

· 问题探讨 ·

# 超大直径深立井施工工艺和装备配套问题及对策

祁和刚<sup>1</sup>, 杨金宏<sup>2</sup>, 梁恒昌<sup>3</sup>, 龙志阳<sup>4</sup>

(1. 中国中煤能源集团有限公司, 北京 100120; 2. 中煤建设集团有限公司, 北京 102218; 3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 天地科技建井研究院, 北京 100013)

**摘 要:** 回顾了我国立井井筒直径及深度及其相应的施工技术装备发展历程; 并从井筒直径和深度需求的角度, 分析了其发展趋势, 阐述了与井筒大小及深度相适应的技术装备匹配关系。指出了净直径超过 10 m、深度超过 1 200 m 的超大直径深立井施工技术难题, 即提升及悬吊安全恶化、提升能力骤降制约建井速度、井壁厚度及安全制约施工、井筒施工环境恶化等; 提出了解决超大直径深立井施工技术难题的思路是: 井架受力合理化, 提升钢丝绳高强度, 提升机性能高强及稳控智能化, 悬吊稳控智能化, 吊盘及模板迈步轻质化, 抓岩清底少人化, 砌壁浇注自动化, 井壁安全信息化, 降温通风智能化。

**关键词:** 超大直径深立井; 施工工艺; 施工装备; 发展历程

中图分类号: TD262. 1<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1002-6029(2016)06-0039-07

## Problems and Countermeasures on Construction Technique and Equipment Matching of Super Large Diameter and Deep Depth Mine Shaft

QI He-gang<sup>1</sup>, YANG Jin-hong<sup>2</sup>, LIANG Heng-chang<sup>3</sup>, LONG Zhi-yang<sup>4</sup>

(1. China National Coal Group Corp., Beijing 100120, China; 2. China Coal Construction Group Engineering Limited Corp., Beijing 102218, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Research Institute of Mine Construction, Tiandi Science and Technology Company Limited, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The paper had an review on the developing course of the mine shaft diameter and depth and the relevant construction technology and equipment in China. And from a view of the mine shaft diameter and depth requirements, the paper analyzed the development tendency and stated the technology and equipment matching relationship related to the mine shaft size and depth. The paper pointed out the construction technology difficulties of the super large and deep depth mine shaft with a net diameter over 10 m and a depth over 1 200 m. Thus the safety of the hoisting and suspension would be worse, the high reduction of the hoisting capacity would restrict the mine construction speed, the thickness and safety of the mine shaft liner would restrict the construction and the construction environment in the mine shaft would be worse and others. The paper provided the idea to solve the construction technology difficulties of the super large diameter and deep depth mine shaft. Thus the stress of the mine shaft headframe would be rational, the hoisting steel rope would be high strength, the hoist would be high strength performances and stable control intelligent, the suspension would be stable control intelligent, the sinking stage and formwork movement would be light, the rock loading and

收稿日期: 2016-10-20 DOI: 10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.2016.06.011

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2008BAB33B04)

作者简介: 祁和刚(1959—), 男, 上海人, 教授级高工, 主要从事煤矿技术管理工作。Tel: 13910283601, E-mail: Qiheg@chinacoal.com

引用格式: 祁和刚, 杨金宏, 梁恒昌, 等. 超大直径深立井施工工艺和装备配套问题及对策[J]. 建井技术, 2016, 37(6): 39-45.

shaft bottom cleaning would have less labor, the concrete pouring of the mine shaft liner would be automatic, the safety of the mine shaft liner would be informationalized and the air cooling and ventilation would be intelligent

**Key words:** super large diameter and deep depth mine shaft; construction technique; construction equipment; developing course

立井井筒深度随煤炭开采深度的增大而加大,合理的井深会使煤炭提升及长期运营保持相对较低的成本。而加大井筒直径,则是为适应矿井通风、提升、运输等安全 and 生产需要,使深部煤炭资源安全、高效开采变为现实的主观需求。

井筒直径及深度的加大,会导致与之匹配的相关施工技术工艺及装备效率明显降低,客观上导致建设大直径深立井需要有更大的施工装备能力。传统的立井施工装备配套依据主要是规范<sup>[1-3]</sup>、规程<sup>[4]</sup>和经验。这些规范或经验中对立井井筒设计和凿井施工工艺的设定主要基于常见的井筒深度及直径等条件;超过此范围后,则会出现施工进度和效益的极大不合理。因此,超大直径深立井施工工艺及装备研制的方向和目标就成为目前迫切需要讨论和解决的问题。

## 1 我国立井井筒概况

### 1.1 立井井筒深度发展历程

目前,我国煤炭资源 90%以上都是依靠井工开采<sup>[5]</sup>。相应于煤炭开采的逐渐加深,井筒也逐渐向深部延深。经过百余年开发,我国浅表煤炭资源已渐枯竭,煤矿正以每 10 年 100 m 左右的开采速度向深部延深。上世纪 50 年代,立井井筒平均深度为 200~300 m;70 年代为 300~400 m,90 年代达到 500~600 m。本世纪前 10 年,立井井筒平均深度已超过 600 m。据统计,不同时期最深的 5 个井筒平均深度,上世纪 70 年代为 584 m;80 年代为 615 m;90 年代前 5 年为 680 m,后 5 年为 815 m。本世纪第 1 个 5 年为 850 m。截至 2013 年底,全国已有千米深井 47 处(山东 21 处,江苏 7 处,安徽 6 处,河南 4 处,河北 4 处,黑龙江 2 处,吉林 2 处,辽宁 1 处)。其中最深的井筒,深度达到 1 501 m。我国煤矿井筒平均深度变化见表 1 和图 1。

表 1 我国煤矿平均建井深度变化

时间/年	1953— 1957 (一五)	1958— 1962 (二五)	1966— 1970 (三五)	1971— 1975 (四五)	1976— 1980 (五五)	1981— 1985 (六五)	1986— 1990 (七五)	1991— 1995 (八五)	1996— 2000 (九五)	2001— 2005 (十五)	2006— 2010 (十一五)	2011— 2015 (十二五)
平均建井深度/ m	187.6	278.4	296.5	393.1	436.0	490.0	510.0	540.0	580.0	600.0	620.0	640.0
5 个最深井筒 平均深度/m	—	—	—	938.9	—	926.4	—	1 034.5	1 006.6	1 052.9	1 099.4	1 186.1

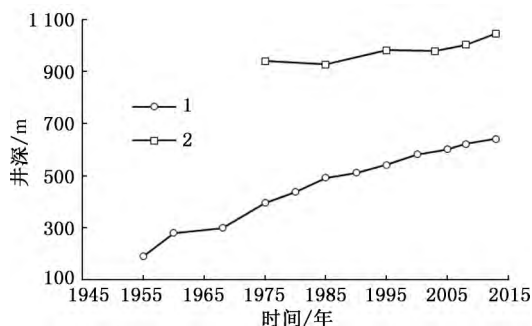


图 1 我国煤矿立井井筒深度发展情况

1—平均掘进井深;2—前 5 个最深井筒平均深度

加大井筒深度是煤炭开采深度增加的必然结果<sup>[6]</sup>。一般来说,井筒深度应与井底车场所在埋深水平相匹配,而后者取决于整个矿井煤炭平均开采深度。可见,井筒深度的主要影响因素是矿

井平均开采深度。

### 1.2 立井井筒直径发展历程

20 世纪 70 年代之前,受到井筒施工能力、矿井生产能力的综合影响,井筒净直径一般在 6 m 以下;70—90 年代,由于矿井设计生产能力普遍在 2.0 Mt/a 以内,井筒净直径一般在 5.5~8 m 之间。20 世纪 70 年代至今,随着施工装备水平、矿井生产能力的提高,井筒设计和施工净直径增加到了 10.5 m,施工荒径达到 15 m,这甚至超过了凿井伞形钻架的最大覆盖范围<sup>[6]</sup>。井筒直径的进一步增大,需要重新评估现有的施工装备能力。

立井井筒直径大小的综合影响因素为:煤矿原煤及材料运输因素(即提升箕斗大小、下运材料长度),以及煤矿通风安全需求因素(即通风风量

及风速等)。

井筒深度超过 1 000 m 之后,井下工作面温度会升高到 30.0~50.0℃,解决深井高温、高湿问题的一条主要途径是通风<sup>[7]</sup>。通风风流由于降温温差的增大,风量、风速势必要加大,因而深部开采需要更大断面的巷道和井筒。通风作为防治瓦斯的一项重要措施,同样需要直径更大或数量更多的井筒。煤矿井下机械化水平日益提高,对大型设备的需求越来越大。例如液压支架(ZY9000/25.5/55)立柱和平衡千斤顶均完全收回时,尺寸为 6 426 mm×1 650 mm×3 358 mm;立柱降到最低时(即顶梁调平时),尺寸为 7 527 mm×1 650 mm×2 550 mm。常用的材料运输工具如支架铲运车(FBL-55),尺寸为 10 066 mm×3 107 mm×2 150 mm;多功能胶轮车(FBR-15),尺寸为 10 430 mm×2 500 mm×1 900 mm。这些大型综采成套装备以大型支架、大型综采机等装备为基础,将大型支架和综采设备从地面运到综采工作面,需要足够大断面的井筒和巷道。除了大型液压支架、大型综采机等装备外,井下辅助运输系统设备的体量和尺度也在不断增加,如支架拖车、装载机、长材运输车等,这些设备均需要有足够大的井筒空间,才能予以保证;同时,这些设备均需要通过大体积提升机下放至井下,而大型提升设备的运行也需要大断面井筒。

## 2 立井井筒大小与施工技术装备的关系

### 2.1 立井井筒施工工艺发展历程

经过几十年的尝试与发展,目前我国已基本形成以立井短段掘砌混合作业方式为主的施工工艺<sup>[8]</sup>。该工艺技术装备以伞形钻架配高颅导轨凿岩机打眼,中心回转式抓岩机装岩,大吊桶提升,伸缩式整体液压金属模板砌壁为主。其施工速度比较稳定,效率较高。立井短段掘砌混合作业方式施工工艺流程如图 2 所示。

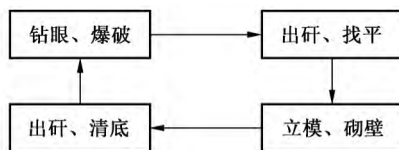


图 2 立井短段掘砌混合作业方式施工工艺流程

立井短段掘砌混合作业方式包括钻眼爆破、出矸找平、立模砌壁、出矸清底等工序,依次循环,完成整个井筒施工。短段掘砌混合作业在工艺方法上,具有以下优点:

(1)作业方式灵活。短段掘砌混合作业是一

种没有临时支护的作业方式,与其他作业方式的区别在于:改变了原有的工艺流程和工序衔接关系,把掘进和砌壁各自独立的工艺系统合在一起,组成新的掘砌循环系统;并按新的工艺要求,重新排列工序,掘进工序中混有砌壁工作,掘砌 2 个工序既有单行作业,又有平行作业。

(2)利于施工组织。经过几十年的发展,不同的施工队伍在该施工工艺衔接上,做了适合本身施工队伍的调整,发展出了在出矸和砌壁环节上的不同衔接关键点,队伍和工序组合完备,在小于 800 m 深的立井井筒施工中,正规单循环作业时间在 24 h 左右,4 个工序施工和 4 个施工队组相匹配,劳动强度不至于超限。

### 2.2 立井井筒施工装备发展历程

近几十年的立井井筒施工装备技术发展是基于以短段掘砌混合作业方式为主的施工工艺基础之上的。井筒大小与装备技术水平互相适应及促进,短段掘砌施工作业方法整体性能的提高需要施工所有环节设备性能有相应的提高,短段掘砌施工作业方法适应增大的井筒直径和增深的井筒深度的方法是增多设备和增大单个设备的能力。

在井筒深度小于 600 m,井筒净直径小于 5.5 m 的情况下,采用 1 套单钩提升,1 台抓岩机以及相应的小型配套设备来施工,即可满足要求。提升机常选用 JKZ-2.8、2JK-3.5、JK-2.5 和 2JK-3.0 型产品,常选用 2~3 m<sup>3</sup> 吊桶和 1.5~2 m<sup>3</sup> 底卸式吊桶及 9 t/11 t 提升钩头;采用 FJD-6A 或 SJZ5.5 型伞形钻架配 YGZ-70 型凿岩机凿岩<sup>[9]</sup>;采用 1 台 HZ-6 或 HZ-4 型中心回转式抓岩机装岩,矿用挖掘机清底。

随着井筒尺寸的加大,深度在 800 m 以内、净直径在 8.0 m 以内的立井井筒施工设备,以增多和增强各项施工工艺设备数量和能力来实现。深度和直径在此区间内的井筒,常采用 2 套单钩提升,1~2 台抓岩机装岩。提升选用凿井专用“大提升机”(JKZ-2.8、2JK-3.5、JKZ-3.0 型提升机),配“大吊桶”(5 m<sup>3</sup>/4 m<sup>3</sup>/3 m<sup>3</sup> 吊桶);出矸选用“大抓岩机”(HZ-6 或 HZ-4 型中心回转式抓岩机)装岩,矿用挖掘机清底;砌壁选用“大段高模板”(3.6~4.2 m 整体金属模板);凿岩采用“伞钻深孔”方式(FJD-6A 型伞形钻架配 YGZ-70 型凿岩机凿岩),光面爆破<sup>[10]</sup>。在这些施工工艺和装备不断升级换代的情况下<sup>[11]</sup>,我国立井井筒施工技术和装备配套水平不断提高。据统计<sup>[5]</sup>,1974 年,我国立井井筒平均施工速度为 16.4

m/月;1984年提高到29.26 m/月;1993年提高到40.11 m/月;1999年提高到54.19 m/月;2005年为68.51 m/月;2006年为67.51 m/月;2008年为65.13 m/月;2010年为70.73 m/月;2012年为61.36 m/月;2013年为64.62 m/月;2014年为62.36 m/月;2015年为64.5 m/月(数据来源:《中国煤炭工业统计资料汇编及统计年鉴》),如图3所示。

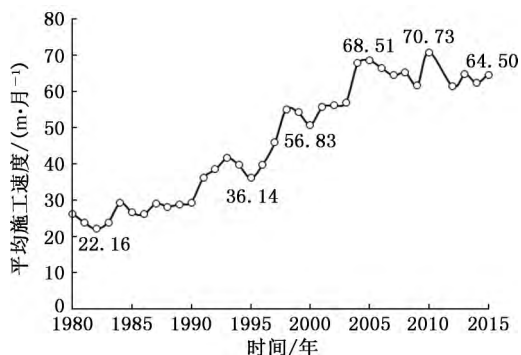


图3 我国立井井筒平均施工速度

但随着立井井筒直径和深度的进一步加大,井筒施工装备能力表现为在达到一定水平后,开始下降。由图3可以看出,2005年以来,立井井筒最高月进度较上世纪有了较大提高,平均月进度维持在65~66 m。2005年后,立井井筒平均月进度由68.51 m逐步降低至2008年的65.13 m,主要原因是井筒掘进直径的加大导致单位进尺工程量剧增,井筒深度的增加则造成施工效率降低。

当井筒深度超过800 m,净直径超过8.0 m后,净直径在10.0 m以内以及深度在1200 m以内时,井筒短段掘砌混合作业施工方法及其施工装备在进一步增多和增强性能的思路下,施工问题得到了一定程度的解决<sup>[12]</sup>。此时提升系统需要2~3套独立提升,方能得到满足;提升机需要JKZ-3.2、2JK-3.6、2JK-4.0型及以上型号产品,方能满足提升需要。选用5 m<sup>3</sup>/4 m<sup>3</sup>/3 m<sup>3</sup>吊桶。吊盘、模板、稳绳的悬吊问题日益突出,成为主要矛盾。此时凿井绞车常选用JZ<sub>2</sub>-25/1300~1600型产品,提升钢丝绳常选用抗拉强度超过1870 MPa的高强钢丝绳;采用FJD-6~9型伞形钻架配YGZ-70型凿岩机凿岩;采用1~2台HZ-6型中心回转式抓岩机配合矿用挖掘机装岩及清底;选用4.0 m以上段高的整体金属模板砌壁。

当井筒深度超过1200 m,净直径超过10 m后,即超大直径深立井施工工艺和装备将会出现一系列的施工技术难题<sup>[13]</sup>。

### 3 超大直径深立井施工技术难题

#### 3.1 提升及悬吊安全恶化

随着井筒深度的增加,由于钢丝绳自重的增加,其悬吊能力逐步减小。受现行《煤矿安全规程》规定的安全系数限制,目前钢丝绳提升和悬吊能力已达极限。凿井提升用钢丝绳属于特殊用途提升钢丝绳系列,其直径一般为32~44 mm,强度等级通常为1550,1670和1870 MPa。钢丝绳强度等级选定后,单根钢丝绳悬吊荷载也是定值。

《煤矿安全规程》中规定:提人时,钢丝绳安全系数 $m_a \geq 9$ ;提物料时, $m_a \geq 6.5$ ;提物时, $m_a \geq 7.5$ 。安全系数校核公式为

$$m = \frac{Q_d}{Q_0 + P_{sb} H_0} \geq m_a$$

式中: $Q_d$ 为钢丝绳破断力,kN; $Q_0$ 为提升钢丝绳终端荷载,kN; $P_{sb}$ 为每m钢丝绳标准重量,kN; $H_0$ 为计算提升高度,m。

在校核的同时,按最不利的情况及最小的提人、提物吊桶考虑,确定在满足安全要求的前提下,不同类型钢丝绳提升的最大悬垂高度 $H_0$ 。经计算,提升时,提升钢丝绳终端荷载见表2。

表2 提升钢丝绳终端荷载

提升类型	提升容器及附件自重/kN	终端荷载/kN
5 m <sup>3</sup> 矸石吊桶	2 161	114.61
4 m <sup>3</sup> 矸石吊桶	2 001	95.61
3 m <sup>3</sup> 矸石吊桶	1 520	71.70
3 m <sup>3</sup> 底卸式吊桶(混凝土)	2 121	87.36
FJD-6A 型伞形钻架	—	75.00
HZ-6 型抓岩机(整机)	—	79.20

随着井筒深度的增加,常用的直径44~46 mm的提升钢丝绳,即使选用国内最高抗拉性能的1870 MPa型号,选用5 m<sup>3</sup>矸石吊桶时,也已经不能满足提升1200 m施工提升安全需要。以18×7-42-1870型钢丝绳为例,其每m质量为6.88 kg;掘进深度每增加100 m,钢丝绳质量增加688 kg;当掘进深度达到1000 m时,钢丝绳质量达到6880 kg,为目前最大提升能力提升机(型号:JKZ-4/17.8)最大静张力的27.5%。若采用更高性能的钢丝绳,其每m质量可达10 kg左右,再加上吊桶、矸石、钩头等质量,将接近提升悬吊能力极限。而对于质量40~60 t的悬吊吊盘

和悬吊模板,悬吊钢丝绳同样达到了或接近《煤矿安全规程》规定的安全系数限制下的极限。抗拉

极限强度为 1 870 MPa 的钢丝绳提升高度分析见表 3。

表 3 抗拉极限强度为 1 870 MPa 的钢丝绳提升高度分析

型号	直径/ mm	破断力/ kN	单位质量/ (kg·m <sup>-1</sup> )	提物最大高度/m	
				5 m <sup>3</sup> 吊桶	3 m <sup>3</sup> 吊桶
6×19(b)	46	1 310	8.06	745	1 278
6×37(a)	48	1 530	9.63	928	1 374
8×19	48	1 490	9.72	865	1 306
8×37	48	1 490	10.00	841	1 270
17×7	44	1 180	7.55	566	1 134
6×24(b)	44	885	6.40	53	723
6V×19	48	1 640	9.88	1 053	1 488
6Q×19	44	1 300	7.78	755	1 306

### 3.2 提升能力骤降,制约建井速度

随着井筒深度的增加,提升耗用的时间急剧增加;按提升机提升速度来进行理论计算,单钩 1 次提升循环时间也明显增加。单钩 1 次提升循环理论时间与井筒深度的关系如图 4 所示。从图中可以看出,单钩 1 次提升循环时间随井筒深度的增加,成线性增加趋势,导致施工深部时,提升能力骤降,间接导致深部 1 个段高施工循环时间增加和深部施工工艺流程趋于不合理。如在提升机提升速度为 3~4 m/s 的情况下,提升 1 200 m 深的矸石时,1 次提升循环时间达到 754.31~948.41 s,耗时过长。在施工设备布置确定的情况下,施工深部与施工浅部时相比,井筒提升耗时明显相差很大。

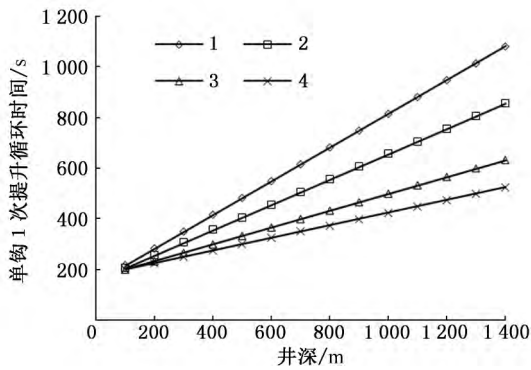


图 4 单钩 1 次提升循环理论时间与井筒深度的关系

1—提升速度 3 m/s;2—提升速度 4 m/s;  
3—提升速度 6 m/s;4—提升速度 8 m/s

由于单次循环时间的增加,1 个段高出矸时间急剧增加。实际工程施工中,提升时间达到甚至超过 20 h,占 1 个段高作业循环时间的 50%~70%,从而导致 1 个段高的施工循环很不合理,施工人员班次出现大量闲置,施工组织难度加大。理论提升能力随井筒深度的变化如图 5 所示。从

图中可以看出,在选定常用的 3~5 m<sup>3</sup> 吊桶之后,理论提升能力就基本确定。随着井筒深度的增加,理论提升能力明显减小。如 4 m<sup>3</sup> 吊桶在井筒深度为 600 和 1 200 m 时,提升能力分别为 32.97 和 22.89 m<sup>3</sup>/h,后者比前者降低了 30%以上。而实际施工中,出矸时间也急剧增加。图 6 为某 1 008 m 深、净直径 8 m 的井筒出矸和清底时间统计数据。

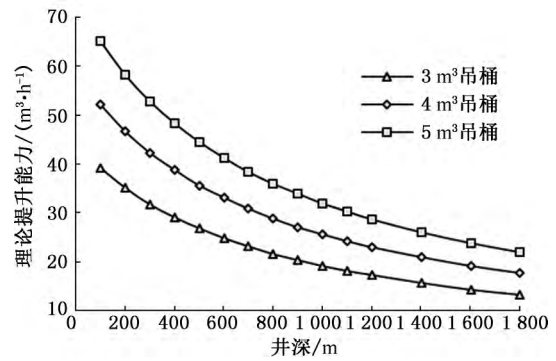


图 5 理论提升能力随井筒深度变化曲线

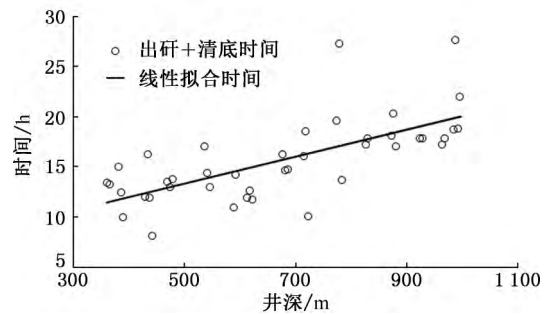


图 6 出矸和清底时间随井筒深度变化实测情况

由图 6 可以看出,在选定提升机及提升容器后,提升能力随井筒深度的增加,逐渐降低,导致相同段高施工中,深部比浅部出矸时间急剧增加。如井深 1 000 m 时,1 个段高平均出矸时间超过了 20 h,是 300 m 以内井深出矸时间的 2 倍以上,

施工效率急剧降低。

### 3.3 井壁厚度及安全制约施工

井壁厚度和安全一直是井筒施工效率的首要影响因素。随着井筒深度的增加,按现有设计理论,会出现一些超厚型井壁。如国内普遍采用的带塑料夹层的双层复合井壁,井筒净直径为10 m时,在井深800 m处,如采用C80混凝土,二级钢筋配筋率为0.4%,按现行理论及规范计算,内壁计算厚度为3.64 m,外壁厚度取0.5 m,井壁总厚度达4.14 m。随着井壁厚度的增大,井筒掘进半径增大,掘进断面积成倍增加,井筒掘进断面利用率(井筒净断面积与掘进断面积之比)急剧下降,有时甚至不到25%。莫斯科矿业学院的研究成果表明<sup>[13]</sup>,当井筒深度为1 000 m时,井壁厚度每减少10 mm,可使矿井建设费用降低1%(采用钢筋混凝土弧板时)和0.25%(采用整体混凝土时)。对于冻结井筒,井壁厚度的增加必然会使井筒掘砌施工费用大幅增加,建井工期大幅延长,并会因此造成冻结壁厚度大幅增加。井筒越深,井壁越厚,深度大处比深度浅处所需的掘进直径越大,同时深处施工和提升能力越小,造成深部井筒施工效率骤降。因此,需要从设计理念和方法上,进行一些改变和研究。

### 3.4 井筒施工环境恶化

深井高温问题已逐渐成为井筒施工中的新的灾害形式。随着井筒深度的加大,这一问题将日益突出。应在前期研究的基础上,通过对国内外深井降温方法的调研,研究和探索我国超深立井凿井工作面降温技术,确保工人劳动条件符合要求。

随着立井井筒掘进深度的加大,工作面温度不断升高。当井筒深度超过1 000 m之后,井下工作面温度会在30.0~50.0℃之间。高温问题一方面会使工人身心健康严重受损,劳动效率将降低30%~40%。前苏联的统计资料表明:工作面温度达到26~30℃时,劳动效率系数为0.8;高于30℃时,劳动效率系数为0.7。天津大学吕石磊对高温条件下的深部地下作业进行了研究,结果表明:在高温环境中作业的工人,劳动生产率会显著下降。深部地下作业时,温度每超过标准工作温度(26℃)1℃,劳动生产率下降6%~8%。江苏徐州矿业集团三河尖煤矿曾因高温、高湿作业环境,工人采掘劳动效率下降了20%~23%,严重时甚至下降了40%~45%。另一方面,随着作业环境温度的升高,事故发生率也急剧

上升。日本在1979年,做过高温环境中,温度与施工事故关系的研究,结果表明:当作业环境温度为30~34℃时,事故发生率是30℃以内时的4.6倍。这些数据表明,井筒工作面热害已成为深井施工中的问题之一,必须予以重视。

其他一些深井施工环境问题也应予以重视,如深井施工防治水。随着井筒深度的加大,水文地质条件更加复杂。要根据现有技术水平,积极探索深井施工条件下的防治水方案,研究工作面快速探水、工作面快速注浆技术与检测技术,对井筒排水系统进行优化设计。

## 4 超大直径深立井施工技术对策分析

随着人们对矿井井筒施工能力要求的不断提高和对安全的进一步关注,解决超大直径深立井施工技术难题时,需要增加施工信息化技术措施,实时精确掌握施工装备工作状况,增强设备性能,增大设备能力,实现井筒施工高效化及少人化。

### 4.1 提升及悬吊系统

在施工超大直径深立井时,提升系统面临的考验将全面加大。提升及悬吊为施工提供安全可靠的作业平台,涉及到井架、提升机等设备和钢丝绳。

传统的提升及悬吊问题以采用较大的安全系数为思路来处理。对于超深立井,钢丝绳安全系数降低到规范规定的数值以下,解决这一问题的思路有:①提高钢丝绳破断力;②减小钢丝绳终端荷载;③减小钢丝绳自重;④实时监测钢丝绳承载性能;⑤抑制提升过程中钢丝绳的摆动。以上思路在目前技术水平下,可通过以下途径实现。

采用欧洲产的casar-eurolift钢丝绳,其最大抗拉强度为2 160 MPa,44 mm直径的钢丝绳破断力1 823.7 kN,可以解决思路①—③的问题,但其增加的能力仍有一定限度。

研究提升过程中钢丝绳的摆动抑制机构,减小及减缓提升过程中过大的摆动,同时对钢丝绳承载性能进行实时监测。这在未来技术水平下,是能够实现的。

解决提升问题的另外一个重要途径是提高提升机静张力及提升速度。这需要研制更高性能的提升机;同时需要采用变频技术来解决施工同一个井筒的深处和浅处时,提升机能力差别较大的问题。

此外,对提升系统依附的基础——凿井井架的布局及其承载性能,需进行合理的设计计算和

监测。对凿井悬吊吊盘和砌壁模板,需进行轻质化研究和设计;可以采用高强低密度的材质进行设计计算,以降低吊盘和模板自重,减小悬吊钢丝绳悬吊荷载和悬吊凿井绞车规格。当然,在悬吊仍有问题时,可以采用迈步式吊盘和迈步式模板来加以解决<sup>[14-16]</sup>。

总的来说,提升及悬吊方面应该做到:井架受力合理化,提升悬吊信息化,提升和悬吊稳控智能化,抓岩清底少人化,砌壁浇注自动化。

#### 4.2 井壁设计及施工

深立井井壁设计理论和方法应区别于现有的井壁设计理论和方法,井壁功能分区和设计理念应该相匹配。井壁在防水问题上和稳定围岩问题等井壁功能上,应分别进行设计;同时深立井井壁设计应依据不同地段岩性,有针对性地进行设计计算。对设计及施工的井壁承载性能及安全性,应进行长期监测,做到井壁安全信息化。

#### 4.3 井筒环境问题

针对高温围岩深立井,解决井筒环境问题的思路有二:①通冷风降温;②采用隔温材料来隔离围岩温度。为此,需研究与之相适应的智能化自动通风方式以及可靠和便于施工的隔温材料。

### 5 结 语

作者对我国立井井筒直径和深度大小与相应的施工技术装备关系作了总结分析;在此基础上,分析了超大直径深立井施工技术难题,并指出了解决施工技术难题的技术思路。

(1)回顾了我国立井井筒直径及深度及其相应的施工技术装备发展历程。指出井筒深度小于600 m,井筒净直径小于5.5 m时,采用1套单钩提升,1台抓岩机以及相应的小型配套设备来施工,即可满足要求;井筒深度小于800 m,井筒净直径小于8.0 m时,以增多和增强各项施工工艺设备数量和能力来实现,通常采用2套单钩提升,1~2台抓岩机装岩,挖掘机清底;井筒深度小于1200 m,井筒净直径小于10.0 m时,应采用2~3套独立提升及相应的高性能装备来进行施工。

(2)分析了数次发展形成的短段掘砌混合作

业方式及其施工装备组合配套格局的优缺点;指出了净直径超过10 m、深度超过1200 m的超大直径深立井施工技术难题为提升及悬吊安全恶化、提升能力骤降制约建井速度、井壁厚度及安全制约施工、井筒施工环境恶化等。

(3)提出了解决超大直径深立井施工技术难题的思路是:井架受力合理化,提升钢丝绳高强度,提升机性能高强及稳控智能化,悬吊稳控智能化,吊盘及模板迈步轻质化,抓岩清底少人化,砌壁浇注自动化,井壁安全信息化,降温通风智能化。同时指出,这是超大直径深立井施工技术发展方向。

#### 参考文献:

- [1] GB 50384—2007,煤矿立井井筒及硐室设计规范[S].
- [2] MT/T 1124—2011,煤矿冻结法开凿立井工程技术规范[S].
- [3] GB 50511—2010,煤矿井巷工程施工规范[S].
- [4] AQ 1083—2011,煤矿建设安全规程[S].
- [5] 国家煤矿安全监察局.中国煤炭工业年鉴(2011)[M].北京:煤炭工业出版社,2012.12.
- [6] 沈慰安,梁恒昌,赵光思.超深立井安全高效施工信息化监测监控[J].中国工程科学,2012,14(2):45-48.
- [7] 牛永胜,王建学.大采深大型矿井井下降温设计研究[J].华北科技学院学报,2014(1):37-41.
- [8] 史天生.深立井井筒施工技术与装备[J].建井技术,1995(3):23-27.
- [9] 刘彦杰,张贵民,范聚朝,等.大直径全深冻结立井机械化配套快速施工[J].建井技术,2014,35(2):21-26.
- [10] 茹新华,季现亮.立井井筒大井径快速掘砌技术的研究与应用[J].山东煤炭科技,2016(5):15-19.
- [11] 李维明.我国煤炭资源开发利用策略研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [12] 刘志强,洪伯潜.改革开放30年煤矿井筒建设技术及装备发展[J].建井技术,2011,32(1/2):4-7.
- [13] 龙志阳.千米深井凿井技术现状及发展新动向[A].周兴旺,程桦,张伟林,等.矿山建设工程技术新进展论文集[C].徐州:中国矿业大学出版社,2009:30-41.
- [14] 沈正芳,王德民,郑青林.立井井壁[M].北京:煤炭工业出版社,1981:1-13.
- [15] 龙志阳,桂良玉.千米深井凿井技术研究[J].建井技术,2011,32(1/2):15-20.
- [16] 刘杰,王志强,邱天德,等.液压整体迈步式凿井吊盘设计研究[J].建井技术,2013,34(3):27-30.