

中国立井冻结井壁技术的发展与展望

杨维好¹, 黄书翔², 王衍森¹, 李伟³, 杨志江⁴, 任彦龙⁴, 韩涛⁴, 张驰¹,
张涛⁴, 骆汀汀⁴, 张雨⁴

(1. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 山东能源集团西北矿业有限公司, 陕西 西安 710018;
3. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014; 4. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:分析了“深部化”和“大型化”趋势对中国深井井筒的设计、施工与运维带来的严峻挑战。总结经验教训,指出冻结法是复杂条件下深井井筒施工最主要的地层堵水与加固工法。回顾了2002年以前国内外冻结井壁技术的状况。概述了2002年以来我国在400~800 m深厚土层中和在500~1 000 m深厚富水岩层中冻结井壁技术取得的重大突破及其应用情况,包括:冻结井筒C60~C100、CF80~CF110高承载力混凝土井壁设计与施工技术,深厚土层中冻结井壁破裂灾害防治技术,深厚富水岩层中低渗漏单层井壁技术等。针对2002年以来中国冻结井壁技术的发展,总结了井壁材料的进步;介绍了横截面、纵剖面井壁结构的发展;归纳了对土层的初始水平水土压力、内层井壁承受的水压、冻结压力、富水岩层中孔隙水引起的井壁水力荷载、井壁竖直附加力等的新认识;简述了井壁力学模型,高径向承载力井壁和内层可缩井壁的力学特性,双层复合井壁之内、外壁厚度的设计理论,含水岩层中单层井壁厚度的设计理论和内层可缩井壁的设计理论等的新进展;介绍了大厚度井壁裂漏机理及防裂技术、井壁腐蚀破坏及防治技术、信息化施工技术,以及内层可缩井壁和低渗漏单层井壁的施工工艺。针对我国在1 500 m超深土层中以及3 000 m深厚富水岩层中冻结井壁技术将面临的挑战,指出应重点研究:深厚土层中冻结井筒掘进期间浅部外壁破裂新机理,超深土的力学特性,高强、高性能筑壁材料与构件,超高承载力井壁结构及其力学特性,超深冻结井壁设计理论与施工技术。

关键词:深厚土层;深厚富水岩层;立井;冻结法凿井;冻结井壁;井壁结构;井壁材料;井壁外载;冻结壁;力学特性;设计理论;施工技术

中图分类号:TD265.3;TD262.1 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)01-0092-23

Development and prospect of freezing shaft lining technology for vertical mine shafts in China

YANG Weihao¹, HUANG Shuxiang², WANG Yansen¹, LI Wei³, YANG Zhijiang⁴, REN Yanlong⁴, HAN Tao⁴,
ZHANG Chi¹, ZHANG Tao⁴, LUO Tingting⁴, ZHANG Yu⁴

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance in Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shandong Energy Group Xibei Mining Company Limited, Xi'an 710018, China; 3. Shandong Energy Group Company Limited, Jinan 250014, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期:2024-12-05 策划编辑:郭晓炜 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2024.1522

基金项目:国家重点研发计划课题资助项目(2016YFC0600904)

作者简介:杨维好(1965—),男,安徽淮南人,教授。E-mail: whyang@vip.sina.com

引用格式:杨维好,黄书翔,王衍森,等.中国立井冻结井壁技术的发展与展望[J].煤炭学报,2025,50(1):92-114.

YANG Weihao, HUANG Shuxiang, WANG Yansen, et al. Development and prospect of freezing shaft lining technology for vertical mine shafts in China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 92-114.



移动阅读

Abstract: This paper delves into the formidable challenges posed by the trends of “deepening” and “scaling up” in the design, construction, and operation of deep mine shafts in China. By synthesizing experiences and lessons learned, it underscores that the freezing method for shaft sinking stands out as the paramount technique for groundwater sealing and formation reinforcement in deep shaft construction amidst complex geological conditions. Additionally, it reviews the state of domestic and international advancements in Freezing Shaft Lining Technology (FSLT) prior to 2002. Furthermore, the paper offers a comprehensive overview of the remarkable advancements and applications of FSLT in deep soil layers spanning from 400 m to 800 m and in deep water-rich rock layers ranging from 500 m to 1 000 m in China since 2002. These include the design and construction technology utilizing C60~C100 or CF80~CF110 high-strength concrete for freezing shaft lining, technologies for preventing and controlling shaft lining rupture disasters in deep soil layers, and single-layer shaft lining technology with minimal leakage in deep water-rich rock layers, etc. Regarding the evolution of FSLT in China post-2002, the paper summarizes advancements in freezing shaft lining materials, introduces developments in cross-sectional and longitudinal freezing shaft lining structures, and generalizes new understandings regarding initial horizontal water and soil pressure in soil layers, water pressure borne by inner shaft linings, freezing pressure, and hydraulic loads induced by pore water in water-rich rock layers, as well as vertical additional forces. It briefly describes the mechanical model of shaft lining, the mechanical characteristics of high radial bearing capacity shaft lining and inner axially compressible shaft lining, the design theories for the thickness of both inner and outer shaft linings in double-layer composite shaft linings, the design theory for the thickness of single-layer freezing shaft linings in water-rich rock layers, and the design theory for inner axially compressible shaft lining. Moreover, it introduces the mechanisms and prevention technologies associated with thick shaft lining fracturing and leakage, corrosion damage and its prevention, information construction technology, as well as the construction technology for inner axially compressible shaft lining and low leakage single-layer shaft lining. In addressing the challenges that FSLT will encounter in 1 500 m ultra-deep soil layers and 3 000 m deep water-rich rock layers in China, this paper emphasizes the need for focused research on new mechanism and prevention technologies for shallow outer shaft lining rupture during frozen shaft excavation in deep soil layers, mechanical properties of ultra-deep soil, high-strength and high-performance building materials and components for shaft lining, ultra-high bearing capacity shaft lining structures and their mechanical properties, and design theories and construction technologies for ultra-deep frozen shaft lining.

Key words: deep soil layer; thick water-rich rock layer; vertical shaft; shaft sinking by freezing method; freezing shaft lining; shaft lining structure; shaft lining material; external load on the shaft lining; frozen soil wall; mechanical properties; design theory; construction technology

0 引 言

向地球深部进军, 开发深埋能源与资源, 利用深地环境与空间, 是保障发展与安全的既定国家战略。以煤炭开发为例, 自 2002 年以来, 在山西、内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、新疆等省区, 占我国新增产能 70% 以上的大型煤矿的煤层埋深已达 500~1 000 m 以上, 必须开凿深、大立井井筒以满足运输大型采矿设备及每年超千万吨巨量煤炭的要求。可见, 建设超深井筒的能力是国家战略需求。

自 2002 年以来, “深部化” 和 “大型化” 是中国井筒建设的显著趋势。在深部化方面, 土层中井筒开凿的深度由不足 400 m(2002 年) 到接近 800 m(2014 年), 不远的将来就需向 1 500 m 深度冲击; 岩层中井筒开凿的深度由 1 000 m 左右 (2000 年) 到接近 2 000 m

(2024 年), 近年就要向 3 000 m 深度进军。例如: 山东万福煤矿主井穿过的土层深度达 755 m, 为世界之最; 在建的山东西岭金矿副井井筒深达 2 005 m, 为亚洲之最。在大型化方面, 在大运量提升和大装备运输需求驱动下, 立井井筒的直径由不足 9 m(2002 年) 向接近 13 m(2024 年) 发展。例如陕西曹家滩煤矿新副立井净直径达 12.5 m。

“深部化” 使井筒穿过更多、更艰难的地层:

- 1) 易胀、缩土层: 湿陷性土, 膨胀土, 冻土。
- 2) 易失稳岩土层: 含水土层, 易风化、泥化岩层, 易溶岩层, 极破碎岩层。
- 3) 难注浆地层: 微孔隙地层, 微裂隙地层, 岩溶地层。
- 4) 难冻结地层: 高温地层, 低冰点地层, 地下水流速大的地层。

“深部化”使井筒施工与运维面临更大、更复杂的荷载:

1) 高水压力: $> 5 \sim 15$ MPa(土层深度 $500 \sim 1\ 500$ m), $> 10 \sim 30$ MPa(岩层深度 $1\ 000 \sim 3\ 000$ m)。

2) 高土压力: 垂直压力 > 30 MPa、水平压力 > 18 MPa(土层深度 $1\ 500$ m)。

3) 高地应力: 垂直应力 > 80 MPa、水平应力 > 40 MPa(岩层深度 $3\ 000$ m)。

4) 高地温: $> 50 \sim 80$ °C。例如高黎贡山隧道措施井地温近 80 °C, 山东龙固煤矿原始地温 58 °C。

5) 高附加荷载: 地下水水位升、降, 围土冻胀、融沉, 围岩采动变形, 井筒内、外大温差等因素, 均可使井壁受到巨大的附加荷载作用。

“大型化”使井筒施工面临更大的掘、支、装、运工作量与难度:

1) 掘进断面积巨量化: 由不足 70 m^2 向超过 200 m^2 变化。

2) 施工装备巨型化: 需采用大井架、大伞钻、大吊桶、大抓斗、大模板, 大提升机、大稳车等。

3) 支护材料高强度: 需采用 CF80 以上高强混凝土、高强钢材、高强锚杆锚索等。

可见, “深部化”与“大型化”对井筒设计、施工与运维提出了严峻挑战。

在深厚土层中, 因土层强度低、富含水且地压大, 普通法凿井难以解决涌水、涌泥、流砂等难题, 沉井法、帷幕法凿井难以解决偏斜、封底等难题。所以, 在大于 200 m 深厚土层中, 可靠的特殊凿井方法只有冻结法和钻井法 2 种。其中, 冻结法因不受掘进直径和深度限制、工期可控性好等优点, 使用更广泛, 占特殊凿井方法总使用量的 90% 以上^[1]。

随深度(水压)增大, 一方面, 井筒穿过的微孔隙地层、微裂隙地层越来越多; 另一方面, 即使是渗透系数较小的地层, 例如中、细砂岩层等, 其涌水量也越来越大。在此情况下, 封堵或疏排地下水的效果就成为事关井筒施工速度与质量, 甚至凿井成败的关键。自 2002 年以来, 陕西亭南煤矿主井和副井, 内蒙古塔然高勒煤矿主井、副井和风井, 甘肃核桃峪煤矿副井和风井, 甘肃新庄煤矿主井、副井和风井, 甘肃邵寨庄煤矿主井、副井和风井, 甘肃花草滩煤矿主井和副井, 宁夏麦垛山煤矿副井, 新疆塔什店煤矿主井、副井和风井, 以及湖北东达磷矿风井等 20 余个井筒, 用普通法+注浆法凿井均失败; 麦垛山煤矿副井又采用普通法+降水法凿井失败, 核桃峪煤矿主斜井因井点降水失败只能顶水掘砌, 成井涌水量曾超过 $1\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

在微孔(裂)隙含水地层中, 注浆法堵水屡试屡败

的根本原因在于: 国内外现有浆液或因粒度大(颗粒团直径大), 或因黏度大, 均难以进入微小孔(裂)隙, 故不能实现渗透注浆, 也就不能形成堵水帷幕。在深厚富水岩层中, 井点抽水法降水鲜能成功的根源在于: 一方面, 实际的富水岩层是非均质、非各向同性的孔(裂)隙介质, 其渗透性是各向异性且严重不均匀的, 而且抽水孔难以贯穿数量众多的高角度裂隙; 另一方面, 中、细砂岩等孔隙含水岩层的持水性强、渗透系数较小, 很难实现用几十个抽水孔在十几个月内大范围地降低井筒周围的地下水位, 但过多的抽水孔和过长的抽水时间在费用与工期方面也难以承受。

各省、区经历上述教训后, 在深厚富水岩层中不得不采用冻结法凿井。正因为封水的效果绝对可靠, 且工期和成本的可控性好, 自 2002 年以来, 在我国深厚富水岩层中冻结法凿井被大量采用^[1]。

冻结法是在地下工程施工之前, 在待施工区周围钻孔, 在孔内下入冻结管, 在冻结管内循环低温盐水, 将目标区内的岩土层冻结成封闭的帷幕——冻结壁, 以抵抗水压力和地层压力, 隔绝地下水与待施工区的联系, 然后在冻结壁的保护下进行掘砌施工的一种特殊施工方法^[2]。

冻结法凿井技术可概括为“两壁、一钻、一机”。“两壁”是指冻结壁和井壁的设计理论与施工技术; “一钻”是指冻结孔施工技术装备; “一机”是指地层冻结制冷技术与装备^[3-4]。其中, 冻结壁和井壁的设计理论与施工技术是冻结法凿井技术的核心。

冻结法自 1883 年被德国工程师波茨舒发明以来, 在世界上广泛应用于矿山工程、市政工程、隧道工程等地下工程施工之中, 目前已发展成为复杂条件下最为可靠的堵水与加固工法^[3]。

在国外, 至今总共只有 8 个、4 个井筒的土层深度超过 400 、 500 m , 冻结土层深度最大为 571 m ; 以岩层为主、冻结深度超过 500 、 600 m 的井筒总共只有 7 个、3 个, 冻结岩层深度最大为 930 m ; 最大掘进直径、井壁厚度分别为 10.50 、 2.25 m ^[3-4]。由于上述井筒分散于多个国家, 其在有关国家的工程实践还很不丰富, 故未形成系统、成熟的深井冻结法凿井理论和技术。

我国自 1955 年首次采用冻结法凿井以来至 2002 年底, 只有 9 个井筒的冻结土层深度超过 350 m , 最大为 383.1 m ; 以冻结岩层为主的只有陕西亭南煤矿主、副井井筒; 冻结岩层深度最大为 461 m ; 最大掘进直径、井壁厚度分别为 10.5 、 2.0 m ; 井壁强度等级最高达 C55^[3]; 在大于 400 m 深厚土层中井壁的外载取值、合理井壁结构的确定、井壁材料的选择和施工

等均无成熟经验可借鉴。

自 2002 年以来, 为开发超 400 m 深厚土层、超 500 m 深厚富水岩层下赋存的煤炭等矿物资源, 我国持续开展了攻关研究, 攻克了 400~800 m 特厚土层中冻结法凿井关键技术、500~1 000 m 深厚富水岩层中冻结法凿井关键技术, 使我国冻结法凿井技术水平居国际领先地位^[3-8]。

下面综述 2002 年以来我国立井冻结井壁技术的发展, 展望未来的技术需求与发展趋势。

1 总体发展状况

2003—2022 年, 我国完成了 650 多个立井冻结工程^[3], 其中冻结井壁技术取得如下重大突破。

1.1 特厚土层中冻结井壁技术

2003—2022 年, 我国建成土层深度超过 400、500、600、700 m 的冻结井筒分别有 88、53、35、6 和 4 个, 创造冻结土层深度世界纪录 587.50、675.60、754.98 m, 创造冻结井壁现浇混凝土强度等级世界纪录 C75、C100、CF80、CF90、CF110。

在特厚土层中冻结井壁技术方面取得的理论和关键技术突破有:

1) 研发了 C60~C100、CF80~CF110 高承载力混凝土井壁技术, 攻克了高水压、高地压下井筒支护重大难题。研究提出了更加符合实际的井壁荷载确定方法; 揭示了 CF80~CF110 钢纤维混凝土井壁的破坏机理、增韧规律、承载与变形特性; 提出了更符合实际的内层井壁和外层井壁新力学模型, 建立了 400~800 m 深厚土层中双层复合钢纤维高强混凝土井壁的设计理论和方法。

2) 发明了高强高性能混凝土黏度调节剂、抗裂防水剂, 解决了 C60~C100、CF80~CF110 混凝土低温早强、高分散、高保坍难统一的难题; 揭示了 C60~C100、CF80~CF110 井壁混凝土温度场与强度场演化规律, 攻克了在-15~-20 ℃ 低温度环境、2~5 mm/h 井帮快速位移严苛条件下的 C60~C100、CF80~CF110 高强、1.7~2.5 m 大厚度混凝土井壁施工技术, 保障了井壁质量。

3) 基于现场实测结果、井壁材料特性、冻结壁材料特性及施工工艺参数, 研发了冻结壁与井壁受力变形的数值反分析及预测预报技术, 实现了冻结法凿井信息化施工, 为施工提供了科学指导。

1.2 深厚富水岩层中冻结井壁技术

2003—2022 年, 我国共建成冻结岩层厚度超过 500 m 的冻结井筒 85 个 (表 1), 主要工程与技术参数如下:

1) 冻结岩层厚度超过 500、600、700、800、900 m 的井筒数量分别为 85、57、28、13 和 5 个。

2) 岩层段冻结井壁现浇混凝土强度等级最高为 C80 和 CF70, 井壁总厚度最大为 2.5 m。

3) 分别于 2013 年、2021 年创造冻结岩层深度世界纪录 950 m (甘肃核桃峪煤矿副井)、990 m (陕西高家堡煤矿西进风井)。

实践中发现, 在岩层中沿用冻结表土段双层复合井壁技术存在如下问题:

1) 外层井壁设计缺乏理论与经验参考。

2) 双层复合井壁自 1976 年以来在我国东部地区大量应用, 至 2002 年很少发现内壁裂漏; 但是自 2003 年以来在西部地区深大冻结基岩井筒中应用后, 内壁开裂严重, 开裂机理不明。

为此, 通过攻关研究, 在深厚富水岩层中冻结井壁技术方面取得如下突破:

1) 揭示了自生温度应力导致大厚度内层井壁大量开裂漏水的新机理; 研发成功纤维混凝土、微膨胀混凝土和井内灌水养护等内层井壁防裂技术。

2) 提出初始不均匀地应力场中外层井壁-岩层冻结壁-含水围岩相互作用力学模型, 探明了外层井壁外荷载随各影响因素的变化规律, 建立了冻结岩层中外层井壁的设计理论。

1.3 深厚土层中冻结井壁破裂灾害防治技术

1987—2022 年底, 在我国华东、华北、东北、华中、西北地区的煤矿、铁矿、铜矿、石膏矿等矿山, 有 140 余个冻结井筒发生了井壁破裂灾害。井壁在土层段及其下风化岩层段呈水平环状压裂, 破裂处混凝土大块剥落, 钢筋向井内折弯, 常伴有漏水 (图 1a)。曾因井壁破裂出现剥落的大块混凝土砸坏罐笼顶盖、罐道屈曲失稳掉落井下、罐道严重变形卡罐和掉落箕斗等严重的提升安全事故。张双楼煤矿副井、城郊煤矿东风井等井筒在破裂处出现涌砂突泥 (图 1b) 重大险情。深厚土层中, 井壁一旦出现涌砂突泥险情, 如不能抓住稍纵即逝的抢险时机, 在短时间内就可能恶化成井壁溃塌事故, 给矿井带来灭顶之灾。例如: 1999 年山东金桥煤矿副井在 242 m 深度处、2013 年河南李粮店煤矿副井在 272 m 深度处, 均由井壁注浆孔初始涌水带砂, 迅速演化为垮井淹矿重大事故, 造成巨大损失。

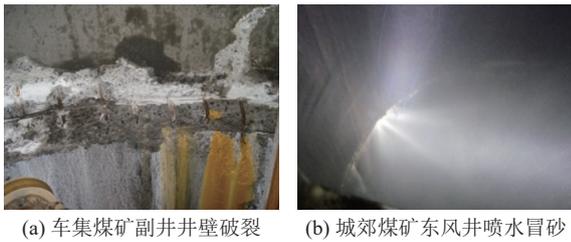
上述井壁破裂灾害, 其数量之多、范围之广、危害之大为国际上所未见, 已成为厚土层地区矿井的重大安全隐患。土层段井壁一旦发生破裂灾害, 不但应急抢险救援时窗窄、风险高、难度大, 而且后期的灾害治理也是如履薄冰、困难重重。因此, 研发深厚土层中

表 1 截至 2022 年底我国岩层厚度大于 500 m 的冻结井筒

Table 1 Shafts constructed by freezing method in rock layers thicker than 500 m in China by the end of 2022

序号	井筒名称	直径/ m	深度/ m	土厚/ m	井壁最大 厚度/m	冻结 深度/m	开工 年份	序号	井筒名称	直径/ m	深度/ m	土厚/ m	井壁最大 厚度/m	冻结 深度/m	开工 年份
1	胡家河煤矿主井	6.5	539.0	12.0	0.95	548	2007	44	梵王寺煤矿风井	7.5	651.3	179.3	1.55	656.3	2011
2	胡家河煤矿副井	8.5	568.3	11.9	1.10	578	2007	45	丁家梁煤矿主井	5.0	904.0	278.6	1.10	653	2011
3	胡家河煤矿风井	7.0	538.4	10.5	0.95	541	2008	46	丁家梁煤矿副井	6.8	929.0	278.2	1.40	651	2012
4	新上海庙1号煤矿主井	6.0	516.0	41.5	1.60	532	2008	47	丁家梁煤矿风井	5.5	904.0	270.3	1.20	662	2012
5	新上海庙1号煤矿副井	8.0	546.0	42.7	2.05	554	2008	48	营盘壕煤矿主井	9.4	849.5	43.6	2.50	865	2012
6	新上海庙1号煤矿风井	6.0	518.9	41.5	1.60	525	2008	49	营盘壕煤矿副井	10.0	789.5	48.4	2.45	805	2012
7	纳林河二号煤矿主井	6.0	610.0	81.8	1.35	631	2008	50	营盘壕煤矿风井	7.5	757.0	43.8	2.00	772	2012
8	纳林河二号煤矿副井	7.0	582.4	83.94	1.80	600	2008	51	石拉乌素煤矿主井	9.0	748.0	6.6	1.95	760	2012
9	纳林河二号煤矿中风井	6.5	565.0	81.4	1.65	580	2008	52	石拉乌素煤矿副井	10.0	718.0	6.6	2.10	730	2012
10	母杜柴登煤矿主井	6.5	762.0	124.7	1.80	777	2008	53	石拉乌素煤矿风井	7.5	716.3	7.1	1.70	728	2012
11	母杜柴登煤矿风井	6.5	664.5	128.9	1.15	675	2008	54	新庄煤矿主井	9.0	790.5	30.8	2.20	673	2012
12	母杜柴登煤矿副井	9.4	711.0	124.7	2.00	721	2009	55	新庄煤矿副井	9.0	1025	209.8	2.20	908	2012
13	麦垛山煤矿风井	6.5	568.0	50.0	1.10	518	2009	56	新庄煤矿风井	7.5	966.6	210.6	1.90	910	2012
14	塔然高勒煤矿主井	8.2	645.1	4.0	1.30	658	2009	57	邵寨煤矿副井	8.0	878.0	317.9	2.20	815	2012
15	塔然高勒煤矿副井	9.0	603.1	4.2	1.50	614	2009	58	邵寨煤矿风井	6.0	864.5	293.8	1.75	830	2012
16	塔然高勒煤矿风井	6.0	569.0	3.7	1.00	579	2009	59	邵寨煤矿主井	5.5	866.0	289.7	1.55	750	2012
17	马鞭山铁矿措施井	4.5	604.0	0.0	0.40	610	2009	60	白家海子煤矿副井	10.5	755.0	45.3	2.50	770	2012
18	泊江海子煤矿主井	9.5	645.5	7.0	1.80	556	2009	61	白家海子煤矿中回风井	7.0	704.0	45.0	1.60	719	2012
19	泊江海子煤矿副井	10.5	611.7	6.9	2.05	564	2009	62	白家海子煤矿主井	9.5	765.0	45.4	2.30	780	2013
20	泊江海子煤矿风井	7.6	569.0	6.9	1.40	556	2009	63	白家海子煤矿中进风井	6.8	679.0	45.4	1.50	715	2013
21	葫芦素煤矿主井	9.6	669.5	42.93	0.90	525	2009	64	红庆河煤矿主井	9.5	787.0	14.8	2.10	695	2013
22	葫芦素煤矿副井	10.0	702.7	41.1	0.95	525	2009	65	红庆河煤矿副井	10.5	718.0	10.35	2.20	694	2013
23	葫芦素煤矿中央风井	8.0	681.3	41.05	1.00	672	2009	66	红庆河煤矿风井	7.6	708.0	9.8	1.70	665	2013
24	孟村煤矿主井	6.5	570.0	17.0	0.95	580	2009	67	红庆河煤矿措施井	9.5	787.0	14.8	2.10	695	2013
25	孟村煤矿副井	8.5	600.0	17.0	1.10	610	2009	68	大海则煤矿主井	9.6	702.0	22.0	2.30	718	2013
26	孟村煤矿风井	7.5	610.0	17.0	1.05	620	2010	69	大海则煤矿1号副井	10.0	661.0	16.96	2.30	678	2013
27	门克庆煤矿主井	9.6	785.0	67.3	1.30	802	2010	70	大海则煤矿2号副井	10.0	667.0	13.2	2.35	692	2013
28	门克庆煤矿副井	10.0	755.5	54.5	1.30	772	2010	71	大海则煤矿回风井	8.0	668.9	25.85	2.05	686	2013
29	门克庆煤矿风井	8.0	736.4	69.0	1.00	747	2010	72	油房壕煤矿风井	7.6	613.5	5.7	1.60	630	2013
30	巴彦高勒煤矿主井	8.2	679.3	109.2	2.20	592	2010	73	招贤煤矿副井	8.4	587.6	39.0	1.10	515	2013
31	巴彦高勒煤矿风井	7.0	624.0	132	1.95	635	2010	74	招贤煤矿风井	6.0	564.0	37.09	1.10	514	2013
32	巴彦高勒煤矿副井	9.0	643.4	90.52	2.35	655	2011	75	红柳煤矿副井	9.4	946.0	21.56	1.65	588	2013
33	平煤—矿北三回风井	6.5	1075	91.0	0.80	660	2011	76	红柳煤矿风井	6.0	893.0	22.2	1.15	587	2013
34	平煤—矿北三进风井	7.5	672.0	91.0	1.00	672	2011	77	巴拉素煤矿中央风井	8.0	541.2	6.6	1.65	555	2014
35	纳林河二号煤矿2号副井	10.5	588.5	76.74	2.50	521	2011	78	塔什店煤矿风井	5.5	476.0	74.5	1.35	505	2014
36	核桃峪煤矿副井	9.0	950.0	214.6	2.20	950	2011	79	塔什店煤矿主井	5.5	742.5	100.0	1.35	500	2015
37	核桃峪煤矿风井	7.0	975.0	216.5	1.65	916	2011	80	葫芦素煤矿西风井	5.5	650.0	41.1	0.80	673	2016
38	小庄煤矿2号副井	6.5	625.8	246.0	1.40	533	2011	81	巴拉素煤矿主井	9.6	590.0	5.0	2.15	610	2016
39	小庄煤矿风井	7.5	472.0	246.0	1.60	533	2011	82	巴拉素煤矿副井	10.5	533.6	5.56	2.00	548	2016
40	高家堡煤矿主井	7.5	859.0	26.5	1.85	791	2011	83	纳林河二号煤矿2号风井	6.0	616.6	72.40	1.50	555	2018
41	高家堡煤矿副井	8.5	841.5	22.8	2.00	850	2011	84	高家堡煤矿西进风井	6.5	986.6	56.50	2.10	990	2019
42	高家堡煤矿中央风井	7.5	821.5	22.6	1.90	830	2011	85	高家堡煤矿西回风井	6.5	927.8	51.06	1.85	818	2019
43	梵王寺煤矿主井	8.5	651.7	157.9	1.95	662	2011								

注：1.表中厚度 > 150 m 的土层均为黄土；2.均为单圈孔+(辅助孔)冻结。



(a) 车集煤矿副井井壁破裂 (b) 城郊煤矿东风井喷水冒砂

图 1 土层段井壁破裂实拍

Fig.1 Actual photographs of shaft lining rupture in soil layer section

井壁破裂灾害防治技术,对矿井的安全、正常生产至关重要。

2002 年以来,随着我国冻结井筒土层厚度突破 400 m,并不断向 600、800 m 挺进,土层段井壁更长、受力更大更复杂,灾害的波及面越来越广,防治灾害的难度也越来越大、成本也越来越高。原来的井内壁后注浆、地面壁后注浆、滑动可缩井壁等防治技术已难适应。因此,必须创新井壁破裂灾害防治技术。

研究表明,在深厚土层中,应采用适应地层沉降的井壁结构来预防井壁破裂灾害。据此,发明了适应土层沉降、竖向刚度可调的内层可缩冻结井壁结构技术^[9-10],建立了内层可缩井壁的设计理论和方法^[11-13],攻克了深厚土层中井壁破裂灾害防治重大难题。

内层可缩冻结井壁结构技术已用于 40 多个新建井筒,防止了井壁破裂灾害,创造了深厚土层中井壁竖向让压装置安装深度 705 m(冻结井筒)世界纪录。与此前国外最先进的 AV 井壁、国内最先进的滑动可缩井壁技术相比,施工速度加快逾 1 倍、造价降低 50% 以上。

对于在役井筒,开发出了用钢质井壁可缩装置改造井壁结构防治井壁破裂灾害技术,成功应用于近 20 个井筒。与此前技术比,仅直接费用增加 10%~20%,却成倍提高了治理有效期。

1.4 深厚富水岩层中低渗漏单层井壁技术

目前,不仅在不稳定含水土层中,而且在稳定的含水岩层中,冻结井筒很普遍地采用双层复合井壁结构^[2](图 2)。然而,在深、大冻结井筒中,传统的双层复合井壁暴露了两大缺陷:

一是井壁总厚度太大。以高家堡煤矿西进风井为例,井筒净直径为 6.5 m,井筒深度为 957.6 m,冻结深度为 990 m。如果该井筒采用双层复合井壁,按现行规范设计计算的结果为:外层井壁采用 C40 钢筋混凝土,厚度为 0.4 m;内层井壁采用 C75 钢筋混凝土,厚度为 3.2 m。井壁总厚度高达 3.6 m,这将使井筒造价剧增至难以承受的地步。

二是大厚度的内层井壁开裂漏水严重。有的井

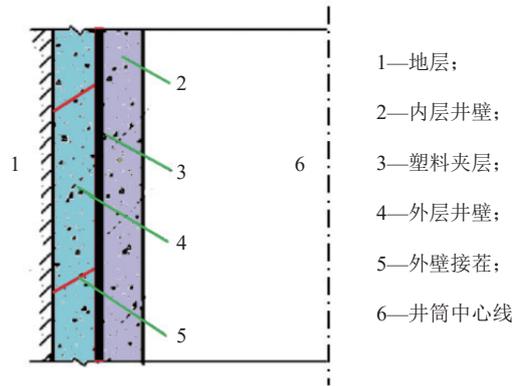


图 2 双层复合井壁结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of double-layer composite shaft lining structure

筒漏水量高达 $130 \text{ m}^3/\text{h}$,井壁注浆治水费钱费时。

产生上述问题的根本原因在于:含水岩层段井筒支护理念不合理,选用的双层复合井壁不能充分利用围岩的自稳性进行支护。

为此,发明了低渗漏单层冻结井壁技术^[14],破解了深厚富水岩层中传统双层复合井壁厚度过大且漏水严重的重大技术难题。揭示了含水岩层中井壁水力荷载的形成机理和规律,首次建立了井壁抗拉、抗压、抗剥离三重验算设计方法;开发了“控温+补偿收缩+预压应力”井壁混凝土防拉裂技术及“钢质接茬板+界面预压应力+超细水泥注浆”井壁接茬抗渗技术,形成“工前防漏,工中检漏,工后堵漏”井壁防漏成套新工艺^[15-21]。成果用于 17 个井筒,井筒壁厚减薄近 50%、造价降低约 30%,创造了单层冻结井壁支护深度 785 m 的世界纪录,至今冻结段井筒涌水量均小于 $4 \text{ m}^3/\text{h}$,满足验收规范要求。

2 冻结井壁材料的发展

在深厚复杂岩、土层中,主要的筑壁材料有:

1) 主体材料:高强混凝土。它是主承载体^[22]。研究表明:因其本体的抗渗性能优异,故也能满足井壁高抗渗要求^[23-24]。选用抗腐蚀水泥、加入合适的添加剂可配出抗腐蚀混凝土。

2) 增强材料:钢板、铸钢弧板、型钢、钢管、钢筋。它也能提高井壁的韧性;与高强混凝土复合,可形成钢骨-混凝土井壁^[25-28]、钢板-混凝土井壁^[29]、铸钢弧板-混凝土井壁^[30]等高承载力井壁。

3) 增韧材料:碳纤维、碳纤维等纤维材料。它能提高井壁混凝土的韧性和抗拉强度^[26-27,29-31]。

4) 辅助材料:让压、保温用泡沫材料;解除约束用塑料板、柔性涂层;滑动、密封用沥青产品;让压、可缩用木材、橡胶、塑料、钢结构等。研究表明^[32]:喷涂

速凝高弹橡胶沥青防水涂料作为井壁喷膜夹层,兼具井壁防水、养护外壁混凝土和解除内外壁间约束的功能。

上述材料必须根据不同工程条件进行合理匹配,才能发挥各自所长,达到最佳效果。

在深厚土层中外壁施工常面临严苛的条件^[33]:

- 1) 井帮温度低达 $-10\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。
- 2) 井内空气温度在 $0\sim-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。
- 3) 井帮以 $2\sim5\text{ mm/h}$ 速度向井心位移。
- 4) 外壁厚达 1.0 m 以上,但仅在靠近模板处振捣器可及,可振捣区小于 0.2 m 厚。
- 5) 冻结压力大、增长快。
- 6) 混凝土防裂、抗腐蚀要求高。

这就要求研制高强、早强、大流态、低水化热、高韧性、抗裂甚至抗腐蚀的混凝土材料。这些严苛要求相互间多有冲突,对井壁施工形成严峻挑战。

限于困难的施工条件,2002年之前,国内、外冻结井壁混凝土的强度等级最高为C55。因此,在深厚土层中,国外普遍采用钢板或铸钢(铁)弧板-混凝土组合材料井壁;山东龙固煤矿副井等井筒在初步设计时采用了钢板-混凝土井壁^[33]。这类冻结井壁的施工工艺复杂、施工速度慢、造价高昂。

2004年之后,通过研发高强高性能混凝土黏度调节剂、抗裂防水剂等矿物添加剂和化学添加剂,我国解决了混凝土低温早强、高分散、高保坍难统一的难题;研究掌握了井壁混凝土温度场、强度场以及冻结压力的变化规律;进而开发出坍落度达 $210\sim240\text{ mm}$ 、工作性优良,且1、3、7 d强度达设计强度40%、70%、90%以上的冻结井壁高强、高性能混凝土施工技术^[34]。龙固、郭屯、赵固二号煤矿副井井壁混凝土强度等级先后达到C70^[33]、C75^[35]、C80^[7],在赵固二号煤矿井壁试验段达C100^[7]。据此,我国在深厚土层冻结井筒中取消了钢板,采用高强高性能混凝土井壁节省了巨额费用。

研究表明^[33,35-36]:深厚土层中,新筑外壁内温度可超过 $50\sim80\text{ }^{\circ}\text{C}$;壁后冻土可融化 $200\sim500\text{ mm}$ 宽;正常浇筑的井壁混凝土,其同龄期强度比标养试块大;有压应力比无压应力下养护所得混凝土强度更大。

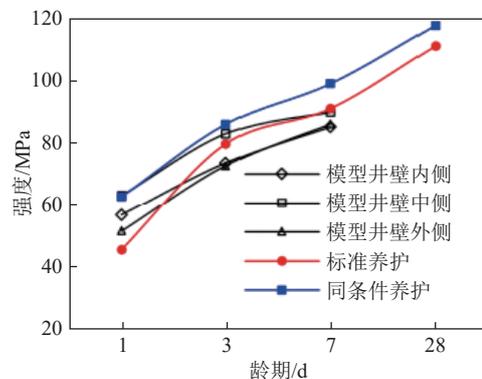
2006年杨维好等在模型实验中发现C60素混凝土井壁在瞬间发生粉碎性破坏。井壁脆性破坏是来不及抢修的,可导致深厚土层中井筒急速垮塌,来不及撤离井下人员,十分危险。鉴于强度等级增至C80时,井壁脆性破坏风险大增,仅按混凝土结构设计规范^[37]要求适当提高配筋率是不够的,况且钢筋太密时外壁施工难度很大,因此加入钢纤维提高混凝土的

韧性是十分必要的。

此前,国内外尚无钢纤维高强混凝土冻结井壁先例。为此,中国矿业大学等单位开展了大量配合比及工艺试验(图3),揭示了CF60~CF110钢纤维混凝土井壁温度场和强度场的变化规律,研发了适应上述严苛条件的井壁钢纤维高强混凝土施工技术。山东龙固煤矿北风井、万福煤矿副井的混凝土强度等级先后达到CF80^[38]、CF90^[39],在山东龙固煤矿东副井试验段达CF110。外壁1、3、7 d强度分别达到设计强度50%、80%、90%以上,混凝土坍落度为 $180\sim220\text{ mm}$ 。用钢纤维高强混凝土取代普通高强混凝土筑壁,井壁韧性和抗拉强度分别提高 $2\sim4$ 倍和 $30\%\sim50\%$,既有利于消减井壁发生脆性破坏的风险,还利于防止大厚度井壁开裂。



(a) 井壁强度增长大型模拟试验



(b) 混凝土强度增长曲线

图3 井壁钢纤维高强混凝土配合比及工艺试验

Fig.3 Mix proportion and process test of steel fiber reinforced high-strength concrete for shaft lining

3 冻结井壁结构的发展

3.1 横截面结构的发展

说到井壁结构,首先必须厘清井壁“层”的定义:径向不含软弱夹层、由主承力材料、构件浇筑、装配而成,且具有相同的封水与径向承载功能的井筒支护结构称为井壁的一层。

早期的冻结井壁是单层的,可称为第1代单层井壁。随水压增大,第1代单层井壁的接茬与裂缝漏水

严重,不得已内套一层井壁,从而发展为第 1 代双层井壁。因内壁冷缩时受外壁约束而产生约束温度应力,常使井壁开裂,故第 1 代双层井壁随水压增大也漏水严重。后来研究采用在内、外壁间铺设塑料板等材料以解除或削弱外壁对内壁的约束,解决了约束温度应力致裂内壁的问题,从而发展出了第 1 代双层复合井壁。在深厚土层中,考虑到如下因素,一般采用双层复合井壁结构(图 2):

- 1) 因强度低,围土对井筒支护无利用价值。
- 2) 因施工条件恶劣、受力复杂,外壁可能存在较多施工缺陷。
- 3) 在深厚土层中,如果没有内壁,外壁的缺陷有导致井筒突水、突泥进而垮井的可能。这种可能性尽管极低,但一旦成真后造成的损失巨大。

研究表明^[40],在内壁采用补偿收缩混凝土、纤维混凝土等可靠的防温度裂缝措施条件下,可取消双层复合井壁结构的塑料夹层,这样就变成了第 2 代双层井壁。无论是双层井壁,还是双层复合井壁,均存在造价高昂的缺点^[3-4]。

在深厚富水岩层中,采用双层复合井壁结构或第 2 代双层井壁结构均是可行的,但造价高昂;考虑到如下因素,在解决好接茬抗渗、混凝土防裂问题的前提下,杨维好等发明并在 17 个井筒成功应用了新一代单层冻结壁结构——低渗漏单层冻结井壁结构^[17,19,41](图 4)。

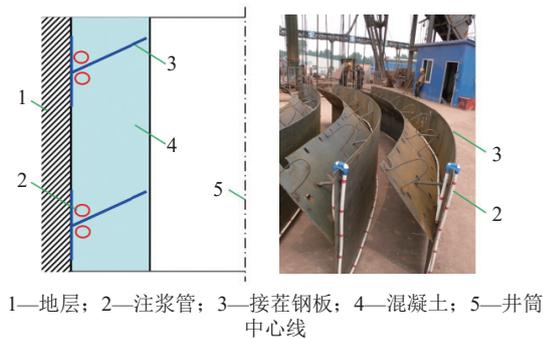


图 4 低渗漏单层井壁示意
Fig.4 Schematic diagram of single-layer shaft lining with low-leakage

- 1) 围岩强度大,对井筒支护有重要利用价值。
- 2) 围岩稳定性好,即使井壁因少量施工缺陷而漏水,也不会出现突泥、垮井险况。

3.2 纵剖面结构的发展

由前文知,在可能发生沉降的深厚土层中,应采取“让”而不是“抗”的策略来防止井壁破裂灾害,即:应采用能适应地层竖向沉降的井壁结构。实现“让”的途径一个是滑动,一个是可缩。前者要求滑动层强

度越低越好,但是如果采用近于液态的滑动层,虽然滑动让压效果好,但井壁施工工艺十分复杂,使造价剧增。

2002 年之前,我国开发的注浆加固地层技术、滑动可缩井壁技术等^[42],均未能有效地预防冻结井壁破裂灾害。滑动可缩井壁(图 5)造价高、施工复杂,于 1993 年首次在安徽祁南煤矿应用,共应用了 8 个井筒;正是由于采用了强度很高的沥青板,难以滑动,其中祁南煤矿副井等 3 个井筒在冻结壁解冻期间受到融沉附加力作用就压裂了。因此,亟需创新能适应深厚土层沉降的冻结井壁技术。为此,2003 年杨维好等发明了能有效防止内壁破裂且施工简便、造价低的内层可缩井壁结构^[9-10](图 6),并于 2004 年首次在城郊煤矿东风井成功应用内层可缩井壁技术。

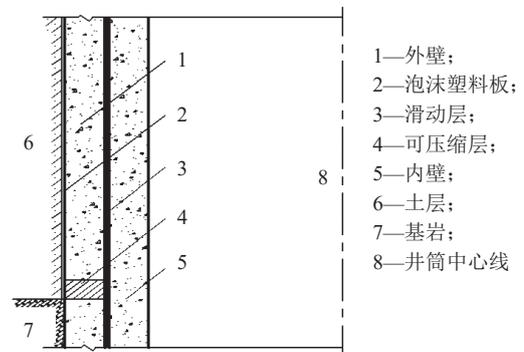


图 5 滑动可缩井壁示意

Fig.5 Schematic diagram of a shaft lining with relative sliding between the inner shaft and axially compressible outer lining

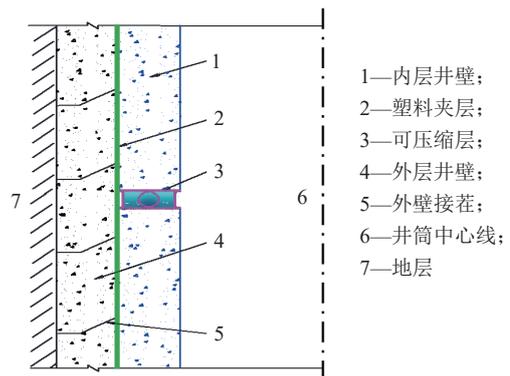


图 6 内层可缩井壁结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of inner retractable shaft lining structure

4 井壁外载理论的发展

4.1 土层的初始水平水土压力

异于岩层,在深厚土层中,可认为初始水平水土压力 p_h (也称永久地压)是二向相等的。规范^[43]中取 $p_h = 0.013H$ 。杨维好等^[33]认为可取 $p_h = 0.012H$ 。

式中, p_h 为初始水平水土压力, MPa; H 为计算点埋深, m。

4.2 内层井壁承受的水压

内层井壁的厚度是按承受的折减水压 p_{wj} 计算的, $p_{wj} = k_z p_w$ 。式中, k_z 为水压折减系数; p_w 为围岩中原始静止地下水压力。2017 年之前, 规范^[44]中 k_z 取 0.81~1.00。杨维好等的理论研究与实测结果表明: 在内壁漏水量满足验收规范^[45]要求的情况下, $k_z=0.95\sim 1.00$ 。该结果被新规范^[43]采纳。

4.3 冻结压力

冻结压力 p_d 为掘砌过程中外壁外缘受到的法向外载, 与冻结壁变形、冻胀等众多因素有关。外壁厚度主要受 p_d 控制。 p_d 及其增长规律与埋深、筑壁后时间、地层特性、井壁参数、冻结壁参数、壁后泡沫塑料板参数、掘进参数等相关。对 p_d 缺乏深入研究与认识, 是历史上外壁压坏事故屡屡出现的重要原因。2002 年之前, 我国只有浅于 400 m 土层情况下 p_d 的经验值, 为 $(0.7\sim 0.9)p_h$ ^[42]; 未见有关于冻结岩层中 p_d 及其增长规律的报道。

4.3.1 特厚土层中 p_d 的变化规律

荣传新等^[46-47]开展了土层冻结壁-外壁相互作用理论研究, 结果表明: 济西生建煤矿主井 385.7 m 深处, p_d/p_h 为 0.84(理论)、0.90(实测)。对于 > 400 m 特厚土层, 王衍森等^[48-50]开展了冻结壁-泡沫板-外壁相互作用理论研究, 结果表明: 对稳定蠕变型冻结壁, 泡沫板的存在将有效地延迟 p_d 的增长, 在一定的支护刚度条件下, 可以有效地降低 p_d 的最终稳定值; 而对非稳定蠕变型冻结壁, 泡沫板尽管可以延迟 p_d 的增长, 但是最终 p_d 将与 p_h 相等, 如图 7 所示。

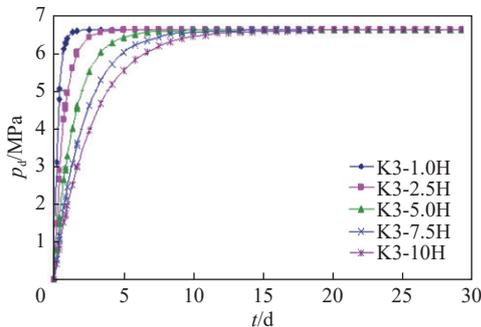


图 7 冻结压力的解析解曲线

Fig.7 Analytical solution curves of freezing pressure

大量的现场实测结果表明^[51-58]: 特厚土层中 p_d 的增长主要集中在外壁浇筑后 10 d 内, 该阶段 p_d 可达到最大值的 80%; 此后 10~30 d 处于非线性增长期, 并基本达到最大值; 随深度增加, p_d 增长速度加快, 且 p_d/p_h 快速趋近于 1, 甚至超过 1(局部应力集中时), 如

图 8 所示。因此, 设计特厚土层外壁时, 宜取 $p_d=p_h$, 且外壁 7 d 宜达到设计强度的 90%。

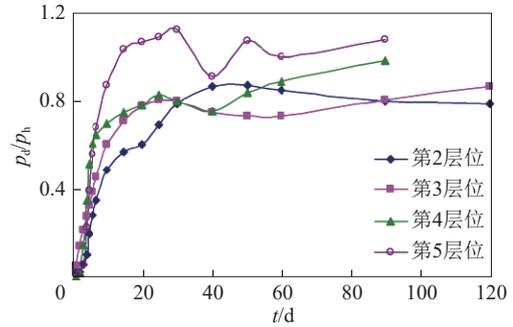


图 8 实测冻结压力与永久地压之比随时间的变化^[54]

Fig.8 Variation of the ratio of measured freezing pressure to permanent geostatic pressure with time^[54]

4.3.2 深厚岩层中 p_d 的变化规律

富水软岩未冻时的强度一般大于 $-10\sim -25\text{ }^\circ\text{C}$ 冻结黏土层的强度, 而冻结后的强度能提高 30%~150% 以上, 即可达 20~30 MPa 以上。张驰、杨维好等的研究^[19,21,41,59]表明: 埋深小于 1 000 m 时, 岩层冻结壁在绝大多数情况下处于弹性状态, 很少处于弹塑性状态, 极少情况下有少量衰减型蠕变变形, 但一般无非衰减型蠕变变形, 换句话说: “埋深小于 1 000 m 时, 岩层冻结壁一般可以认为是稳定的”。在此情况下, 冻结岩层中 p_d 主要取决于砌壁时工作面空帮段高度 h_c 和下一段高爆破时外壁的刚度 k_g , h_c 越小、 k_g 越大则 p_d 越大; 反之, 则 p_d 越小, 并趋向于 0。

4.4 富水岩层中孔隙水引起的井壁水力荷载

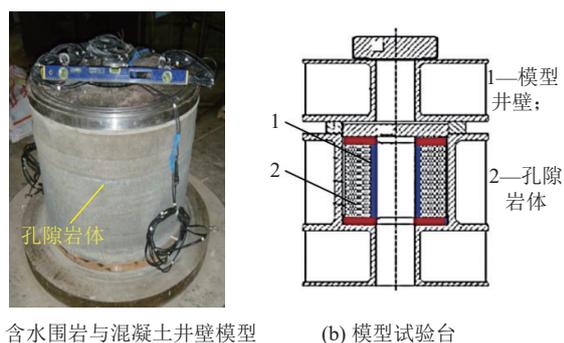
随埋深的增大, 高压孔隙水破坏岩石地下结构衬砌的问题日益凸显。孔隙水压引起的地下结构的法向外载称为地下结构的水力荷载 f_w 。此前, 国内外对 f_w 缺乏研究, 致使孔隙含水岩层中单层井壁的外载取值无据可依。柏东良、杨维好、韩继欢等的研究(图 9) 结果^[41,60-63]表明:

1) f_w 的形成机理-孔隙水压致胀。类同于围岩热胀冷缩引起的结构荷载, 孔隙水压变化致胀或致缩围岩孔隙, 进而引起地下结构荷载变化。

2) f_w 与孔隙水压成正比。围岩的孔隙率越大, f_w 越大; 衬砌相对于围岩的变形刚度(厚度与弹性模量)越大, f_w 越大; 围岩的泊松比越大, f_w 越大; 衬砌的泊松比对 f_w 影响不显著。 f_w 可表示为

$$f_w = Kn p_w \quad (1)$$

式中: n 为围岩与井壁交界面的孔隙率; p_w 为围岩的原始地下水压力; K 为与各影响因素有关的系数, 一般地 $K=1.0\sim 2.3$, 在常见参数范围内可偏安全地取 $K=1.7\sim 2.3$ 。



(a) 含水围岩与混凝土井壁模型 (b) 模型试验台

图 9 含水围岩中井壁受力模拟试验

Fig.9 Stress simulation tests of shaft lining in water-bearing surrounding rock

3) 在孔隙水压作用下, 薄衬砌会与围岩剥离开, 进而发生失稳破坏。因此, 含水岩层中应按“内缘防拉裂与压裂、外缘防剥离”三重验算设计方法设计单层井壁, 以保证井壁有足够的强度与刚度。

4.5 竖直附加力与深厚土层中井壁破裂机理

竖直附加力 f_v 是指土层相对井壁下沉情况下土层作用于井壁外表面上竖直向下的面力。产生 f_v 的原因主要有: 采矿或采水导致的土层疏排水固结沉降、冻土融化下沉、土层受采动影响沉降、地下水下渗水夯作用和井壁热胀冷缩等^[64]。前 3 者引起的 f_v 分别称为疏水附加力、融沉附加力和采动附加力。

1987 年发生表土段井壁破裂灾害后, 崔广心首先揭示了井壁破裂机理^[42]: 按之前的井壁设计理论, 井壁自重主要由土层承担; 但是在特殊条件下, 土层不但不承担井壁自重, 反而对井壁作用有竖直附加力 f_v , 使井壁竖向受力过大而破裂。

2006 年之前, 学者们认为: 采矿引起土层水压下降情况下, 疏水附加力是致裂井壁的主因^[65]。后来发现抽采土层中地下水时, 疏水附加力也可致裂井壁。河南省城郊煤矿东风井于 2015-05-18, 因附近的电厂抽采砂层水而在 199.5 m 深度处破裂。

崔广心、付厚利对深厚土层冻结壁融沉与井壁的耦合作用进行了系统研究, 获得了融沉附加力的变化规律和数值, 发现在特定地质与工程条件下融沉附加力足以压裂井壁^[66]。2006 年江苏李堂煤矿主、副井井壁因此而破裂证实了该发现。

2018-05-25, 山东省新阳煤矿副井井壁在 290 m 深度左右破裂出水。随后发现主井井壁也已破裂了。杨维好等认为: 因新阳煤矿投产不久且矿井涌水量很小, 疏水附加力是次要因素; 主要是附近的两翼采区的开采使井筒受到采动附加力作用而破坏。中国矿业大学的研究^[67-69]表明: 因按现行规范留设的井筒保护范围不足 (主要是土层移动角取 45° 不符合实际, 最

新研究结果为 33° 左右), 采矿引起井筒周围土层移动, 使井壁受到水平与竖直附加力作用, 致使井壁在附加力和自重的共同作用下发生非对称的压弯破坏或对称的压裂破坏。

影响 f_v 的主要因素有: 井壁结构形式、井壁的几何与物理力学参数、井壁周围土层的物理力学性质、土层沉降的影响深度范围与沉降量等等。中国矿业大学的研究表明: f_v 可能很大^[65], 一般地, 当土层厚度 $\delta_s < 100$ m 时, 硬“抗” f_v 在技术上是可行的, 有时在经济也是合理的; 当 $\delta_s > 150$ m 时, 硬“抗” f_v 有时在技术上虽可行, 但肯定不经济; 当 $\delta_s > 300$ m 时, 硬“抗” f_v 不但技术上基本不可行, 而且经济上也极不合理, 应采用能适应地层竖向沉降的井壁结构, 井壁竖向以让为主、先抗后让^[42,70-71]。这为井壁破裂灾害的防、治指明了方向。

5 井壁设计技术的发展

立井井筒是矿井的咽喉。井壁是井筒的安全屏障, 是矿井最重要的地下结构物。井壁一旦垮塌, 将会给矿井带来灭顶之灾。对井壁的要求为:

- 1) 免修性: 成形好, 变形小, 免返修。
- 2) 安全性^[43]: 不产生强度破坏, 不产生屈曲失稳破坏, 不产生腐蚀破坏。

3) 封水性: 单层井壁、双层井壁之内壁、双层复合井壁之内壁均应基本无接茬漏水、无裂缝漏水, 按验收规范^[45]全井筒涌水量不大于 $6 \sim 10$ m³/h。

- 4) 经济性、易筑性和光滑性。

在深厚富水、软弱、不稳定土层与岩层中, 面临高地压、高水压、强腐蚀、大沉降、软弱围岩等恶劣条件, 势必要求:

- 1) 井壁材料具有高强度、高耐久性、高抗渗性和高韧性。
- 2) 井壁结构具有高承载力、大厚度、高封水性, 且能适应凿井期围岩径向快速大变形和适应运营期地层竖向大沉降。

这对井壁的设计与施工提出了严峻的挑战。

5.1 井壁的力学模型

关于井壁的力学模型有如下新认识:

1) 对于深厚土层中的井筒, 一般均有井壁与围土的剪切模量之比 $G_s/G_u > 10$ 。研究表明^[72], $G_s/G_u > 10$ 时, 可不考虑井壁与围土的法向相互作用, 即: 可采用荷载-结构法设计井壁, 荷载取为 p_h 。

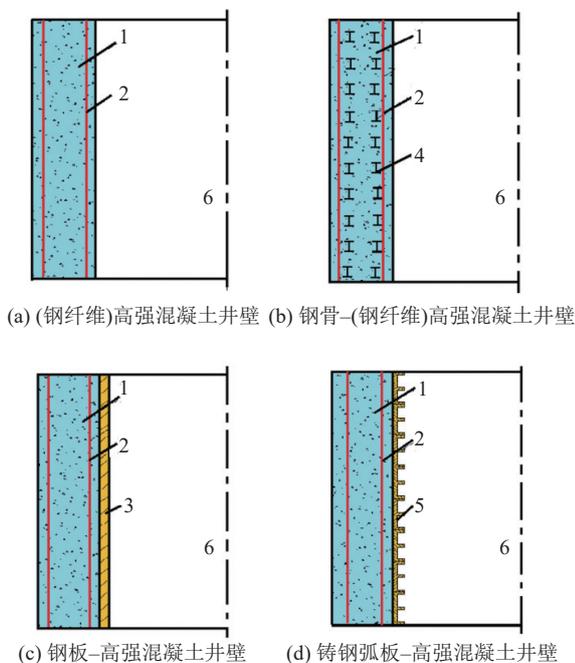
2) 综合施工与运营期受力情况, 内壁受力接近广义平面应变状态; 外壁受力接近平面应力状态; 岩层中单层冻结井壁接近广义平面应变状态。

3) 至今,在我国煤矿混凝土井壁设计中,强度验算仍采用古典的第 4 强度准则^[43],未正确反映混凝土的多轴强度特性^[37]。杨维好、任彦龙等的研究^[33,73]表明:在某些应力状态下,采用第 4 强度准则校核,会低估混凝土井壁的极限承载力。以净直径 8 m、壁厚 1.8 m 的 C80 混凝土井壁为例,在平面应变模型下,和采用第 4 强度准则相比,采用 GB 50010《混凝土结构设计规范》^[37]推荐的 G-W 多轴强度准则计算所得井壁水平极限承载力提高了 21.5%。因此,建议在以后的井壁设计中采用 GB 50010^[37]规定的多轴强度准则进行强度验算。

5.2 高径向承载力井壁的力学特性

随土层由 400 m 加深至 800 m,富水岩层由 500 m 加深至 1 000 m,井壁受力更大、更复杂。在深厚富水岩、土层中,内壁为抵抗高水压、外壁为抵抗高冻结压力,以及单层井壁为抵抗高水土(岩)压力,均需采用高承载力井壁。随外载增大,为保证井壁厚度处在技术可靠、经济合理的区间,一方面必须提高井壁主体承载材料——混凝土的强度等级,另一方面需提高井壁增强材料——钢材的用量。

针对 C60~C100 高强混凝土井壁、CF80~CF110 钢纤维高强混凝土井壁、钢筋-钢纤维高强混凝土井壁、钢板-钢纤维高强混凝土井壁、铸钢弧板-钢纤维高强混凝土井壁(图 10)等 10 余种井壁,综合采用理



1—高强混凝土或钢纤维高强混凝土; 2—钢筋;
3—钢板; 4—型钢骨架; 5—铸钢弧板; 6—井筒中心线

图 10 几种高承载力井壁示意

Fig.10 Schematic diagrams of several types of high load-bearing shaft linings

论分析、数值计算和大型模拟试验方法(图 11)研究获得了其力学特性和极限承载力计算公式。主要结论^[25,33,38-39]为

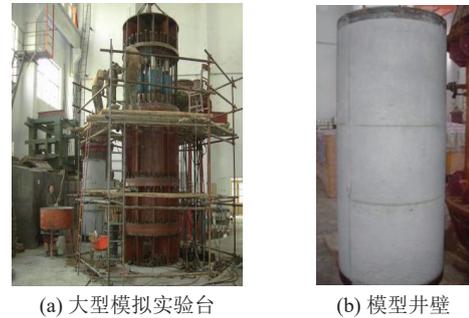


图 11 井壁承载力大型模拟试验

Fig.11 Large-scale simulation tests of shaft lining load-bearing capacity

- 1) 其极限承载力可达 32 MPa 以上。例如:厚径比为 1/3 时,CF110 井壁能极限承受 42 MPa 水压。
- 2) 采用高强混凝土可大幅减薄井壁。例如:按规范计算直径 6 m、深 1 200 m 的内壁,C80 混凝土需 3.4 m 厚,而 CF110 混凝土只要 1.5 m 厚。
- 3) 随强度增加,混凝土井壁呈脆性破坏特征。
- 4) 添加钢纤维可提高井壁的韧性和抗拉强度。
- 5) 用钢板、钢管等约束混凝土的变形,可显著提高井壁的韧性和强度,达到“1+1>2”的效果。
- 6) 钢板-混凝土井壁、铸钢弧板-混凝土井壁的破坏特征均是内侧钢板、铸钢弧板先局部失稳内凸,与混凝土剥离,然后剥离处混凝土因受力状态恶化而破坏,如图 12 所示。
- 7) C60~C100 井壁和 CF60~CF110 井壁的水平极限承载力 p_{\max} 可用如下拟合式表示

$$\frac{p_{\max}}{\eta(2-\eta)f_{cu}} = -0.3372 + 0.933 \frac{\sigma_v}{f_{cu}} + 0.164 \left(\frac{\sigma_v}{f_{cu}} \right)^2 + 0.8368 \sqrt{1 - 1.35 \frac{\sigma_v}{f_{cu}}} \quad (2)$$

式中: f_{cu} 为混凝土的立方体抗压强度; η 为井壁的厚度与外半径之比; σ_v 为计算点处井壁的竖向应力。

5.3 内层可缩冻结井壁的力学特性

刘鹏飞^[11]的研究(图 6、图 13)表明:

- 1) 外壁能极限承受的轴力 F_{vw} 先随围压增大而增大,达最高值后随围压增加而下降。井筒服役后一般可认为外壁内侧受水压、外侧受水土压力作用, F_{vw} 可用下式表示

$$F_{vw} = f_{kw} A_w \quad (3)$$

式中: f_{kw} 为外壁混凝土的棱柱体抗压强度; A_w 为外壁的横截面积。

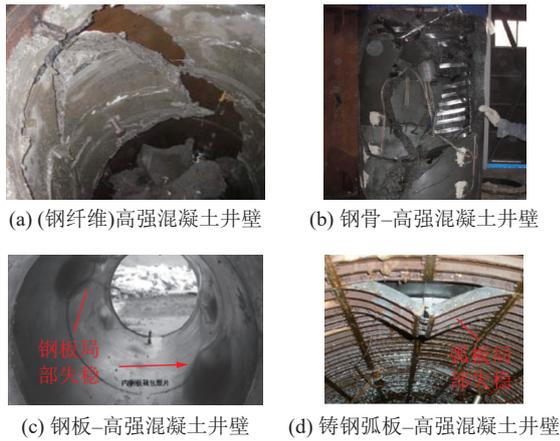


图 12 模拟试验中井壁的破坏模式

Fig.12 Failure modes of mine shaft lining in simulation tests

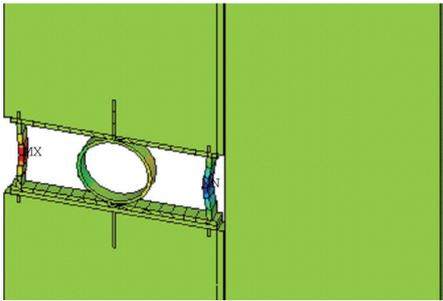


图 13 内层可缩井壁的轴向变形特征

Fig.13 Axial deformation characteristics of inner retractable shaft lining

2) 内壁能极限承受的轴力 F_{vn} 可用下式表示

$$\text{能轴向让压时: } F_{vn} = F_s \quad (4)$$

$$\text{不能轴向让压时: } F_{vn} = f_{kn}A_n \quad (5)$$

式中: F_s 为内壁上井壁轴向可缩装置能极限承受的轴力; f_{kn} 为内壁混凝土的棱柱体抗压强度; A_n 为内壁的横截面积。

3) 对于双层复合井壁, 内壁与外壁间的耦合作用很弱, 内层可缩井壁能极限承受的轴力 F_v 可用下式表示

$$F_v = F_{vn} + F_{vw} \quad (6)$$

这样就可将内、外壁竖向极限承载力分开独立设计、计算, 为井壁轴向可缩装置的计算带来方便。

5.4 内壁厚度的设计理论

当围土不沉降时, 内壁按承受壁间水压设计。

当井筒周围的深厚土层存在沉降可能时, 根据前述研究, 必须采用能适应土层沉降的井壁结构, 来限制内壁竖向受力的增长不超过设定值, 以保证内壁不会因土层沉降而破坏。研究表明, 在此情况下, 壁间水压仍是控制内壁厚度的关键荷载^[11]。

这样, 无论围土是否有沉降, 基于均质、各向同性、小变形、理想弹塑性、广义平面应变假设, 采用多轴强度准则对内缘进行强度验算, 经推导得内壁厚度计算公式^[33]如下

$$\delta_n = r_n \left[\sqrt{\frac{(\xi f_c + \rho f_y)}{(\xi f_c + \rho f_y) - 2\gamma_0 \gamma_G p_{wj}}} - 1 \right] \quad (7)$$

式中: δ_n 为内壁厚度; r_n 为内壁内半径; ξ 为混凝土强度提高系数, 在广义平面应变状态下, 内缘处于双轴压缩状态, 按混凝土结构设计规范^[37]取 $\xi=1.2$; f_c 、 f_y 为混凝土和钢筋的强度设计值; ρ 为环向配筋率; γ_0 为结构重要性系数, 按规范^[43], 对服务年限不少于 50 a 或大型矿井或表土层深度不小于 150 m 的立井井筒, $\gamma_0=1.10\sim 1.15$; 对服务年限少于 50 a 且表土层深度小于 150 m 的中、小型矿井的立井井筒, $\gamma_0=1.05\sim 1.10$; γ_G 为结构安全系数, 按规范^[43]取为 1.35; p_{wj} 为壁间水压力, 见 5.2 节。

研究表明, 按上式设计内壁厚度, 内壁的水平极限承载力与设计承载力之比为 3.0~3.3。

5.5 土层段外壁厚度的设计理论

外壁主要起抵抗冻结压力的作用。基于均质、各向同性、小变形、理想弹塑性、平面应力假设, 采用多轴强度准则对内缘进行强度验算, 经推导得外壁厚度计算公式^[33,74]如下:

$$\delta_w = r_w \left[\sqrt{\frac{(\xi f_c + \rho f_y)}{(\xi f_c + \rho f_y) - 2\gamma_0 \gamma_G p_d}} - 1 \right] \quad (8)$$

式中: δ_w 为外壁厚度; r_w 为外壁内半径; ξ 为混凝土强度提高系数, 对于外缘受冻结压力作用、内缘无荷载的平面应力状态, 按混凝土结构设计规范取 $\xi=1.0$; f_c 、 f_y 为混凝土和钢筋的强度设计值; ρ 为环向配筋率; γ_0 为结构重要性系数, 因外壁主要在施工期发挥作用, 建议取 $\gamma_0=0.95\sim 1.0$; γ_G 为结构安全系数, 在冻结压力为主荷载时, 按规范^[43]取 $\gamma_G=1.0\sim 1.05$; p_d 为冻结压力, 见 5.3.1 节。

研究表明, 按上式设计外壁厚度, 外壁的水平极限承载力与设计承载力之比为 2.3~2.6。考虑到外壁是临时结构, 故外壁是有足够安全度的。

5.6 岩层段外壁厚度的设计理论

之前, 冻结岩层段外壁设计无理论可依。冻结壁内缘的径向卸载率 $\psi=(1-p_d/p_{h0})$ 为影响外壁厚度的关键因素, 其中, p_d 为冻结压力; p_{h0} 为原始水平地应力。张驰^[19]导出了冻结岩层段外壁-冻结壁-含水围岩径向相互作用解析解, 获得了冻结壁内缘最小径向卸载率 ψ_{min} 的计算公式。根据 ψ 求得 p_d 后, 岩层段外壁

厚度仍可用式 (8) 计算。根据 5.3.2 节, 在深度小于 1 000 m 情况下, 岩层冻结壁一般是稳定的。对于稳定的冻结壁, 理论上外壁只需取构造厚度 300 mm 即可, 这时外壁主要起防止井帮掉渣和一定的保温作用。

5.7 含水岩层中单层井壁厚度的设计理论

在含水岩层中, 井壁必须能承受孔(裂)隙水压、围岩变形压力乃至注浆压力的作用而不破坏、不渗漏。之前, 国内外无含水岩层段单层井壁设计理论。杨维好、韩涛、张驰等研究认为单层冻结井壁在运营期接近平面应变模型, 推导了井壁-冻结壁-含水围岩相互作用解析解, 提出井壁抗拉、抗压、抗剥离三重验算设计方法, 建立了能考虑孔隙水压作用和能充分利用围岩承载力的单层冻结井壁设计理论和方法^[17,19,41]:

1) 根据导出的公式, 先按抗压设计井壁厚度。

2) 根据导出的公式, 验算抗拉条件, 必要时按抗拉设计壁厚。

3) 根据导出的公式, 验算围岩与井壁间的抗剥离条件。

4) 必要时重复 1~3 步, 直到抗压、抗拉以及抗剥离均满足要求。

上述计算的公式较复杂, 对于孔隙含水稳定围岩, 一般可用下式近似计算单层井壁的厚度为

$$\delta_d = r_d \left[\sqrt{\frac{(\xi f_c + \rho f_y)}{(\xi f_c + \rho f_y) - 2\gamma_0 \gamma_G f_w} - 1} \right] \quad (9)$$

式中: δ_d 为单层井壁的厚度; r_d 为井壁内半径; ξ 为混凝土强度提高系数, 在平面应变状态下, 井壁内缘处于双轴压缩状态, 按规范^[37]取 $\xi=1.2$; f_w 为孔隙水引起的井壁水力荷载, 可用式 (1) 计算, 见 5.4 节; 其他符号同式 (7)。

5.8 深厚土层中内层可缩井壁的设计理论

当存在能引起土层沉降的特殊条件时, 在深厚表土中采用提高井壁材料强度和厚度硬“抗”竖直附加力的方法是不科学和不经济的, 应采用能适应地层沉降的可缩井壁结构。其中, 杨维好等发明的内层可缩井壁(图 6) 因具有效果可靠、施工简便、造价低等优点, 得到了广泛应用^[9-10]。

内层可缩井壁利用安设于内壁适当位置上的竖向可缩装置, 限制内壁竖直应力不超过设定值, 因而能保证内壁不会因土层沉降而破坏。

内层可缩井壁设计的要点^[11-13,35]为

1) 竖向可缩装置的总压缩量与井壁允许的竖向压缩量之和, 应大于土层的预计沉降量。

2) 在土层沉降引起井壁竖直附加轴向力最大点

的上下一定范围内, 挑选厚度大于 6 m 的隔水土层段, 在其对应深度的内壁上设置竖向可缩装置。

3) 在设计井壁竖向可缩装置时, 一般取其竖向极限承载力为 1.2~1.5 倍上覆井壁自重。这意味着: 由自重和竖直附加力等因素引起的内壁竖向应力始终不会超过 1.2~1.5 倍上覆井壁的自重应力。在此情况下仍是水平荷载控制内壁厚度。

4) 竖向可缩装置先“抗”后“让”, 以“让”为主保护内壁; 因外壁主要起临时支护作用, 也不要求防水, 故外壁能“抗”则“抗”, 允许局部压裂让压。

5) 在上述条件下, 仍可按水平外载设计井壁厚度, 即分别按式 (7)、式 (8) 设计内、外壁厚度。

6 井壁施工技术的发展

6.1 大厚度井壁裂漏机理及防裂技术

6.1.1 井壁裂漏新机理

双层复合井壁(图 2) 应用广泛^[3-4], 2002 年之前是国际公认的封水性能优异的井壁结构形式(注: 在淮南、淮北等矿区有的双层复合井壁滴水不漏), 其封水机理^[2]是: 内壁因是连续浇筑的故无接茬缝, 内、外壁间的塑料板解除了外壁对内壁的约束, 避免了内壁因约束温度拉应力过大而开裂漏水。

但是, 2002 年之后, 在深厚土层和深厚岩层中, 双层复合井壁均出现了严重的内壁开裂漏水问题。

在深厚土层中, 安徽丁集煤矿主井、副井和风井在壁间注浆时涌水量达 30 m³/h 以上; 安徽顾北煤矿主井、副井和风井在冻结壁融化时接连发生井壁透水, 最大漏水量达到 130 m³/h; 特别是丁集煤矿风井、顾北煤矿主井、山东郓城煤矿副井、河南薛湖煤矿主井、山东龙固煤矿副井等井筒内壁出水带砂严重危及井筒安全, 最严重的是内蒙古铁北煤矿风井出水 800~1 000 m³/h 淹井。

在深厚富水岩层中, 陕西高家堡煤矿主井、副井和中央风井, 甘肃核桃峪煤矿副井和风井等井筒在冻结壁解冻不到 1/5 井筒高度时井筒漏水量就达到 110 m³/h 以上。

上述裂漏严重的井筒, 采用注浆法堵水后, 均成功地将涌水量降至井筒验收规范许可值以下。

上述严重裂漏的内壁具有如下共同特点:

- 1) 与外壁间都铺了塑料板。
- 2) 厚度 ≥ 1 m, 达到大体积混凝土范畴。
- 3) 混凝土强度等级 $\geq C60$ 。
- 4) 高标号水泥用量 $\geq 420 \sim 550$ kg/m³。
- 5) 井壁混凝土体积收缩量 ≥ 300 μe 。

针对上述特点, 杨维好等探明了内壁水化热温度

场^[38,75-77]和温度应力场的变化规律,发现:内壁在砌壁后 1~2 d 温度升至 60~81 °C 峰值(图 14),内壁内、外缘温差最大可达 40 °C,随后受冻结壁影响井壁温度降至 20~-10 °C,在 50~90 °C 的大幅降温冷缩过程中,内壁不同部位相互约束,产生了足以导致内壁开裂的竖向拉应力。由此揭示了自生温度应力导致大厚度混凝土内壁开裂漏水新机理。

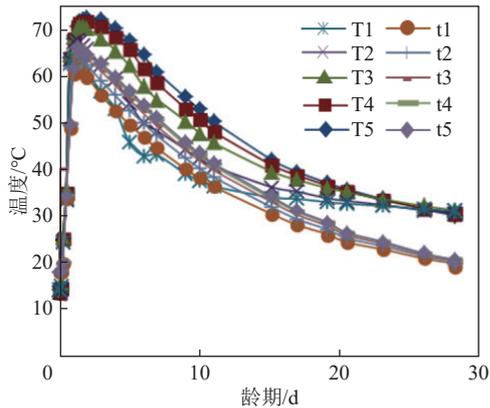


图 14 内壁温度场实测结果

Fig. 14 In-situ measurement results of temperature field inside inner shaft lining

以内蒙古纳林河二号煤矿新副井(净直径 10.5 m, 495 m 深处内壁厚度为 1.8 m)为例,作为当时国内直径和厚度均最大的混凝土井壁结构,内壁实测最高温度达到了 73.1 °C,最高温升达 48.8 °C,内壁内最大温差达 33.0 °C^[76],最大温升速率达 5.3 °C/d,均超过 GB 50496《大体积混凝土施工规范》的规定,如不采取措施,则井壁竖向温度拉应力会达到混凝土抗拉强度,井壁必然开裂。

6.1.2 井壁防裂新技术

对于大厚度、高强混凝土井壁防温度裂缝问题,有如下认识^[33,35,38-40]:

1) 应尽量采用低水化热水泥,或减少水泥用量,以减小混凝土的绝热温升。但随混凝土强度等级的提高,这类措施可施展的余地有限。

2) 可采用如下降温措施: ① 适当降低入模温度。这有时与井壁早强、高强要求冲突。② 用冰沫拌混凝土。由于冰沫融化后会留下小孔,故该法不利于井壁抗渗与高强。③ 在井壁内设冷却系统。该法降温效果好,但实施难度较大,事后需注浆充填降温管路。

3) 井壁厚度大时,采取在内、外壁间铺塑料板等措施虽然可弱化外壁对内壁的约束,但解除不了内壁自身各部分间的约束。

4) 采用增大配筋率和加密钢筋的措施阻止井壁

开裂有较好效果。但是,对于深厚土层中的外壁,当配筋率 > 1% 时,绑扎钢筋量大、耗时长,有时满足不了快速筑壁承载的要求;另外,因振捣条件很差,过密的钢筋可能影响外壁的浇筑,需要采用免振捣或自流平混凝土。

5) 通过加纤维提高混凝土的抗拉强度是有效手段,但拌合混凝土时需解决均匀分散纤维、防结团,以及坍落度、延展度大幅降低的问题。

6) 通过添加膨胀剂来补偿混凝土收缩是有效手段。但膨胀剂用量不宜超过 12%,过大则有害。

根据上述井壁裂漏的新机理,提出了基于补偿收缩混凝土、纤维混凝土、混凝土绝热温升控制和淹水养护等措施的内壁防裂新技术。

在变弹性模量、变约束条件下对内壁膨胀应力场的研究表明^[19,39],采用膨胀应变 > 300 $\mu\epsilon$ 的微膨胀混凝土可在井壁竖向产生约 1.59 MPa 的压应力,对防止自生温度裂缝有重要作用。

数值计算(图 15)和模拟试验表明,钢纤维掺加体积分率为 0.5%~1.5% 时,可将混凝土抗拉强度提高 30%~50%,对阻止井壁温度裂缝有显著作用。龙固煤矿北风井于 2011 年首次采用钢纤维高强混凝土,解冻后井筒涌水量小于 2 m³/h^[38]。此后万福煤矿主井、副井和风井,内蒙古石拉乌素煤矿主井、副井和风井,龙固煤矿东副井等井筒均采用了钢纤维混凝土防裂技术,井壁温度裂缝大幅减少。

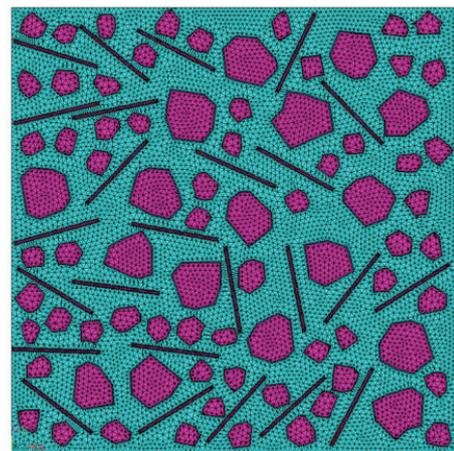


图 15 钢纤维混凝土数值计算

Fig. 15 Numerical calculation of steel fiber reinforced concrete

纳林河二号煤矿 2 号副井于 2011 年首次采用了淹水养护内壁措施,防裂效果十分显著^[75-76],此后该法又在万福煤矿井筒施工中成功应用。

补偿收缩混凝土、纤维混凝土、绝热温升控制等技术措施同样可用于外壁或单层冻结井壁预防温度裂缝。对于外壁或单层冻结井壁,还开发成功了新筑

混凝土防坠裂、岩层段井帮控温、岩层段混凝土防冻害、施加竖向预压应力等防裂技术措施^[42]。

6.2 井壁腐蚀破坏及防治

在 2002 年之前,因井筒不深或遇到浅埋地层含腐蚀性地下水的情况少,故井壁混凝土腐蚀问题案例少、未得到重视。2002 年之后,随深度增加,新建井筒穿过含腐蚀性水地层的情况越来越多。例如:河南顺和煤矿井筒、陕西小纪汉煤矿风井、内蒙古新街一井井筒分别遇到 SO_4^{2-} 质量浓度超过 3、5、10 g/L 的腐蚀性地下水。刘娟红^[78]、韩涛、周廷定^[79]等调查发现,在河南永城、安徽淮北、山东兖州和巨野等矿区,有 20 多个井筒发生了井壁混凝土腐蚀现象。例如顺和煤矿副井井壁 C50 混凝土在 5 a 内腐蚀深度超过 100 mm (图 16)。



图 16 顺和煤矿副井井壁混凝土腐蚀实拍

Fig.16 Actual photographs of concrete corrosion on the shaft lining of the Shunhe Coal Mine Auxiliary Shaft

混凝土的腐蚀机理有物理腐蚀和化学腐蚀 2 种类型。物理腐蚀主要有冻融循环下水结冰体积膨胀致裂、干湿循环下可溶盐结晶体积膨胀致裂、反复热胀冷缩致裂、水力冲刷和磨损等;化学腐蚀主要有硫酸盐腐蚀、氯离子侵蚀、酸碱侵蚀和碳化作用等^[80]。对于井壁混凝土,硫酸盐腐蚀最多、最常见,氯离子侵蚀相对少见,干湿循环致裂较次要。

硫酸盐的腐蚀破坏作用主要体现在^[80]:硫酸盐与水泥水化产物反应,一方面,生成体积更大的难溶化合物以及可溶但结晶时体积膨胀的化合物,胀裂混凝土;另一方面,生成强度很小的化合物,削弱了混凝土内部结构的强度。类似地,氯离子与水泥水化产物反应,生成低强度易溶盐和带有大量结晶水、比反应物体积大几倍的固相化合物,造成混凝土内部结构削弱与膨胀破坏。另外,氯离子使钢筋去钝化,既引发钢筋腐蚀,削弱井壁,又因反应生成物体积膨胀致裂混凝土。

值得重视的是,发现多处注浆浆液结石体腐蚀混凝土的例子。例如山东东滩煤矿副井井壁注浆处粉化脱落^[79]。现有浆材中,有的含高质量浓度硫酸根、

氯离子等腐蚀性离子,例如:脲醛树脂浆材中含草酸,一种盾构注浆材料用高质量浓度硫酸调黏度等。

理论上,井壁外缘受高压腐蚀性水腐蚀最快,但难以观测到,是最危险的隐蔽腐蚀破坏情况。但是在高水压、高地温下混凝土的腐蚀机理和规律尚缺乏深入研究,急需开展攻关研究与现场监测。

对于新建井筒,预防井壁腐蚀破坏的措施为

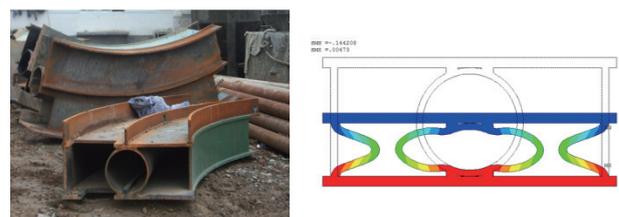
- 1) 设计采用添加抗硫酸盐、氯离子等腐蚀添加剂的水泥筑壁。
- 2) 施工中杜绝使用有腐蚀性的材料、水等,包括注浆时。
- 3) 提高井壁混凝土的密实度,减少或封堵井壁上的裂缝。
- 4) 在含腐蚀性水的地层中,在井壁内、外缘设计抗腐蚀隔层,例如环氧树脂、聚合物涂料层等,阻断井壁与水的接触。

在役井壁腐蚀破坏的防治措施为

- 1) 拆除局部受腐蚀井壁,采用抗腐蚀混凝土重筑。
- 2) 注浆封堵井壁上腐蚀性水的渗出通道。
- 3) 疏干含腐蚀性水地层。
- 4) 用涂层阻断井壁内表面与地下水的接触。
- 5) 在与腐蚀性水接触的井壁外缘附近,注入代替井壁的易受腐蚀介质,即为井壁找“替身”。

6.3 内层可缩井壁的施工工艺

井壁竖向可缩装置是可缩井壁能否安全、可靠地发挥功能的关键。一般要求可缩装置具有设定的初撑力、可缩量大,而且要在变形前、后均不漏水,以防出水淹井、垮井。之前,可缩装置主要采用木头、塑料或橡胶砌块制作。这类装置不但竖向可压缩量小($< 35\%$),而且更为严重的是整体性差、径向承载能力小、封水能力差,故只宜用于浅部井筒。杨维好等研发了压缩率高($> 70\%$)、高水压下全寿命周期可靠封水的管板组合式井壁竖向可缩装置(图 17),提出了其设计方法;获得其合理的设计、加工、安装、检验、防腐蚀、防漏水工艺^[35]。在服役期,井壁上的中空可缩装置可能发生瞬间竖向屈曲压缩,从而冲击破坏井筒



(a) 可缩装置段实物照片

(b) 变形前后的截面形状

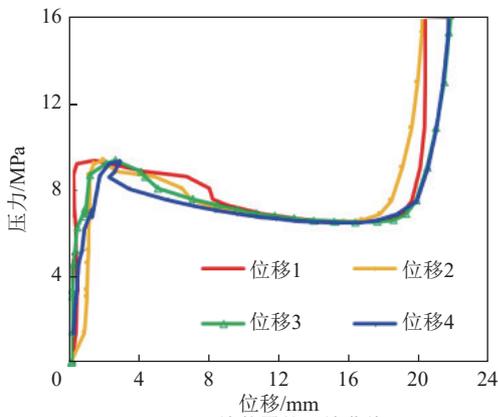
图 17 井壁竖向可缩装置

Fig.17 Vertical compressible device for shaft lining

装备, 导致重大提升安全问题。为此, 研发了调控可缩装置竖向承载力、刚度和阻尼技术, 实现了内壁近似恒阻可缩 (图 18)。



(a) 模型井壁吊入试验台



(b) 可缩装置的压缩曲线

图 18 内层可缩井壁模型试验

Fig.18 Model tests of inner compressible shaft lining

除可缩装置安装 (图 19) 外, 内层可缩井壁的施工工艺与双层复合井壁相同。



图 19 在内壁上安装竖向可缩装置施工图

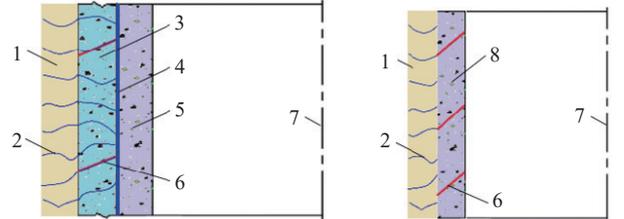
Fig.19 Construction drawing of vertical retractable device on the inner shaft lining

6.4 低渗漏单层井壁的施工工艺

随冻结岩层深度由 500 m 迈向 1 000 m, 岩层段井筒在沿用国内外惯用的土层段双层复合井壁结构技术时, 始料未及地暴露出不但井壁厚度大 (> 3.0 m,

C80 混凝土)、井筒造价高 (> 25 万元/m), 而且冻结壁解冻后井筒漏水量大 (> 100 m³/h) 等严重问题。其根源在于: 因之前未能解决外壁接茬漏水和开裂漏水问题, 只得靠套砌内壁来防水。

内壁属离壁式支护 (图 20a), 与单层井壁贴壁式支护 (图 20b) 相比, 有如下不利的受力条件。



(a) 双层复合井壁之内壁为离壁式支护

(b) 单层井壁为贴壁式支护

1—围岩; 2—导水通道; 3—外壁; 4—夹层中的水; 5—内壁; 6—接茬; 7—井筒中心线; 8—单层井壁

图 20 离壁式支护与贴壁式支护示意

Fig.20 Schematic diagram of spacer support and lining-attached support

1) 内壁与外壁间无连接作用, 在冻结壁解冻后完全被夹层水包围, 由于夹层塑板的存在, 不能利用外壁分担其径向外载。而对于贴壁式支护, 单层井壁与围岩浇筑在一起, 可利用围岩分担外载。

2) 由于夹层塑料板的存在, 内壁的全外表面受全水压作用。在贴壁式支护中, 地下水压只能通过围岩与井壁交界面上的有效孔隙、裂隙作用于井壁, 也即: 不是井壁全外表面均受水压作用。

正是上述不利的受力条件导致内壁厚度过大, 进而引发了大体积混凝土开裂漏水问题。基于“解决接茬漏水和混凝土开裂问题, 靠外壁承载、封水, 利用围岩分担水力荷载, 取消内壁”的思路, 杨维好等发明了低渗漏单层井壁技术 (图 4、图 21), 主要施工工艺^[19]要点有:

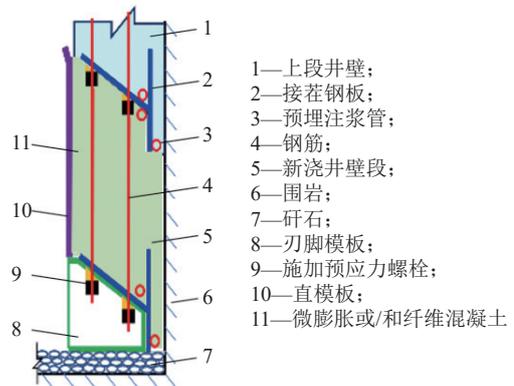


图 21 低渗漏单层冻结井壁施工示意

Fig.21 Schematic diagram of construction of single-layer shaft lining with low leakage

1) 混凝土防冻工艺。因岩层冻结壁一般没有流变变形,故井壁与岩层冻结壁之间一般不能铺设泡沫塑料板保温层,否则日后泡沫塑料板被高压水压缩会形成导水通道。这使得新型单层冻结井壁现浇混凝土可能直接与低温井帮接触,面临受冻害风险。由于添加普通防冻剂会延缓混凝土的强度增长,与井壁新筑混凝土防坠裂要求相冲突,故须另辟防冻途径!在研究掌握井壁温度场演化规律的基础上,研发出早强防冻复合剂、井帮温度控制、入模温度控制等材料与工艺措施,防止了单层井壁混凝土冻害。

2) 接茬抗渗工艺。

(1) 新、老混凝土接茬面是井壁的主要漏水通道之一。提出改接茬处混凝土-混凝土接触为混凝土-钢板接触新思路,通过增设钢质接茬板提高井壁接茬的连接强度与抗渗性能(图 22)。



图 22 接茬钢板与注浆管实拍图

Fig.22 Actual photograph of splicing steel plates and attached grouting pipes

(2) 利用钢质接茬板与竖向钢筋施加竖向预压应力(图 23),增加接茬钢板与混凝土交界面处的压应力,以防界面受拉剥离。

(3) 混凝土达设计强度的 70% 以上后,利用预埋注浆管,对井壁接茬进行注浆,进一步提高其抗渗能力。

3) 混凝土防裂工艺。开发了集“控温+防坠裂+补偿收缩+预压应力”等为一体的井壁防裂工艺^[41](图 21),具体为

(1) 控制井帮温度并用添加剂调控水泥水化速度和放热量,以减小井壁温升和内、外温差;



图 23 新型单层井壁施工图

Fig.23 Construction drawing of new type of single-layer shaft lining

(2) 加入膨胀剂补偿混凝土收缩,必要时加入纤维提高混凝土的抗拉强度;

(3) 保证 4 h 混凝土强度大于 5 倍以上现浇段混凝土自重应力,以提高混凝土的抗坠裂能力;

(4) 浇筑完毕后,提高直模板悬吊力以及直模板对刃角模板的悬吊力;

(5) 出矸前,通过由竖筋、接茬钢板等组成的张拉系统对新筑井壁段施加竖向预压力。

4) 井壁封水性能检验与弥补工艺。对于深井施工,施工瑕疵和意外情况往往难以完全避免,关键在于能否早发现和是否有补救方法。为此,提出了“由传统的冻结壁解冻后被动治理井壁漏水,转变为解冻前主动检漏、提早弥补施工瑕疵”新理念,即:

(1) 在各段井壁施工中,利用接茬抗渗工艺、混凝土防裂工艺,预防混凝土开裂和接茬渗漏。

(2) 在井壁砌筑完成之后,向壁后注水逐段检验井壁的封水性能,如有渗漏点则进行注浆堵漏。完成该步骤后,冻结壁才能解冻。

(3) 在冻结壁解冻过程中,及时注浆封堵新出现的少量渗漏点。

6.5 信息化施工技术

鉴于我国深厚复杂岩土层中冻结法凿井的巨大难度和复杂性,为保证施工安全和施工质量,开发成功了冻结法凿井信息化施工技术^[81-85],即:

1) 研发了先进的自动在线监测系统,采集大量与井筒冻结、掘砌施工有关的信息,例如:盐水温度、盐水流量、冻结壁温度、井帮温度、井帮位移、冻结压力、外层井壁收敛、井壁温度、井壁应变、钢筋轴力、

孔隙水压力等。

2) 基于上述实测结果、井壁材料特性、冻结壁材料特性及施工工艺参数等, 及时评估冻结壁发展状况和分析冻结壁、井壁的安全状况。

3) 研制了基于有限元计算软件平台的多圈孔冻结温度场、冻结壁变形、井壁变形的数值反演及预测预报程序, 实现了物性参数反演, 预测了关键层位冻结壁的温度与位移变化规律, 以及井壁的受力与变形规律, 为及时完善井壁支护设计、调整施工工艺参数等提供了可靠的决策依据。

信息化施工技术成功应用于 50 余个具有深厚复杂岩土层的冻结井筒, 科学地指导了施工, 保障了工程安全与质量^[3-6,21,33,35,38-41,48-59]。实测情况举例如图 24、图 25 所示。



图 24 外层井壁内已安设的应变计实拍图

Fig.24 Actual photograph of strain gauges installed inside the outer shaft lining

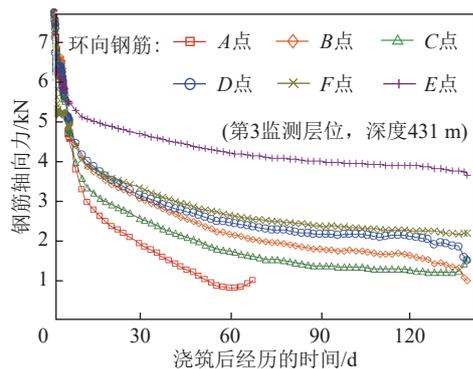


图 25 龙固煤矿北风井第 3 监测层位环筋轴力变化曲线

Fig.25 Variation curves of rebar axial force at the 3rd monitoring level of the North Wind Shaft, Longgu Coal Mine

7 冻结井壁技术的展望

目前, 我国已具备用冻结法通过 800 m 深厚土层、1 000 m 深厚富水岩层建设井筒的能力, 成就固然可喜, 但是离通过 1 500 m 超深厚土层、3 000 m 超深厚富水岩层建设井筒的战略需求还有很大差距, 在井壁

技术相关方面还需要开展如下攻关研究。

7.1 深厚土层中外壁在浅部发生破裂的机理

自 2006 年以来, 李堂煤矿副井, 赵固二矿风井, 李粮店煤矿主井和副井, 万福煤矿主井、副井和风井, 以及龙固煤矿东风井等井筒发生了外壁破裂现象。其共同特点是:

1) 井筒穿过的土层深度为 427~755 m。

2) 破裂的深度均小于 350 m, 破裂处地层既有粘性土层, 也有砂性土层。

3) 破裂时间一般在砌壁后 30 d 以上, 不是因外壁设计不当与质量欠佳导致的。

4) 主要呈弯拉破坏, 严重破裂处外壁环向折断、环向钢筋呈折迭式弯曲 (图 26)。



图 26 外壁破裂处环向钢筋弯曲情况实拍图

Fig.26 Actual photograph of circumferential reinforcement bending at the rupture site of outer shaft lining

5) 破裂处冻结壁的厚度较大、平均温度较低, 掘砌时井帮位移很小, 可排除因冻结壁强度不足致裂井壁的可能。

6) 外壁砌筑时冻土尚未发展到井帮。

7) 外壁与井帮间铺有 25~50 mm 厚泡沫塑料板, 局部拆除外壁时发现泡沫塑料板被压实。

上述破裂是在冻结壁承载力大、变形小的情况下发生的, 迥异于因冻结壁承载力低、变形大而压坏外壁的情况。因此十分有必要查明其破裂机理。

7.2 超深土的力学特性

超千米深埋原状土的力学特性参数, 是进行超深土层冻结壁设计和井壁设计所必须的基础参数。在此方面需要开展如下研究:

1) 深埋原状土的保真取样技术与装备。

2) 深埋原状土的原位力学特性参数测试技术与装备。

3) 深埋原状土的原位力学特性室内模拟技术。

4) 深埋土层原始地压现场实测与室内模拟。

7.3 高强、高性能筑壁材料与构件

对于 1 500 m 深处的土层, 估算其水平地压约为

18 MPa; 对于 3 000 m 深处的含水岩层, 估算孔隙水引起的井壁水力荷载约为 12~18 MPa。因此需要研发正常服役承载力 ≥ 18 MPa, 极限承载力 ≥ 60 MPa 的高承载力井壁。为合理降低井壁厚度, 相应地要开发:

1) 高强、高韧性井壁混凝土材料。例如 CF150 以上混凝土。

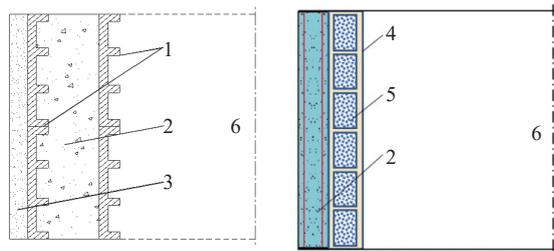
2) 弧形高强铸钢构件。

3) 高承载力约束混凝土井壁构件。例如: 高强度矩形钢管 (或纤维编织管) 内充高强混凝土构件。

7.4 超高承载力井壁结构及其力学特性

为抵抗超 18 MPa 水土压力、10~30 MPa 渗透水压的作用, 需发挥上述各种筑壁材料和构件的长处, 取长补短、相互匹配, 才能建造出承载与密封效果好、经济合理的井壁。需开展如下研究:

1) 基于高强、高性能筑壁材料与构件的超高承载力单层井壁。例如图 27 所示的井壁。



(a) 双层铸钢弧板-混凝土井壁 (b) 多孔铸钢构件-混凝土井壁

1—带肋铸钢弧板; 2—高强钢筋混凝土; 3—充填混凝土;
4—含排孔铸钢构件; 5—充填微膨胀混凝土; 6—井筒中心线

图 27 2 种高承载力单层井壁示意

Fig.27 Schematic diagram of two types of high load-bearing single-layer shaft linings

2) 内、外壁先分开施工, 后黏合为一体的联合承载井壁。中国矿业大学与山东能源西北矿业公司合作, 已将该种井壁^[86]成功应用于陕西高家堡煤矿西进风井, 将井壁总厚度由 3.6 m (采用双层复合井壁结构时, 见 2.4 节) 变为 1.65 m, 节省了大量费用。在此基础上, 需要进一步研发超高强黏结材料, 以及高承载力内、外壁的黏结工艺。

3) 径向可缩井壁。对于岩层中大直径超深立井, 首先要推进新型单层冻结井壁技术的研究与应用。如果在采用高承载力井壁技术后, 新型单层井壁的厚度仍过大, 则应研发带径向可缩层、能充分发挥外壁承载力的径向可缩井壁技术 (图 28)。在此方面, 已初步研究了现浇混凝土径向可缩井壁的力学特性, 并初步建立了其设计理论, 研究结果表明该种井壁结构可有效减薄井壁厚度^[87]。

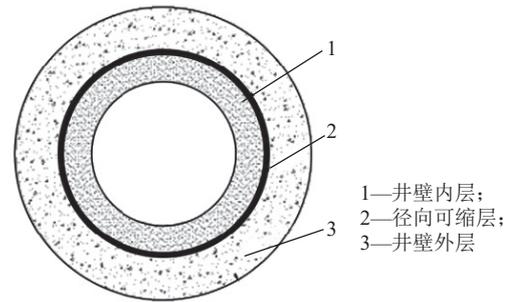


图 28 径向可缩井壁示意

Fig.28 Schematic diagram of radial retractable shaft lining

由高强筑壁材料、构件浇筑、装配而成的超高承载力井壁结构形式是多种多样的, 对于每种结构, 均需研究掌握其力学特性, 获得其变形规律、破坏特征和极限承载力, 为井壁设计提供依据。

7.5 超深冻结井壁设计理论

针对高地压、高水压下临时、永久支护设计难题, 需开展如下研究:

1) 构建井壁-深埋深冷冻结壁-围土间的水热力共同作用模型, 研究掌握建造期、服役期井壁荷载演变规律, 建立超深土层中冻结井壁设计理论。

2) 构建井壁-冻结壁-多孔围岩间水热力共同作用模型, 研究掌握井壁径向外载及孔裂隙水压的演变规律, 建立超深岩层中高承载力、高可靠封水的冻结井壁设计理论。

7.6 超深冻结井壁施工技术

针对超深土层深冻结条件下的低温施工环境, 需研发低温下早强、高强、高韧性、大流态混凝土材料, 以及超高承载力井壁浇筑、装配工艺。

针对超深岩层冻结井筒, 需研究井壁接茬高性能封水材料、壁后精细注浆与检漏技术, 以及新型高承载力单层冻结井壁、联合承载井壁、径向可缩井壁的高效施工技术。

参考文献(References):

- [1] 杨维好. 十年来中国冻结法凿井技术的发展与展望[C]//中国煤炭学会. 中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论文集. 北京, 2012: 190-196.
YANG Weihao. Development and prospect of freezing shaft sinking technology in China over the past decade[C]// High-level Academic Forum for the 50th Anniversary of China Coal Society, China Coal Society. Beijing, 2012: 190-196.
- [2] 翁家杰. 井巷特殊施工[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [3] 张胜利, 杨杰, 杨维好, 等. 冻结法施工手册[M]. 北京: 应急管理出版社, 2021.
- [4] 陈文豹. 冻结法凿井施工手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [5] 李功洲. 深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

- [6] 程桦. 深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [7] 李功洲. 中国冻结法凿井理论与技术综述[J]. 建井技术, 2017, 38(4): 1-10.
LI Gongzhou. China mine shaft sinking theory and technology summary with ground freezing method[J]. Mine Construction Technology, 2017, 38(4): 1-10.
- [8] 张文. 我国冻结法凿井技术的现状与成就[J]. 建井技术, 2012, 33(3): 4-13.
ZHANG Wen. Present situation and achievements of freezing sinking technology in China[J]. Mine Construction Technology, 2012, 33(3): 4-13.
- [9] 杨维好, 黄家会, 王衍森, 等. 一种轴向可伸缩井壁: CN1320255C [P]. 2007-06-06.
- [10] 杨维好, 黄家会, 任彦龙, 等. 一种井壁可缩装置: 02286442.3 [P]. 2003-11-12.
- [11] 刘鹏飞. 可缩井壁轴向承载性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.
LIU Pengfei. Research on the axial bearing behavior of shaft linings with axially compressible segments [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2005.
- [12] 杨志江, 韩涛, 杨维好, 等. 管板组合式井壁可缩装置的竖向临界荷载[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1276-1280.
YANG Zhijiang, HAN Tao, YANG Weihao, et al. Vertical critical pressure of a new shaft lining compressive device consisting of pipes and shells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1276-1280.
- [13] 杨志江. 管板组合式井壁可缩装置研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
YANG Zhijiang. Research and application of a new kind of shaft yielding device consisting of pipes and shells [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2004.
- [14] 杨维好, 黄家会, 王衍森. 带接茬板的单层井壁及其施工方法: CN100526604C [P]. 2009-08-12.
- [15] 陈晓祥. 新型单层冻结井壁关键技术与设计理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
CHEN Xiaoxiang. Research on the key technology and design theory of a new type of monolayer freezing shaft lining [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2007.
- [16] 陈晓祥, 杨维好. 新型单层冻结井壁水平极限承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3740-3748.
CHEN Xiaoxiang, YANG Weihao. Experimental study on horizontal ultimate bearing capacity of new single-layer frozen shaft lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3740-3748.
- [17] 韩涛. 富水基岩单层冻结井壁受力规律及设计理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
HAN Tao. Study on stress law and design theory of single-layer frozen shaft lining of water-rich bedrock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [18] 刘海新. 新型单层冻结井壁中钢板-混凝土接茬的抗渗性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
LIU Haixin. Bonding anti-permeability research of the connection stubble of steel plate-concrete in the new type of monolayer freezing shaft lining [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2011.
- [19] 张驰. 富水岩层中新型单层冻结井壁关键施工技术与工艺研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
ZHANG Chi. Study on key construction technology and technology of new single-layer frozen shaft lining in water-rich strata[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [20] 张驰, 杨维好, 齐家根, 等. 基岩冻结新型单层井壁施工技术与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 337-346.
ZHANG Chi, YANG Weihao, QI Jiagen, et al. Construction technology and monitoring analysis of a new single-layer shaft lining in deep aqueous bedrock during freezing sinking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 337-346.
- [21] 张驰, 杨维好, 刘计寒, 等. 深厚冻结基岩中新型单层井壁的施工技术与混凝土应变实测[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 192-199.
ZHANG Chi, YANG Weihao, LIU Jihan, et al. Construction technology and monitoring analysis on concrete strain of a new single-layer shaft lining in deep aqueous bed rock during freeze sinking[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 192-199.
- [22] 王建中. C80~C100 高强混凝土井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
WANG Jianzhong. Research on the mechanical characteristics of C80~C100 high strength concrete shaft lining [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.
- [23] 穆亚凤. 纳米材料对井壁混凝土性能影响规律及机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
MU Yafeng. Study on the influence regulation and mechanism about manophase material to concrete properties [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.
- [24] 刘阳. 纳米混凝土井壁的抗渗性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
LIU Yang. Research on nano concrete anti-permeability [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [25] 刘登攀. 钢骨混凝土井壁力学特性初步研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003.
LIU Dengpan. Preliminary study on mechanical properties of steel reinforced concrete shaft lining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2003.
- [26] 畅遥遥. CF120 高韧性混杂纤维混凝土井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CHANG Yaoyao. Study on mechanical properties of CF120 high toughness hybrid fiber concrete shaft lining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [27] 韩涛, 杨维好, 任彦龙, 等. 钢骨钢纤维高强砼井壁水平承载特性的计算和试验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 205-211.
HAN Tao, YANG Weihao, REN Yanlong, et al. Numerical and experimental model studies of the horizontal bearing properties of shaft linings of encased steel or steel fiber reinforced, high strength concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 205-211.
- [28] 韩涛, 杨维好, 任彦龙, 等. 钢骨混凝土井壁水平极限承载特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 181-186.

- HAN Tao, YANG Weihao, REN Yanlong, et al. Horizontal ultimate bearing capacity of encased steel concrete shaft lining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(2): 181-186.
- [29] 齐善忠. 钢板-高强钢纤维混凝土复合井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- QI Shanzhong. Study on the mechanical characteristics of shaft lining consisting of steel sheet and high-strength steel fiber reinforced concrete [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.
- [30] 韩旭. 铸钢弧板-钢纤维混凝土复合井壁力学特性与设计理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- HAN Xv. Research on the mechanical characteristics of combined shaft lining consisting of cast-steel tubbing and high-strength steel fiber reinforced concrete [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.
- [31] 王修春. CF80~CF100 钢纤维高强混凝土井壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- WANG Xiuchun. Research on the mechanical characteristics of CF80~CF100 steel fibre reinforced high strength concrete shaft lining [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2007.
- [32] 荆玉明. 双层复合井壁喷膜夹层防水技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- JING Yuming. Study on waterproof technology of shotcrete inter-layer in double-layer composite shaft wall[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [33] 杨维好, 王衍森, 黄家会, 等. 特厚表土层中冻结法凿井技术[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.
- [34] 王衍森, 黄家会, 李金华, 等. 冻结井外壁高强混凝土的早期强度增长规律研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(5): 595-599.
- WANG Yansen, HUANG Jiahui, LI Jinhua, et al. Early-stage strength growth of high-strength concrete in outer freezing shaft walls[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(5): 595-599.
- [35] 杨维好, 宋雷, 李海鹏, 等. 特厚冲积层及强含水岩层中 702 m 冻结法凿井技术[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [36] 夏玲玲. 研究养护压力和温度对高性能混凝土强度影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- XIA Lingling. Study on the effects of curing pressure and temperature to high performance concrete [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [38] 杨维好, 杨志江, 韩涛, 等. 近 700 米特厚表土中冻结法凿井技术研究[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [39] 杨维好, 杨志江, 张驰, 等. 800 米深厚土层中冻结法凿井关键技术[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [40] 杨维好, 张驰, 韩涛, 等. 深厚富水软岩大直径立井及毗邻硐室冻结法开凿关键技术[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [41] 杨维好, 韩涛, 张驰, 等. 深厚含水岩层中新型单层冻结井壁关键技术研究与应用[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [42] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [43] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿立井井筒及硐室设计规范: GB 50384—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [44] 中华人民共和国建设部. 煤矿立井井筒及硐室设计规范: GB 50384—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [45] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 矿山立井冻结法施工及质量验收标准: GB/T 51277—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [46] 荣传新. 深厚冲积层冻结壁与井壁的力学特性及其共同作用机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- RONG Chuanxin. Study on mechanical properties of frozen wall and shaft lining in deep alluvium and their joint action mechanism [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [47] 荣传新, 王秀喜, 程桦. 深厚冲积层冻结壁和井壁共同作用机理研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(3): 235-239.
- RONG Chuanxin, WANG Xiuxi, CHENG Hua. A study on interaction mechanism of frozen soil wall and shaft lining in deep alluvium[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(3): 235-239.
- [48] 王衍森. 深特厚冲积层中冻结井外壁强度增长及受力与变形规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.
- WANG Yansen. Study on the law of strength growth, stress and deformation of the outer wall of freezing well in deep and extra thick alluvium [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2005.
- [49] 王衍森, 文凯. 深厚表土中冻结壁与井壁相互作用的数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(6): 1142-1146.
- WANG Yansen, WEN Kai. Numerical analysis of interaction between freezing wall and shaft lining in deep alluvia[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1142-1146.
- [50] WANG Y S, YANG Z J, YANG W H. Viscoelastic analysis of interaction between freezing wall and outer shaft wall in freeze sinking[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 612-620.
- [51] 姚直书, 程桦, 张国勇, 等. 特厚冲积层冻结法凿井外层井壁受力实测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2004, 32(6): 49-52.
- YAO Zhishu, CHENG Hua, ZHANG Guoyong, et al. Research on site measurement of outer shaft wall stressing in freezing sinking shaft in special thick alluvium[J]. *Coal Science and Technology*, 2004, 32(6): 49-52.
- [52] 陈远坤. 深厚冲积层井筒冻结压力实测及分析[J]. *建井技术*, 2006, 27(2): 19-21.
- CHEN Yuankun. Site measurements and analysis on freezing pressure of mine shaft in deep thick alluvium[J]. *Mine Construction Technology*, 2006, 27(2): 19-21.
- [53] 汪仁和, 亢延民, 林斌, 等. 深厚黏土地层冻结压力的实测分析[J]. *煤炭科学技术*, 2008, 36(2): 30-32, 38.
- WANG Renhe, KANG Yanmin, LIN Bin, et al. Analysis on measurements of freezing pressure in deep thick clay strata[J]. *Coal Science and Technology*, 2008, 36(2): 30-32, 38.
- [54] 王衍森, 薛利兵, 程建平, 等. 特厚冲积层竖井井壁冻结压力的实测与分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 207-212.
- WANG Yansen, XUE Libing, CHENG Jianping, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of vertical shaft lining in deep alluvium[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 207-212.
- [55] 盛天宝. 特厚黏土层冻结压力研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 571-574.

- SHENG Tianbao. Research and application on freezing pressure of extra-thick clay layer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 571-574.
- [56] 张松涛, 马涛, 陈志博. 深厚黏土层冻结壁冻结压力实测与数值分析[J]. *力学与实践*, 2013, 35(2): 46-49, 45.
- ZHANG Songtao, MA Tao, CHEN Zhibo. Measurement and numerical analysis of freezing pressure of the freezing wall in the thick clay strata[J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(2): 46-49, 45.
- [57] 姜国静, 王建平, 刘晓敏. 超厚黏土层冻结压力实测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(3): 43-46.
- JIANG Guojing, WANG Jianping, LIU Xiaomin. Study on frozen pressure measurement of ultra thick clay stratum[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(3): 43-46.
- [58] 姚直书, 程桦, 居宪博, 等. 深厚黏土层冻结压力实测分析[J]. *建井技术*, 2015, 36(4): 30-33.
- YAO Zhishu, CHENG Hua, JU Xianbo, et al. Measurement and analysis of freezing pressure in deep clay stratum[J]. *Mine Construction Technology*, 2015, 36(4): 30-33.
- [59] 张驰, 杨维好, 杨志江, 等. 深厚含水基岩区立井外壁冻结压力的实测与分析[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 33-38.
- ZHANG Chi, YANG Weihao, YANG Zhijiang, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of outer shaft lining in deep aqueous bed rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 33-38.
- [60] 柏东良, 杨维好, 杨志江, 等. 基于接触面孔隙率的含水基岩井壁外荷载研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(4): 600-603.
- BAI Dongliang, YANG Weihao, YANG Zhijiang, et al. Study on radial loads of mine shaft lining in rock aquifer based on porosity of contact surface[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4): 600-603.
- [61] 柏东良, 杨维好, 黄家会, 等. 孔隙含水岩石水平侧压力系数数值分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(5): 781-787.
- BAI Dongliang, YANG Weihao, HUANG Jiahui, et al. Numerical analysis of lateral pressure coefficient of pores and pore pressure in porous rock aquifer[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(5): 781-787.
- [62] 柏东良. 孔隙含水岩石中地下水结构的水力荷载[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- BAI Dongliang. Hydraulic load of underground structure in porous water-bearing rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [63] HAN J H, ZOU J Q, YANG W H, et al. Mechanism of fracturing in shaft lining caused by high-pressure pore water in stable rock strata[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019(1): 5234642.
- [64] YANG Weihao, FU Houli. Theoretical investigation on the vertical additional force of shaft lining in special stratum[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 9(2): 129-135.
- [65] 黄家会, 杨维好. 井壁竖直附加力变化规律模拟试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(10): 1204-1207.
- HUANG Jiahui, YANG Weihao. Study on variation of vertical additional force on shaft lining by simulation tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1204-1207.
- [66] 付厚利. 深厚表土中冻结壁解冻阶段井壁竖直附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- FU Houli. Study on the variation law of vertical additional force of shaft lining during thawing of frozen wall in deep topsoil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2000.
- [67] HAN J H, ZOU J Q, HU C C, et al. Deflection mechanism and safety analysis of coal mine shaft in deep soil strata[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019(1): 9461742.
- [68] 韩继欢, 杨权威, 杨维好. 深厚松散层薄基岩采动沉降致裂井壁机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 784-790.
- HAN Jihuan, YANG Quanwei, YANG Weihao. Mechanism of fracturing in shaft lining caused by mining subsidence in thin bedrock and deep loose strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(4): 784-790.
- [69] 韩继欢. 深厚土层中井筒偏斜机理与规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- HAN Jihuan. Study on mechanism and law of wellbore deviation in deep soil layer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [70] 佟凤建. 特厚土层沉降时常规井壁与土层间的相互作用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- TONG Fengjian. Interaction between conventional shaft lining and soil layer during settlement of extra-thick soil layer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.
- [71] 孟新华. 特厚土层沉降时可缩井壁与土层间的相互作用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- MENG Xinhua. Interaction between retractable shaft lining and soil layer during settlement of extra-thick soil layer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.
- [72] 棘怀海. 2000 m 超深土层中冻结—帷幕凿井法井壁温度及受力与变形规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- Ji Huaihai. Study on temperature, stress and deformation law of shaft wall by freezing-curtain sinking method in 2000 m ultra-deep soil layer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [73] 任彦龙, 杨维好, 韩涛. 基于不同强度准则的井壁极限承载力研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(4): 540-543.
- REN Yanlong, YANG Weihao, HAN Tao. Study of the ultimate bearing capacity of a shaft lining based on different failure criteria[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(4): 540-543.
- [74] 王衍森, 杨志江, 杨宇飞, 等. 凿井期冻结井外壁的力学模型及水平极限承载力研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(3): 359-362, 366.
- WANG Yansen, YANG Zhijiang, YANG Yufei, et al. Mechanics model and ultimate horizontal bear capacity of outer shaft lining during freezing sinking[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(3): 359-362, 366.
- [75] 张涛. 深厚复杂地层中冻结井壁温度场演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- ZHANG Tao. Study on evolution law of temperature field in frozen shaft lining in deep and complex stratum[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

- [76] 张涛, 杨维好, 陈国华, 等. 大体积高性能混凝土冻结井壁水化热温度场实测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 290-296.
ZHANG Tao, YANG Weihao, CHEN Guohua, et al. Monitoring and analysis of hydration heat temperature field for high performance mass concrete freezing shaft lining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 290-296.
- [77] HAN T, YANG W H, YANG Z J, et al. Monitoring study of shaft lining concrete strain in freezing water-bearing soft rock during mine shaft construction period in West China[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 992-1000.
- [78] 刘娟红, 卞立波, 何伟, 等. 煤矿矿井混凝土井壁腐蚀的调查与破坏机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 528-533.
LIU Juanhong, BIAN Libo, HE Wei, et al. Investigation and destruction mechanism on corrosion of concrete shaft in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 528-533.
- [79] 周廷定. 顺和煤矿副井井壁腐蚀破坏机理与防治措施研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
ZHOU Tingding. Study on corrosion failure mechanism and prevention measures of auxiliary shaft wall in Shunhe coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [80] 杜健民, 梁咏宁, 张风杰. 地下结构混凝土硫酸盐腐蚀机理及性能退化[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [81] 宋雷, 杨维好, 李海鹏. 郭屯煤矿主井冻结法凿井信息化监测技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 19-23.
SONG Lei, YANG Weihao, LI Haipeng. Monitoring of freezing shaft sinking in ultra-deep alluvium of guotun coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 19-23.
- [82] 王衍森, 杨维好, 黄家会, 等. 龙固副井冻结凿井期外壁混凝土应变的实测研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 296-300.
WANG Yansen, YANG Weihao, HUANG Jiahui, et al. Study of freeze sinking period concrete strain of outer shaft wall of Longgu Coal Mine auxiliary shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 296-300.
- [83] 王衍森, 张开顺, 李炳胜, 等. 深厚冲积层中冻结井外壁钢筋应力的实测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 287-291.
WANG Yansen, ZHANG Kaishun, LI Bingsheng, et al. In-situ measurement on the stress of reinforcing steel bar of outer freezing shaft wall in deep alluvium[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 287-291.
- [84] 邵景柱, 吕树杰, 王伟, 等. 赵楼矿深厚表土层冻结法凿井工程监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(2): 33-38.
SHAO Jingzhu, LYU Shujie, WANG Wei, et al. Monitoring and measurement technology for mine shaft freezing sinking project of Zhaolou Mine in deep thick overburden[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(2): 33-38.
- [85] 韩涛, 黄家会, 李建清. 基于光纤光栅传感技术的深井井壁结构监测[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(11): 88-92.
HAN Tao, HUANG Jiahui, LI Jianqing. Monitoring of deep shaft lining structure using the fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2011, 28(11): 88-92.
- [86] 杨维好, 杨志江, 任彦龙, 等. 一种联合承载的双层井壁及其施工方法: CN113202480B[P]. 2022-11-22.
- [87] 任彦龙. 径向可缩井壁的力学特性和设计理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
REN Yanlong. Study on mechanical characteristics and design theory of radial retractable shaft lining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.