的工作之一，常抓不懈。本套培训教材就是动力厂70多位工程技术人员和老技师自己编写的，并在动力厂作为长期使用的操作岗位员工职业技能培训专用教材。

本套教材以操作岗位员工为对象，以提高员工的操作技能、安全生产能力和应急处理能力为重点。全套书共有10册，分别是《气体压缩机运行与维护》、《气体深冷分离操作指南》、《气体吸附制取操作指南》、《制氧站辅助系统运行与维护》、《气体生产系统安全》、《余压发电站运行与维护》、《变电站运行与维护》、《常用电气设备的维修》、《实用电气试验技术》、《电气运行维检安全》。衷心希望本套培训教材能够给同行们提供一定的帮助和借鉴，共同为冶金动力事业做出贡献。

# 前 言

近年来，钢铁企业为降低能耗，扩大自发电量，积极循环再利用二次能源，已成为节约能源、降低成本的最有效措施。目前，钢铁企业用于发电的二次能源主要有三类：一是回收的可燃气体，主要是焦炉、转炉和高炉煤气；二是余热，各工序用于设备、产品冷却的余热及加热炉产生的高热烟气、废气，如烧结余热、焦炭余热、加热炉烟气余热等；三是余压，如高炉炉顶余压等。从目前情况看，重点大中型钢铁企业二次能源综合利用水平和自发电比例不断提高，加强从业人员及相关人员余压发电设备运行及事故处理专业知识教育显得越来越迫切。

我们结合我厂高炉煤气余压发电 10 余年的生产运行经验，并参考有关专业的技术资料，编写了本教材，目的是提高岗位运行人员、维护检修人员以及相关技术人员对高炉煤气余压发电的系统性认识及操作技能，涉及涡轮机、发电机、高低压供电系统、自控系统等相关专业。

本书由张卫主编；参加编写的人员有：毕红恩、何智、张福兴、张国英。

本书在编写过程中得到高级工程师陈金英的大力支持和帮助。在编写过程中还参考了一些相关书籍和资料，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之发电新技术发展迅速，书中难免存在疏漏与不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 丛书序

## 前言

<b>第一章 高炉煤气余压发电基本知识及工艺原理</b> .....	1
第一节 高炉煤气余压发电的用途及设置 .....	1
第二节 高炉煤气余压回收透平装置分类 .....	4
第三节 高炉煤气余压发电的基本工作原理和特点 .....	5
<b>第二章 TRT 装置主要设备的结构及工作原理</b> .....	7
第一节 透平机的工作原理 .....	7
第二节 TRT 透平机的结构特点 .....	19
第三节 提高 TRT 出力的途径 .....	22
<b>第三章 发配电系统</b> .....	25
第一节 发电机 .....	25
第二节 高低压配电系统 .....	33
第三节 发电并网装置 .....	46
<b>第四章 高炉煤气余压发电自动化控制系统</b> .....	48
第一节 控制理念 .....	48
第二节 主要控制部分组成 .....	50
第三节 TRT 计算机控制系统的运行与操作 .....	58
<b>第五章 高炉煤气余压发电配套系统运行操作与维护</b> .....	74
第一节 煤气管道及大型阀门系统 .....	74
第二节 润滑系统 .....	81
第三节 液压系统 .....	100
第四节 给排水系统 .....	106
第五节 氮气密封系统 .....	107
第六节 气体置换 .....	110

## VI 余压发电站运行与维护

---

<b>第六章 高炉煤气余压发电点检、维护与检修</b> .....	115
第一节 设备维护 .....	115
第二节 设备点检周期与标准 .....	118
第三节 检修的标准与周期 .....	122
第四节 TRT 透平机组在运行中可能出现的故障及 消除方法 .....	127
<b>第七章 TRT 机组重大事故处理</b> .....	133
第一节 透平机重大事故的处理原则 .....	133
第二节 几种典型重大事故的处理步骤 .....	134
<b>第八章 TRT 安全运行知识及典型事故案例分析</b> .....	147
第一节 TRT 安全运行知识 .....	147
第二节 TRT 岗位典型事故案例分析 .....	151
<b>附录 复习题及参考答案</b> .....	161
附录 A 初级工复习题 .....	161
附录 B 中级工复习题 .....	166
附录 C 高级工复习题 .....	169
附录 D 技师复习题 .....	170
附录 E 参考答案 .....	171
<b>参考文献</b> .....	175

# 第一章 高炉煤气余压发电基本知识及 工艺原理

## 第一节 高炉煤气余压发电的用途及设置

高炉煤气余压发电装置 TRT (Blast Furnace Top Gas Recovery Turbine Unit, 以下简称 TRT), 是应用于冶金企业的一种高效节能装置。

高炉是钢铁企业的重要设备, 其主要作用是冶炼生铁。炉内有铁矿石、焦炭及其他附加物组成的炼铁炉料, 有高温空气鼓入高炉, 熔化的铁液从高炉底部排出。其顶部则输送出大量的高炉煤气, 经除尘得到较干净的煤气, 经过减压阀组减压后进入低压煤气管网。炼铁过程中的能耗约占全厂总能耗的 70%, 其中约有 55% 用于炼铁高炉, 而且随着高炉大型化和炉顶高压化的发展, 向高炉鼓风所需的能耗也越来越大。

TRT 装置可以将高炉煤气的压力能和温度能回收, 转化为电能, 同时又可净化煤气, 降低噪声, 并且改善高炉炉顶压力的调节品质, 在其运行过程中不产生污染, 降低发电成本, 一般可回收高炉鼓风机所消耗能量的 20%~50%, 投资回收期 2~3 年, 经济效益十分显著。TRT 开发研制, 起步最早的是前苏联; 发展速度最快、水平最好的是日本川崎重工、三井造船、日立造船三家公司, 目前日本在透平机的数量、质量、效率等多方面都居世界领先水平。TRT 迄今为止已有近四十年的发展历史, 对回收高炉煤气的潜能发挥了巨大的作用。随着国民经济的发展及人们节能意识的日益提高, 越来越多的国家, 都在高炉上安装了煤气余压透平发电装置 (即 TRT)。近来随着干式除尘技术的成



## 2 余压发电站运行与维护

功应用，高炉煤气余压发电开始由湿式除尘向干式除尘技术发展。

冶金系统在高炉冶炼程序中，除尘干燥后的压缩空气经高炉鼓风机进入热风炉进行加热，加热后的热空气由高炉下部吹入，高炉内焦炭燃烧产生高温，并且和铁矿石发生还原反应，使铁矿石还原成铁液，从高炉下部出铁口排出。高炉炉顶产生的气体（含有氮气、CO、CO<sub>2</sub>等）含有20%以上的一氧化碳，成为可燃性高炉煤气，经过重力除尘器（干式旋风分离）进行一次除尘和湿式除尘装置（文氏洗涤塔）进行二次除尘，然后经过高炉减压阀组减压，最后进入低压煤气管网供用户作为燃料使用，多余部分被排放掉。由于高炉排出的煤气具有一定的压力和温度（压力一般为100~300kPa，温度约为350℃），也就是具有一定的能量。对于湿式除尘温度大约降低到50℃左右，对于干式除尘温度大约降低到200℃左右。经过二次除尘后，压力稍有降低，仍含有较大的压力能，这部分压力通过减压阀组，如图1-1所示，降压到约10kPa，大量的能量被消耗在减压阀组上，形成能源浪费和噪声污染。

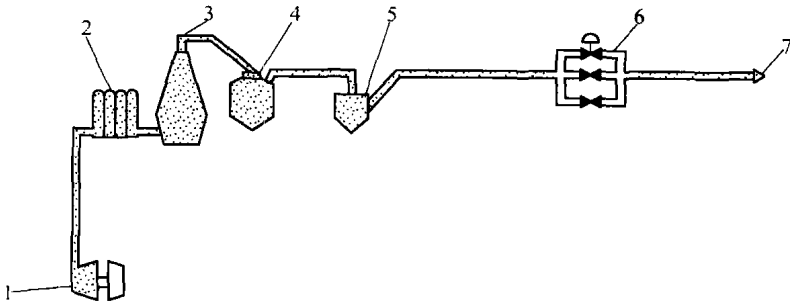


图 1-1 通过减压阀组的高炉煤气流程

- 1—鼓风机 2—热风炉 3—高炉 4—重力除尘器 5—湿式除尘  
6—减压阀组 7—低压煤气管网

采用 TRT 装置替代减压阀组，如图 1-2 所示，回收了原来消耗在高炉减压阀组上的能量，净化了煤气，降低了噪声，有效地调节炉顶压力的波动，在运行过程中能源消耗极小，发电成本

低。

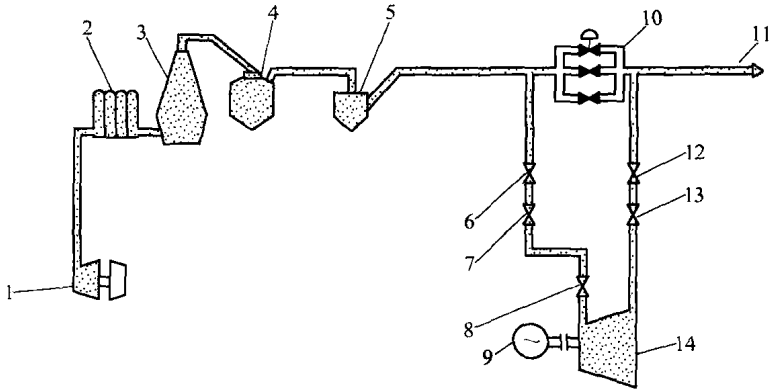


图 1-2 采用湿式除尘 TRT 的高炉煤气流程

- 1—鼓风机 2—热风炉 3—高炉 4—重力除尘器 5—湿式除尘 6—入口蝶阀  
7—入口插板阀 8—快切阀 9—发电机 10—减压阀组 11—低压煤气管网  
12—出口蝶阀 13—出口插板阀 14—湿式 TRT

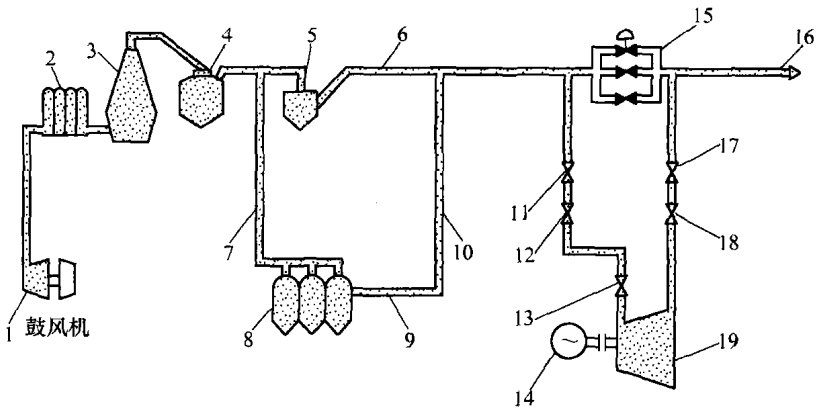


图 1-3 采用干式除尘 TRT 的高炉煤气流程

- 1—鼓风机 2—热风炉 3—高炉 4—重力除尘器 5—湿式除尘 6—干湿  
切换阀 7—入口截止阀 8—干式除尘器 9—出口截止阀 10—干湿切换阀  
11—入口蝶阀 12—入口插板阀 13—快切阀 14—发电机 15—减压阀组  
16—低压煤气管网 17—出口蝶阀 18—出口插板阀 19—干式 TRT

煤气经湿式除尘后温度下降很多，大量的热值被除尘用的水带走而造成浪费。随着干式除尘技术的发展（主要有布袋除尘、静电除尘、多管旋风除尘和充填式沙滤除尘四种形式），很多 TRT 装置采用了干式除尘技术，提高了除尘效率，压力损失小，温度下降小，能使进入 TRT 的煤气温度由湿式除尘后的 50℃ 左右，提高到干式除尘后的 130~200℃，从而大大提高了 TRT 的输出功率和发电量。采用干式除尘 TRT 的高炉煤气流程如图 1-3 所示。

### 第二节 高炉煤气余压回收透平装置分类

1) 按高炉煤气在工作轮中的流动方向分为径流式 TRT、轴流式 TRT 和混流式 TRT，一般混流式 TRT 很少见。

2) 按反动度分为反动式 TRT 和冲动式 TRT。

3) 按进入透平机的煤气的干湿情况分为湿式 TRT、干式 TRT 和干湿两用 TRT、半干式 TRT。

湿式 TRT 的气体在采用湿式除尘后，成为含饱和水蒸气的湿煤气，在膨胀过程中，有部分凝结水析出。干式 TRT 因为经过干式除尘后，气体一般不含或含少量的水蒸气，在膨胀过程中不存在凝结水的析出。干湿两用 TRT 则根据除尘装置方式兼顾干式运行和湿式运行，半干式 TRT 采用燃烧部分高炉煤气并掺混加热，气体中含有非饱和水蒸气，膨胀过程中可能析出凝结水。

4) 按进入透平的介质分为高炉煤气膨胀透平型、烟气膨胀透平型、硝酸尾气膨胀透平型、天然气膨胀透平型等。TRT 与透平的应用领域是密切相关的。

5) 按煤气的流程可分为单流程式（一座高炉带一台单流道的 TRT）、双流程式（一座高炉带一台具有一个进气流道和两个排气流道的共轴式 TRT）及双负载式（两座高炉带一台具有两个进气流道和一个排气流道的共轴式 TRT）。

6) 按工作转速分为高速型 (3000r/min 或 3600r/min)、低速型 (1500r/min 或 1800r/min)。

7) 按级数分为单级 TRT、两级 TRT 和多级 TRT。为了完整地命名一台 TRT 的类型, 往往把以上分类项组合在一起, 如: 二级湿式轴流反动式 TRT、三级干式轴流反动式 TRT 等。

### 第三节 高炉煤气余压发电的基本工作原理和特点

#### 一、TRT 基本工作原理

高炉煤气余压发电装置利用了冶金企业高炉在炼铁期间产生的冶炼副产品——高炉炉顶煤气具有的压力能及热能, 使高温、高压的煤气通过透平膨胀机做功, 将压力能和温度能转化为机械能, 驱动发电机发电或驱动其他装置旋转做功, 是一种二次能量回收装置。

#### 二、TRT 设备的工作特点

TRT 和蒸汽透平或燃气透平相比有以下特点:

1) TRT 作为高炉的附属设备, 对高炉正常生产起着重要的作用, 因此必须以保证高炉正常运行为前提, 不允许对高炉产生不良影响;

2) 通过 TRT 装置的煤气介质具有温度低、压力低、膨胀比小而流量则相当大的特点;

3) 由于受高炉炉况的影响, 通过 TRT 装置的煤气流量波动大, 变化频率大;

4) 通过 TRT 装置的煤气介质具有介质复杂, 存在气—固、气—液、气—固—液二相或三相形式, 而且还会产生相变 (凝结水析出);

5) 由于煤气中含有灰尘, 叶片易磨损, 并容易积灰和堵塞;

6) 由于煤气中含有腐蚀性的氯和二氧化硫等, 溶于水后形成酸而造成叶片等腐蚀;

## 6 余压发电站运行与维护

---

7) TRT 装置不消耗任何原燃料（只消耗煤气压力），不产生污染公害，是最经济的发电设备；

8) 高炉煤气是有毒气体，所以 TRT 及系统的安全性十分重要，要求所有设备必须安全可靠。

和其他发电设备相比有以下优点：

1) 因为在整个能量回收过程中不消耗任何燃料，不改变原高炉煤气的品质，所以不影响下道工序对煤气的使用；

2) 因为整个回收过程不产生污染，所以是没有公害、较为经济的发电设备；

3) 在能量回收过程中，可以利用透平机入口可调静叶来调节高炉顶压，于是替代了高炉系统中减压阀组，起到了稳定高炉顶压力的作用。

## 第二章 TRT 装置主要设备的结构及工作原理

### 第一节 透平机的工作原理

#### 一、透平机概述

对于透平机的某一级，在静叶流道内气体自压力  $p_0$  膨胀到  $p_1$ ，温度自  $T_0$  下降到  $T_1$ ，速度由  $v_0$  降至  $v_1$ ，将动能转换为机械能，另一方面压力由  $p_1$  继续膨胀到  $p_2$ ，也对动叶片施加一个反作用力，动叶片在速度能和压力能的双重作用下产生转动，输出机械功。同时气体热能也转化为动能，作用在转子上输出机械功。

#### 1. 特点

高炉煤气透平机，通过的煤气的压力不高，但流量颇大，虽经多次除尘，仍含有不少炉灰粒子，并且水蒸气呈饱和状态。据此透平设计不能完全套用燃气轮机方法，而是采用大通流面积，低圆周速度，平直粗壮叶型等新设计方法。

#### 2. 结构

由定子、转子、可调静叶、轴承、底座等组成。

定子：由可调静叶，扩压器等机构组成。

转子：由主轴、二级动叶栅、危急保安器、盘车装置等组成。

静叶调节机构：二级全静叶可调，伺服调节。

轴承：支撑轴承、四油叶滑动轴承，强制供油润滑；

推力轴承，金斯贝雷式，强制供油润滑。

底座：两个分开的左、右支架底座。

密封：充氮气密封，根据顶压波动自动连续调节。

清洗机构：低压喷雾，间断或连续喷水。

盘车机构：电动盘车，超过一定转速时自动脱开。

超速保护：限超 10% 转速。

电气系统：先迅速打开旁通阀组快开阀，同时关快速切断阀、调速阀及静叶。

机械系统：危急保安器油门动作，关闭快速切断阀。

### 二、透平机的主要零部件

#### (一) 主轴承

##### 1. 主轴承的种类

主轴承根据其结构不同，又分为圆筒形轴承、椭圆形轴承、多油楔轴承和可倾轴承等。在中小型透平机中，多数应用圆筒形轴承和椭圆形轴承。

透平机是高速旋转的机械，随着功率的增大，转子的重力也在增大，为了保证轴承工作正常并且尽量减少摩擦功耗，透平机主轴承采用液压油润滑的滑动轴承。

##### 2. 主轴承的润滑原理

主轴承是采用压力供油方式进行润滑的，对润滑油质及供油温度都有一定的要求。润滑油除了能在轴颈和轴瓦间形成油膜，建立液体摩擦外，还能对轴颈进行冷却，带走因摩擦而产生的热量。同时，对轴承也是一种清洗，能把轴承在半干摩擦中产生的乌金<sup>⊖</sup>粉末等带走。

轴承在运行中，按其润滑情况可分为干摩擦、半干摩擦、半液体摩擦、液体摩擦等四种情况。

转子在静止状态时，轴颈和轴承间不存在油膜，因而透平机转子刚转动时，轴承与轴颈属于干摩擦状态。

转子转动后，随着转速的增高，附着在轴颈上的油被带到轴颈和轴承之间，这时轴承与轴颈属于半干摩擦状态。

---

⊖ 轴承合金。

转子的转速进一步升高，轴颈和轴承表面大部分面积被润滑油层分开，这时轴承表面与轴颈间的摩擦属于半液体摩擦状态。

转子达到一定的转速后，轴颈和轴承间出现了稳定的、具有一定厚度的润滑油膜，这时在轴颈与轴承表面的摩擦是润滑油层之间的摩擦，属于液体摩擦状态。

研究轴承润滑的目的，就是要避免发生干摩擦和半干摩擦，减少半液体摩擦，使轴承处于良好的液体摩擦状态。

透平机的轴颈总是比轴承内径小，轴颈静止时落在轴承的最下方，如图 2-1a 所示。这时轴颈和轴承间形成一个楔形间隙，进入轴承中的润滑油充满了楔形空间，并渗透到轴颈下方，但在这里不形成油压。

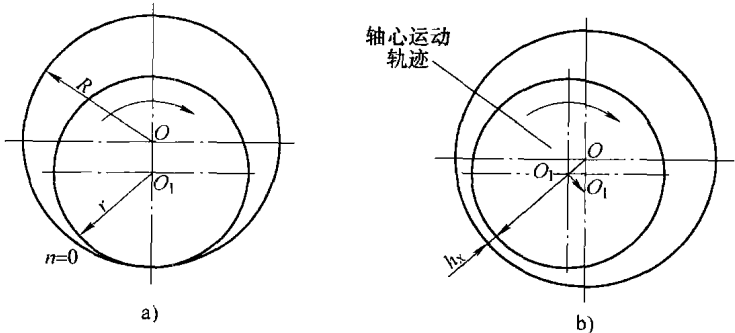


图 2-1 油膜形成示意图

a) 轴颈静止时与轴承的位置 b) 轴颈转动时轴颈中心变化轨迹

当透平机转起来之后，由于润滑油有黏性，贴在轴颈上的一层润滑油便和轴一起同速转动，这层油又带动下—层油一起旋转，轴承内的润滑油就这样层层带动旋转起来。但由于润滑油内层与层间内摩擦阻力的存在，从轴表面算起，由内到外，圆周速度越来越小，贴在轴承内表面上的油，其圆周速度为零。

轴转动的过程中，润滑油不断地被从楔形间隙的宽口部分带向楔形的底部，聚积在狭窄的楔形间隙中，形成一定的压力。随着透平机转速的升高，带入楔形间隙中的油也增多，形成的油压也增高。当油压对轴的浮力大于该轴颈的荷重时，轴颈被抬起。



这时轴颈和轴承便不直接接触，而是被一层很薄的油膜隔开，轴颈悬浮在油膜上，实现了轴颈和轴承间的液体摩擦。轴的转速越高，油膜的内压力也越大，轴颈也就被抬起得越高，轴心在轴承内便处在较高的偏心位置，当透平机转速无穷大时，理论上讲，轴颈中心便与轴承中心重合，如果将轴颈中心位置随转速变化的情况绘制成曲线，其轨迹近似一个半圆曲线，如图 2-1b 所示。油膜的最小厚度  $h_x$  是随轴承负荷的减少，润滑油温度的降低，润滑油黏度的增加和透平机转速的提高而增大的。

实践证明，圆筒形轴承的承载能力与轴颈的圆周速度及润滑油的黏度系数成正比，且随着油膜厚度  $h_x$  的减少而增加。在一定的  $h_x$  下，其承载能力随着轴承相对间隙的增加而下降，随着轴承宽径比  $L/d$  的增大而增大，在一定的  $L/d$  时，随着轴承直径的增加而增大。

轴承相对间隙为  $\delta$ ：

$$\delta = (R - r)/r$$

式中  $R$ ——轴承的半径 (mm)；

$r$ ——轴颈的半径 (mm)。

轴承的宽径比  $L/d$  中， $L$  为轴承的长度， $d$  为轴承的直径。

$L/d$  增大，虽然能增大轴承的承载能力，但  $L$  的增大意味着透平机轴向尺寸的增加，同时  $L$  增加太大，不利于轴承的冷却，反而会降低轴承的承载能力。

### 3. 主轴承的结构

在中小型透平机中，主轴承最常用的是圆筒形轴承和椭圆形轴承。两者在外观上没什么大的区别，唯一的区别是轴承的顶部间隙和两侧间隙不同。如果轴的直径为  $D$ ，则

对于圆筒形轴承

顶部间隙为  $a = 0.002D$

每侧间隙为  $b = 0.001D$

对于椭圆形轴承