

《新一轮找矿突破战略行动先进适用勘查技术推广清单(第一批)》之钻探技术介绍

膨胀波纹管护壁技术

完成单位:中国地质科学院勘探技术研究所

供稿人:崔淑英, 宋刚, 陈晓君, 邵玉涛, 赵明

中图分类号:P634 文献标识码:C 文章编号:2096-9686(2026)01-0158-02

1 技术背景

地质钻探是人类获取地球内部地质信息最直接最可靠的手段,可为资源勘查、工程建设及科学研究提供第一手地下数据与样本。深孔钻进过程中钻遇复杂地层一般可通过套管护壁、泥浆调配、水泥人造孔壁、凝胶护壁等方式解决。套管护壁主要应用于钻孔设计的非终孔段,终孔段通常只能采用调配泥浆、水泥人造孔壁或凝胶护壁等方式,以上方法对于严重坍塌、缩径、大溶洞、漏失等地层,通常不能起到根本防护作用,开新孔或侧钻都将造成施工成本增加,工期延误。因此,能为深孔钻遇复杂地层时提供临时稳定孔壁支护且不造成孔径损失的膨胀波纹管护壁技术应运而生,它也被称为深孔钻探的“急救包”。

膨胀波纹管护壁是利用可膨胀金属管材对孔壁进行临时稳定支护的技术,该技术起源于20世纪70年代的苏联,由鞅鞅石油研究设计院研发,后经石油钻探行业引入国内。在引进应用的同时,我国开始自主研发,先后研发出适用于石油钻井的 $\varnothing 149.2$ 、 215.9 、 241.3 和 311.15 mm规格的膨胀波纹管及配套工具。针对地质钻探的小口径需求,中国地质科学院勘探技术研究所自2008年起,依托地质调查项目和公益性科研专项项目,经过10余年技术攻关,先后研发出具有完全自主知识产权的,适用于小口径地质钻探的 $\varnothing 75$ 、 96 、 122 mm规格的膨胀波纹管及配套器具,为深部、复杂地层地质钻探保驾护航。

2 技术内容

2.1 工作原理

膨胀波纹管以圆管为基管,经冷压或冷拔加工使圆管径向产生大幅度塑性变形,截面呈波纹状,从而减小外径尺寸。膨胀波纹管护壁技术以膨胀波纹管为核心,借助多功能送入工具,结合精准扩孔工艺,实现事故孔段的不缩径护壁。该技术主要适用于岩石地层,护壁前对事故段及其上下稳定地层精准扩孔,为管体膨胀与悬挂预留空间。管体下孔前进行底部密封处理,下入至护壁位置后,向管体内泵入高压液体

打压膨胀,通过压力数据判断管体膨胀尺寸;膨胀到位后管体基本恢复圆形,硫化于管体外部的橡胶经挤压与孔壁形成稳定锚固力,能够承受较高拉、压力与扭转力。膨胀后,解锁多功能送入工具的割刀进给机构,使割刀下移并切除管体上端及底部,切割完成后对管口进行扩大规圆处理,最终获得直径不小于原孔径的护壁段。其施工流程如图1所示。

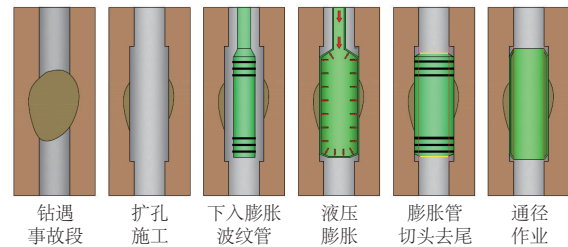


图1 膨胀波纹管护壁施工流程

2.2 关键技术

(1)选材和成型技术:膨胀波纹管以无缝圆管为基管,经冷压或冷拔加工实现径向塑性变形,下孔后通过液压膨胀基本恢复圆形以贴合孔壁。基于成型与膨胀工艺,管体材料需同时具备低屈服强度、高抗拉强度及膨胀后高硬度的特性,故材料筛选与热处理工艺优化是研发核心。研究团队经上百次试验,选定代号KP02的管材,经定制化热处理后,多次冷加工不易产生缺陷,且膨胀后硬度较高,能为孔壁提供稳定支撑。截面形状设计上,综合成型难度、膨胀受力均匀性及膨胀后圆度,优选多瓣梅花型,通过多道渐进式模具逐步成型,既减少管体损伤,又使膨胀后截面圆度误差较小,无需额外机械膨胀。

(2)一体化送入、膨胀、切割技术:膨胀波纹管护壁作业主要涵盖管体送入、液压膨胀、切头去尾及管口规圆4个核心流程。依托自主研发的多功能送入工具,可一趟钻完成上述全部工序,大幅简化施工流程,尤其对深孔护壁作业能有效减少起下钻次数,降低孔内事故风险,提升施工效率。该多功能送入工具核心组成部分包括波纹管连接组件、密封组

件、割刀及其进给机构和规圆器。波纹管连接组件与膨胀波纹管焊接固定,密封组件防止管体液压膨胀时压力泄漏,割刀及其进给机构对膨胀波纹管切头和去尾,规圆器将切口扩大并修整至圆形。所有工序完成后,多功能送入工具提出孔外,孔内仅留存已膨胀并锚固于孔壁的膨胀波纹管,形成稳定护壁段。

(3)异形薄壁对接技术:膨胀波纹管截面为多瓣梅花型,管体最小壁厚仅3~4 mm,长距离护壁时的管体可靠对接成为技术难点。圆形管体常用的螺纹连接方式不适用于异形截面管体,经大量调研与试验,最终优选氩弧焊作为管体对接方式。通过不断调整焊接工艺、优化焊接参数,并充分考虑野外作业特性,最终形成一套满足薄壁异形截面管体单面焊接双面成型的焊接工艺,焊后管体强度及韧性与母材相当。经大量试验与工程应用验证,焊道可与母材同步膨胀,且强度优于母材。

(4)悬挂锚固技术:膨胀波纹管膨胀后需要稳定锚固于孔壁,一方面承受切头去尾和孔口规圆带来的压力和扭矩,另一方面与地层结合为一个整体,避免受到钻具反复扰动窜动脱落。为尽量减小管体膨胀量,小口径膨胀波纹管利用与管体弧形凹槽截面相同的弧形橡胶条,通过冷硫化工艺硫化到凹槽内,既不影响管体外径,又能够防止入孔过程对橡胶条造成刚蹭和损伤。单位长度的悬挂橡胶条能够提供的锚固力与扩孔质量(孔径准确性、孔壁光滑性)有关,但项目组通过大量室内试验已经获得了基础数据,能够为施工应用提供基本数据支撑。

3 技术特点

(1)一趟钻护壁施工,简化工艺流程,缩短施工周期。研发的小口径膨胀波纹管护壁工艺,通过多功能送入工具携带膨胀波纹管,一趟钻即可完成管体下入、膨胀悬挂、切头去尾、管口规圆四道核心工序。相较于石油领域采用的管体下入液压膨胀+多趟钻机械膨胀工艺,该技术大幅简化了施工工序,对深孔护壁施工具有重要实践价值。

(2)管体可一次性液压膨胀到位,无需多次机械规圆。研发的膨胀波纹管截面采用偶数多瓣梅花形状,波峰波谷交替均布且差值较小。液压膨胀时,圆周均布的波谷优先涨大并逐渐接近波峰,随后波峰波谷同步膨胀;结合管体材料与焊道的优良抗拉强度,可实现管体一次性液压膨胀到位,无需后续进行多次机械膨胀处理。

4 应用案例

(1)坍塌地层护壁应用。2015年,为广西地球物理勘察院的马鞍山孔明银铅锌矿区第七勘线ZK703孔完成坍塌护壁施工。ZK703孔设计孔径为75 mm,设计孔深为1200 m,钻至孔深1032 m处出现坍塌卡钻现象。事故发生后,现场多次采用泥浆调配、水泥造壁等常规方法处理,历时5个月未取得成效,面临钻孔报废风险。项目组进入现场,先后完成1033.4~1038.9和1038.0~1040.4 m两处严重坍塌段护壁施工,液压膨胀压力21 MPa,通孔后下入 \varnothing 75 mm绳索取心

钻具,继续钻进至1200.6 m终孔。

(2)缩径地层护壁应用。2016年,为广西柳州地区页岩气地质调查井工程雒容1井实施缩径坍塌护壁施工。雒容1井设计井深2200 m,完钻井径75 mm,钻至1470 m白云岩与泥岩过渡段时井内出现严重缩径坍塌现象。现场采用泥浆改进、水泥封堵、孔内捞渣等方法,近3个月无有效进尺。后采用膨胀波纹管对1470.1~1477.3 m处进行护壁施工,打压至21 MPa完成液压膨胀,通井后下入 \varnothing 75 mm绳索取心钻具顺利完钻。

(3)大斜度孔破碎段堵漏护壁应用。2016年,为山东黄金地质矿产勘查有限公司的西岭矿区ZK92-7孔实施破碎涌水段护壁施工(图2)。ZK92-7孔设计孔深1600 m,终孔孔径75 mm,设计孔斜 13° ,实测孔斜 20° 。该孔在1217.1 m和1293 m处出现风化破碎岩段,伴随严重掉块涌水。结合钻孔状况及岩心分析,对1216~1219.8 m进行护壁,液压膨胀压力21 MPa,通孔后下入 \varnothing 75 mm绳索取心钻具继续钻进至终孔。

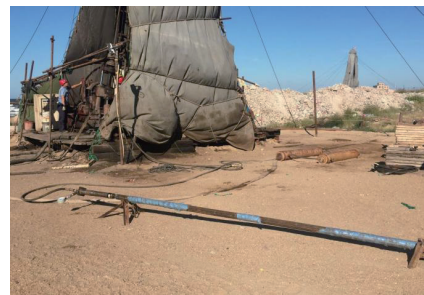


图2 ZK92-7孔护壁施工现场

(4)深孔长距离破碎带护壁施工。2015年,为山东招金地质勘查有限公司的阜山镇栾家河矿区ZK04孔实施长距离破碎带护壁施工。ZK04孔设计孔深2500 m,终孔孔径75 mm,钻至1800 m时发现多处破碎带,根据现场岩心情况确定护壁段为1789.5~1810 m,累计长度20.5 m,采用3根波纹管对接后进行护壁施工。膨胀压力18 MPa,护壁后下入 \varnothing 75 mm绳索取心钻具继续钻进。

5 应用建议

膨胀波纹管护壁作为有效的钻孔临时稳定支护技术,得到了石油和地质领域的高度认可。它可以作为钻孔“急救包”,为深孔、超深孔和复杂地层钻进提供保障,适用于陆地小口径钻孔、油气钻井和深海钻井等领域,尤其在边远和深山等复杂地层区域,可依托该技术优化钻孔结构,提高钻孔效率并降低施工成本。除适用于小口径的 \varnothing 75、96和122 mm膨胀波纹管,项目组还成功研发了 \varnothing 216和241 mm 2个系列的膨胀波纹管,其中 \varnothing 75和96 mm 2个规格进行了较多的施工应用, \varnothing 122、216和241 mm 3个规格已完成了管材和器具配套研发和陆地试验,能够有效支撑不同规格钻孔的护壁需求。□