

盾构施工煤矿长距离斜井 关键技术

杨俊哲 夏国斌 等 编著

DUNGOU SHIGONG MEIKUANG CHANGJULI XIEJING
GUANJIAN JISHU



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

国家科技支撑计划项目课题:2013BAB10B02

盾构施工煤矿长距离斜井关键技术

杨俊哲 夏国斌 等 编著

中国铁道出版社

2017年·北京

图书在版编目(CIP)数据

盾构施工煤矿长距离斜井关键技术/杨俊哲,夏国斌等
编著. —北京:中国铁道出版社,2016. 12 (2017.3 重印)

ISBN 978-7-113-17702-7

I. ①盾… II. ①杨… ②夏… III. ①地下采煤—斜井
开拓—盾构法—研究 IV. ①TD823. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 234669 号

书 名:盾构施工煤矿长距离斜井关键技术

作 者:杨俊哲 夏国斌 等 编著

责任编辑:张 婕

编辑部电话:010-51873141

电子信箱:crph_zj@163.com

封面设计:王镜夷

责任校对:焦桂荣

责任印制:陆 宁 高春晓

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2016年12月第1版 2017年3月第2次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:21.5 字数:532 千

书 号:ISBN 978-7-113-17702-7

定 价:120.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

本书编委会

主 编：杨俊哲 夏国斌

副主编：杜 彬 沙明元 张丕界 宋伟俊

编委会：南清安 卓 卉 武子生 晏启祥 崔安义

许联航 乔文俊 宋桂军 邓朝辉 张旭东

夏明钺 齐占国 徐润泽 杨继元 李向海

韩 兵 邹春华 张开顺 游龙飞 姚 捷

管会生 梅勇兵 徐 震 辛德林 何 川

胡雄玉

前 言

盾构施工技术已广泛应用于交通、水电、市政、国防等工程领域,与传统暗挖法相比,在安全、质量、进度、环保等多方面都具有明显优势。随着神东矿区煤炭资源开采向中深部区的延伸,煤矿建井技术的创新再一次被提到了重要日程,神华集团在神东和新街矿区采用盾构施工煤矿长距离斜井,针对“深埋超长、连续下坡、富水高压、地层多变”等关键技术问题,集中国内盾构科研、设计、施工和装备制造等优势技术力量,立足自主创新,研究开发了盾构法施工煤矿长距离斜井成套技术和装备并在神东矿区补连塔煤矿成功应用。该技术的研究应用在我国尚属首次,为700m以浅的中深部煤炭资源开发提供了一种全新途径,开创了煤矿斜井建设新模式,填补了国内盾构施工煤矿斜井技术空白,使700m左右的中深部煤炭资源斜井开拓成为可能,实现了斜井开采矿井主运输胶带化、辅助运输不换装一次到位无轨胶轮化,进一步提高了矿井生产自动化、集约化管理水平,对于我国大型煤炭基地建设具有典型的示范和引领作用。

本书由神华集团公司组织神东煤炭集团公司、神华新街能源公司、中国铁建股份公司、中铁十一局集团公司、中国铁建大桥工程局集团公司、中铁第四勘察设计院集团公司、中国铁建重工集团公司、西南交通大学、中煤科工集团武汉设计研究院等单位共同完成,得到了国家科技支撑计划项目课题“煤矿长距离斜井盾构始发及连续下坡掘进技术”(2013BAB10B02)资助,体现了国家科技支撑计划项目“盾构施工煤矿长距离斜井关键技术研究示范”(2013BAB10B00)的相关研究成果。

本书在总结煤矿斜井施工技术及盾构法施工技术成果的基础上,通过理论与实践相结合的研究分析,从盾构法施工煤矿斜井的设备选型配置、盾构始发与快速掘进、地下拆解、不良地质处置、远程数字化监测监控等方面进行了详细介绍,并简述了研究成果在示范工程中的实际应用效果,对盾构法施工煤矿长距离斜井的成套技术进行了全面系统阐述。

本书共九个章节。第一章由杨俊哲、南清安、卓卉、武子生等人编写,重点介绍盾构施工煤矿斜井的背景与意义,掘进机技术现状,以及国内外的应用状况;第二章由杜彬、乔文俊、曹颢、宋桂军等人编写,重点介绍示范工程建设的基本情况,工程及水文地质特点;第三章由杨俊哲、韩兵、邹春华、梅勇兵、管会生、沙明元、许联航等人编写,介绍了盾构主机及附属配套设备的选型与配置;第四章由夏明铤、姚捷、徐润泽、邹春华、张丕界等人编写,阐述了盾构步进、始发、掘

进及壁后填充等内容;第五章由张世良、辛德林、安士岗等人编写,介绍了盾构掘进施工通风与排水关键技术;第六章由夏国斌、姚捷、夏明镡、齐占国、邹春华、游龙飞等人编写,阐述了富水、软岩、断层破碎带及有害气体地段盾构掘进施工处置技术;第七章由宋伟俊、李向海、邹春华、徐震、姚捷、汤启栋等人编写,从盾构可拆解结构设计、拆解硐室设计到拆解施工进行了阐述;第八章由晏启祥、何川、胡雄玉、关丙火等人编写,介绍了盾构施工及管片结构的远程实时监测与评估技术;第九章由张开顺、刘明辉、李海周、李鹏等人编写,介绍了示范工程建设及实施效果。

全书图文并茂,资料翔实,可供煤矿斜井盾构科研、设计、施工、工程管理等相关专业技术人员参考。

编 者

2016年11月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外盾构技术发展现状	3
1.2.1 国外盾构(TBM)技术现状	3
1.2.2 国内盾构(TBM)技术现状	4
1.2.3 盾构(TBM)法斜井施工案例	5
2 工程概况	8
2.1 新街台格庙矿区斜井工程	8
2.1.1 工程基本情况	8
2.1.2 地质情况	9
2.2 神东补连塔煤矿斜井工程	12
2.2.1 工程基本情况	12
2.2.2 地质概况	12
2.3 井筒结构设计	16
2.3.1 设计总体要求	16
2.3.2 设计总体布局	17
2.3.3 井筒结构设计	17
3 盾构设备选型与配置技术	18
3.1 盾构型式选择及整机系统集成	18
3.1.1 双模式盾构技术要求	18
3.1.2 双模式盾构主机参数确定	18
3.1.3 双模式盾构总体设计	22
3.2 斜井双模式盾构关键部件选型与研制	24
3.2.1 刀盘研制	24
3.2.2 主驱动选型配置	25
3.2.3 管片拼装机	27
3.2.4 主机出渣装置	28
3.3 掘进模式转换主体部件	29
3.3.1 刀 盘	29

3.3.2	主机出渣装置	32
3.4	掘进模式转换工艺	33
3.4.1	盾构掘进模式转换要求	33
3.4.2	闭式模式转换为开式模式	34
3.4.3	开式模式转换为闭式模式	35
3.4.4	盾构掘进模式转换过程试验及优化	35
3.5	主机设备性能参数匹配及系统配置	36
3.5.1	两种模式对盾构关键参数的要求和规律	37
3.5.2	盾构关键参数匹配原则	41
3.5.3	盾构关键参数的匹配关系	44
3.5.4	盾构关键参数配置范围	51
3.6	施工配套设备选型与配置	52
3.6.1	超前钻探设备	52
3.6.2	物料转运系统	55
3.6.3	管片壁后组合填充设备	58
3.6.4	渣土改良系统	63
3.6.5	连续出渣系统	65
4	盾构斜向始发及连续下坡掘进技术	81
4.1	盾构斜向始发技术	81
4.1.1	盾构始发工序流程	81
4.1.2	盾构始发基座	82
4.1.3	大坡度条件下盾构快速步进技术	86
4.1.4	盾构导轨步进控制技术	89
4.1.5	盾构斜向始发姿态控制与轴线纠偏技术	89
4.2	盾构连续下坡掘进技术	93
4.2.1	盾构控制参数与围岩力学参数关系	93
4.2.2	掘进速度对盾构掘进参数的影响	97
4.2.3	盾构掘进姿态控制技术	99
4.2.4	盾构过竖曲线姿态调整	101
4.2.5	管片拼装技术	102
4.2.6	重载物料辅助运输及安全保障技术	103
4.2.7	换刀技术	111
4.3	管片壁后填充技术	114
4.3.1	同步注浆浆液的种类及优缺点比较分析	115
4.3.2	管片壁后填充层与管片结构共同防水作用机理	115
4.3.3	管片壁后填充	118
5	通风与排水技术	123
5.1	施工通风技术	123

5.1.1	施工通风方法	123
5.1.2	通风风量及风压	127
5.1.3	施工通风设备	132
5.1.4	粉尘防治	135
5.1.5	通风机的电气传动与监测系统	136
5.1.6	通风效果监测	137
5.2	富水长距离斜井盾构施工反坡排水技术	139
5.2.1	地下水涌入途径	139
5.2.2	涌水量预测	140
5.2.3	排水方案比选及系统整体布局	142
5.2.4	抽排水设备配置	145
6	特殊不良地质段处置技术	159
6.1	煤矿斜井盾构超前地质探测技术	159
6.1.1	超前地质预报的预报内容	159
6.1.2	超前地质预报方法比选	159
6.1.3	斜井盾构施工超前预报方法确定	161
6.1.4	超前钻探地质预报技术	163
6.1.5	超前钻机地质预报技术的应用	164
6.2	软岩地段处置技术	164
6.2.1	软岩变形规律研究	164
6.2.2	软岩变形地段井筒设计应对技术	169
6.2.3	软岩变形地段盾构设备应对技术	169
6.2.4	斜井软岩变形分级及处置	171
6.3	富水地段防水处置技术	178
6.3.1	长距离斜井防水体系	178
6.3.2	管片接缝防水密封垫结构研究	179
6.3.3	盾构法斜井壁后填充共同防水及分段隔水	183
6.4	高水压地段泄水降压技术	185
6.4.1	高水压地段泄水降压必要性和机理分析	185
6.4.2	盾构管片泄水孔布置的影响分析	187
6.4.3	泄水降压式管片泄水方案	190
6.5	断层破碎带处置技术	190
6.5.1	工作面稳定性分析	190
6.5.2	断层破碎带盾构施工技术	191
6.5.3	工作面失稳处置技术	194
7	盾构地下拆解技术	199
7.1	地下拆解区域管片受荷特性及地层加固技术	199
7.1.1	斜井管片结构受荷特性	199

7.1.2	盾构拆解影响区管片纵向卸荷特性	205
7.1.3	盾构无扩大硐室拆解地层加固技术	211
7.1.4	盾构扩大硐室拆解地层加固技术	213
7.2	盾构地下可拆解结构型式	218
7.2.1	盾构地下可拆解结构型式的技术要求	218
7.2.2	刀盘可拆解结构	218
7.2.3	盾体可拆解结构	222
7.2.4	主驱动可拆解结构	224
7.2.5	螺旋输送机可拆解结构	225
7.2.6	管片拼装机拆解结构	227
7.2.7	拖车可拆解结构	227
7.2.8	主要可拆解结构部件的尺寸和重量	228
7.3	盾构原位地下拆解技术及专用装备	228
7.3.1	无扩大硐室盾构拆解专用装备	228
7.3.2	无扩大硐室盾构地下拆解技术	232
7.3.3	扩大硐室盾构拆解专用装备	238
7.3.4	扩大硐室盾构地下拆解技术	244
8	远程实时监测与评估技术	254
8.1	实时综合监测软件系统模块设计	254
8.1.1	监测系统层次设计	254
8.1.2	监测系统功能设计	255
8.1.3	监测系统模块设计	256
8.1.4	监测系统接口设计	262
8.1.5	监测系统数据库设计	263
8.2	现场监测元器件布设及其工艺	264
8.2.1	传感器总体布置	264
8.2.2	盾构自带传感器监测项目	265
8.2.3	埋入式传感器的埋设工艺	266
8.3	盾构斜井现场监测设备组网与集成技术	269
8.3.1	斜井监测混合组网技术	269
8.3.2	数据自动采集传输技术	270
8.4	斜井盾构施工安全评估指标体系	272
8.4.1	盾构工作参数指标	272
8.4.2	防喷涌施工安全指标	273
8.4.3	工作面稳定安全指标	274
8.4.4	盾构防卡机安全指标	276
8.4.5	注浆质量合格性指标	280
8.4.6	盾构姿态安全指标	281
8.4.7	管片结构形变安全指标	281

8.4.8 斜井施工安全评估标准	281
8.5 盾构斜井管片衬砌安全评估方法	282
8.5.1 基于容许应力法的结构安全评估	283
8.5.2 基于极限状态法的结构安全评估	284
9 工程示范	287
9.1 示范工程总体设计	287
9.1.1 示范工程一:新街台格庙矿区斜井工程	287
9.1.2 示范工程二:神东补连塔煤矿斜井工程	300
9.2 示范工程施工组织	310
9.2.1 工期目标	310
9.2.2 组织机构设置	311
9.2.3 作业人员配置	312
9.2.4 作业流程	312
9.2.5 进度指标分析及经济指标	313
9.3 示范工程关键技术应用	314
9.3.1 盾构施工煤矿长距离斜井设备选型与配置技术应用	314
9.3.2 煤矿长距离斜井盾构始发及连续下坡掘进技术应用	317
9.3.3 盾构施工煤矿长距离斜井盾构原位地下拆解及配套技术应用	320
9.3.4 盾构施工煤矿长距离斜井数字化远程监控技术应用	322
9.3.5 盾构施工煤矿长距离斜井特殊不良地段处置技术应用	325
9.4 示范工程效果	329

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

煤炭是我国的主体能源,在一次能源消费结构中约占 65%,是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业。随着国民经济继续保持平稳较快发展,工业化和城镇化进程加快,对环境保护力度进一步加大,煤炭在一次能源消费结构中,相当长的时期内占比不会低于 60%,煤炭作为我国主体能源的地位不会改变。

由于国家煤炭资源开发重点转向西部,且西部地区浅部煤炭资源已基本被开发,待开发的资源大多是中深部煤层,地质条件复杂,开采难度大。为适应国家建设特大型煤炭企业的需要,解决西部深层煤炭开采的技术难题,迫切需要研究开发先进的煤矿建井技术。

根据国家发展和改革委员会发改能源[2011]249 号文件精神,国务院同意将内蒙古新街台格庙矿区开发作为国家重点项目建设配置给神华集团公司勘查开发作为神东矿区的接续矿区。整装配置开发新街台格庙矿区是贯彻落实科学发展观,转变煤炭资源分散配置方式,保护和集约开发煤炭资源的有益尝试,有利于调整和优化煤炭产业结构,保障煤炭的可靠供应。

新街台格庙矿区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市境内,矿区规划总面积为 771.0 km²,规划总资源量 14 427.72 Mt。按照中国神华新街台格庙矿区总体规划和建设要求,矿区建设将按照设计一流、技术一流、设备一流、管理一流、效益一流、效率一流、规模一流、安全一流和环保一流“九个一流”的要求,以体制创新、制度创新、技术创新、开发模式创新为主导,将矿区打造成“集约高效、智能安全、生态和谐、科学发展”的世界一流矿区。

同时,借鉴国内外大型矿区开发建设先进经验,特别是亿吨级大型煤炭基地神东矿区的建设经验,以高度集中的千万吨矿井群为依托,集中建设利用铁路、供电、供水、洗选加工等矿区基础设施,充分利用现代信息和自动化技术,通过智能化矿山建设,打造技术领先、健康安全、绿色环保、节能减排、优质高效、和谐发展的现代化亿吨级特大型煤炭基地,转变煤炭工业发展方式,引领煤炭工业健康发展。

为实现新街台格庙矿区规划建设目标,在矿区内规划建设南、北两个集中场地,作为全矿区开发的支点,其中,南部集中场地是全矿区生产指挥的核心,集中布置生产能力均为 15.0 Mt/a 缓坡主、副斜井四个,从而实现南部四个矿井的集中管控,共享基础设施。

神东补连塔煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗东南,乌兰木伦河一级阶地的西缘,矿井资源储量 592.89 Mt。截至 2012 年底,矿井采矿证范围内剩余资源量为 481.03 Mt,可采储量为 303.03 Mt,矿井生产能力 2 000 万吨/年。井田划分 5 个盘区,2014 年矿井开始回采 2-2 煤四盘区。矿井煤炭采用强力带式输送机运输,辅助运输采用无轨胶轮车运输,补连塔煤矿新建斜井并用于辅助运输,为井下运送重型采矿设备及大型材料。新建斜井总长 2 745 m,

最大埋深 276 m。

20 世纪 90 年代后,随着强力带式输送机和矿用防爆无轨胶轮车的应用,长距离缓坡斜井是实现矿井主运连续化,辅助运输无轨胶轮化的关键工程,也是矿区开发建设中的重点工程和难点工程。因此,长距离缓坡斜井的快速安全施工是矿区开发建设面临的重要课题之一。

新街台格庙矿区,白垩系含水层厚度约 300 m,煤层埋深约 650 m,缓坡斜井(6°)设计长度达 6 500 m。神东补连塔煤矿新建斜井穿越表土层长度约 48 m,白垩系志丹群长度约 460 m,侏罗系安定组、直罗组约 1 150 m,侏罗系延安组约 1 087 m,斜井设计总长 2 745 m。采用钻爆法和冻结法施工工艺,工期长、安全性差、可靠性低,斜井穿过含水层地段,井筒涌水可能导致斜井无法施工,其中采用冻结法施工段工效低、投资过大。盾构法施工技术已广泛应用于交通、水电、市政、国防等工程领域,但是该施工方法在煤炭领域矿井建设中的应用,国内尚无先例,特别是在地质条件复杂、大埋深、大坡度的长距离斜井条件下,盾构装备和施工技术都有待于进行新的研究和试验。

因此,开展“盾构施工煤矿长距离斜井关键技术”研究,研制在大埋深、长距离、富含水、复杂地层中进行盾构施工的斜井成套技术和工艺势在必行。

1.1.2 研究意义

随着科学技术的进步和煤炭生产发展的要求,我国矿井的技术面貌发生了根本性变化,生产集中化、矿井大型化、运输连续化、系统简单化是新建大型、特大型安全高效矿井追求的目标。但随着开采强度的不断加大,我国煤矿开采深度以每年 8~12 m 的速度增加,据统计,我国查明的煤炭保有资源量中,埋深 300 m 以浅的占 36.1%,300~600 m 的占 44.6%,600~1 000 m 的占 19.3%,目前平均开采深度接近 600 m。由于煤炭主运输、辅助运输连续化的要求,井筒采用缓坡斜井开发的越来越多,因此,井筒长度也会大幅度增加,同时为保障煤炭开采的可靠性,采、掘工作面设备也朝着重型化及大型化发展,要求煤矿井巷断面净宽和空必须增大,井巷净断面已由原来的约 15 m^2 逐渐增大到 35 m^2 左右。因此,由于煤矿斜井长度不断增加、井巷断面的不断增大及地质条件的不断复杂化,对煤矿井巷掘进施工装备、施工技术和施工工艺以及施工安全提出了新的挑战。采用盾构法施工煤矿长距离斜井,研究“盾构施工煤矿长距离斜井关键技术”,必将对煤炭开发建设及生产管理产生深远的影响。

1.1.2.1 盾构施工安全条件好

盾构施工煤矿斜井采用机械全断面开挖,现场作业人员少,安全技术水平高,人员及设备均可以在护盾防护下安全地进行推进等相应的工序,采用预制钢筋混凝土管片及时支护,斜井一次成巷;配套相应的安全设备和超前探测设备及监测监控系统,可有效应对软岩地层、含水层、断层破碎带等不良地质条件,抗灾能力强,人员进出工作面时间也短,因此,施工人员和机械设备的安全防护及安全技术条件好,同时安全保障系统的可靠性也得到了极大的提高。

1.1.2.2 盾构施工作业效率高

一般埋藏深度超过 400 m 的煤炭资源采用立井开拓,盾构施工煤矿斜井施工为 700 m 以浅的中深部资源开发提供了一种全新的开发建设模式,使 700 m 左右的中深部资源开发的主运输实现皮带化,辅助运输实现不换装一次到位的无轨胶轮化,从而进一步提高矿井生产管理自动化水平,为矿区采用集约化管理模式创造条件,促进行业进步和产业升级。

1.1.2.3 盾构施工建设工程质量高

传统施工方法一直存在井巷成型差,支护强度到位不及时,后期维护量大,维护成本高等

问题。盾构开挖对围岩扰动小,开挖面光滑,衬砌采用预制管片方式,工厂化作业,衬砌质量高,稳定性好,还有利于检测,能显著提高矿井建设工程质量,可以确保建设工程质量的优良。

1.1.2.4 盾构施工更加环保

盾构法施工机械化程度高,劳动强度低,能够有效控制粉尘,极大地改善作业环境;盾构施工中噪声、振动等引起的公害小。斜井施工涌水排放受控,控制地下水位下降和地表沉降,对于生态环境脆弱的西部地区意义尤为重要。另外,盾构施工使得采用长距离缓坡斜井集中开拓布置成为可能,可以共享地面基础设施,大幅减少对地面生态的扰动或破坏。

1.1.2.5 盾构施工速度快

相对于传统施工方法,盾构法施工时开挖、衬砌、装渣、运输等全部工序流水线作业,一般月进度可达 400 m 以上,最高月进度可达 600 m 以上,是传统施工方法的 3~5 倍,可大幅度提升矿井建设速度,时间效率和效益明显。

综上所述,盾构法施工长距离斜井技术在我国尚属空白,技术难度大、涉及专业领域广,需集中优势力量,立足自主创新和技术研发,研究盾构法建设煤矿长距离斜井成套技术,提出盾构施工煤矿斜井的相关规范和标准,建立盾构施工煤矿斜井双模式转换系统,不仅可以填补国内技术空白,更重要的是具有以下重大意义:一是将会推动煤炭行业建井模式的转变,将创新煤矿斜井建设新模式,对于我国大型煤炭基地开发建设具有典型的示范引领作用;二是将会促使中深部煤炭资源的开发模式和管理方式的转变,为中深部资源开发提供了一种全新的开发建设模式,使中深部资源开发的主运输实现皮带化,辅助运输实现不换装一次到位的无轨胶轮化,从而进一步提高矿井生产管理自动化水平,为矿区采用集约化管理模式创造条件,促进行业进步和产业升级;三是促进煤矿斜井安全优质高效建设的重大技术变革,盾构法建设长距离煤矿斜井在安全、高效、优质、快速、环保等多方面都将呈现出显著的优势,在我国煤炭行业矿井建设方面具有显著的应用潜力和价值,从而为煤矿快速、高效建设提供技术支撑。

1.2 国内外盾构技术发展现状

1.2.1 国外盾构(TBM)技术现状

自 20 世纪 50 年代美国罗宾斯公司研制出第一台真正具有实用价值、能够可靠完成对岩石地层隧道掘进任务的盾构产品以来,全世界盾构隧道施工总里程累计已经超过 10 000 km,盾构施工工法已经成为世界上大中型硬岩隧道工程的首选工法。盾构产品设计与施工技术主要集中在日本、德国、美国和法国等国家的隧道施工装备企业,其中以日本三菱、德国海瑞克、美国罗宾斯、德国维尔特和加拿大挪瓦特最为突出,日系盾构主要突出的是产品类型的多样性、地质适应性和经济性,而欧系或美系盾构主要突出的是产品的安全性和可靠性高。盾构设计直径大多为 6~10 m,最大设计直径已达 14 m,盾构类型已由最初的敞开式发展为以敞开式和护盾式盾构为主的结构类型。随着新材料技术、液压技术、电机变频驱动技术、PLC 控制技术、现场总线技术、信号传感技术、激光制导技术等不断应用到盾构产品上,现代盾构已经成为世界上大型工程施工先进成套装备的典型产品之一,已经完成的重大隧道工程有美国芝加哥蓄水工程隧道(隧长 211 km)、英吉利海峡隧道工程(隧长 151 km)、南非莱索托引水隧道工程(隧长 45 km)等,其施工规模和难度均体现出盾构隧道工程的最高技术水平。

自 19 世纪 20 年代开始,盾构由最初的手掘式、半机械式开挖发展到现今的机械式、自

动化开挖,开挖断面也呈现出圆形、双圆形及矩形等多种形式。1967年,日本人应用英国人提出的泥水加压系统成功研制出第一台功能较完善的泥水平衡盾构,1974年,日本人又成功研制出符合现代施工要求的土压平衡盾构,之后,土压平衡盾构技术得到飞速发展,成功应用于各种地铁隧道、公路隧道、市政管道工程等。同时,伴随着控制技术、液压驱动技术、测控技术、高压密封技术、耐磨材料制备技术等相继出现实质性进展,土压平衡盾构的制造与应用技术不断提升,以日本和德国企业最突出,盾构最大直径超过17m(工程在美国,盾构制造商在日本),已成为全球地质适应能力最强的全断面隧道掘进机的首选工法和设备。

由于工程地质的复杂性和多变性,为了提高单台设备适应具有复杂地质情况的隧道工程,特别是特长重大隧道工程的应对能力,降低施工风险,国外企业如日本的川崎重工、奥村等、德国的海瑞克、法国的NFM等企业相继研制了土压平衡与泥水平衡、土压平衡与盾构相结合的双模式盾构(掘进机)产品,在盾构(掘进机)施工过程中可根据不同区段的工程地质条件采用相对应的掘进模式,并能够实现洞内模式转换,主要应用工程有巴塞罗那地铁9号线(NFM,土压平衡+泥水平衡)、香港地铁九龙南线工程(海瑞克,泥水平衡+盾构)以及南京机场轻轨工程(奥村,土压平衡+盾构)(图1.1和图1.2),但由于双模式全断面掘进机制造工艺复杂、设备成本较高且特定工程地质的施工效果较单模式掘进机差,尚未得到广泛应用。



图 1.1 NFM 双模式盾构



图 1.2 奥村双模式盾构

1.2.2 国内盾构(TBM)技术现状

我国自主研发盾构设备大致经历了三个阶段,第一阶段为20世纪60年代中期到70年代中期,属于盾构研制的起步阶段。由原水电部上海水工机械厂与原北京水电学院联合攻关,设计生产出我国第一台直径为3.4m的盾构,并在杭州人防隧道工程中进行了工程试验,初步掌握了盾构基本设计理论和技术。第二阶段为20世纪70年代中期到80年代末期,属于盾构研制的实用性阶段。先后由煤科院上海分院联合上海重型机械厂以及原水利部杭州机械设计研究院联合上海水工机械厂研制出直径3~5m左右的盾构产品10余台,并陆续投入到河北引滦、福建龙门滩、青岛引黄济青等隧道建设工程,取得了一定的工程业绩,但在设备可靠性、设备寿命、掘进速度等方面远远落后于国外同类型产品。第三阶段为20世纪90年代至今,属于联合制造阶段。为了满足我国重大隧道工程施工需要,国家陆续引进国外先进的盾构产品,国内多家企业分别与国外著名盾构制造商合作,在我国国内联合制造盾构,其中包括美国罗宾斯公司分别与上海隧道股份、中国二重、大连重工,法国NFM公司与上海重型机械厂(现中国北方重工已经收购法国NFM公司)、德国海瑞克与广州重工等,完成了用于我国隧道工程的盾

构产品总计 20 余台套,使我国部分企业初步掌握了高水平盾构产品组装和施工技术,但受制于国外企业对盾构核心技术的垄断和我国本身基础工业的相对薄弱,特别是在刀盘刀具(尤其是大直径滚刀)、高性能耐磨材料、主轴承、密封技术、高精度液压元件等关键零部件领域仍主要依靠进口。随着我国多项重大盾构隧道工程的完成,如秦岭隧道、中天山隧道、大伙房水库输水工程隧道、桃花铺铁路隧道、万家寨引黄隧道等,国内施工企业在盾构施工工法领域已经达到世界先进水平,加上我国逐步掌握并完善土压平衡盾构与泥水平衡盾构核心技术、基础工业的逐步提升以及国家政策的大力扶持,我国自主研制的高性能盾构产品已经具备较好的基础。

在土压平衡盾构方面,自 20 世纪 90 年代初开始,我国从工程总体外包、盾构整机进口加参与施工、技术引进/合作制造加自主独立施工逐步走到现如今的设备自主研制加完全自主施工及技术加设备出口阶段,实现了一个个重大跨越。特别是近 3 年来,通过原始创新、集成创新等手段,国内自主品牌的土压平衡盾构产品国内市场占有率超 70%,涌现出了以上海隧道、中铁装备、铁建重工、沈阳重工等为代表的盾构研制企业,掌握了盾构总体设计、复合式刀盘研制、大功率驱动系统设计、液压传动与控制系统集成、密封系统集成等多项关键技术(图 1.3),完全摆脱了国外盾构整机企业长期以来的技术垄断和市场垄断,部分国内企业的盾构产品也逐步进入新加坡、马来西亚等东南亚国家市场。



图 1.3 盾构国产化

在双模式盾构方面,随着隧道工程领域的不断扩大,为了满足部分特殊工程的建设需要,在引进吸收国外先进技术及自主掌握的部分关键技术的基础上,结合特定工程实际特点和要求,创新盾构设计方法,国内企业也逐步尝试着研制双模式盾构产品,如广东华隧通过引进日本技术,合作研制完成了双模式盾构(土压平衡+泥水平衡,盾构开挖直径 6.8 m),应用于广州地铁 9 号线的隧道工程施工。

盾构集开挖、支护和出渣运输工序于一体,可有效实现长大隧道施工的工厂化作业,是世界上先进的大型综合性地下隧道施工设备,代表着国际地下工程技术的最高水平,已广泛应用于交通、水电、市政、国防等工程领域,但盾构施工煤矿斜井国内尚无先例。

1.2.3 盾构(TBM)法斜井施工案例

目前,国外盾构(TBM)法施工大角度隧道(斜井)有一些相关案例,其中典型案例见表 1.1。从国外典型案例来看,虽然有较大纵坡的斜井案例,如最大坡度向上 45°(100%)等,但从其工程技术来看,大坡度条件下隧道长度较短,检索的 39 个案例中长度超过 2 km 的仅 3 例,还没有超过 4 000 m 的工程案例,且实例均洞径小,地质条件好,采用全敞开式盾构施工,技术难度较小。国内盾构(TBM)法施工隧道的最大坡度为 5.5%,见表 1.2。

表 1.1 国外大坡度隧道施工实例

国家	用途	施工地点	技术参数			地层	掘进机型号
			长度(m)	洞径(m)	倾角(°)		
美国	煤矿	西桑	945	3.05	14.0	石灰岩	JAVA MK6
奥地利	有压输水	策勒	1 314	4.20	42.0	片麻岩	ROBBINS 136
日本	有压输水	四三河	500	3.30	45.0	砂岩	WIRTH
日本	有压输水	四三河	500	5.80	45.0	砂岩	WIRTH
日本	有压输水	四三河	500	3.30	45.0	砂岩	WIRTH
日本	有压输水	四三河	500	5.80	45.0	砂岩	WIRTH
法国	输水	大房水电站	1 460	3.60	29.2	片麻岩	WIRTH
法国	输水	大房水电站	1 460	3.60	29.2	片麻岩	WIRTH
法国	输水	上比索特	2 793	3.60	29.2	片麻岩	WIRTH
挪威	输水	西尔维克	800	2.53	45.0	片麻岩	WIRTH
瑞士	交通	萨斯尔弗	1 450	4.10	24.2	花岗岩	ROBBINS
奥地利	交通	比兹特尔	3 693	4.10	25.2	片麻岩	ROBBINS
挪威	有压输水	焦登	1 240	3.20	41.0	花岗片麻岩	JAVA
瑞士	有压输水	埃多松	1 069	2.25	42.0	原生岩	WIRTH
德国	有压输水	威而黑森林	1 400	3.00	27.9	片麻岩	WIRTH
德国	扩挖	威而黑森林	1 400	6.30	27.9	片麻岩	WIRTH
瑞士	燃气管	奥伯格斯丁	1 328	3.50	7.4	页岩	ROBBINS
奥地利	交通	卡普隆	3 300	3.60	27.9	页岩	WIRTH
瑞士	有压输水	霍顿洛尚特尔	1 100	2.53	33.0	片麻岩	WIRTH
瑞士	有压输水	马普拉格	1 400	4.2	35.0	石灰岩	DEMAG TVM42
瑞士	公路通风	圣哥达	850	3.00	42.0	片麻岩	WIRTH
瑞士	通风井扩挖	圣哥达	850	6.64	42.0	片麻岩	WIRTH
瑞士	通风井	圣哥达	476	3.00	40.0	花岗岩	WIRTH
瑞士	通风井扩挖	圣哥达	476	6.64	36.9	花岗岩	ROBBINS
瑞士	燃气管	格里	580	3.65	35.0	云母岩	ROBBINS
瑞士	有压输水	萨勒里	488	3.30	45.0	石灰岩	ROBBINS
瑞士	有压输水	奥伯拉	812	4.30	45.0	花岗岩	ROBBINS
意大利	有压输水	舍奥塔萨特位	1 080	2.53	42.9	页岩	WIRTH
意大利	有压输水	舍奥塔萨特位	1 080	3.00	42.9	页岩	WIRTH
意大利	有压输水	舍奥塔萨特位	1 080	3.00	42.9	页岩	WIRTH
奥地利	有压输水	塞尔伦西兹	2 000	3.20	38.7	页岩	WIRTH
奥地利	有压输水	基迪特尔	1 200	4.80	21.3	花岗岩片麻岩	WIRTH
意大利	公路通风	弗雷儒斯	685	3.00	45.0	页岩	WIRTH