

朱祖培 **ZHUZUPEI**
水泥科技论文选
SHUINI KEJI LUNWENXUAN

中国建材工业出版社

朱祖培水泥科技论文选

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

朱祖培水泥科技论文选/朱祖培著. —北京:中国建材工业出版社, 2007.1

ISBN 978-7-80227-170-8

I. 朱… II. 朱… III. 水泥—科学技术—文集

IV. TQ172-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 133309 号

内 容 提 要

朱祖培先生是我国水泥界知名老专家、中国工程设计大师,曾长期担任天津水泥工业设计研究院总工程师,为天津水泥工业设计研究院的发展作出过重要贡献,也为我国水泥工业技术研究和工程设计作出了贡献。朱祖培先生曾在国内专业报刊发表了很多科技论文,在业界产生了重要影响。本书收录了朱祖培先生在不同时期发表的 24 篇论文。

本书的文章,大体可分为两类:一类是针对具体问题的技术分析;一类是针对水泥行业发展趋势的宏观论述。每当某些工艺、设备、生产技术发展 to 一定阶段,其生长成熟过程中累积的许多问题需要梳理、总结,或尚处于认识上的模糊状态时,作者总是不失时机地从理论高度系统地予以阐明。这些文章按发表时间顺序编排,读者可以清晰地感受到我国水泥工业技术发展脉搏的律动,感受到老一代水泥工作者热爱水泥事业的拳拳之心。

朱祖培水泥科技论文选

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.25

字 数:245 千字

版 次:2007 年 1 月第一版

印 次:2007 年 1 月第一次

定 价:25.00 元

网上书店:www.ecool100.com

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

序 一

新中国成立以来,广大工程设计人员和勘察技术人员以自己的聪明才智和辛勤劳动,在艰苦的条件下,完成了成千上万个技术先进、适合国情的工业、民用项目设计和建设项目的勘察设计工作,为我国社会主义建设事业作出了巨大贡献。

中国工程设计大师、原天津水泥工业设计研究院总工程师朱祖培先生,作为中国水泥工业建设大军中的优秀人才和推动行业技术进步的老专家,为中国水泥工业的技术进步和发展作出了积极的贡献。本论文集汇编了朱祖培一生从事水泥工业研究的系列成果,内容丰富,观点鲜明,立意高远。这些研究成果和重要观点,是其多年理论研究和实践经验的总结,很多已经在水泥工业发展和具体工程项目中得到应用并创造了良好的经济效益和社会效益,为推动中国水泥工业技术进步起了积极作用,在当前仍具有借鉴和参考意义。

作为中国水泥工业工程设计和技术装备开发排头兵的天津水泥工业设计研究院,在国家上级主管部门的支持和指导下,在历任老领导、离退休老同志和全院职工的共同努力下,历经创业、成长、发展、壮大的奋斗历程,技术水平不断提高,综合实力不断增强,创造了一个又一个奇迹,留下了光辉的业绩,为中国水泥工业的发展作出了巨大贡献。当前,实现经济的持续快速发展,推动中国水泥工业技术进步,是摆在全体水泥院人面前的重大历史任务。面对深刻变化的形势,面对日益激烈的市场竞争,面对异常繁重的任务,我们将在继承老一代水泥院人的优良传统和精神风貌的基础上,坚持“高端品质,继承创新,诚信级务,发展共赢”的企业理念,按照发展新型工业化道路的要求,与建材行业各界同仁一道,依靠科技进步和技术创新,在推动水泥工业结构调整和产业升级、加速水泥工业现代化建设进程中作出我们的努力,为实现中国水泥工业的可持续发展和民族工业的振兴作出新的更大的贡献。

天津水泥工业设计研究院院长 于兴敏

2006年7月

序 二

今年正值“中国工程设计大师”朱祖培同志 85 岁寿辰,此时出版《朱祖培水泥科技论文选》是对寿星最好的祝贺。

朱祖培同志 1921 年 6 月 17 日生于上海。1944 年 7 月浙江大学毕业后,就投身于水泥工业。1947 年至 1950 年在美国 ALLIS—CHALMERS 公司实习和工作。全国解放后,毅然回国参加祖国经济建设。从 1951 年起,一直从事水泥工厂设计、建设工作,是我国水泥工业设计研究领域中的开拓者和科技带头人。

解放初期,新中国百废待兴,国家急需恢复一批老水泥厂和筹建一批新水泥厂。朱祖培同志勇挑重担,担任当时全国唯一的水泥设计院——北京水泥设计院工艺专业技术负责人,在水泥厂工艺设计方面做了很多开创性的建设工作,并主持大同、永登、昆明等厂的工艺设计。作为松江水泥厂技术改造的负责人,成功地将原两台余热发电回转窑工厂改造成立波尔窑厂,窑的单产从 14t/h 提高到 25t/h,水泥生产能力扩大了近一倍。

1958 ~ 1978 年,朱祖培同志受到了不公正的政治、生活待遇,但他忍辱负重,坚持过来了。1978 年起的改革开放,给朱祖培同志发挥才能创造了良好的条件。

1981 年 9 月,原建材部下文,同意天津水泥工业设计院任命朱祖培同志为院总工程师。在担任总工程师 18 年中,朱祖培同志为天津水泥院的发展、壮大,为设计现代化的新型干法水泥厂勤奋工作并作出了杰出的贡献。他用自己渊博的知识、广阔的视野,及时吸取和传播国外水泥工业的先进技术,并结合国情提出对我国水泥厂工艺技术进行革新的建议。1986 年主持新疆水泥厂 2 000t/d 新型干法水泥厂设计工作,首先在国内于生料磨、水泥磨上采用了滚压机预粉磨和引进二档支持的回转窑。

朱祖培同志近二十年来,一直跟踪国外水泥工业的技术发展动向和著文介绍国外水泥工业成熟的先进技术,为我国水泥工业的研究课题、结构调整以及我国整个建材工业的由“大”变“强”作出了积极的贡献。现在这本“论文集”仅是朱祖培同志一生著作中的一部分论文,但从其中可以看出他对中国水泥工业发展的深厚见解和对中国水泥工业的关爱与期望。

朱祖培同志不仅是我工作上的前辈,也是我学术上的老师、生活上的楷模。他一生中坎坷不平,有相当长时间处于困境,但他对祖国、对人民的热爱,对党的信任丝毫不动摇。朱祖培同志于 1984 年光荣加入中国共产党,他把自己毕生的精力贡献给了祖国的社会主义建设事业,为中国水泥工业的发展、壮大、现代化作出了贡献。我衷心祝愿朱祖培同志健康长寿,生活幸福!

原天津水泥工业设计研究院院长 侯宝荣

2006 年 7 月

前 言

本文集系作者多年来从事水泥工艺设计中的学习心得,在国内各有关专业报刊上发表过的科技论文,共选 24 篇成集。按发表时间依次排列,可供业内有关同行参考阅读。

水泥是国民经济中的一项重要物资。我国第一个水泥厂建于 1889 年,已有百余年历史。20 世纪国际水泥工艺技术有很大发展。新中国成立时,国外主要发展湿法生产。我国当时新建的工厂,如大同、永登、昆明等都因此由国外引进湿法生产线。第二个五年计划期间,我国根据实际情况,发展以立窑为主的小水泥工业,当时小水泥厂遍布全国,尽管在质量上不够稳定,但解决了广大农村水泥急需的问题。此后,国际水泥工业为降低水泥生产能耗,采用了带有多段预热器的干法窑,同时,在旋风预热器窑上援用预分解新技术,进一步降低能耗,并提高了单位生产能力,这种窑型习惯上称之为“新型干法预分解窑”,从此,湿法生产退出历史舞台,新型干法成为水泥生产的主要工艺方法;与此同时,它也促进了水泥装备的大型化。此外,水泥业已进入国际市场,从而排除了水泥只适于就近销售的陈旧观念,目前我国新型干法生产线的单位能力已达日产万吨,且远销国外。

由于本文集撰写过程超过半个世纪,因而文内部分专业术语,计量单位以及涉及有关国家的名称,不符合当前出版标准要求,为保持历史原貌,未作修改,特此加以说明。

作 者

2006 年 7 月

目 录

1 磨机的配球	1
2 地区拔海高度对水泥厂设计的影响	5
3 我国湿法水泥窑的窑型及系列化问题	15
4 水泥回转窑的相似性	26
5 预分解窑的产量和热工指标分析	36
6 分绍相似理论	47
7 预分解——水泥窑发展的新阶段	61
8 2 000t/d(提高型)生产线设计方案综述	71
9 水泥生产的节能问题	77
10 水泥粉磨技术的发展	82
11 多级旋风预热器的温度分布	89
12 水泥生产中的余热发电	94
13 我国水泥工业的技术改造	100
14 水泥煅烧技术的理论和实践	108
15 关于水泥的细度	116
16 水泥窑燃烧技术的进展	123
17 预分解窑的新发展——第三代篅冷机	129
18 中国水泥工业走向大而强——跨世纪的挑战	135
19 新世纪水泥工艺设想	139
20 浅谈水泥和混凝土	144
21 建大改小	147
22 新型干法生产的原料均化链	149
23 水泥生产方法的演变	152
24 漫谈水泥工艺过程的革新	155

1 磨机的配球

朱 祖 培

关于磨机配球问题,到现在为止,还停留在经验基础上,缺少理论的分析 and 研究。也没有可用的经验公式,用来确定钢球级配和装球量。

在多仓磨机中,物料由第一仓到第三仓(或第四仓),逐步由粗变细,因而各仓内的钢球球径,也需要相应地由大而小。一仓内装大球,二仓次之,三仓内装小球。磨机运转时,钢球(或其他研磨体)在离心力的作用下,随着磨胴体被带到一定的高度,然后沿近似于抛物线的轨迹,向下坠落。由于大球的重量大,在运动中动量较大,因而冲击作用也较大,有利于粉碎粗料;小球重量小,冲击作用较小,但研磨作用则较大,有利于粉碎细料。

磨机各仓的钢球级配,现在尚无一定之规,一般说来,在考虑配球时,需考虑三个因素:①进料粒度;②物料易碎性;③产品细度。

磨机的进料粒度,通常在 5~50 公厘范围内,而在大多数情况下,在 10~25 公厘范围内。进料较粗大,球径也应该大些。有人曾经试图找出进料粒度与最大球径之间的关系,但还没有能得到肯定的结论。在一般磨机操作条件下,物料在第一仓内由 25 公厘细碎到 2 公厘,第一仓实际上起着破碎的作用,因此,加大第一仓的球径是有利的。目前第一仓所用钢球的直径,最大曾到 125 公厘。

但最大球径,也受磨体直径的限制,有的学者认为:最大球径应在磨体直径的 $1/18 \sim 1/24$ 范围内,大多数磨机第一仓最大球径采用 80~100 公厘,根据苏联的经验,自从在水泥磨第一仓内采用 110 公厘大球后,产量提高很多,特别是熟料粒度较大的工厂。苏联专家郭瓦廖夫同志甚至认为水泥磨第一仓的平均球径应在 87~92 公厘之间,其中 100~110 公厘的钢球应占 35% 左右。

但是,在确定一仓球径时,还应该考虑物料的易碎性,而且应该根据易碎性的不同,同时调节其他各仓的级配,才能取得有效的结果。一般来说,物料易碎性小,各仓平均球径应该较大。小屯水泥厂 1956 年开始生产矿渣水泥时,由于半干状矿渣易碎性小,加大了各仓球径,一仓平均球径由 52.2 公厘加大到 64.6 公厘;二仓由 49.6 公厘加大到 54.3 公厘,三仓也增加了较大的钢段,使小时产量由 20 吨/时提高到 21.5/吨时。后来生产普通水泥,用页岩做混合材,易碎性大,重新调整钢球,缩小球径,产量比未缩小球径以前又获得提高。哈尔滨水泥厂也有类似的经验,说明各仓平均球径的大小,应随物料易碎性而异。

大多数工厂利用细度曲线来检查多仓磨机的粉碎效率,从而调整各仓的钢球级配和装球量。细度曲线是检查各仓钢球工作情

况的最好依据。不论被粉磨物料的性质及粉磨条件如何不同,多仓磨机的细度曲线,均有一个共同特征,即开始时突然下降,后来逐渐减慢。图1代表磨机的理想的细度曲线,工厂常根据实际测得的曲线与理想曲线的差异情况来调整钢球,使各仓的粉碎能力,彼此平衡。广州水泥厂 $2.2\phi \times 11$ 公尺水泥磨的各仓要求细度,原制造厂(丹麦史密斯公司)曾有一规定:当出磨产品的细度要求为90%通过200号筛时,一仓出料在10号筛上筛余不能超过6%,同时,其粒度不能粗于3公厘;二仓出料应全部通过10号筛,同时在20号筛上的筛余不能超过1%*。

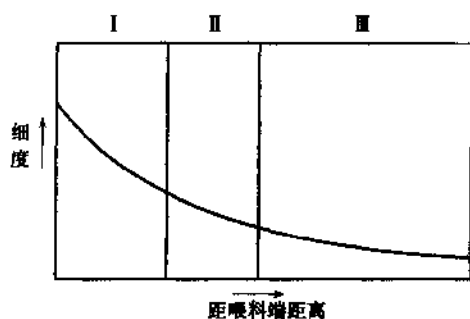


图1 磨机的理想细度曲线

各仓钢球的直径,工厂曾经采用过的范围如下:

第一仓 60~125 公厘

第二仓 30~60 公厘

第三仓 30公厘以下或其他形式研磨体。

在最后一仓内,最常用的研磨体是圆柱体的钢段。也可用具有双凹面的钢球,螺纹型的钢段或立方体研磨体等,以增加研磨表面积。

在第一次装球时,同一仓内的球径种类,毋需过多;因为磨机在开始运转以后,大球很快变小,而小球也变为不合格规格。仓内不合格规格的小球过多,使粉碎效率降低,特别是第一仓。因此,磨机第一二仓的钢球,应该定期(每隔1500~2000小时)过筛,将不合格规格

的小球筛出来,而将合格的大球加进去。过筛的方法,是将磨内物料转空以后,将一定大小孔眼的筛子装在磨门上,然后空转30~45分钟,这样,不合格的小球,就可被筛去。

钢球的研磨损耗是很大的,损耗率随被粉碎物料的易碎性和钢球材料而异。大致在0.5~2公斤/吨物料范围内。铸铁球的损耗最大,高碳钢次之,合金钢(铬钢或锰钢)又次之。高碳钢球的损耗约为合金钢球的一倍,苏联鲁尼耶在所著“水泥工业中的破碎与粉磨”一书中对研磨体损耗介绍了以下的平均指标:

表1 1吨水泥的研磨体消耗量

粉碎物料	研磨体消耗量(公斤)	粉碎物料	研磨体消耗量(公斤)
石灰石	0.8	自动立窑熟料	0.7
泥灰岩和白垩	0.5	立窑熟料	0.6
煤	0.3	熟料和矿渣	1.0
回转窑熟料	0.8		

关于磨机的装球量,在多仓磨机中的平均填充率,一般在25%~33%范围内,而以28%左右为适宜。湿法磨填充率可以较高。磨机装球量也可按经验数据来计算,即每立方公尺磨机的容积可装球(或其他研磨体)1.0~1.1吨。但是,磨机各仓的填充率是不同的。由于各仓球径大小不同,球径愈小,钢球单位容积重量则愈大,因此,第一仓的填充率量大,第二仓次之,第三仓最小。下列数字,可以作为参考:

第一仓 30%左右

第二仓 27%左右

第三仓 24%左右

从大献上看到,现在磨机的填充率有逐渐增加的趋势,有些磨机第一仓装到33%,第二三仓也装到30%,单仓球磨机的填充率,一般较大,以40%~45%时的粉碎效率为最高。美国宾·狄克西工厂曾作过试验,当磨机转速为

* 所指筛号系美国标准筛,200号筛孔径为0.0029吋;20号筛孔径为0.0331吋;10号筛孔径为0.0787吋。

临界转速的 75%, 装球量为 40% ~ 45% 时, 单位产品耗电量最低, 产量最高。

磨机填充率与需要动力之间的关系, 可由图 2 的曲线看出。填充率 50% 时为最大。

磨机装球量的测定, 在大多数工厂中, 采用测量磨机中心到钢球表面的高度(中心高)的方法, 来进行计算。表 2 系根据不同磨机直径与中心高而计算的每公尺磨机装球量。

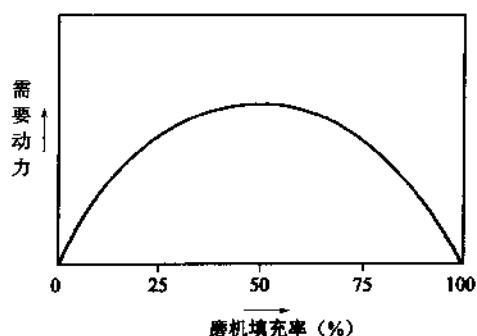


图 2 磨机填充率与需要动力的关系

表 2 磨机每公尺装球量与中心高的关系

以钢球容重 4.5 吨/立方公尺为基准

中心高 (公厘)	磨 机 直 径 (公尺)											
	1.5		1.8		2.0		2.2		2.4		2.6	
	填充率 (%)	球重 (吨)	填充率 (%)	球重 (吨)	填充率 (%)	球重 (吨)	填充率 (%)	球重 (吨)	填充率 (%)	球重 (吨)	填充率 (%)	球重 (吨)
200	32	2.22	35	3.56	37	4.72	38	5.92	39	7.30	40	8.85
250	28	1.95	32	3.25	34	4.34	35	5.48	36	6.72	37	8.19
300	24	1.67	28	2.85	31	3.95	32	5.00	34	6.38	35	7.72
350	20	1.39	25	2.55	27	3.44	29	4.53	31	5.80	32	7.09
400	—	—	21	2.14	24	3.05	26	4.05	28	5.23	30	6.62
450	—	—	—	—	21	2.68	24	3.74	26	4.86	28	6.20
500	—	—	—	—	—	—	21	3.28	23	4.30	25	5.52
550	—	—	—	—	—	—	—	—	21	3.93	23	5.10
600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	4.65

表 2 中的数值, 是按钢球平均容重为 4.5 吨/立方公尺来计算的。但钢球的容重随球径而异。对于大多数装有钢段的磨机, 由于钢段容重较小, 研磨体平均容重可以采用 4.5 吨/立方公尺, 以简化计算。不同球径的容重及其他有关数据, 列于表 3 中。

磨机装球量的计算, 也可利用图 3 所示的算图。该算图是根据下列公式绘制的。

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot \varphi \cdot \gamma$$

式中 G_w ——磨机装球量(吨);
 D ——磨机内径(公尺);
 L ——磨机长度(公尺);
 φ ——磨机平均填充率(%);
 γ ——钢球容重, 采用 4.5 吨/立方公尺。

表 3 钢球及钢段的大小与重量

研磨体	大小 (公厘)	每个重量 (公斤)	1 立方公尺的重量 (公斤)	1 吨重的个数	1 立方公尺的 表面积 m^2/m^3	松度系数 μ
钢 球	直径 30	0.111	4 850	9 000	123.8	0.62
	40	0.263	4 760	3 800	90.9	0.61

续表

研磨体	大小 (公厘)	每个重量 (公斤)	1 立方公尺的重量 (公斤)	1 吨重的个数	1 立方公尺的 表面积 m^2/m^2	松度系数 μ
钢	50	0.514	4 708	1 945	72.6	0.60
	60	0.889	4 660	1 120	59.0	0.595
	80	2.107	4 620	460	42.6	0.59
球	100	4.115	4 560	240	10.8	0.58
	125	8.038	4 528	120	2.7	0.57
钢 段	直径 × 长度					
	16 × 30	0.046 8	4 438	21 400	181.5	0.565
	20 × 40	0.098	4 389	10 200	141.0	0.560
	25 × 40	0.15	4 340	6 670	105.0	0.556

在上述公式中,如果 γ 采用 4.5 吨/立方公尺, φ 采用 28.5%, 则 $\frac{\pi}{4} \cdot \varphi \cdot \gamma \approx 1$, 该公式

可简化为 $G_w = D^2 L$, 可以利用这个简化公式来迅速确定磨机装球量。

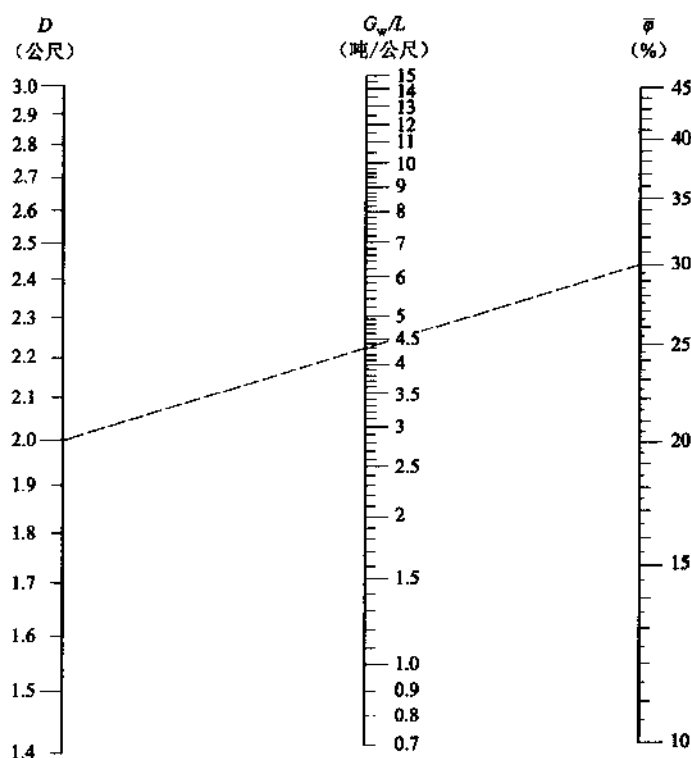


图3 磨机钢球量算图

2 地区拔海高度对水泥厂设计的影响

朱 祖 培

在设计新水泥厂的时候,需要考虑建厂地区的各种自然条件。例如,资源条件,地形条件,气候条件,水源条件,工程地质条件,等等。拔海高度也是必须考虑的自然条件之一,它对工厂设计有着明显的影响。我国幅员辽阔,地形起伏相差很大。东南沿海的地势较低,平原和丘陵地区拔海高度平均不超过 200 米;而西北、西南高原地区一般都在 1 000 米以上;青藏高原更高达 3 000 ~ 5 000 米。在发展我国水泥工业的时候,不可避免地需要在拔海较高的地方建设新厂。对这个问题进行讨论,将有助于正确解决高地建厂时有关的设计问题。

由于地心引力的作用,地球表面大气层的分子密度随拔海高度而变化。高度愈高,空气密度愈低,大气压力也就愈小。拔海高度与大气压力之间存在着固定不变的关系。工程上常常从大气压力的读数来确定当地的拔海高度。但是,由于空气湿度以及其他气候条件的变化,精确地确定它们之间的关系实际上是不可能的。举例来说,在室内悬挂一个气压计,尽管周需的空气保持平静,但在数小时内其读数仍可变化 2~3 毫米汞柱,这就相当于数十米拔海高度的差异。因此,用计算的方法来确定它们之间的关系只能是近似的。计算不同高度处大气压力的公式有许多种。苏联 A. C. 伊里伊契夫在他的著作中推荐了下列公式:

$$P_H = P_0 \left(1 - \frac{H}{44\,300} \right)^{5.526} \quad (1)$$

式中 P_H ——拔海高度为 H 处的大气压力 (mmHg);

P_0 ——海平面的大气压力 (mmHg);

H ——拔海高度 (m)。

根据这个公式可以算出不同拔海高度的大气压力。从表 1 所列数字中可以看出:在拔海高度为 1 000 米的地方,大气压力比海平面降低 10% 以上;而在拔海 3 000 米的高地上,大气压力降低将近三分之一。

大气压力的降低,在水泥厂设计时对空气压缩机和风机的选型,回转窑等热工设备的生产,以及电动机的选型等,都将产生影响。现在分别进行讨论。

表 1 不同拔海高度的大气压力

H (m)	P_H (mmHg)	P_H/P_0	H (m)	P_H (mmHg)	P_H/P_0
0	760	1.000	2 500	550	0.725
500	716	0.944	3 000	515	0.678
1 000	674	0.888	4 000	450	0.592
1 500	635	0.835	5 000	392	0.515
2 000	598	0.788	6 000	340	0.448

(I)

在水泥厂中,为了满足料浆或生料粉搅拌与输送的需要,一般要求供应 3 ~ 5 kg/cm² 表压力的压缩空气。随著拔海高度的不同,

当需要相同表压力的压缩空气时,要求压缩比也有所不同。设海平面处的大气压力为 P_0 , 海拔为 H 高地处的大气压力为 P_H (单位均为 kg/cm^2), 为了获得表压力为 P_g 的压缩空气, 在海平面时的压缩比为 $\varepsilon_0 = \frac{P_g + P_0}{P_0}$; 而在高地时要求的压缩比为

$$\varepsilon_H = \frac{P_g + P_H}{P_H},$$

为简便起见, 令 $P_0 = 1\text{kg}/\text{cm}^2$, 则 $\varepsilon_0 = P_g + 1$, 或 $P_g = \varepsilon_0 - 1$, 故

$$\varepsilon_H = \frac{(\varepsilon_0 - 1) + P_H}{P_H} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 由于 $P_H < 1$, 所以 $\varepsilon_H > \varepsilon_0$ 。也就是说, 海拔高度愈高, 要求压缩比也愈大。如果将式(2)绘成图1所示的曲线就更容易看出它们之间的关系。图1表明, 如果要得到 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 表压力的压缩空气, 在海平面时的压缩比为7; 而在2000米高地上需要8.6才能得到相同的表压力。

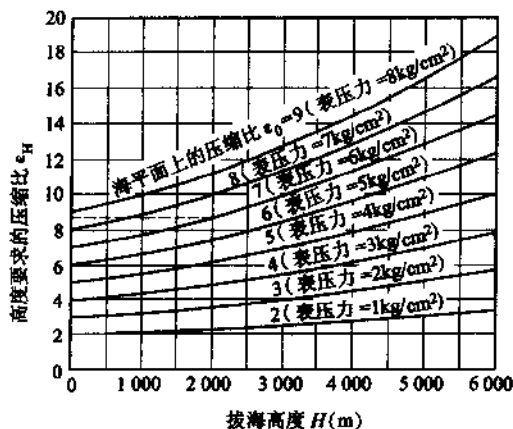


图1 不同海拔高度要求达到相同表压力时的压缩比

压缩比的改变直接影响空气压缩机的生产能力。空气压缩机的容积效率随压缩比的增高而降低。所谓容积效率是指活塞一次行程吸入压缩机内的空气体积与活塞实际所经过的容积之比。由于空气压缩机

的活塞处于终点位置时活塞与气缸盖之间存在着间隙, 当活塞吸气的时候, 气缸间隙内排气后残余的空气首先进行膨胀, 一直到这部分空气的压力降低到与大气压力相等时才开始吸气。因此, 气缸容积得不到充分的利用。大气压力愈低, 气缸容积的利用率愈小, 也就是容积效率愈低。不难证明, 容积效率与压缩比之间存在着以下关系:

$$\lambda = \frac{V'}{V} = 1 - m(\varepsilon^{\frac{1}{n}} - 1) \quad (3)$$

式中 λ ——空气压缩机的容积效率;

V' ——活塞一次行程吸入气缸内的空气体积(m^3);

V ——活塞一次行程实际所经过的容积(m^3);

m ——气缸间隙的容积与活塞所经过的容积之比;

n ——空气压缩机的多变压缩指数;

ε ——压缩比。

对于一定的空气压缩机来说, V 、 m 与 n 都是常数。因此, 式(3)表明 ε 愈大, 则 λ 愈小。在海拔 H 米的高地上容积效率的降低率可计算如下:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_H}{\lambda_0} = \frac{1 - m(\varepsilon_H^{\frac{1}{n}} - 1)}{1 - m(\varepsilon_0^{\frac{1}{n}} - 1)} \quad (4)$$

容积效率的降低, 也就是空气压缩机以体积表示的生产能力(用当地自由空气量来表示)的降低。它与海拔高度的关系可如图2所示。图2是按照式(4)绘制的, 并假定 $m = 0.05$, $n = 1.25$ 。从图2可以看出, 在海拔2000米处当压缩空气的表压力为 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 时, 空气压缩机的体积生产能力降低约6%。

以重量表示的生产能力降低比以体积表示的生产能力降低率要大。因为容积效率的降低是由于气缸间隙所造成, 它与压缩比的改变有关; 但与高地的空气密度并无联系。如果用重量来表示生产能力的降低, 还应该

就空气密度作出校正。

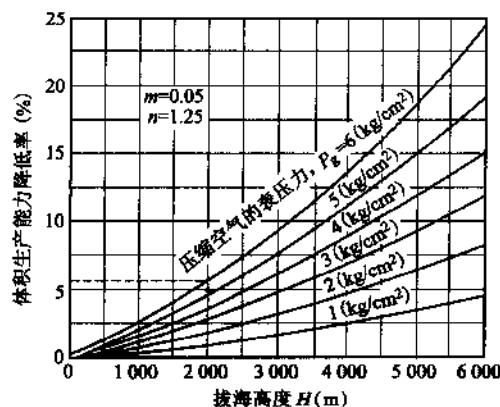


图2 海拔高度对空气压缩机(单级压缩) 体积生产能力的影响

$$\beta_1 = \alpha_1 \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_0} = \alpha_1 \cdot \frac{P_H}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_H} \quad (5)$$

式中 β_1 ——空气压缩机重量生产能力的降低率;

γ_0, γ_H ——海平面及海拔为 H 处的空气密度(kg/m^3);

T_0, T_H ——海平面及海拔为 H 处空气的平均温度($^{\circ}\text{K}$);

根据 A.C. 伊里伊契夫:

$$T_H = T_0 - 0.0065H.$$

以上所讨论的只适用于单级压缩的空气压缩机。对于双段或多段压缩来说,却是另一种情况。因为对于双段压缩的空气压缩机来说,其容积效率决定于其第一段压缩的压缩比;而第一段压缩比又决定于两个气缸的截面积之比。因此,双段压缩机的容积效率实际不受海拔高度的影响;因而在高地上它的体积生产能力保持不变。但由于高地上的空气密度较低,其重量生产能力的降低率直接与空气密度的降低成正比。

$$\beta_2 = \alpha_2 \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_0} = \frac{P_H}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_H}, (\alpha_2 = 1) \quad (6)$$

图3表明了空气压缩机的重量生产能力降低率随海拔高度变化的情况。从图3看

出,单段压缩机的降低率随排气压力的加大而增加;但双段压缩机的降低率却与排气压力的大小无关。这是因为双段压缩机的压缩比是固定的。也正因为如此,它的最大排气压力随海拔高度的升高而降低。如果不改变双段压缩机的设计,它在地面上就不能达到与海平面时相等的表压力。例如,一台设计为 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 表压力(压缩比为9)的双段压缩机,在2000米的高地上只能压缩到大约 $6.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 表压力。但实际压缩比仍然为9,与海平面时相同(参阅图1)。

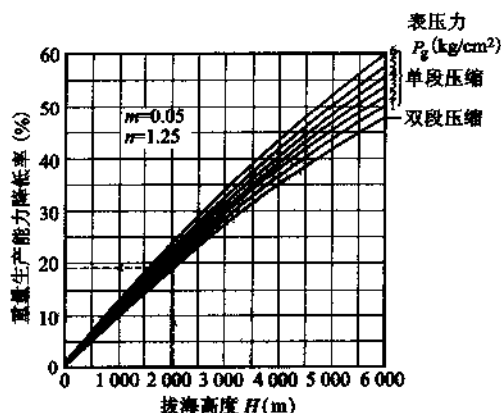


图3 海拔高度对空气压缩机重量生产能力的影

前我们已经讨论了空气压缩机的生产能力与海拔高度的关系。但在另一方面,一公斤相同表压力的压缩空气在高地上所做的功较海平面时为大。这是因为一公斤相同表压力的压缩空气在大气压力较低的地方“膨胀比”较大的缘故。在水泥厂中,压缩空气主要用于搅拌与输送。压缩空气在作功过程中直接与大气相接触;因而可以把它看作是一个等温膨胀过程。一公斤空气所作的功按照等温膨胀过程可计算如下:

$$W_g = 23\,030 P_1 v_1 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (7)$$

式中 W_g ——每公斤空气按照等温膨胀过程所作的功($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{kg}$);

P_1 ——压缩空气的压力 (kg/cm^2);

$P_1 = P_g + P_2$, P_g 为表压力;

P_2 ——大气压力 (kg/cm^2);

当在海平面时, $P_2 = P_0$;

当在 H 米高地时, $P_2 = P_H$;

v ——空气的比容 (m^3/kg).

每公斤空气在高地上比在海平面做功的增加率可计算如下:

$$\delta_g = \frac{W_{gH}}{W_{g0}} = \frac{23\,030 P_H v_H \log \frac{P_g + P_H}{P_H}}{23\,030 P_0 v_0 \log \frac{P_g + P_0}{P_0}}$$

在等温过程的情况下, $P_H v_H = RT_H$, $P_0 v_0 = RT_0$; 故

$$\delta_g = \frac{T_H \log \frac{P_g + P_H}{P_H}}{T_0 \log \frac{P_g + P_0}{P_0}} \quad (8)$$

如果将式(8)绘成图4所示曲线,就可看出表压力愈小,或海拔高度愈高,所作的功较海平面增加愈多。当压缩空气的表压力增高时,海拔高度的影响反而减小。在海拔2000米的高地上表压力为 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 时,每公斤空气所作的功比海平面约增加6%。

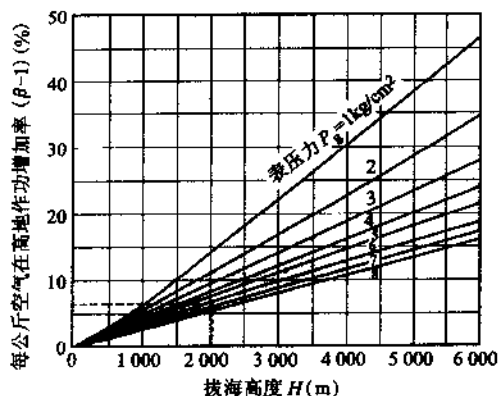


图4 海拔高度与空气等温膨胀做功的关系

当考虑海拔高度对空气压缩机选型的影响的时候,应该对上述两方面同时进行校正:一是压缩机在高地上生产能力的降低;

另一是表压力相同的压缩空气在高地上做功的增加。因此,海拔高度对空气压缩机选型的总的影晌,应该是这两个指数的乘积:

$$\xi = \beta \cdot \delta_g$$

上式左侧的 ξ 代表在高地上对空气压缩机的综合校正系数。

如果按一立方米自由空气来考虑不同海拔高度上做功的变化时,则:

$$\delta_v = \delta_g \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_0} = \delta_g \cdot \frac{P_H}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_H} \quad (9)$$

此时,综合校正系数 ξ 为

$$\xi = \alpha \cdot \delta_v = \alpha \cdot \delta_g \cdot \frac{P_H}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_H} = \beta \cdot \delta_g \quad (10)$$

可以看出,由体积所得到的校正系数与由重量所得到的是一致的。这里需要指出,由于在高地上空气密度较低,每立方米自由空气所作的功较海平面时为少。

因此,对于单段与双段压缩机的综合校正系数应分别为:

$$\text{单段压缩: } \xi_1 = \alpha_1 \cdot \delta_v = \beta_1 \cdot \delta_g \quad (10a)$$

$$\text{双段压缩: } \xi_2 = \delta_v = \beta_2 \cdot \delta_g \quad (10b)$$

为了便于设计时应用,将式(10a)与式(10b)绘成图5与图6,分别表示单段与双段空气压缩机在高地上的综合校正系数。在选型的时候,可按照图上所查得的系数进行校正。当选用双段压缩机时,还应该先按照图1来检查所选压缩机是否能满足高地时对表压力的要求。举例来说,在海拔2000米的高地上选用1-40/8型立式双段空气压缩机,其排气量为 $40\text{m}^3/\text{min}$,最大排气压力为 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 。从图1可先求出在2000米高地上最大排气压力为 $6.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 。再从图6求出当表压力为 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 时的综合校正系数 ξ_2 为0.87;因此,压缩机的生产能力只能按 $40 \times 0.87 = 34.8\text{m}^3/\text{min}$ 来选用。对于单段空气压缩机可以不考虑排气压力的变化问题。

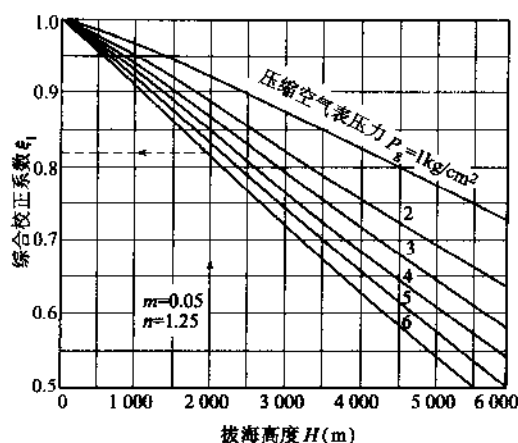


图5 在高地上对单段空气压缩机的
综合校正系数

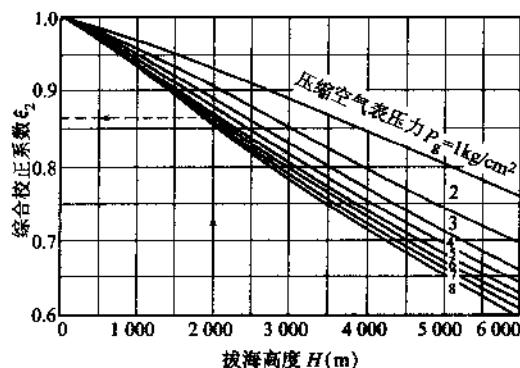


图6 在高地上对双段空气压缩机的
综合校正系数

(II)

高地上空气密度的降低对于风机选型也产生影响。水泥厂内所用风机有两种情况：一种是在回转窑、烘干机、冷却机等热工设备上所用的鼓风机或排风机，用以排除反应气体或鼓入反应所需要的空气。为了保证其主机的生产能力不受影响^{*}，对于这一类风机的选型，要求其在高地上单位时间内通过的空气（或气体）重量 G (kg/H 或 nm^3/H) 与海平面时相等；但风量 Q (m^3/H) 则与高地上空气密度 γ (kg/m^3) 的降低成反比增加。另一

种是一般的通风除尘排风机，要求其在主机内产生一定的风速；因而要求风机的风量 Q 与海平面保持不变；而空气重量 G 则随空气密度 γ 的降低而减少。

在空气密度一定的情况下，对于一定规格的风机来说，风机的转速 n (RPM) 与风量 Q 、风压 P 及动力 N (kW) 之间存在着以下关系：

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N_2}} \quad (11)$$

也就是说，当转速 n 变化的时候，风量 Q 与转速 n 的一次方成正比；风压 P 与其二次方成正比；而动力 N 则与其三次方成正比。但是，如果在不同海拔高度处空气密度发生变化时，它们之间的关系却存在着不同情况。

如果我们要求同一台风机在高地上产生与海平面时相同的风量 Q ，我们毋需改变风机的转速 n 就可以达到这一目的。因为风量 Q 与空气密度 γ 无关，在不同海拔高度的地方风机的风量是不变的。但风压 P ，空气重量 G 及动力 N 则与空气密度 γ 成正比变化；即海拔高度愈高，空气密度 γ 愈低， P 、 G 及 N 均成正比减少。

如果我们要求同一台风机在高地上产生与海平面时相同的风压 P ，我们就必须加快风机转速 n ，使转速与空气密度的平方根成反比变化 $\left(n \propto \frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right)$ 。此时，风量 Q 与动力 N 均将与转速 n 成正比增加。在这种情况下，风量 Q 与转速 n 成正比是容易理解的。而动力 N 之所以与转速 n 成正比是由于：一方面 $N \propto \gamma$ ，另一方面 $N \propto n^3$ ；现在我们使 $n \propto \frac{1}{\sqrt{\gamma}}$ ，因面 $N \propto \gamma \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right)^3$ ，或 $N \propto \frac{1}{\sqrt{\gamma}}$ ，也就是 N 与 n 成正比。

如果我们要求同一台风机在高地上产生与海平面时相同的空气重量 G ，我们同样需

* 关于热工设备的生产能力与海拔高度的关系，在(III)中讨论。

要加快转速 n 。但此时应使转速与空气密度的一次方成反比变化 ($n \propto \frac{1}{\gamma}$)。此时, 风压 P 及风量 Q 均与转速 n 成正比增加, 而动力 N 则与转速 n 的平方成正比增加 ($N \propto n^2$)。

以上都是就同一台风机在不同海拔高度时的情况而言; 也就是说, 在风机规格不变的情况下改变转速 n 后所能获得的效果。但是, 在设计选型的时候, 风机规格是可以按照需要来选用的。我们可以按照海拔高度的不同从风机规格和转速两方面来进行选型, 以使所选风机在高原操作时既满足风量 Q 与风压 P 的要求, 又保持在最高效率下运转。

我们在高地上选用风机时, 可以采用一个比值 A ; 并令

$$A = \sqrt{\frac{\gamma_0}{\gamma_H}} = \sqrt{\frac{P_0 \cdot T_H}{P_H \cdot T_0}} \quad (12)$$

现在举例说明选型的程序: 设在海拔为 H 的高地上选用一台风机要求其风量为 Q (m^3/H), 风压为 P (mmHg_2O)。在选型的时候, 可以先用 A 值去除 Q 得出风量 Q' ($Q' = Q/A$); 按照风量 Q' 与风压 P 进行选型; 从样本上得出在最高效率下的风机规格; 其转速为 n' , 以及相应的动力为 N' , 然后再操高风机的转速到 n , 使 $n = A \cdot n'$; 同时, 风机的动力 N' 也相应地提高到 N ($N = A \cdot N'$)。这时所选风机既满足了高地上风量 Q 与风压 P 的要求, 又可使所选风机的规格较小, 运转效率最高。

同样, 如果我们要求在高地上选用一台风机, 其单位时间空气重量为 G (kg/H 或 Nm^3/H), 风压为 P (mmHg_2O)。在选型的时候, 可以先用 A 值去乘 G 得出 G' ($G' = G \cdot A$); 然后按 G' 与 P 进行选型, 得出某一规格的风机其转速为 n' , 动力为 N' 。再保高风机转速使 $n = A \cdot n'$, 此时所选风机即能满足要求, 且 $N = A \cdot N'$ 。但是, 由于在风机样本上一般不给出空气重量或标准状态下风量的数据; 而只给出 20°C 时的风量; 因此, 用这个方法来选型反多不便。不如先将 G 换算成

20°C 时的 Q (即 $Q = G \cdot \frac{1}{\gamma_{20}}$), 然后按前节所示方法进行选型, 当更为便捷。

表 2 列出了不同海拔高度时的 A 值, 可供选型时应用。此外, 选择在高温下操作的风机与高地选型的原理是一致的。表 3 也列出了不同

温度下的 B 值, 令 $B = \sqrt{\frac{\gamma_{20}}{\gamma_T}}$ 。如果要求在高地上选用高温风机时, 应该同时考虑两者的影响; 其综合比值为两者的乘积, 即 $A \cdot B$ 。

表 2 在高地上选用风机时的 A 值

$H(\text{m})$	P_H (mmHg)	A	$H(\text{m})$	P_H (mmHg)	A
0	760	1.000	2 500	550	1.142
500	716	1.023	3 000	515	1.173
1 000	674	1.050	4 000	450	1.280
1 500	635	1.075	5 000	392	1.315
2 000	598	1.102	6 000	340	1.392

表 3 不同温度下选用风机时的 B 值

$t(^{\circ}\text{C})$	γ_t (kg/m^3)	B	$t(^{\circ}\text{C})$	γ_t (kg/m^3)	B
0	1.293	0.965	250	0.673	1.335
20	1.205	1.000	300	0.616	1.396
30	1.165	1.095	350	0.566	1.458
100	0.946	1.150	400	0.523	1.522
150	0.834	1.200	450	0.488	1.569
200	0.746	1.268	500	0.457	1.622

(III)

海拔高度对回转窑及其他热工设备的生产, 也有一定程度的影响。回转窑在正常条件下生产每公斤熟料所生成的废气量 (以 Nm^3/kg 熟料来表示) 一般说来是一定的。但是, 由于高地上大气压力降低, 生产每公斤熟料需要的空气体积和生成的废气体积都将显著增加; 因而提高了窑内气体的速度, 加大了飞灰损失, 增加了热耗, 从而也限制了回转窑的最大产量。以大同、永登、昆明三厂的回转窑为例: 三厂窑的规格是相同的, 但大同的海拔高度为 1 000 米, 而永登与昆明则超过或接近 2 000 米; 它们的生产情况相差很大。