

风机节能与降噪

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

科学出版社

夏耀光 李耀忠 编著

内 容 简 介

本书是“冶金继续工程教育丛书”之一，是编著者在系统总结国内外风机节能与降噪技术的基础上编写而成的。书中反映了编著者近年来所取得的最新研究成果。

全书共六章，主要内容包括：国内外风机发展水平、风机运行原理、节能技术、现代交流调速、风机气动声学及降噪措施。全书重物理概念，重应用理论，重新技术，重实例分析，书末列有详细的参考文献，供读者进一步研究参考。

本书可作为冶金系统、矿山和其他工矿企业从事风机装置技术革新和运行、维护的工程技术人员和管理干部的继续教育用书，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

冶金继续工程教育丛书

风机节能与降噪

聂能光 李福忠 编著

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100707

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年5月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1990年5月第一次印刷 印张：11 3/8 插页：1

印数：0001—6,000 字数：256 000

ISBN 7-03-001748-X/TB·54

定价：6.00元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事
冶金工业部副部长

徐大铨

一九八八年十二月

前 言

到本世纪末,我国工农业总产值要在1980年的基础上翻两番。然而根据预测,在此期间我国能源总产量只能翻一番。亦即,总产值翻两番所需的能源,一半要靠增产,另一半要靠节约。我国是仅次于美、苏两国的第三耗能大国,能源消费总量比日本还高,但总产值仅约为日本的四分之一。这种低效率、高投入、高消耗的局面,现在还未得到根本改变^[1]。

据1982年机械工业部的调查,风机用电约占全国发电量的10%。据1988年冶金部有关资料,当前我国金属矿山的风机用电量占采矿用电的30%^[3]。据1980年前后的有关资料,钢铁工业的风机用电量占其生产用电的20%;煤炭工业的风机用电量占全国煤炭工业用电的17%;冶炼工业,以沈阳冶炼厂为例,风机用电量占该厂用电的25%^[2]。可见,风机是举足轻重的耗电设备。

据某煤炭公司1986年对148台矿井主通风机的调查,运行效率在70%以上的仅占10%左右;运行效率低于55%的竟达59%。30年来金属矿山一直使用70B2主通风机和JF系列局部通风机。由于这些风机在性能上不能与大多数金属矿山的通风网络相匹配,因此其平均运行效率只有30%左右^[1]。再根据某老钢铁联合企业的调查^[43],通风机的平均运行效率只有40%左右;某发电厂锅炉鼓、引风机的最高运行效率为67.5%,最低为45.2%;某耐火厂竖窑鼓风机最高运行效率为25.5%,最低为13.6%。近年来各主管部门在推广新型风机、改造旧风机及其系统上做了大量工作,情况有所好

转。但是，按国务院1982年4月下达的节电二号指令要求，现场风机运行效率不得低于70%。由上述数字可见，我国现场风机节能的潜力是巨大的。

提高风机本身的效率当然是基本的、重要的。但是，现在的情况是，有些风机研究单位和风机厂正在忙于搞三元叶轮设计，CAD/CAM一体化等项目，为使风机效率提高2—3%而绞尽脑汁，而现场中对某些风机效率丢失10—30%却重视不够。作者认为，对现场风机，应加强维护和管理，在保证其可靠运转的基础上，不断挖掘设备的潜力，仍然是科技工作者的重要责任。国务院于1980年就提出能源工作要“开发与节能并重，近期把节能放在优先地位”的方针。这就为我们研制新型风机、挖掘现有风机的潜力指明了方向。否则，即使能源有所增加，收效仍将甚微。

据1986年鞍山钢铁公司环保处对大于90dB(A)的1746个主要噪声源进行普查，其中机械噪声513个(占30%)，气动噪声793个(占45%)，电磁噪声440个(占25%)；按声级分，91—100dB(A)者738个(占42%)，101—110dB(A)者634个(占36%)，大于110dB(A)者214个(占12%)。近年来虽已进行了一定程度的治理，但仍有不少重要噪声源至今还没有得到根本解决。可见，风机降噪问题仍然是有待进行大量工作的研究课题。

本书力求理论密切结合生产实际，反映国内外在风机装置节能与降噪方面的新成果，重点突出应用理论和应用技术，其中也包括了本书作者们和他们的研究生近年来所取得的科研成果及解决现场实际问题的经验。如果本书能对读者有所裨益，这正是编著者的愿望。

本书采用国际单位制，但为了引用资料方便，有的地方也用工程单位制。为了帮助读者进一步研究风机的节能与降

噪，书末列出了主要参考文献，供读者进一步研究参考。

李福忠编写了本书第三、四章，聂能光编写了序言及本书其他章节（其中第五章第5.7，5.8二节由宁铁执笔），并对全稿进行了整理和统一。

东北工学院成心德教授审阅了除第四章以外的全部稿件，佟纯厚教授审阅了第四章。冶金部生产司徐志强同志对稿件进行了审查，他们对本书提出了许多中肯的意见。中国金属学会薛凌工程师在出版过程中给予了热情帮助。在此谨向他们表示衷心的感谢。

在编写本书的过程中，王晓东、李楠协助整理第三、四章文稿和图稿，并提出修改意见；宁铁协助整理第五章文稿和图稿，并提出修改意见；杨晓刚提供了一些重要的参考文献目录；傅瑶、张运福、聂虹协助整理第一、二、六章文稿和图稿。在此向他们表示衷心的感谢！

限于水平，书中可能还会有不妥之处，欢迎读者指正。

编著者

1989年6月

目 录

序

前言

1 国内外风机产品概况	(1)
1.1 国外风机产品技术水平	(1)
1.2 国内风机产品技术水平	(19)
2 风机的特性和运行	(29)
2.1 叶轮机械理论压力方程	(29)
2.2 风机的性能曲线与工况	(34)
2.3 风机的联合工作	(38)
2.4 风机的相似原理	(43)
2.5 急变流场对风机性能及现场测试的影响	(50)
3 风机节能与调节	(62)
3.1 风机节能效益的评价方法	(62)
3.2 风机使用中存在的问题	(68)
3.3 风机节能与调节原理	(77)
3.4 风机变速调节与节能	(82)
3.5 风机的进出口节流调节	(86)
3.6 风机前导器调节、节能与设计	(92)
3.7 改变动叶安装角的调节与节能	(112)
3.8 改变静导叶安装角的调节与节能	(114)
3.9 液力耦合器变速调节与节能	(116)
3.10 风机的微机控制	(120)
3.11 台数控制与间歇运转	(132)
3.12 联合调节	(135)
3.13 几种调节方式的比较	(137)
3.14 管网的合理布置与导流叶片	(139)

3.15	风机的合理选型	(147)
3.16	现场风机的改进	(152)
3.17	风机性能现场测试	(162)
3.18	风机内部流动可视化	(168)
3.19	系统节能与风机(子)系统效率计算实例	(171)
3.20	提高科学管理水平的几个问题	(178)
4	现代交流电动机调速及其在风机节能上的应用	
		(182)
4.1	鼠笼型异步电动机运行特性和调速	(184)
4.2	调压调速	(186)
4.3	电磁调速电动机调速	(189)
4.4	变极对数调速	(193)
4.5	变频调速	(198)
4.6	绕线型异步电动机和调速	(205)
4.7	同步电动机调速控制	(212)
4.8	调速装置的分类、选择和比较	(213)
5	通风机气动声学设计的探讨与降低噪声的途径	
		(220)
5.1	声级与频谱	(221)
5.2	气动噪声基本声源	(224)
5.3	风机的气动噪声源	(227)
5.4	通风机气动声功率及A声级与通风机性能的关系	
		(231)
5.5	风机气动声功率与风机气动参数及几何参数的关系	
		(233)
5.6	低叶尖速度轴流式通风机的低噪声最优流型及最佳叶栅稠度	(237)
5.7	串列叶栅在轴流及子午加速风机中的应用	(243)
5.8	轴流式通风机防喘振装置	(247)
5.9	通风及冷却用轴流式通风机的降噪	(252)

5.10	动叶与蜗舌(或静叶)间的间隙对风机性能的影响.....	(257)
5.11	通风机的消声蜗壳.....	(261)
5.12	提高离心通风机内效率的新叶轮叶片出口段结构...	(264)
5.13	风机降噪的其它措施.....	(267)
5.14	对通风机降噪措施的综合考虑.....	(268)
6	风机装置噪声控制	(270)
6.1	噪声评价数 NR	(270)
6.2	风机装置噪声特性	(271)
6.3	风机装置噪声控制的途径	(275)
6.4	声屏障的衰减	(289)
6.5	吸声降噪	(291)
6.6	消声器	(295)
6.7	隔声	(317)
6.8	隔振	(333)
6.9	风机房降噪隔振的综合治理	(342)
参考文献.....		(344)

国内外风机产品概况

1.1 国外风机产品技术水平¹⁾

1.1.1 矿用通风机

1. 矿井主通风机

美国煤矿使用的主风机以轴流式为主，离心式主风机所占比例不到3%，而且轴流式主风机所占比例仍有增加的趋势。从美国的发展来看，矿用风机将从单纯的风量控制向集中式环境控制系统发展。美国的矿用通风设备制造公司正在研制新式的矿用粉尘、瓦斯、噪声和温度控制设备。美国拟采用计算机控制的动叶可调轴流式或变速固定叶片轴流式及离心式主风机，根据井下探测器提供的数据自动调节流量和压力，并拟采用与空调装置联机的压入式主风机，使井下保持恒温环境。

轴流式风机转子的直径和重量比同容量离心式风机小或轻 $1/3$ — $2/3$ ，转速较高，惯性矩小，其加速性能和动态特性优于离心式风机。无论变速式还是动叶可调式轴流风机的调节范围均比离心风机的宽，运行效率比离心风机高。这就是美国煤矿乐于采用轴流式主风机的主要原因之一。

1) 本节大部分内容引自文献[5]。

在运行中可以改变叶片角度的液压式动叶可调矿用主风机在美国近年来才开始采用。这种风机价格高达 35 万美元/台，是普通风机价格的4—6倍，但节能效果好，如图1-1所示。

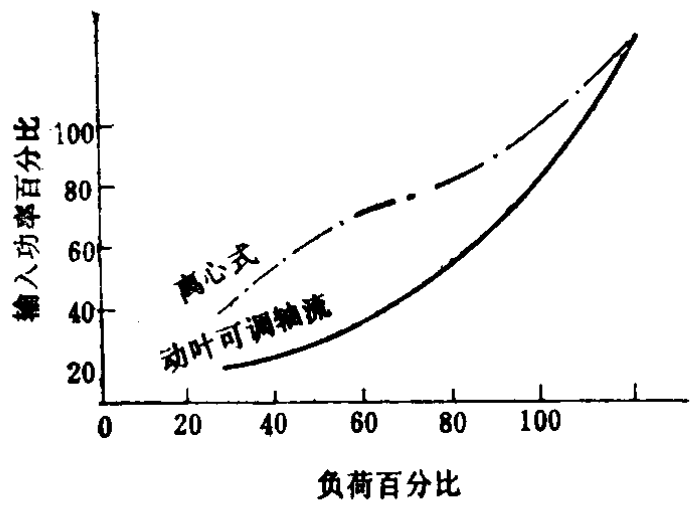


图1-1 动叶可调轴流式通风机与离心式通风机的功率曲线对比

联邦德国TLT (Turbo Lufttechnik) 公司是欧洲一家有代表性的矿用风机制造公司，在矿用风机制造方面有50多年历史。该公司在液压式动叶调节技术方面积累有一定经验。液压调节系统包括液压伺服机构和锁定系统，结构较复杂，制造精度高。

苏联是以使用离心式矿用风机为主的国家。最近十几年来，他们致力于改进离心风机的气动性能，使最大静压效率从72%增加到88%，平均静压效率从52%增至75%。最大流量从300m³/s增至700m³/s。最大功率从2000kW增至5000kW。使用总功率增加了2.3倍。风机的外型尺寸却减小了1.5—2倍。

近几年苏联顿涅茨煤炭机械制造设计局据中央流体动力研究所等提出的气动略图研制的BOKД型轴流风机，效率比旧型号提高10—15%，流量达600m³/s以上，用于深矿井的

双级轴流风机，设计周速 100m/s ，压力可达 6kPa 。

在日本，原使用的后向叶片或多叶式通风机已完全由高效轴流式和高比转速机翼形叶片离心式所代替，其中多数是轴流式风机。

三井三池公司生产的轴流式矿用风机，叶片由硅铝明合金或铝镁合金制成，用于海底煤田时，由于排气中含有腐蚀性湿气，叶片则采用不锈钢制造。机壳为钢板焊接，当排气含有腐蚀性湿气时，机壳内涂布环氧树脂。关于动叶调节机构，日本主张采用停机调节的简单结构。认为运行中动叶可调机构精密，而矿井通风调节频度小，精密的调节机构往往因粉尘附着或腐蚀性气体影响锈蚀而失灵。因此日本煤矿很少采用运行中动叶可调结构风机。

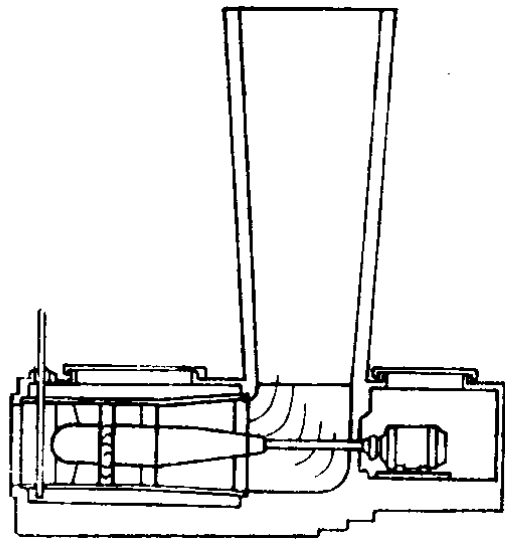


图1-2 矿井轴流式主通风机带立式风塔[5]

联邦德国Turmag公司生产的矿用轴流主扇最大直径达 5m ，风量达 $700\text{m}^3/\text{s}$ ，每级风压达 4500Pa 。可按用户需要单独设计。最高装置效率达 86% ，高效工作区宽广。有数种调节动叶角度方法供选择：停机用手调节单个动叶角度，停机用手同时调节全部动叶角度，在运行中或停机时用液压调

节全部动叶角度。轴承设计寿命都是在100000工作小时以上。轴承的监控包括温度控制、振动控制和冲击脉冲测定（SPM）系统。扩压器有立式及卧式两种。立式布置时传动轴自风机后端伸出，故来流可沿轴向较均匀地进入风机，有利于提高效率。风塔伸向空中，高频声得到自然衰减。该公司特制的熔岩混凝土砖与消音织物一起作为风塔的衬里，用于隔音和消音；必要时，在风塔出口再装消音器。立式风塔的造价高些，其布置如图1-2所示。

2. 矿用局部通风机（局扇）^[6]

矿用局部通风机所面临的主要改进问题是应尽量缩小风机体积、降低噪声及收集粉尘。就煤矿而言，局部通风机的总耗电量相当，甚至超过主通风机的总耗电量，因此，也应注意提高风机效率。

在苏联，金属矿大都是露天矿，只有煤矿才大量使用局扇，使用量约15万台。苏联煤矿局部通风大有通过长度达1000m以上导风筒向工作面输送5—20m³/s风量的趋势，预测近年局扇最大功率将近110kW。苏联目前多使用改进的CBM型单级轴流式局扇。从1983年开始，着力推广70年代中期研制成功的BM型局扇，它曾荣获苏联国家优质产品称号。该型具有如下特点：

（1）采用单级子午加速叶轮，局扇压力得以大幅度提高。

（2）在叶轮的前部，装置了简单而又有效的防特性曲线断裂结构——分流器。它能及时地引走叶片顶部产生的涡流，从而消除性能曲线上的驼峰和压力凹陷区，扩大工况范围，为增加通风长度创造了条件。试验证明，这种结构不会恶化风机的噪声特性。

(3) 在BM-5以上机号的局扇上安装了可调式前导叶，这是第一次将这种结构运用在局扇上。它可以根据管道长度的大小进行压力调节，调节深度为 $\pm 20\%$ 。采用可调式前导叶后，使局部通风更加有效，还可以节约能源。

(4) 叶轮叶片用卡普纶树脂和钢骨架制成，由螺栓将其固定在铸铝轮毂上。BM-12的叶片为钢质空心铆焊结构。

苏联在掘进1500—2000m的长独头采准巷道时，使用了离心式通风机。在筒形外壳里焊有20个径向叶片的整流器。

英国Keith-Blackman公司是生产局扇的专业厂。1958年第一次生产了混流式局扇，也就是子午加速叶轮构成的局扇。该公司生产的68系列混流式局扇最高静压效率可超过75%。局扇叶片用低碳钢制成，焊接在锥形轮毂上。叶轮后部装有静止导叶。

Keith-Blackman公司还生产“C”系列矿用局部扇风机。这种局扇实质上即是所谓离心叶轮、轴向导流的筒形离心风机结构，具有压力高、体积比离心风机小、轴向导流、便于矿井使用的特点。局扇内安装一离心叶轮，噪声比较低，C40噪声仅93dB(A)。机壳用钢板焊接而成，中部被分隔，成为上下两个流道——分叉。气流流入风筒后分为两支，并在筒体后部汇合。电机安装在法兰上，实际上它不在筒体内，便于井下对电机进行接线、维修和保养。以叶轮直径为610mm的C40局扇为例，当风量为 $2.5\text{m}^3/\text{s}$ 时，静压为2.7kPa，静压曲线单调下降，总长约1535mm，最大直径为924mm，电机功率18.5kW，总重量约5kN。

Keith-Blackman公司还生产一种对旋式局扇，此局扇能在相对湿度达100%，温度为 $-70\sim 40^\circ\text{C}$ 的环境下工作，并可随意安装。

英国Aerex公司生产的“B”系列局扇前部装了喷雾腔，后部接有过滤器。使用时，含有粉尘的污风进入喷雾腔中被水雾湿润后，经叶轮、分叉式机壳进入过滤器。过滤器将污风中的粉尘过滤，集入集尘箱中，从而使污风得以过滤。

英国Woods公司主要生产矿井和隧道中使用的风机，基本上是普通的轴流式风机。但是该公司生产大量的通风附属装置，比如风管、手动闸门、消声器等。

瑞典Flakt公司生产的2PMD对旋式局扇，一直用于瑞典和西欧的许多矿井，它是非防爆型的。我国60年代就曾引进，并据此研制成功JFD局扇，广泛地应用于国内各金属矿。近年来该公司仍在生产和销售这种风机，国内亦有一些部门仍在订购。

日本三井三池制作所是日本生产矿用局部通风机的主要公司之一，1980年的资料表明，已生产各种局部通风机1 150台。在此之后，又已研制出两种可换吸声材料的低噪声高效局部通风机，一种是低噪声对旋式双级轴流通风机，另一种是低噪声单级混流式通风机。前者比原来的通风机提高风压10—20%，零、部件通用化程度较高（进出口吸声罩亦可通用），可组成多种规格的通风机（见图1-3）。

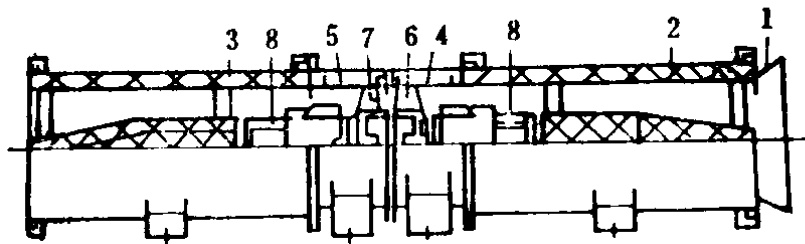


图1-3 低噪声对旋式双级轴流通风机结构

- 1——进气口；2——进口侧吸声罩；3——出口侧吸声罩；
- 4——No.1 机壳；5——No.2 机壳；6——第1级叶轮；
- 7——第2级叶轮；8——电动机

低噪声混流式局部通风机，其压力范围介于单级轴流式风机和上述对旋式风机之间，风压值可为同直径单级轴流风机的二倍，相当于普通双级轴流式风机。这种风机的叶轮根据不同使用要求采用铝合金或铸钢制造，可通过改变叶高和叶片安装角度获得所需要的性能。该风机的最高效率接近80%。

井下使用的局部通风机，由于粉尘附着，会导致吸声材料在一年，甚至几个月内失效。上述两种新型局部通风机均采用易更换吸声材料的结构，可长期保持良好的消声效果。

1.1.2 电站锅炉鼓、引风机

电站锅炉鼓、引风机属于大型中、高压通风机。大型双级轴流鼓风机的压力已达11—14kPa，单机功率已达11000kW。由于动叶可调轴流式的综合经济性明显地优于离心式风机，所以其使用范围仍在扩大。

动叶可调轴流风机在欧洲已有30多年的使用历史。美国和日本等国则是在1970年前后开始采用的，并均已从欧洲引入这种风机的制造技术。

在欧洲，丹麦诺迪斯克（Nordisk）公司首先研制成功运行中动叶可调式轴流风机。其他公司，如联邦德国TLT，K.K.K.等公司也相继生产这种风机。因此，这种风机首先在欧洲得到推广使用。

美国从1972年开始在0.6，0.8和0.85MkW发电机组上采用了这种轴流风机。

日本在1965年前几乎全部采用离心式风机，其后也开始采用动叶可调式轴流风机。70年代初，石川岛播磨公司引进了丹麦诺迪斯克公司制造技术，所生产的动叶可调式轴流风机已用在1MkW机组上。

丹麦诺迪斯克公司生产的VARIAX型动叶可调式轴流风机有ASN（单级）和AST（双级）两个系列。最大规格为 $\phi 4200\text{mm}$ ，可为1.3MkW机组配套（使用二台）。该风机叶片一般采用铝制机翼形实心叶片。大型风机叶片采用高强度铝合金铸成。引风机叶片前缘装有可更换镀铬不锈钢前缘。用于燃煤锅炉时，叶片表面均镀以铬防护层。

为改善调节性能，离心式锅炉风机趋向采用汽轮机或变速电机驱动，汽轮机适合于大功率。英国和苏联的0.3—0.6MkW机组广泛采用双速电机驱动离心式风机，配合进口导叶调节风量，可满足机组70%负荷的需要。近年来，无级变速电机有所发展，并已用于驱动锅炉鼓、引风机，但是价格较贵。随着电子元件成本的下降，采用无级变速电机驱动将是一个可行的方向。不同调节方式引风机组的一次投资见表1-1。

表1-1 不同调节方式引风机组的一次投资

	单速带进口导叶 调节离心风机	双速电机 驱动离心风机	带液力耦合 器离心风机	电子调频变速电 机驱动离心风机	单速电机驱 动轴流风机
A	100%	113%	135%	158%	—
B	100%	115%	—	156%	135%
C	100%	130%	—	147%	115%

注：A是 $42 \times 10^4\text{kW}$ 燃煤机组配2台4560kW引风机的情况。

B是 $64 \times 10^4\text{kW}$ 机组配4台3040kW引风机的情况。

C是 $80 \times 10^4\text{kW}$ 机组配4台5320kW引风机的情况。

1.1.3 烧结引风机

大型烧结机面积已达 600m^2 ，日产量20000t。烧结引风机到70年代初期在大型化方面就已经发展到顶点，最大的烧