

● 葛世荣 鲍久圣 曹国华 编著

采矿运输 技术与装备

Transportation and Hoisting
Technology and
Equipments in Mining



煤炭工业出版社

采矿运输技术与装备

葛世荣 鲍久圣 曹国华 编著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

采矿运输技术与装备/葛世荣, 鲍久圣, 曹国华编著. --北京:
煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978-7-5020-4790-0

I. ①采… II. ①葛… ②鲍… ③曹… III. ①矿山开采②矿山运输
IV. ①TD8②TD5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 037529 号

采矿运输技术与装备

编 著	葛世荣 鲍久圣 曹国华
责任编辑	向云霞 赵金园 徐 武 成联君 武鸿儒 张江成
编 辑	杜 秋 李景辉
责任校对	王云巧 邢蕾严
封面设计	王 滨
出版发行	煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话	010-84657898 (总编室) 010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)
电子信箱	cciph612@126.com
网 址	www.cciph.com.cn
印 刷	煤炭工业出版社印刷厂
经 销	全国新华书店
开 本	787mm × 1092mm ¹ / ₁₆ 印张 34 ³ / ₄ 字数 847 千字
版 次	2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷
社内编号	7645 定价 65.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

序 言

人类采矿的历史已有 2500 多年。采掘和运输是采矿过程中两个必不可少的工艺环节,但在很长一段时间,我国的采掘与运输分科而修。采掘者修运输不多,运输者修采掘较少。生产中,矿井运输似乎被当作采掘工艺的配角。实际上,运输是采矿工程技术发展中最先实现机械化的生产环节,由此才使近代采矿效率得以大幅度提高。可见,采掘与运输缺一不可。矿井运输是一门集机械学、运动学、动力学、电机学、摩擦学于一体的综合技术。

师者,授业解惑,教材为先。

1990 年秋季,我初登讲台,为矿机 87 级 50 多名学生讲“矿井提升设备”课程时采用的教材还是我读本科时所用的中国矿业学院编写的《矿井提升设备》,可见,一本好的教材堪称经典。后来,陆续有各种关于矿井运输、提升的教材出版,但似乎基本框架和理论体系都没能超越经典的《矿井提升设备》。更为遗憾的是,现有教材一直没有把矿井提升、运输、辅助运输以及露天采矿运输等融为一体,也缺少动力学、电机学、摩擦学等关键知识的延伸,这很容易导致学生的知识不完整、不系统、不深入。

2013 年秋,我重登讲台,为本科生讲“矿井提升运输”课程。今非昔比,听课学生已达 300 余人。我与鲍久圣、曹国华两位青年副教授一起上课,还请荷兰德尔夫特大学 Gabriel Lodewijks 教授讲授部分内容。在讲课过程中,我们深感缺少一本适应我们讲课方式的教材。为此,我们尝试着从新的角度对矿井运输技术进行归纳梳理,编写一本兼顾学术著作和教材的新书,以科研引领教学,展现采矿运输的新技术、新装备和新工艺,拓宽学生视野,夯实理论基础。

本书共有 13 章,体现以下几个特点:

一是系统性。完整归纳井工开采的 8 种运输工艺系统:立井提升、斜井提升、带式运输、刮板运输、电机车运输、无极绳连续运输、架空乘人索道、无轨胶轮车运输,同时也将露天开采运输纳入其中,建构了地采运输与露采运输并重、矿井主干运输与辅助运输一体化的知识体系(第 2、12 章)。

二是交叉性。从电力拖动、电气调速到承载部件、驱动机构，对矿井运输装备的运行、调控进行了介绍，把矿井运输装备所需的机电一体化、智能自动化等高新技术内涵加以描述（第3、4、5、6章）。

三是条理性。按照运输工具导向方式进行归类，把采矿运输工具梳理归纳为运载容器（箕斗、罐笼）、有轨车辆（轨道矿车、齿轨车、吊轨车、索道车）、无轨车辆三种形式，便于读者对运输方式、运输工艺的理解（第7、8章）。

四是理论性。对矿井运输装备的安全可靠运行理论和技术作了系统介绍，涵盖牵引钢丝绳、输送带、刮板链的动力学分析、安全保护技术、可靠性技术，进一步夯实了矿井运输装备的设计理论，丰富了安全运行保障技术知识（第9、10、11章）。

五是新颖性。把人类采矿历史与运输技术演变融为一体，给采矿运输技术一个新视角，不仅把采矿运输与城市交通运输加以比较，而且还介绍了矿井管道运输、磁悬浮运输的新研究，描述了未来“三深采矿”（深地、深海、深空）的运输技术（第1、13章）。

基于以上的知识体系调整，我们把常规的采矿运输系统归纳为如下的矩阵表达形式。读者可根据这些矩阵单元，组合出不同的运输工艺，形成经济适用、安全可靠的运输系统。显然，以矩阵形式梳理的知识要点，学习起来也更为直观，技术关键点更易把握。

运输功能	井工采矿运输	露天采矿运输	海底采矿运输
运输线路	干线运输（立井提升、斜井提升、带式运输）	支线运输（巷道运输、辅助运输）	采区运输（工作面运输、顺槽运输）
驱动方式	啮合驱动（绳传动、带传动、链传动）	黏着驱动（电机车、卡轨车、吊轨车、胶轮车）	管道驱动（水力驱动、电磁驱动）
动力来源	电机动力	燃油动力	流体动力

本书整体框架由葛世荣构思，并负责编写第1、5、9、10、11、13章；鲍久圣负责编写第2、3、4、8、12章；曹国华负责编写第6、7章。实际上，本书不只是我们三位编写者的笔耕之作，它也汇聚了众多国内专家的科研成果。北京华宇设计研究院李玉瑾研究员，山东科技大学于岩教授，辽宁科技大学毛君教授，中国矿业大学夏士雄教授、朱真才教授、伍小杰教授、张德坤教授等都为本书奉献了宝贵素材。同时，本书的出版还得到了煤炭工业出版社的大力

支持。

在此，我们向对本书提供无私帮助的专家们，为本书出版付出辛勤汗水的编辑们，对本书试用提出意见的同学们，表示衷心的感谢！

学无止境，止于至善。本书是一部专著与教材相融合的读物，意在提升教材的先进性，让最新的科研成果走进课堂教学，以弥补目前专业教材滞后于生产技术的缺憾。尽管我们探索着改变、尝试着创新，力求使本书能契合于现代化采矿技术，但受我们的知识和水平所限，书中难免仍有不足之处，请各位读者给予批判和指正，也希望读者能不断提供最新研究成果，以择机补充完善。

葛世荣

2014年11月20日

目 录

1 采矿运输技术概述	1
1.1 采矿是人类文明变迁之本	1
1.2 煤炭推动工业技术革命	2
1.3 煤炭开采系统	6
1.4 矿井物流系统	8
1.5 采矿运输与城市交通	14
参考文献	29
2 矿井运输工艺系统	30
2.1 立井提升系统	30
2.2 斜井提升系统	39
2.3 输送带运输系统	44
2.4 刮板机运输系统	57
2.5 电机车运输系统	60
2.6 无极绳连续运输系统	69
2.7 索道载人车运载系统	76
2.8 无轨胶轮车运输系统	81
2.9 煤炭运输仓储系统	83
参考文献	90
3 矿井运输动力技术	92
3.1 矿井运输动力形式	92
3.2 防爆柴油机	95
3.3 电动机	102
3.4 电动机选型计算	107
3.5 电动运输车动力电池	114
参考文献	118
4 矿井运输调速控制技术	120
4.1 直流电动机调速技术	121
4.2 交流异步电动机调速技术	124
4.3 开关磁阻电动机调速技术	130

2 采矿运输技术与装备

4.4 带式输送机调速控制技术	136
4.5 矿井提升机调速控制技术	148
参考文献	155

5 矿井运输牵引力计算

5.1 摩擦力定量计算	156
5.2 挠性体摩擦传动方程	164
5.3 摩擦提升传动力计算	170
5.4 输送带摩擦牵引力计算	174
5.5 轮轨黏着牵引力计算	182
5.6 轮胎摩擦牵引力计算	183
5.7 刮板链啮合传动力计算	186
参考文献	194

6 矿井运输驱动设备

6.1 挠性驱动部件	196
6.2 钢丝绳驱动设备	200
6.3 输送带驱动设备	208
6.4 轨道车驱动设备	215
6.5 刮板链驱动设备	226
参考文献	234

7 井筒运载容器

7.1 箕斗	237
7.2 罐笼	248
7.3 容器连接装置	254
7.4 容器导向装置	256
7.5 凿井吊桶	258
7.6 新型运载容器	261
7.7 运载容器选型	264
7.8 箕斗结构力学分析	265
参考文献	271

8 巷道运载车辆

8.1 窄轨运输车	273
8.2 无极绳运输车	277
8.3 齿轨运输车	281
8.4 吊轨运输车	284
8.5 索道乘人车	288

8.6 无轨胶轮车	292
参考文献	303
9 矿井运输系统动力学	305
9.1 矿井提升系统刚体动力学	305
9.2 矿井提升系统动力学分析	312
9.3 斜井提升系统动力学分析	329
9.4 架空索道系统动力学分析	332
9.5 带式输送机动力学分析	338
9.6 刮板输送机动力学分析	349
参考文献	355
10 矿井运输安全保护技术	357
10.1 摩擦制动及保护技术	357
10.2 斜井防跑车保护技术	371
10.3 运载容器失速保护技术	375
10.4 带式输送机保护技术	384
10.5 刮板输送机保护技术	395
参考文献	400
11 矿井运输可靠性技术	402
11.1 矿井运输系统可靠性理论	402
11.2 刮板输送机可靠性技术	404
11.3 带式输送机可靠性技术	416
11.4 井下电机车可靠性技术	425
11.5 矿井提升机可靠性技术	430
11.6 提升钢丝绳可靠性技术	439
参考文献	451
12 露天采矿运输技术	454
12.1 自卸汽车运输	454
12.2 铁路运输	468
12.3 带式运输	474
12.4 联合运输	485
12.5 露天矿运输系统智能化	492
参考文献	499
13 特殊采矿运输技术	501
13.1 管道水力输送技术	501

4 采矿运输技术与装备

13.2 矿井水力提升技术	506
13.3 矿井磁悬浮运载技术	515
13.4 深海采矿运载技术	524
13.5 太空采矿运载技术	533
参考文献	542

1 采矿运输技术概述

运输是用设备和工具,将物品从一地点向另一地点运送的物流活动,它包括集货、分配、搬运、中转、装入、卸下、配送等一系列工序。

采矿是人们从地壳或地表挖掘矿产资源的技术和科学。广义的采矿包括矿石、煤炭、石油、气体、水、热等资源的开采。由此可见,采矿工业是人们从自然界获取能源和原材料的一种工业生产活动。采矿生产工艺由矿体挖掘和矿物运输两个重要环节组成,二者紧密关联,需要有序、高效、安全地组织和运行。

煤炭是人类历史上最古老的能源之一,也是现代工业的重要原料之一,自古以来人们就将它誉为“乌金”,近代人们又称之为“工业的粮食”。从历史上看,煤炭与人类文明的发展是息息相关的。

中国是世界上最早发现、利用及开采煤炭的国家。考古学家在河南省巩义市的汉代冶铁遗址发现了许多煤块和煤饼,说明在两汉时期我国用煤已十分普遍。约公元前5世纪的《山海经·五藏山经》中记载了陕西、四川地区已发现煤,并称之为石涅,这是人类有关煤的最早记载。魏、晋时把煤称为石墨或石炭,李时珍的《本草纲目》首次使用煤这一名称。在公元10世纪前后,欧洲开始开采和使用煤炭,英国从公元13世纪开始有组织地开采煤炭。

起初,人类并不清楚煤炭的形成机制。随着自然科学的发展,直到18世纪人们才逐渐认识了煤炭的成因。到了19世纪,煤炭的产量猛增,登上了人类能源的首席宝座,人们的煮食、取暖、照明及工业生产和交通运输等都离不开煤炭。从此,煤炭促成了以蒸汽机诞生为标志的工业革命,奠定了现代文明的物质基础。

1.1 采矿是人类文明变迁之本

文明,广义上指人类社会进步状态。人类文明历程实际上是生产力发展过程,它与人类对能源的认识、获取及利用活动密不可分。人类文明进程划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、蒸汽机时代、电气时代、电子时代。在某一特定环境下,能源基础是这一文明形成和发展的决定因素。

石器时代(约1万年前):人类处于柴草能源时代,学会了用火取暖和熟制食品,从天然火中保存火种,以草木取暖、吃熟食、抵御猛兽侵害,靠人力、畜力以及来自太阳、风和水的动力从事生产活动,逐步发展了农业文明。人们发现火器旁的黏土结板成型,便有意识地采集、提炼黏土,制成一个造型放在火中烧制而发明了陶器,还学会打造石器工具,因此出现了采石场、采土场等原始采矿形态。

青铜器时代(约公元前5000年):人类进入煤炭认识和初级利用阶段,人们发现了煤炭的可燃性和热能性质并学会了煤炭燃烧控制,用这种先进的能源开发了炼铁技术,使人类在制造工具方面前进了一大步。煤炭被用于熔炼青铜合金,制造出精美的青铜器、饰

品、祭品和精良的兵器。

铁器时代（约公元前 14 世纪）：人类开始煤炭规模化利用，煤炭成为冶炼、制陶、烧瓷的基本燃料。春秋至战国中期，中国古人对金属矿的寻找方法有了突破性进展，使铁矿得以开采。人类开始用煤炭加热铁材、锻造铁器来制造工具，铁制农具、工具、兵器得以广泛应用。此时，中国古人还发明了火药的聚能技术。煤炭炼铁和火药的利用，促进了手工业的发展，奏响了工业文明的前奏。

蒸汽机时代（18 世纪末至 19 世纪）：人类进入矿物能源时代，用煤炭替代柴草燃料，实现了动力燃料革命，煤炭成为人类社会的主体能源。人们逐渐认识和掌握了热能—机械能的转化规律，发明了蒸汽机及利用其蒸汽动力驱动的交通、纺织等工具，促进了第一次工业革命的兴起。钢铁冶炼达到流程化作业水平，煤炭开采升级为炸药爆破、蒸汽动力运输。人们发现了石油能源的优越性，发明了内燃机并广泛使用，使工业生产规模扩大。

电气时代（20 世纪以来）：人类进入多元化能源时代，以大量煤炭和石油为燃料的电厂，向社会提供便捷、易控的电，彻底改变了人类的生活方式和生产业态。电能的大规模使用，促进了第二次工业文明的蓬勃发展。随着矿物能源对环境影响越来越大，人们开始重视其他能源，水力发电开发力度加大，核能利用规模扩大，太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等可再生能源的开发利用被提上日程。

1.2 煤炭推动工业技术革命

1.2.1 煤炭使用促进生产力的发展

人类生产力发展史上的一大飞跃，是对“火”的利用，从来没有一项发明能像“火”的影响之大。从钻木取火到柴草烧火，再到煤炭燃料、油气燃料，在人类文明前进的每一步，火的作用和影响都极为重要。恩格斯说：“人类学会了摩擦取火以后，人才第一次使无生命的自然力为自己服务。”

火的本质是燃烧产生热量和能量。从原始人到现代人，人类智慧成长的每一步都离不开对燃烧的认识和控制。人类智慧启迪的第一步是在火光中获得光明，在寒冷中取得温暖。第二步是钻木取火、保存火种而且加以控制地运用火。偶然发现掉入火堆的动物具有烧烤香味，进而掌握了用火烧烤食物，摆脱了茹毛饮血的时代，促进人的大脑更加智慧。第三步是发掘自然界赋存的化石燃料，利用其能量替代人力劳动，煤炭、石油和天然气开采即为这第三步的重大突破。

中国最早的煤炭使用已可追溯到六七千年前，在沈阳新乐遗址中发现了大量的煤精雕刻品、煤块、半成品。在西汉至南北朝时期，中国采煤井、煤洞已达一定规模。魏晋时期已有深达八丈的煤井（立井）和可容纳一百多人的煤洞（平硐）。在汉代，煤炭已成为冶铁业的燃料。另外，当时已有专用模具制作煤饼，这是最早的煤炭加工利用。河南鹤壁宋元时期的古煤井遗址发掘显示，当时的凿井、开拓、巷道布置、凿煤、井下运输、排水、提升、通风、照明等技术成熟且配套，形成了系统的采煤技术体系。在唐代就出现了焦炭雏形，至宋代炼焦技术臻于完善，炼焦技术是煤炭加工利用的进步，成为中国古代科技史上的重大成果。

在明代宋应星所著《天工开物》中，第一次详细描述了中国古代采煤技术：“凡取煤经历久者，从土面能辨有无之色，然后掘挖。深至五丈许，方始得煤。初见煤端时，毒气

灼人。有将巨竹凿去中节，尖锐其末，插入炭中，其毒烟从竹中透上，人从其下施钁拾取者。或一井而下，炭纵横广有，则随其左右阔取。其上支板，以防压崩耳。”它不但记述了找矿、采矿的情况，而且记述了排除瓦斯和防止塌陷的措施。

英国在公元9世纪、德国在公元10世纪先后发现了煤，并于12世纪用作家庭燃料，13世纪英国国王准许开采煤矿，14世纪初开始有组织地开采和利用煤。但是，16世纪中叶之前不论在中国还是欧洲，煤炭在人类所用能源构成中只占极小比例，煤炭开采一直沿用人力作业方法，开采技术处于落后的原始水平。

从16世纪中叶到18世纪末，英国的燃料构成发生了重大变化，称之为燃料革命。在这期间，英国手工业和建筑业的迅速发展导致当时的燃料木材供不应求，价格急剧攀升，且危及英国森林保有量。为此，1858年英国议会会对铁生产者颁布了森林保护法，并在此后几十年中相继颁布了多项保护森林法规。在这种情况下，人们积极寻找木柴的替代燃料，发现煤是英国储量丰富且高效的替代燃料，因此开始改用煤炭。例如，玻璃制造业、酿造业、制陶业、制碱业等高耗热工业，都开始用煤代替木柴燃料。到1615年，英国法律明确规定玻璃熔炉不允许使用木材燃料。

在燃料革命历程中，煤炼铁技术的成功起到了决定性的作用。当时英国的炼铁业发展最快，1490—1500年间，英国出现了高炉炼铁技术，此后的一百多年的产量增长和技术改进，没有解决炼铁工业烧掉大量木材的问题。到18世纪初时，炼铁业已使英国的森林濒于绝境，甚至吞噬欧洲大陆的森林，铁锭的价格优势逐步被瑞典和俄国的木材资源优势所排挤，为此英国炼铁业不得不认真地研究煤的替代使用问题。

实际上，用煤炼铁的想法早在1612年就被提出，但由于煤中含硫和其他杂质，直接燃烧冶炼的铁质较脆，强度无法达到使用要求。1735年，达比父子首次研究成功焦炭炼铁技术并应用于工业化生产；1783年，科特发明了搅炼钢技术。从此，炼钢逐渐开始使用焦炭作为燃料，解决了英国炼铁业所面临的燃料短缺问题。

1.2.2 煤炭开采催生蒸汽机发明

蒸汽机是人类历史上最伟大的技术发明之一，它的发明和应用都与煤矿密切相关。古人从烧烤食物中发现烧烤食物时常有树叶或草灰被热气吹起飘舞，在火堆上方还能感受到一股热气推力，这是火的“热空气动力”效应，于是他们以此游戏取乐。当使用灯笼时，其上端就始终有热气流涌上，可使纸片或羽毛飘动。得此启发，五代的闽国人莘七娘在公元前121年发明了松脂灯，这是世界上最早的热气球。后来，莘七娘又发明了走马灯，燃灯以后，热气上熏，纸轮辐转，灯屏上即出现人马追逐、物换景移的影像，如图1-1a所示。这是燃气涡轮的始祖，也是人类利用热空气动力的第一台机器。

公元1世纪，古希腊的发明家希罗（Hero）发明了蒸汽动力转球，它是支承在两根垂直导管上的空心球体，当加热下面容器内的水时，蒸汽便沿着两根导管分别进入球内，从球上两根相反方向的弯管喷出，由于喷气的反作用使球转动，这是第一个把蒸汽压力转化为机械动力的装置，如图1-1b所示。

燃料革命之后，英国采煤业发展很快，开采深度逐步增大使矿井排水成为一个大问题。当时的矿井排水使用人力和畜力，有的英国煤矿用500匹马轮流拖动水泵。为了解决矿井排水的动力需求问题，1688年，法国物理学家巴本受炼铁厂活塞式风箱的启发，制造出第一台利用蒸汽的活塞动力机械。1698年，英国机械工程师赛维利设计出由圆筒和锅炉

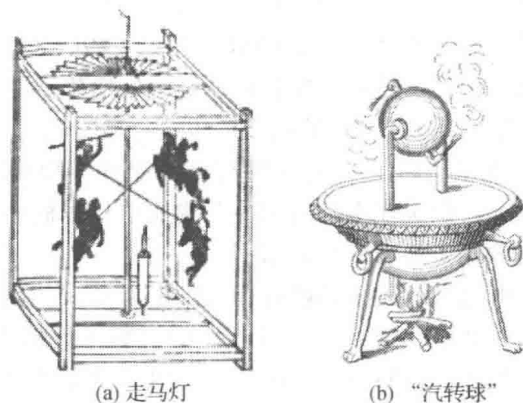


图 1-1 利用热力学原理的古代走马灯和古希腊人发明的蒸汽动力“汽转球”

构成的蒸汽排水泵。1705 年，英国铁匠纽科门和考利、赛维利共同试制出第一台蒸汽机，用于矿井的排水作业，如图 1-2a 所示；1712 年，他们把蒸汽汽缸和抽水缸分开，蒸汽通入汽缸后在内部喷水使它冷凝，造成汽缸内部真空，汽缸外的大气压力推动活塞做功，再通过杠杆、链条等机构带动水泵活塞，称为纽科门蒸汽机。到 1720 年，英国全部煤矿和金属矿都使用了蒸汽机驱动排水泵。

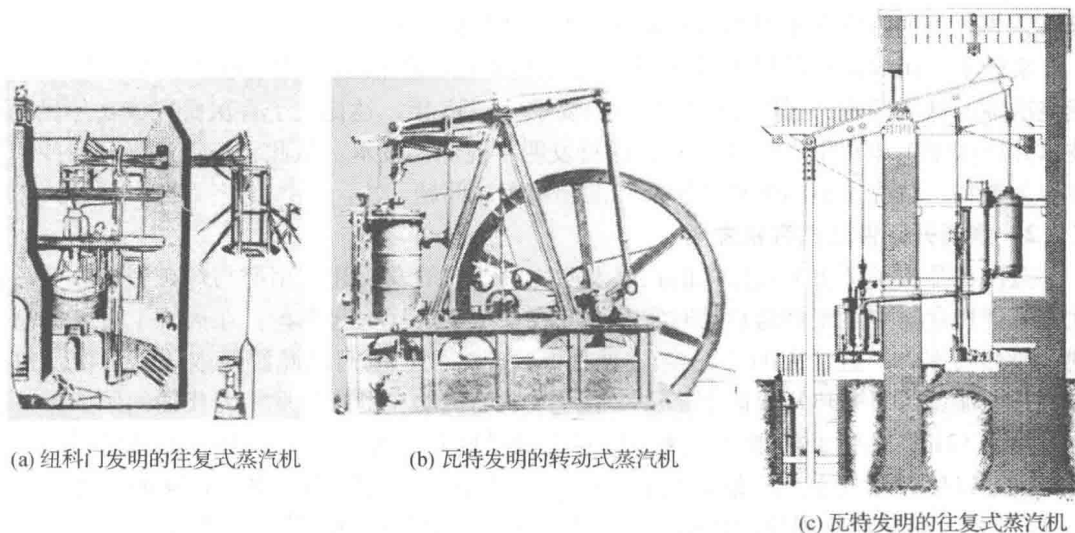


图 1-2 各种蒸汽机原型图

詹姆斯·瓦特于 1757 年在格拉斯哥大学担任机器制造师职务，他发现纽科门蒸汽机的汽缸反复加热、冷凝而浪费很多蒸汽，为此设计了一个与汽缸分离的低温冷凝器来冷凝蒸汽，在汽缸外面加了绝热层以保持汽缸的高温状态；1765 年，他制造出第一台有分离凝汽器的小型蒸汽机，如图 1-2b 所示；此外，他把纽科门蒸汽机抽水机的连杆改为曲柄机构，带动一个皮带轮转动，这样就把蒸汽动力驱动的往复直线运动转换成为转动，如图 1-2c 所示。1776 年，瓦特在英国伯明翰制造这种新机器；1784 年，他为蒸汽机增加了一

种自动调节蒸汽机速度的装置,使它能适用于各种机械的驱动。历时近30年,瓦特终于完成了蒸汽机的改进、完善和实用化创新,从此为纺织业、采矿业、冶金业、造纸业、陶瓷业、运输业提供了蒸汽机驱动力,引发了一场工业革命。

当时无人能料到,源于解决煤矿抽水问题的蒸汽机发明,使自然赋予的煤炭能源与代替人力的蒸汽动力机械得以完美结合,对人类文明发展产生了巨大影响。恩格斯在《自然辩证法》中对蒸汽机有专门的评价:“在发现摩擦取火以后,一定经过了好几千年,亚历山大的希罗才发明了一种用本身发出的水蒸气使之转动的机械。”又过了差不多两千年,才造成了第一部蒸汽机,第一个把热能转化为真正有用的机械运动的装置。蒸汽机是第一个真正国际性的发明。

对煤矿开采而言,它不仅在于解决了煤矿的排水问题,更重要的是为近代采煤技术变革提供了重要基础。从此,矿井采用蒸汽机带动提升机、排水机和通风机,替代了古老的辘轳提升、水斗提水和自然通风,从而实现了煤矿运载(固体、流体、气体)系统的机械化,这是近代采煤与古代采煤的根本区别,使煤矿开采深度和范围大幅度拓展。

1.2.3 燃煤动力变革运载技术

在蒸汽机出现之前的手工业时代,水力和风力是省力器的主要动力源。工业革命中从手工工具到机器工具的第一个转折是怀亚特纺锭纺纱机(1738年)。把水力和机器结合起来,开始从手工工场到机器工厂的第二个转折是阿克莱特水力纺纱机(1769年)。但是,从工具到机器,从手工工场到机器工厂,从天然动力到机器动力,从手工操作到机械化的过渡中最重要的转折、质变和飞跃是蒸汽机。

蒸汽机在煤矿成功应用之后,启发了许多工程师,他们开始尝试为机车、轮船、汽车装上蒸汽机,以燃煤动力驱动取代人力、畜力驱动,产生了人类交通运输的技术革命。

1801年,英国煤矿工程师特里维克研制成功第一辆能在轨道上行驶的蒸汽机车,这是一辆单缸蒸汽机车。1812年,英国人莫莱将机车传动轮改成一个大齿轮,铁轨也改成齿轨,但未能成功。后来,英国人海德利改进蒸汽机车使时速达到8 km,并可拖挂8节货车厢。英国人斯蒂芬逊是被公认的蒸汽机车发明人。他出生在纽卡斯尔乡村一个煤矿工人家庭,14岁随父亲到煤矿井下干活,17岁操作蒸汽式矿井抽水机,后又担当蒸汽升降机司机。这期间,他研制出防止瓦斯爆炸的安全矿灯,被称为“乔治灯”。当时的英国煤矿都用马拉货车在木质轨道上运送煤炭,运输能力极为有限。为此,斯蒂芬逊决定改进研制新的蒸汽机车,1814年7月制造出一辆两气缸、8英尺锅炉、凸缘车轮的蒸汽机车,能以4英里时速牵引8辆货车、拖重30 t。他还创造性地将原来的生铁铁轨改为铸造钢轨,并在钢轨下铺设枕木,解决了铁轨因震动而易发断裂的问题,使火车提速和加大运量成为可能。1829年1月8日,斯蒂芬逊驾驶他制造的“火箭号”蒸汽机车在利物浦到曼彻斯特铁路线上竞赛,满载12 t货物,以时速10英里行驶完全程,从此奠定了铁路交通技术的革命性基础。

蒸汽机为船舶动力变革带来了新曙光。用蒸汽动力推动船舶航行的设想最早由法国发明家帕平于1690年首先提出,但他的想法未得到重视。1783年,法国人泰巴设计制造一艘蒸汽机带动的长45 m、宽4.5 m的木壳明轮船“比罗斯卡夫号”,由两个直径5 m的明轮推进,在里昂附近的萨万河上首航。1787年,美国人菲奇造出不用明轮的蒸汽机船“巴希维拉斯号”,他在船的两舷各装6根长桨,用连杆把长桨与蒸汽机活塞相连,活塞的

往复运动带动长桨划水,船速可达8节。1788年,英国人希明顿造出一艘长7.6 m的双体蒸汽机明轮船,时速可达9.3 km,他首创了曲轴传动方式,改变以往的蒸汽机动力链条传动,成为当今船舶动力的普遍传动方式。1790年,美国人费希设计制造的蒸汽船在威德拉河上开创了客货运输服务航线,然而该船动力系统笨重且庞大,载人运货均无经济效益,未能得到推广应用。1807年8月17日,美国人富尔顿设计制造一艘长45 m、宽9 m、排水量100 t的平底明轮船“克莱蒙特城号”,在纽约哈得逊河上逆水连续行驶32 h,时速达到9 km。1841年,根据富尔顿的设计建造了长50 m、排水量2475 t、侧舷装有20门火炮的军舰,成为世界第一艘蒸汽机动力军舰。

蒸汽机诞生不久很快就被用于汽车驱动。当瓦特发明的蒸汽机传到法国之后,1769年,法国人N. J. 古诺制造出世界上第一辆蒸汽驱动的三轮汽车。1804年,托威迪克设计并制造出一辆蒸汽汽车,载着10 t重的货物行驶了15.7 km。1831年,美国人哥德史沃奇·勒将一辆蒸汽汽车投入运营,在15 km线路上往返运输,单行程耗时约45 min。但蒸汽汽车又笨又重,乘坐时又热又脏。1800年,艾提力·雷诺制造了一种与燃料置于外部燃烧的蒸汽机(即外燃机)所不同的发动机,燃料在发动机内部燃烧,被称为内燃机。1876年,康特·尼古扎·奥托发明了具有进气、压缩、作功、排气四个冲程的发动机,人们把这种循环称为奥托循环。1879年,德国工程师卡尔·本茨首次试验成功一台二冲程发动机。1883年10月,本茨创立了奔驰公司和莱茵煤气发动机厂,1885年在曼海姆制成了第一辆奔驰专利的两冲程单缸0.6 kW的汽油车,此车具备了现代汽车的基本特征。

在蒸汽机的推动下,纺织业、机械制造业、采矿冶金业、交通运输业都快速发展起来。从此,地球表层在远古的地质年代成藏的煤矿和铁矿被大规模开采出来,在现代发挥出巨大的作用,成为人类物质生活的新基础。用蒸汽动力机器开采煤炭、矿石,燃烧煤炭推动蒸汽机、冶炼钢铁和其他有色金属,再用蒸汽动力机器把金属制成各种机器,然后把机器应用到各个工业行业,由此推动人类文明快速进步。

1.3 煤炭开采系统

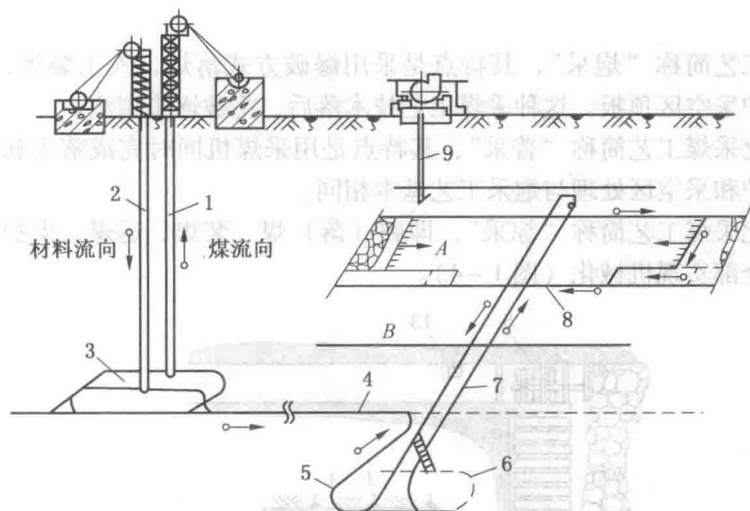
煤炭开采系统包括巷道掘进、煤炭回采、物流运输、动力供给、通风排水、安全监控6个子系统。由于煤矿地质条件与开采技术条件的不同,煤炭开采系统的巷道分布及5个子系统的空间布局会有差别,从而形成了多种采煤工艺。

1.3.1 运输巷道构建

巷道是在煤矿地下岩石中挖掘构建的稳固隧道空间,如同城市地铁隧道及地面路网系统,承担着物流运输、人员运载、井下供电、通风排水、通信传输等任务。一个采区的巷道系统包括开拓巷道、准备巷道和回采巷道,它们是煤矿运输的三级路网,类似于国道、省道、市道,如图1-3所示。

开拓巷道:在矿区井田中掘进形成的干线巷道,为整个矿井、一个开采水平或若干采区服务,如主副井、主运输石门、阶段运输大巷、阶段回风大巷、风井等,服务年限基本与矿井寿命同步。它们是从地面通往地下开采水平的干线路(“国道”)。

准备巷道:在采区、盘区或带区掘进形成的支线巷道,分布在采区、盘区或带区内,起点位于开拓巷道,终点位于区段或斜巷通道,如采区上下山、采区或带区车场、变电



1—主井井筒；2—副井井筒；3—井底车场；4—运输大巷；5—石门；6—采区车场；
7—上山运输巷道；8—采区运输巷道；9—风井井筒

图 1-3 煤矿井下三级路网巷道分布示意图

所、煤仓等，在一定时期内为采区、盘区或带区服务。它们是从开采水平通往采区、盘区或带区的支线路（“省道”）。

回采巷道：在采煤工作面掘进形成的巷道，如区段运输平巷（顺槽）、区段回风平巷（顺槽）和开切眼，服务期为煤炭回采时间。它们是采区、盘区或带区通往采煤工作面的区间路（“市道”）。

1.3.2 煤炭回采工艺

我国煤炭资源分布广，赋存条件差异大，开采地质条件复杂多样，由此形成多样化的采煤方法。根据煤炭资源埋藏深度，可采用矿井开采（埋藏较深）和露天开采（埋藏较浅）两种方式。2013 年，中国煤炭产量达到 37 亿 t，约占全世界煤炭产量的一半，其中露天开采煤炭约占 10%，其余 90% 煤炭（约 33 亿 t）都是采用矿井开采方式生产的。

露天开采适用于煤层上覆岩层较薄的煤田。剥离煤层上面的表土和岩石（覆盖层），开采显露的煤层，习惯上称为剥离法开采。

矿井开采适应于煤层埋藏较深的煤田。可用 3 种方法构建通向地下煤层的井筒，即立井、斜井、平硐。立井是从地面向煤层挖掘的垂直井筒，可以提供到达某一煤层或某几个煤层的通道。从一个煤层下掘到另一个煤层的立井称作盲井。斜井从地面向煤层挖掘的倾斜井筒，适用于缓倾斜和倾斜矿床，特别适用于倾角为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的层状矿床，对于急倾斜侧翼倾覆的矿床可用侧翼斜井开拓。平硐是一种水平或接近水平的巷道，开掘于水平或倾斜煤层在地表露出处。

采煤工作面是指在矿井内进行采煤作业的场地，一般简称采面。煤层厚度有厚和薄，采煤工作面开采出的厚度称为采高，采煤工作面的煤壁长度称为采煤工作面长度。采煤工作面回采煤炭的作业工序包括破（落）煤、装煤、运煤、支护顶板、采空区处理。各道工序要求不同，在进行的顺序、时间和空间上必须有规律地进行排列和配合。

我国矿井采煤工艺方式主要有爆破采煤工艺、普通机械化采煤工艺、综合机械化采煤