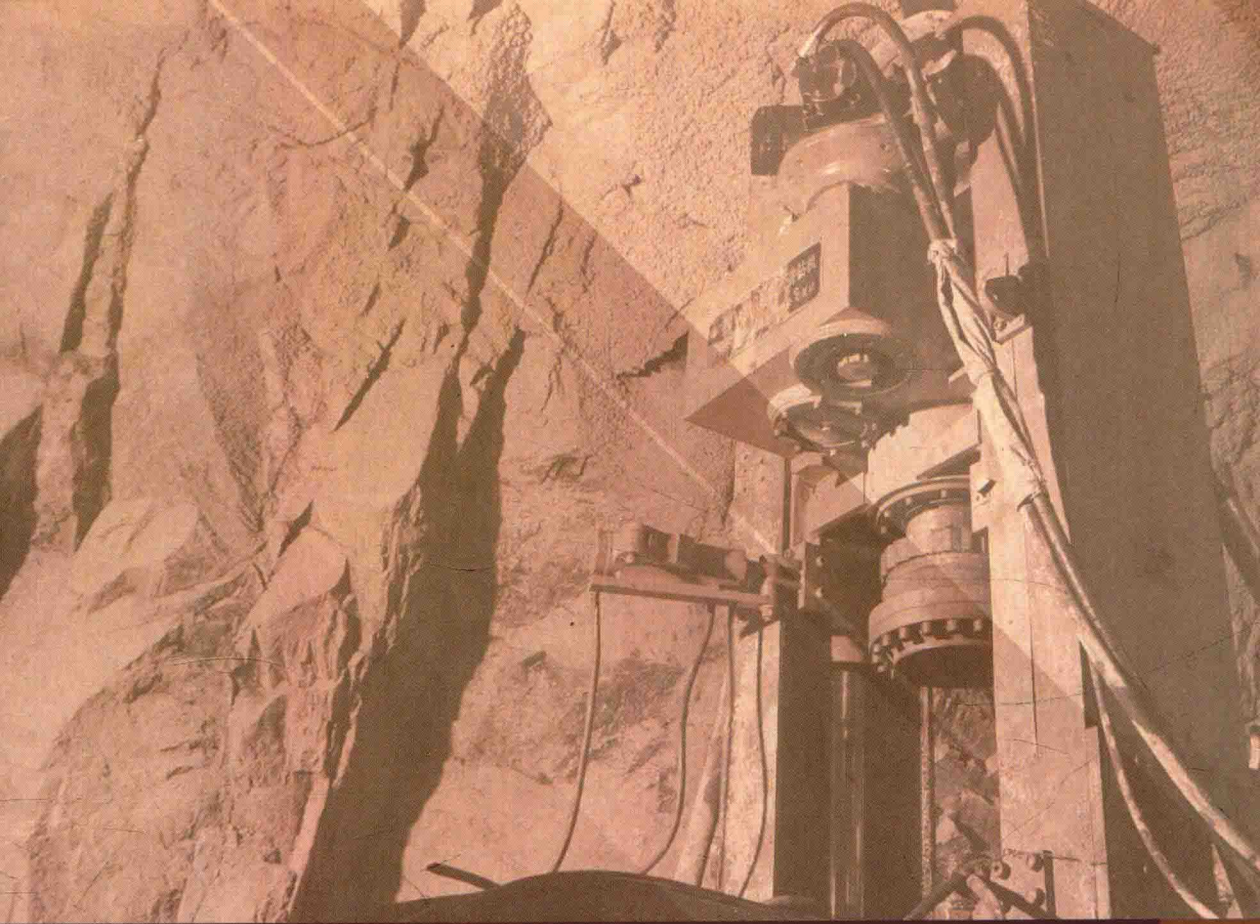




反井钻机

.....刘志强 著

Raise Boring Machine



科学出版社

反井钻机

Raise Boring Machine

刘志强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部详细论述反井钻机技术的专著,也是作者30多年来从事反井钻机技术研究,对反井钻井工程实践经验的总结和升华。作者力求全面展示反井钻机的发展和现状,从反井钻井工艺和基本参数入手,以滚刀破岩为基础,对构成反井钻机的地面设备和孔内设备进行分析论述。

本书可供从事反井钻机设计研究及矿山、水电、交通等地下工程建设领域与反井钻井工程相关的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

反井钻机=Raise Boring Machine / 刘志强著. —北京: 科学出版社, 2017.2

ISBN 978-7-03-051694-7

I. ①反… II. ①刘… III. ①反井钻机 IV. ①P634.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第016034号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 498 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序 言

反井作为矿山的特殊工程，长期以来需要人工由下向上施工，是单项工程死伤人员最多的项目，也是劳动强度高、职业伤害严重的作业，这种现状制约了建井技术发展和进步，30多年来作者致力于解决这一困扰矿建界的难题，从深入煤矿危险的反井施工现场，调研第一手资料，到参与小直径反井钻机研制，再到进行机械破岩理论研究，提出适合煤矿复杂地层条件的反井钻井工艺研究，组织研究反井钻井装备。在工业性试验阶段，在煤矿井下跟班操作，在接卸钻头、处理掉钻事故等危险或关键环节冲在前面，通过团队的艰苦努力，取得小直径反井钻井技术成功，矿山井下危险的煤仓、暗井等施工由机械取代人工操作，根本解决反井施工的安全问题，再也未出现伤亡事故，施工效率明显提高，在政策上淘汰其他落后反井工法。

多年来，作者所带领的反井钻机团队，承担了多项与反井钻机及反井钻井技术相关课题研究，包括国家“863”课题、科技部科研院所专项资金、财政部资助项目，以及煤炭、电力、北京市科委项目20多项，研制钻孔直径从0.75~5.3m，钻井深度最大到600m的系列反井钻机，适合不同岩石条件的反井钻机和破岩滚刀，经过长期艰辛的工作，将反井钻井技术提高到新的高度，获得四项部级成果一等奖，创造了多项国内第一，包括第一次在地面钻成井筒导井、第一次钻成倾角50°的斜井、第一次钻成煤矿瓦斯管道井、第一次钻成大直径煤矿通风井井筒等，作者所带团队将反井钻机技术从煤炭行业发展到水力发电、抽水蓄能电站、公路铁路隧道等地下工程建设领域，解决了这些工程中各种竖井施工的难题，取代了其他落后的施工方法，明显提高了工程建设速度。其团队还将反井钻机应用到国外工程中，在我国承揽的国际工程中发挥巨大作用，先后在土耳其、马来西亚、哈萨克斯坦、巴基斯坦、厄瓜多尔、赞比亚、老挝等煤矿及水电工程成功应用，为我国地下工程施工企业走出去作出了贡献。

作者利用其较扎实的工程地质、岩石破碎、机械设计、钻井工艺等方面的理论知识，在交叉学科领域取得突破。本书结合作者30多年的反井钻机设计、反井钻井工艺研究、反井钻井工程实践的经验完成编著，全书内容丰富、图文并茂、论述流畅、可读性强，本书对矿井、电站、隧道等地下工程建设技术人员，以及反井钻机设计研究人员，地下工程施工企业技术人员，以及大专院校地下工程专业的教学研究，都具有很强的借鉴和指导价值。



2016年10月20日

前言

反井是指地下采矿连接不同水平巷道的暗竖井，是重要的井巷工程，一般采用由下向上的反向凿井方法，称为反井法。反井是地下采矿井巷工程中施工难度最大、风险最大的施工项目，工人在危险的空间进行反向钻爆作业，伤亡事故经常发生。反井钻机作为机械破岩钻进的专用设备，根本解决了反井施工安全问题。虽然，反井钻机是一种机械装备，但是，其涉及地面设备部分和孔内钻具两部分，是一种特殊的机械装备，需要在工程地质、钻井工艺、机械设计和制造、材料、岩石破碎机理多学科的基础上，以反井钻井工艺及相适应的技术参数为依据，根据其适应的地下工程条件，完成反井钻机的设计、加工制造、检验和实际应用，本书力求对反井钻机技术进行全面的论述。

为了改变我国反井施工技术落后状况，解决反井施工的安全问题，从国家“七五”科技攻关课题“LM-120型反井钻机及工艺”开始，在煤炭行业“LM-200型反井钻机研制”、“LM-90型反井钻机研制”、科技部科研院所技术开发研究专项资金项目“深井反井钻井技术与装备(2000zx01)”“反井钻进竖井导孔轨迹测控装备与技术”“大直径反井钻机关键技术及装备研究(NCSTE-2007-JKZX179)”“新型大直径扩孔钻头结构及配套钻具开发研究(2008EG122177)”“大直径煤矿风井反井钻井工艺技术研究(2009EG122175)”以及北京市重大科技成果转化落地培育“大直径反井钻机研制(Z121100003012009)”，研制出了多种类型反井钻机，适合不同岩石的破岩滚刀，形成了复杂地质条件下反井钻井工艺等技术。在此基础上，实现了在不同岩石条件下，一次钻成直径达到0.75~5.3m的技术及装备能力，工人不下井作业，具有施工安全性高和工人劳动强度低、工作环境好等突出优点，成为地下工程暗井、斜井、隧道建设的高效、快速、安全、经济的施工方法，使我国反井钻机及反井钻井工艺方面达到国际先进水平，促进了我国地下工程施工技术的发展。

本书从地下采矿的“反井”这一类井巷工程的特殊性，将反井进行了分类，根据地下工程建设的发展，提出对应于其他地下工程反井的概念，对反向凿井从蹬渣到木垛、吊罐、爬罐、深孔爆破等反井施工方法，到反井钻井法及反井钻机发展过程进行论述。说明了构成反井钻井的系统装备构成，论述了反井钻机导孔钻头、扩孔钻头、破岩滚刀、普通钻杆和稳定钻杆等钻具系统，探讨了反井钻机扭矩、推力、拉力、转速等主要参数的计算方法，对反井钻机主机钻架结构形式、旋转方式、推进方式进行的反井钻机进行分类。对影响反井钻井的工程地质进行分析，介绍了人工冻结和地面预注浆两种适合反井钻井的地层改性方法，介绍了反井钻机在煤矿和其他矿山、普通水利发电站、抽水蓄能电站、隧道等工程以及国外的工程项目的典型应用案例。

本书可供从事地下采矿井巷工程、水力发电、抽水蓄能电站、公路铁路隧道、地下管廊、地下核废料封存、地下油气储存以及人防及军事等领域设计与施工的工程技术人员，从事地下工程施工机械设计研究人员，以及大专院校相关师生作为参考，也为相关

地下工程机械破岩研究的相关科研人员的交流、探讨提供借鉴。

本书是作者从事反井钻机技术研究多项课题研究、现场试验和工程管理 30 多年的理论研究和施工实践的总结，以煤炭科学研究总院建井研究分院反井钻机技术、工艺装备团队多年来在本领域研究成就为基础，在此，感谢李维远、陈秀英、刘佳等老一代研究人员为反井钻机技术所作出的贡献，感谢煤炭科学研究总院建井研究院及钻井研究所全体同志为此付出的辛苦和努力，感谢谭昊、王强、徐广龙、曾志远等许多同志在编著过程给予的帮助。

本书在编著过程中力求使内容尽可能全面和系统，也保持各章的独立性，使读者能够对反井钻机这一特殊机械有全面的了解，同时也兼顾与反井钻井工艺相对应的内容，但是由于作者个人能力和知识水平的局限，书中难免存在错误、不足和疏漏之处，恳请各位读者及同行给予批评指正。

刘志强

2016 年 10 月 18 日

目 录

序言

前言

第 1 章 反井和反向凿井	1
1.1 地下采矿中的反井	1
1.2 反井及其分类	2
1.3 地下工程建设中的反井	5
1.3.1 水力发电工程	5
1.3.2 抽水蓄能电站工程	6
1.3.3 公路铁路隧道工程	6
1.4 反向凿井法	8
1.4.1 反井法的发展	9
1.4.2 木垛反井法	9
1.4.3 吊罐反井法	11
1.4.4 爬罐反井法	13
1.4.5 深孔爆破反井法	16
1.4.6 反井钻机钻井法	16
1.5 不同反井法比较	17
第 2 章 反井钻机技术及发展	19
2.1 机械破岩井巷(隧)掘进	20
2.1.1 旋转钻机钻凿井筒	21
2.1.2 隧道掘进机掘进	21
2.2 无钻杆反井钻进系统	23
2.3 有钻杆反井钻机	26
2.3.1 转盘式有钻杆反井钻机	26
2.3.2 动力头式反井钻机	26
2.4 现代反井钻机	28
2.5 其他反井钻进方式	29
2.5.1 环状取心式反井机	29
2.5.2 高压水射流破岩反井钻机	30
第 3 章 反井钻机分类	32
3.1 反井钻机的分类方式	32
3.2 下导上扩式反井钻机	33
3.3 上导下扩式反井钻机	35
3.4 上导上扩式反井钻机	38

3.5	直接上钻式反井钻机	39
第 4 章	反井钻机系统构成	42
4.1	主机系统	43
4.2	钻具系统	45
4.3	辅助系统	47
第 5 章	镶齿破岩滚刀	49
5.1	滚刀的发展及分类	50
5.2	滚刀与钻头	52
5.3	镶齿滚刀结构	55
5.4	镶齿滚刀设计加工	59
5.5	影响破岩及滚刀寿命的因素	62
5.5.1	岩石条件	63
5.5.2	刀齿的齿形	64
5.5.3	刀齿材料	67
第 6 章	反井钻机导孔钻头	69
6.1	小直径钻头	70
6.2	镶齿三牙轮钻头	70
6.3	牙轮钻头的编码	76
第 7 章	反井钻机扩孔钻头	78
7.1	扩孔钻头基本要求及分类	79
7.2	扩孔钻头的构成	81
7.3	扩孔钻头体	86
7.3.1	整体式扩孔钻头结构	87
7.3.2	中心分体组装式扩孔钻头结构	88
7.3.3	梯阶形圆盘连接组装扩孔钻头结构	91
7.3.4	多翼式组装扩孔钻头结构	95
7.3.5	球形钻头结构	98
7.4	冷却及降尘系统	99
7.5	滚刀布置	101
7.6	扩孔钻头直径计算	104
7.7	扩孔钻头滚刀布置	106
7.8	滚刀布置的校核	111
第 8 章	反井钻机钻杆	115
8.1	钻杆的用途	115
8.1.1	小直径正循环钻机钻杆	115
8.1.2	大直径反循环钻机钻杆	118
8.2	反井钻机钻杆及布置	120
8.3	反井钻机钻杆的分类及外形结构	121

8.4	常用钻杆参考尺寸	125
8.5	钻杆螺纹形式	128
8.5.1	三角形牙型螺纹	128
8.5.2	偏梯形牙型螺纹	129
8.5.3	螺纹的破坏	131
8.6	钻杆材料及加工	132
8.6.1	钻杆材料	132
8.6.2	钻杆加工	133
第 9 章	反井钻机技术参数	135
9.1	反井钻机工程用途	136
9.2	工程结构参数	137
9.3	破岩相关的基本参数	139
9.3.1	转速	139
9.3.2	扭矩	141
9.3.3	钻压	142
9.4	反井钻机参数设计	143
9.5	国内外反井钻机主要技术参数	145
第 10 章	反井钻机钻架结构	151
10.1	不同类型钻机钻架结构	151
10.2	外支撑箱形整体框架	155
10.2.1	全封闭框架	156
10.2.2	侧封闭上敞开框架	159
10.2.3	单侧封闭框架	161
10.3	外支撑四柱整体框架	162
10.4	内支撑框架	165
10.4.1	矩形导向柱内支撑框架	165
10.4.2	圆形导向柱内支撑框架	169
10.5	侧支撑框架	170
10.5.1	后置矩形导向侧支撑框架	170
10.5.2	后置圆柱导向侧支撑框架	172
10.5.3	后置圆柱导向加方柱侧支撑框架	174
10.5.4	前置圆柱导向支撑框架	174
10.6	非对称导向圆柱支撑框架	176
10.7	支撑推进一体钻架结构	176
10.8	反井钻机结构特点	177
第 11 章	反井钻机旋转推进系统	179
11.1	钻机旋转和推进方式	179
11.2	反井钻机旋转驱动	180
11.3	变速单液压马达驱动	181

11.3.1	单液压马达一级减速	182
11.3.2	单液压马达二级减速	184
11.3.3	单液压马达驱动液压系统	184
11.4	同轴双液压马达驱动	185
11.4.1	动力头	185
11.4.2	液压系统	188
11.4.3	泵站	189
11.5	异轴双液压马达驱动	189
11.5.1	动力头	190
11.5.2	电液控制系统	190
11.5.3	液压动力系统	192
11.5.4	电控系统	194
11.6	多液压马达驱动	197
11.6.1	动力头	198
11.6.2	动力与控制系统	199
11.6.3	液压系统	202
11.6.4	电控制系统	203
11.7	电机驱动	205
11.8	反井钻机推进系统	207
11.8.1	推进系统功能	207
11.8.2	推进方式	208
11.8.3	单活塞杆液压油缸	208
11.8.4	伸缩液压油缸	211
11.8.5	串联油缸	213
第 12 章	反井钻井工程地质	217
12.1	地层对反井钻井的影响	217
12.1.1	地层对导孔钻进的影响	217
12.1.2	地层对扩孔钻进的影响	218
12.2	宏观工程地质对反井钻井的影响	219
12.2.1	地壳物质构成	220
12.2.2	地质年代	220
12.2.3	组成岩石的矿物	223
12.2.4	组成地层的岩石	226
12.2.5	地质构造	228
12.2.6	水文地质	229
12.2.7	瓦斯地质	230
12.3	工程地质资料	230
12.4	工程地质影响综合分析	231

第 13 章 地层改性	233
13.1 地层冻结改性	233
13.2 地层注浆改性	237
第 14 章 反井钻机技术应用	247
14.1 反井钻井技术进展	247
14.2 反井钻井工程设备及工艺选择	248
14.2.1 设备工艺选择的依据	248
14.2.2 反井钻井风险评价	249
14.2.3 反井钻机选择	250
14.3 反井钻机施工	253
14.3.1 反井钻机施工准备	253
14.3.2 钻机安装调试	254
14.3.3 导孔钻进	254
14.3.4 扩孔钻进	255
14.4 矿山反井钻井工程	255
14.4.1 煤矿井筒导井工程	255
14.4.2 核矿通风井工程	258
14.4.3 大直径煤矿风井工程	259
14.5 水力发电反井钻井工程	264
14.5.1 大朝山电站尾水通风井工程	264
14.5.2 溪洛渡电站通风井	266
14.5.3 十三陵电站压力管道斜井反井工程	268
14.5.4 琅琊山抽水蓄能电站反井工程	270
14.6 隧道通风井反井钻井工程	272
14.7 国外反井钻井工程	275
14.7.1 土耳其硬煤公司反井工程	275
14.7.2 马来西亚巴贡电站	277
14.8 反井钻井特点	281
参考文献	282

第1章 反井和反向凿井

在地下矿物资源开发、水力发电、公路铁路隧道等传统地下工程领域，竖井作为重要的工程结构，在这些工程中起到咽喉的作用。竖井的建设速度影响地下工程的建设速度，井筒施工是一种非常艰苦的劳动，传统的普通凿井采用钻眼爆破的凿井方式，需要大量的人员下井作业，劳动强度大，工作效率低，受到塌方、淋水、有害气体的伤害，因此，需要研究以机械破岩代替爆破破岩、工作人员不下井或少下井、以装备为主在地面钻成井筒的新工艺。在一些具备下部生产系统条件下，或者能够创造地下隧道条件的井筒工程，可以采用反井法施工，通过反井钻机以机械破岩钻进的方法快速安全地施工井筒。为了充分利用有限的空间资源，人类向地下空间发展，21世纪又称为地下工程世纪，人类需要建设大量的地下工程结构，包括地铁隧道、城市管廊、地下废物储存、地下石油天然气储存、人防工程、军事工程等，这些工程都离不开用于提升、通风、液体物料输送的井筒工程，因此，也就需要高效反井施工方法^[1]。

1.1 地下采矿中的反井

进入矿体建设各种类型的井筒，只能采用由上向下掘进方法，也称为正向掘进或正向凿井法。矿井在建设和生产过程中，还需开凿不具地面出口的暗井或类似工程，这些处于矿井的两个生产水平中间，没有直达地面出口，施工受到井下巷道空间限制，难以像地面凿井那样布置大量的稳绞设备，由上向下进行普通法凿井施工，一些工程采用由下向上掘进方法，称为反向凿井法(反井法)，能够用反向凿井法施工的工程也统称为反井工程，简称“反井”，金属或非金属矿山也称为“天井”。一般在没有地面出口的暗井工程中尽量采用反井法，这类工程难以采用地面普通凿井方法的施工条件，包括大面积施工场地、大量的施工装备和掘进产出的废石排放。反向凿井方法需要具备的基本条件是下部巷(隧)道条件，随着施工技术进步，在地下工程建设中，只要井筒或类似工程下部具有巷(隧)道并形成生产系统，就可以采用反井法施工，反井及反井法的概念得到拓展，成为井巷工程的建设基本方法，并形成了独立的技术体系^[2]。

最初的反向凿井方法，采用人工钻爆由下向上掘进，工人在狭小的反井掘进工作面作业，环境恶劣，施工安全状况差，效率低，经常发生伤亡事故。反井钻机的出现改变了这些工程施工落后状况，采用钻机进行反向凿井，人员不再进入工作面施工，保证了反井作业人员的安全，且反井钻机应用范围逐渐拓展，形成了反井钻井工艺技术，逐渐成为井筒工程施工的重要方法，反向凿井和正向凿井形成完整的凿井工艺。

下面以图 1-1 说明反井法应用，地下矿山工程建设从地面开始由上向下掘进井筒，井筒施工到达第一开采水平后，掘进井底车场和通向矿体的联络巷道等工程，这些工程

完成后, 进行开采作业, 在第一水平矿体开采接近完成前, 需要进行下一个水平开采的准备工作, 即由上向下进行井筒延深。为了不影响第一水平正常生产, 需要建设临时措施工程, 先施工一条斜井到辅助施工水平, 并掘进必要的措施巷道, 以满足主井延深施工, 因为主井延深段下部还没有巷道, 只能采用由上向下的施工方法, 需要施工凿井设备布置空间硐室, 在延深井筒上部和工作井筒之间留有保护岩柱, 保护岩柱下进行延深掘进工作。当然, 条件许可, 不影响正常生产, 也可以利用地面凿井设施直接延深主井, 当主井掘进到新水平后, 完成新水平必要的巷道, 达到副井井底, 形成生产系统后, 就可以采用反井法施工副井井筒, 即由下向上掘进反井(溜渣孔), 当反井和上部辅助巷道贯通后, 可以由上向下爆破刷大, 并进行必要的井壁支护, 形成井筒工程。最后, 将两个井筒的保护岩柱拆除, 完成井筒装备的安装, 使井筒可以在两个水平之间进行提升工作。

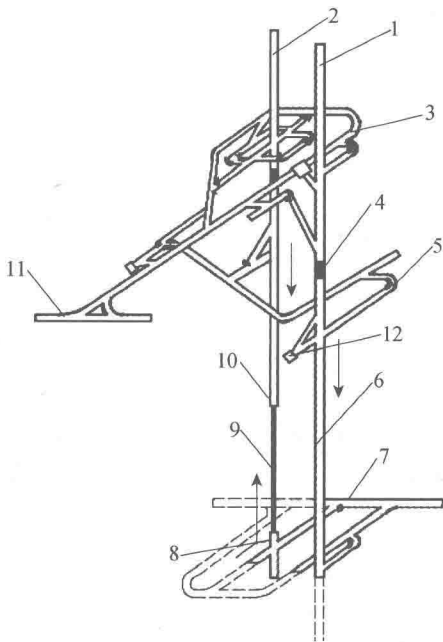


图 1-1 矿山井筒延深的反向凿井施工布置示意图

1-主井井筒; 2-副井井筒; 3-井底车场; 4-井筒延深保护岩柱; 5-主井延深措施巷道; 6-自上而下延深主井井筒;
7-新水平车场; 8-副井马头门; 9-反向凿井; 10-利用反井副井由上向下扩大掘进延深; 11-通向采区巷道; 12-临时绞车房

1.2 反井及其分类

根据工程用途、施工方法不同, 反井的断面形状有矩形、正方形、不规则形状和圆形。一部分工程反向凿井后直接形成永久工程, 就要一次完成设计断面形状、尺寸及支护全部作业。另一部分工程反向凿井只是先施工一小断面导井, 还需要由上向下扩大到设计断面, 才能满足工程需要。大部分反井断面设计为圆形, 表 1-1 为不同地下工程反

井结构、尺寸等描述。

表 1-1 部分反井工程基本条件参数

领域	工程名称	长度/m	倾角(°)	断面形状	尺寸/m	施工方法	导井尺寸/m
矿山工程	矿仓	30~60	60~90	圆形	D3~10	导井法	D1.0~1.5 1.8×1.8
	暗井	60~200	90	圆形	D5~6	导井法	D1.0~2.0
	延深井筒	100~200	90	圆形	D5~8	导井法	D1.0~2.0
	新建井筒	100~800	90	圆形	D5~10	导井法	D1.0~2.0
	溜眼	20~60	60~90	圆形	D1~2	全断面	D1.0~2.0
	管道井	100~1000	60~90	圆形	D1~2.0	全断面	D1.0~2.0
	下料井	100~500	60~90	圆形	D0.5~1.0	全断面	D0.5~1.0
	电缆井	100~500	60~90	圆形	D0.3~1.5	全断面	D0.3~1.5
	取水孔	100~500	90	圆形	D0.3~0.5	全断面	D0.3~0.5
水电站、抽水蓄能电站	抢险钻孔	100~500	60~90	圆形	D0.2~1.0	全断面	D0.2~1.0
	通风井	50~200	60~90	圆形	D3~8	导井法	D1.0~2.0
	压力管道	50~600	45~90	圆形	D3~10	导井法	D1.0~2.0
	调压井	50~200	90	圆形~矩形	D3~20	导井法	D1.0~2.0
	电梯井	50~200	90	圆形	D5~8	导井法	D1.0~2.0
交通(公路、铁路)工程	船闸竖井	50~100	90	矩形	10×20	导井法	D1.0~2.0
	隧道通风竖井	100~800	60~90	圆形	D5~10	导井法	D1.0~2.0
地下储油(液化气)罐	输送井	50~120	90	圆形	D0.5~1.2	全断面	D0.5~1.2
其他工程	通道井	50~1000	90	圆形	D3.5~10	导井法	D1.0~2.0

对反井可以进行如下分类。

(1)按照地下工程类型分，反井工程应用的领域划分包括地下采矿、隧道、建筑和水利发电等，分类如图 1-2 所示。

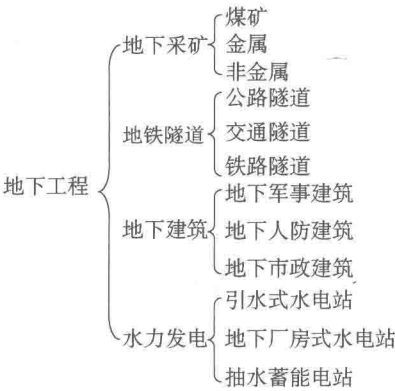


图 1-2 按照地下工程类型划分

(2)按照工程用途，可分为永久工程和措施工程，永久工程是指反井施工完成后，能够担当一定的功能，能够保证一定的服务年限内有效工作；措施工程是指施工的反井，再用于扩大开挖时溜渣、通风、排水等功能，随着扩大开挖反井逐渐消失。永久工程用途非常广，包括通风、溜井、管道井和过水发电压力管道井等(图 1-3)。

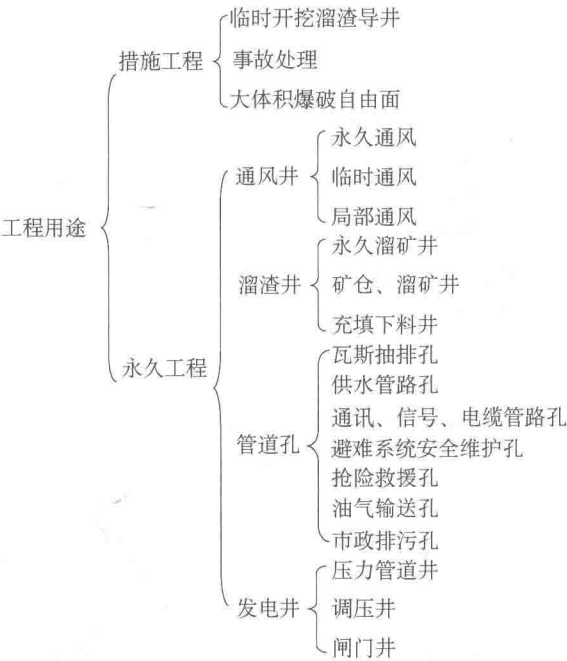


图 1-3 按照工程用途类型划分

(3)按照工程轴线与地面夹角分，作为反井开始阶段是指垂直于地面的工程，随着反井施工方法的丰富，反井应用范围的逐渐增加，不同角度的工程也纳入反井范围，采用反井施工方法或类似的方法，以满足不同工程需要，按照反井轴线和水平面夹角，可分为近水平、小倾角、大倾角和垂直反井(图 1-4)。

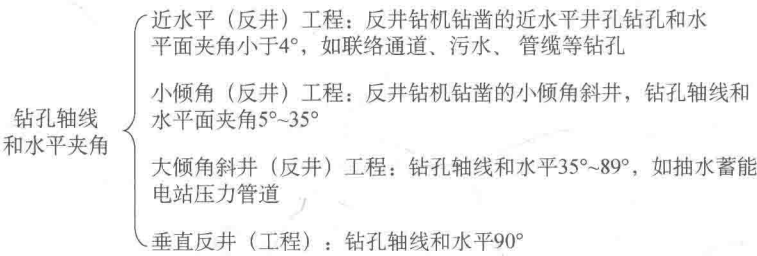


图 1-4 按照工程轴线与地面夹角分

1.3 地下工程建设中的反井

1.3.1 水力发电工程

随着开发条件较好的江河位置已开发完毕,地下厂房式水力发电站、引水式电站等大量以地下工程为主的水力发电系统,需要建设输水发电的压力管道、电缆、电梯、通风、调压等许多竖井、斜井工程(图 1-5),这些工程施工时,上下口的隧道工程已经率先施工完毕,可采用反向凿井法施工,也属反井工程类^[3]。

通风竖井工程,通风工程包括临时通风和永久通风两类,在电站建设时期,由于地下厂房式电站需要开挖大体积或长距离的工程结构,在这些工程结构的开挖过程中,大体积爆破会产生大量有害气体,大功率内燃凿岩设备、装载设备、运输车辆等也产生大量的有害气体,这些有害物质很难靠压入式通风快速得到稀释和排放,以往施工过程中,通风问题使工程施工效率降低,同时,对施工人员造成职业伤害。近年来随着对职业危害的重视,反井钻井技术的发展,以及通风竖井的施工速度远高于普通隧道的施工速度,通风井成为地下工程建设的重点和先行,在大型地下厂房开挖之前,施工支洞到达地下厂房位置后,可在地面采用反井钻机钻进通风竖井和地下厂房施工支洞组成通风系统,施工支洞进风,在通风竖井上部设置抽出式风机,施工支洞和通风井形成通风循环,将爆破产生的有害气体排出洞外,排放效率远高于单独压入式通风方式,为电站地下厂房建设创造了良好的施工条件。一些电站的长大尾水隧洞、引水隧洞、导流洞也多采用竖井通风方式,通风竖井可以和工程的开挖同步到位,起到分段通风的作用,保证爆破之后,有害气体及时排除,快速进入下一循环施工。在电站运行期间,设备运转也会产生大量的热量,需要通风降温,以往采用的隧道通风方式,其效率远低于竖井通风方式,建设地下厂房式电站永久通风竖井,是电站通风的发展趋势。

压力管道是产生发电势能的主要工程结构,一般有垂直和倾斜两种布置方式,斜井的角度一般为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$,压力管道的长度一般为 $200 \sim 600\text{m}$,压力管道上口和引水隧洞连接,下部连接到地下厂房,上下都有施工支洞到达,可以采用反井方法施工,特别是斜井工程,施工难度大,偏斜不易控制。

调压井包括引水调压井和尾水调压井,一般深度不超过 100m ,有些工程采用变径布置,调压井的断面大,采用反井方法先施工导井,然后扩挖刷大成井,最后采用滑膜衬砌形成调压井工程结构。

出线井或电梯井,电站运行发出的巨大的电能,需要通过缆线输送到地面,建设垂直的竖井是输送距离最短的一种方式,同时,竖井内可安装提升电梯和楼梯结构,用于工作人员输送以及在紧急情况下逃生。

图 1-5 为引水式地下厂房电站布置示意图。

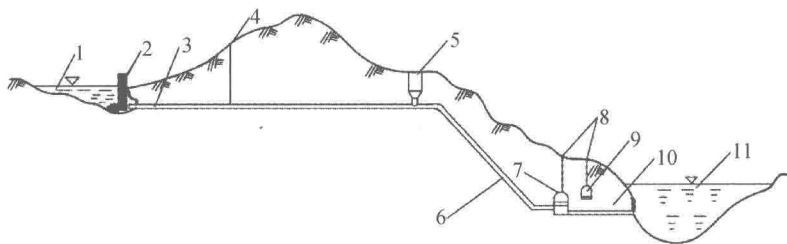


图 1-5 引水式地下厂房电站布置示意图

1-上游水库；2-闸门井；3-引水隧道；4-引水隧洞通风竖井；5-调压井；6-压力管道；7-地下厂房；8-地下厂房等通风竖井；9-主变压器室；10-尾水隧洞；11-下游河道

1.3.2 抽水蓄能电站工程

抽水蓄能电站是一种调峰式水力发电结构，通过抽水 and 发电的变化实现电能的蓄积和释放，以上下水库的高差实现蓄能，利用山体内空间布置发电隧道和地下厂房，电站建设工程包括上下水库、引水隧洞、闸门井、调压井、压力管道、地下发电厂房、出线竖井、变压器室、尾水隧洞、尾水调压井、尾水闸门井，以及施工用引水隧洞、地下厂房、尾水隧道等工程的通风竖井。抽水蓄能电站和地下厂房工程电站结构相似，一般只是抽水蓄能电站压头较高，压力管道长，多采用倾斜压力管道，压力管道倾角在 $45^\circ \sim 60^\circ$ ，目前，单段压力管道的施工长度在 300m 左右，所以一些长距离压力管道采用设置中段或者建设中部施工支洞方式，图 1-6 为斜井方式布置的压力管道式抽水蓄能电站，图 1-7 为竖井方式布置的压力管道式抽水蓄能电站。

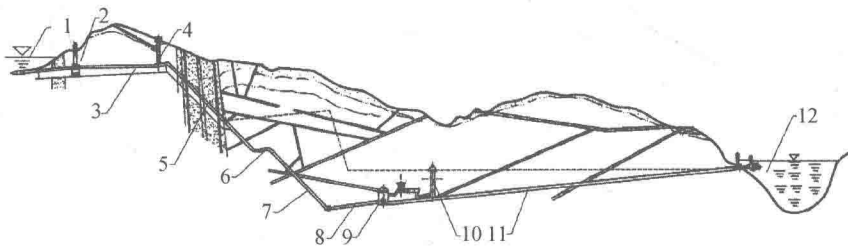


图 1-6 倾斜压力管道布置的抽水蓄能电站

1-上水库；2-进水口；3-上水库引水隧道；4-调压井；5-压力管道上斜段；6-压力管道中段；7-压力管道下斜段；8-压力管道下平段；9-发电厂房；10-尾水调压井；11-尾水隧道；12-下水库

1.3.3 公路铁路隧道工程

随着隧道施工技术的发展，特别是全断面掘进机的采用，隧道的施工速度加快，长距离公路、铁路隧道越来越多，在隧道施工期间和隧道运营期间，需要建设通风井(图 1-8 和图 1-9)和紧急逃生通道。以前多用斜井，斜井长度大，通风距离长，风阻大，风量损失严重，且施工存在支护等方面的问题^[4]。随着反向凿井技术发展，竖井施工效率、速度提高，逐渐以竖井取代斜井，提高通风效率并降低运营成本。地铁工程的各种