

# 深孔用高钢级绳索取心钻杆分区热处理工艺试验研究

彭莉<sup>1</sup>, 梁健<sup>2</sup>, 蔡纪雄<sup>1</sup>, 杨金东<sup>1</sup>, 孙环平<sup>1</sup>, 孙建华<sup>2</sup>

(1. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214174; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**为改善绳索取心钻杆受力工况,延长钻杆使用寿命,满足深孔及特深孔钻探施工要求,开展了对绳索取心钻杆杆体进行分区热处理工艺的试验研究。试验选用高钢级薄壁管材,通过对钻杆两端 300 mm 左右的区间内进行盐浴淬火及高温回火处理,保证了调质区域的机械性能,硬度和金相组织均匀性良好,同时热处理过渡带影响区域小。试制加工的特深孔绳索取心钻杆具有两端部螺纹连接段刚性强、杆体中部韧性好的特点。该钻杆在山东莱州西岭村矿区完成了 2845.55 m 深孔的钻进施工,使用情况良好。

**关键词:**绳索取心钻杆;分区热处理;盐浴淬火;高温回火;深孔钻探

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)09-0014-06

**The Experimental Study on the Partition Heat Treatment Process of High Grade Wireline Coring Rod/PENG Li<sup>1</sup>, LIANG Jian<sup>2</sup>, CAI Ji-xiong<sup>1</sup>, YANG Jin-dong<sup>1</sup>, SUN Huan-ping<sup>1</sup>, SUN Jian-hua<sup>2</sup>** (1. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** In order to improve stress conditions of wireline coring drill rod and extend the service life of wireline coring drill rod to meet the special deep hole drilling and construction requirements, this paper carries out the experimental study on the partition heat treatment process of wireline coring drill rod. The experiment chooses high grade thin-walled tubes, the interval of about 300mm rod ends are bath quenching and tempering process, which ensures the mechanical properties of the quenched area, hardness and microstructure uniformity is good, while heat treatment transitional area of influence is small. Prototype manufacturing special deep hole wireline coring rod has features of strong rigidity at both ends of the connection section rigid and good toughness at central rod, the drill rod used in Shandong Laizhou site drills 2845.55m, use effect is very good.

**Key words:** wireline drill rod; step heat treatment; salt bath hardening; high-temperature tempering; deep hole drilling

## 0 引言

通过近年来对产品不断的技术革新,绳索取心钻杆的应用钻进深度已由原来的 1500 m 以浅突破至 2500 m 以深。随着钻进深度不断加深,孔内地层情况愈加复杂,对于薄壁绳索取心钻杆而言,保证钻杆在有较高的刚性连接性能的前提下,又具备良好的柔韧性,使钻杆能够承受较高的拉、压、弯交变应力,应从管材的选择、热处理方法的研究、螺纹结构的设计以及加工制造方法等多方面进行研究。本文阐述了通过选择机械性能较好的高钢级管材,对其进行分区调质热处理工艺研究,使绳索取心钻杆实现“刚柔并济”的综合使用效果,以便适应孔内大环空扰动回转、斜孔施工等复杂工况的施工环境。

## 1 绳索取心钻杆材料的选择

根据目前国内管材制造的技术特点,绳索取心钻杆的生产厂家多采用无缝钢管作为钻杆原材料。一般来说,普遍采用的是 45MnMoB 或 30CrMnSiA 材料。近年来,在地勘行业“十一五”、“十二五”科技项目的实施中,新的高性能无缝管材的应用也不断涌现,其中包括 XJY850 和 XJY950 管材的应用。XJY850 近似于美国钢铁学会标准中 4140 材料,根据国内钢坯特点调整了部分微量元素的含量,并且对硫、磷有害元素的成分控制均 < 0.03%,使其具有更高抗拉强度和伸长率,有利于钻杆制造中端部镦粗工艺所需的塑性变形,材料的曲强比较高。另外,在 XJY850 基础上进行了优化和提高,又开发出了 XJY950 材质,该材料近似于合金结构钢 SAE4137H,是一种超

收稿日期:2016-04-01;修回日期:2016-04-15

基金项目:“十二五”国家高技术研究发展计划(863 计划)“4000 米地质岩心钻探成套技术装备”(编号:2014AA06A607);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放课题“特深孔绳索取心钻杆分区热处理工艺优化研究”(编号:DET201602)

作者简介:彭莉,女,土家族,1977 年生,技术研发部部长,高级工程师,硕士,从事地勘产品的研发与加工制造的研究工作,江苏省无锡市惠山经济开发区畅园路 8 号, pengliwx@126.com。

高强度超细晶粒淬透性调质钢,具有高淬透性、耐冲击、抗疲劳性优良。通过对上述几种常用的绳索取心钻杆材料进行多次强度测试,经过数据归纳整理,提取具有普遍代表性相关数据见表 1。

表 1 几种常用绳索取心钻杆材料机械性能对比

| 项目        | 热处理方式 | HRC 硬度 | 晶粒度 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% | 冲击吸收能量(20℃)/(KV <sub>2</sub> ·J <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-------|--------|-----|----------|----------|-------|---|
| 45MnMoB   | 正火    | 20     |     | ≥760     | ≥588     | ≥12   |   |
| 30CrMnSiA | 调质    | 28~32  | 8   | ≥850     | ≥750     | ≥14   | ≥35   |
| XJY850    | 调质    | 28~32  | 9   | ≥950     | ≥850     | ≥14   | ≥59   |
| XJY950    | 调质    | 30~34  | 9   | ≥1050    | ≥950     | ≥13   | ≥62   |

注:冲击吸收能量(20℃)均已换算成 10 mm×5 mm×55 mm 的标准冲击试样数值。

从表 1 可看出,45MnMoB 一般在出厂后的正火状态下直接应用,该钢种是非调质钢,因此,用正火状态下的管材加工的钻杆体,杆体两端配接材质为 30CrMnSiA 的钻杆接头,该类钻杆的机械性能强度能够满足 1500 m 以浅钻进施工需求。而 30CrMnSiA、XJY850 和 XJY950 必须经过调质热处理,才能使钻杆材料达到较高的机械性能,调质热处理的主要目的是使材料的晶粒度细密,金相组织为均匀回火索氏体。在调质热处理后,XJY850 和 XJY950 材质综合机械性能明显优于常规普通绳索钻杆材质,可作为深孔高强度绳索取心钻杆应用的主要材质。随着钻进施工深度的不断加深,将高强度级管材作为深孔钻杆材料已经成为必然趋势,使钻杆能够始终采用薄壁材料,不用过度通过增加钻杆的壁厚,以免钻杆变得粗笨,不仅增加原材料成本,还使钻机的负荷增加,影响钻进施工效率。

## 2 分区热处理工艺研究

### 2.1 热处理方案设计

尽管目前高强度绳索取心钻杆采用整体热处理方式较普遍,使钻杆的整体刚性全面提高,具有良好的刚性强度,但钻杆韧性欠佳,尤其是在浅孔或破碎地层施工中刚性过强的钻杆容易发生钻杆折断等质量事故,分析其原因,主要是由于当钻进深度较浅时,少量的钻杆柱连接,被视为一组刚性较强长钻

杆,钻杆很难弯曲,在回转过程中刚性最强的螺纹连接处始终受扭转载荷,而杆体部分也由于韧性不好,无法吸收部分弯扭能量,而使螺纹连接出的载荷继续加大,最后导致钻杆螺纹断裂。而随着钻孔不断加深后,钻杆柱长度增加,孔内整体钻杆柱的柔韧性增加,此时整体调质钻杆的优越性才能发挥出来。

为了使深孔高强度绳索取心钻杆能够更好地适用从浅至深的施工需求,使钻杆达到“刚柔并济”的性能状态,通过采用分区调质热处理方式达到该目的。目前,采用的工艺方法为:对钻杆端部 300 mm 左右长度进行调质热处理,即盐浴等温淬火和高温回火的热处理方式,使端部硬度控制在 HRC28~32,保证钻杆端部较高的强度和刚性,而杆体中部依旧保持原有的正火状态,HRC22 左右,具有良好的韧性,在钻进过程中使杆体能够更好地吸收瞬间的冲击载荷,释放部分能量,减轻刚性较强的螺纹副的承载负担。

对国外高性能绳索取心钻杆取样分析,其钻杆也采用分区调质热处理方式,一方面利用杆体原材料原有的正火状态机械性能保证钻杆的柔韧性,另一方面通过对杆体两端调质处理及表面高频淬火热处理方式保证钻杆螺纹连接部分高机械性能和连接强度。

因此,我们对部分深孔用高强度级绳索取心钻杆亦采用分区调质的热处理方式。主要包括采用高强度 XJY850 加工 N 口径 Ø73 mm×5 mm 整体自接式钻杆和采用 XJY950 钢级加工 H 口径 Ø91 mm×5 mm 整体自接式钻杆。这两种钻杆的外径内外尺寸比常规普通钻杆略大,主要是尝试研究是否可将该口径钻杆作为套管使用,直接进行下一级口径钻进,同时要尽可能发挥经热处理后钻杆整体韧性,以及减少钻杆连接螺纹数量,因此将钻杆长度定为 4.5 m。其中钻杆分区热处理方式示意图见图 1。

### 2.2 热处理工艺及设备选择

传统的整体钻杆热处理方式主要有 3 种,即井式炉整体调质处理、步进窑炉整体调质处理以及中频调质热处理方式。表 2 列出了 3 种热处理方式的不同优缺点。

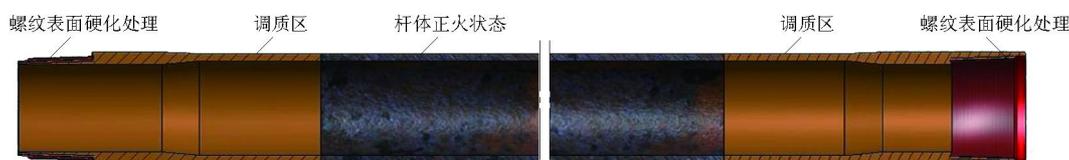


图 1 钻杆热处理方式示意图

表2 几种不同的钻杆热处理方式对比情况

| 热处理方式      | 优点   | 缺点                           |
|------------|--|------------------------------|
| 井式炉整体调质处理  | 钻杆的直线度较好,回火充分,内部应力释放完全,金相组织晶粒度7~8级                       | 表面氧化皮较厚,钻杆头尾的硬度分布不均,钻杆整体刚性较大 |
| 步进窑炉整体调质处理 | 可适用于大规模连续生产,回火充分,内部应力释放完全,钻杆整体硬度分布较均匀,金相组织晶粒度7~8级        | 钻杆直线度不容易弯曲,表面氧化皮较厚,钻杆整体刚性较大  |
| 中频感应整体调质处理 | 适合于连续作业生产,生产效率高,钻杆表面基本无氧化皮,表面有增加疲劳强度的压应力,金相组织晶粒度9~10级或以上 | 钻杆直线度较差,钻杆整体刚性较大             |

我们此次采用分区热处理方式,因此,以上3种大型热处理设备都不能满足不同区间段的热处理硬度需求。经过调研对比,钻杆端部调质区域的热处理方式采用盐浴池等温淬火和箱式炉保温回火的热处理工艺。盐浴淬火的特点是工件加热速度快,工件与溶液密切接触,加热均匀、变形小,加热温度波动小,容易保持中性状态,能实现无氧化、无脱碳加热,容易实现工件局部加热操作。所以能更好地适应目前钻杆两端进行淬火的热处理方式。

具体的热处理工艺过程如图2所示。

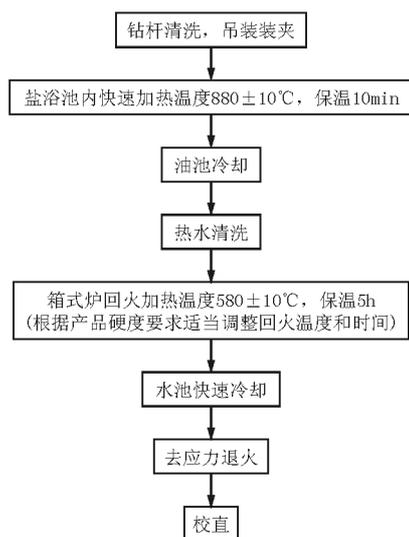


图2 热处理工艺过程

## 2.3 钻杆测试分析

### 2.3.1 试验钻杆规格参数(见表3)

表3 测试样件规格参数

| 钻杆规格/mm | 钻杆结构      | 材质     | 调质段 HRC 硬度 |
|---------|-----------|--------|------------|
| Ø73 × 5 | 端部加厚自接式钻杆 | XJY850 | 28 ~ 32    |
| Ø91 × 5 | 端部加厚自接式钻杆 | XJY950 | 30 ~ 34    |

### 2.3.2 检测分析过程

#### 2.3.2.1 XJY850 材质硬度检测及金相分析

该材料在合理的硬度范围内的机械性能特点我们已经做了分析了解,做分区热处理的主要目的是

检测热处理段的均匀性,以及过渡带影响区域大小,因此,只针对样件进行了硬度和金相的检测分析。

#### (1) 硬度检测。

根据该材料的硬度要求,我们设计调质段硬度范围为 HRC28 ~ 32,该硬度区间的抗拉强度值 912 ~ 988 MPa。经过对该材料多次的测试分析,该硬度值下的抗拉强度值 > 1000 MPa,都能满足使用要求。鉴于该批次钻杆是分区调质的钻杆,只对钻杆的两端进行调质处理,杆体部分为出厂的正火状态。因此,我们分别检测了调质区域、过渡区域和调质区域各个不同位置的硬度,同时,对加厚端的钻杆,检测不同壁厚情况下,钻杆的调质硬度是否均匀,进行了分段硬度检测。对上述硬度检测检验分析情况如图3~图5以及表4所示。



图3 XJY850 加厚段硬度检测样品实物



图4 XJY850 管体部分热处理区域硬度测试样品实物



图5 XJY850 管体周向硬度测试样品实物(顺时针方向硬度)

经过对上述试验样件的硬度检测分析,管端经过局部热处理的钻杆体硬度分布较均匀,均在设计要求的 HRC28 ~ 32 的合格范围之内,在管体的过渡段,硬度分布依次由调质硬度减弱为正火状态的硬度,规律

表 4 管体及过渡区域硬度测试汇总

| 序号                      | 打点位置 | 维氏硬度(HV) | 洛氏硬度(HRC) | 备注            |
|-------------------------|------|----------|-----------|---------------|
| 1                       | (1)  | 252      | 22.2      | 未进行热处理的管体轴向部分 |
|                         |      | 261      | 24        |               |
|                         |      | 218      | ≈18       |               |
|                         |      | 222      | ≈19       |               |
| 2                       | (10) | 279      | 25.6      | 热处理与未处理的过渡区域  |
|                         |      | 280      | 27        |               |
|                         |      | 284      | 27.8      |               |
| 3                       | (16) | 319      | 32.2      | 热处理区域         |
|                         |      | 323      | 32.2      |               |
|                         |      | 325      | 33        |               |
| 管体周向硬度<br>(从“1”开始顺时针方向) |      | 225      | ≈19       | 未进行热处理管体周向区域  |
|                         |      | 215      | ≈18       |               |
|                         |      | 257      | 23        |               |
|                         |      | 237      | 20        |               |
|                         |      | 233      | ≈20       |               |
|                         |      | 210      | ≈18       |               |
|                         |      | 206      | ≈18       |               |

依次递减,过渡段的热影响区间长度约为 20 mm。

(2) 金相分析。

金相组织分析可以有效地判断热处理淬火加热温度、保温时间、冷却速度等是否合适,为调整工序

及修改工艺参数提供依据,并指导生产。为此,我们对试验钻杆分段进行了金相检测,具体检测分析情况如图 6 所示。

分析结果:调质区域为调质状态,回火索氏体和极少量细块状铁素体,晶粒度 10 级;管体本体区域是正火状态,金相组织为条状及块状铁素体和珠光体,晶粒度 6 级;过渡区域为正火状态与调质的混合状态,区间长度约 20 mm,金相组织为回火索氏体和部分块状铁素体。

经过对管端调质区域样件的金相分析,金相组织均为回火索氏体和极少量细块状铁素体,壁厚不均匀的管体及过渡区域金相组织也十分均匀,未受壁厚差异的影响。

(3) 拉伸试验检测。

对钻杆端部采用盐浴淬火和高温回火的调质处理方式的试样,我们进行了拉伸试验。经测试,该方法调质后的钻杆材料抗拉强度为 1060 MPa。与箱式炉或中频感应加热方式调质的材料性能相同,满足钻杆使用需求。

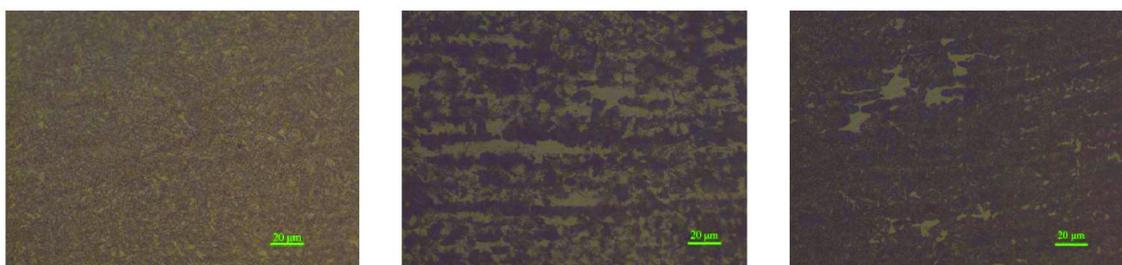


图 6 XJY850 钻杆金相照片

2.3.2.2 XJY950 材质硬度检测及金相分析

(1) 硬度检测。

该批次试验样件进行了两个硬度范围内的检测,检测样品见图 7、图 8,具体检测结果见表 5。



说明:共计实测 15 个点,依次从左向右为序号为 1 ~ 15

图 7 XJY950 样品 1



说明:共计实测 16 个点,依次从左向右序号为 1 ~ 16

图 8 XJY950 样品 2

表 5 测试样件硬度情况

| 样品            | 样品 1                         |           | 样品 2                         |    |
|---------------|------------------------------|-----------|------------------------------|----|
|               | HRC30 ~ 32                   |           | HRC33 ~ 35                   |    |
| 调质区域硬度<br>实测值 | ①                            | 32        | ①                            | 35 |
|               | ②                            | 31        | ②                            | 34 |
|               | ③                            | 31        | ③                            | 34 |
|               | ④                            | 32        | ④                            | 35 |
|               | ⑤                            | 31        | ⑤                            | 33 |
|               | ⑥                            | 32        | ⑥                            | 33 |
|               | ⑦                            | 31        |                              |    |
| 过渡区域硬度<br>实测值 | ⑦ - ⑧ - 1                    | 30        | ⑥ - ⑦ - 1                    | 35 |
|               | ⑦ - ⑧ - 2                    | 26        | ⑥ - ⑦ - 2                    | 33 |
|               | ⑦ - ⑧ - 3                    | 19        | ⑥ - ⑦ - 3                    | 33 |
|               | ⑧ - ⑨ - 1                    | 15        | ⑦ - ⑧ - 1                    | 21 |
|               | ⑧ - ⑨ - 2                    | 15        | ⑦ - ⑧ - 2                    | 14 |
| ⑧ - ⑨ - 3     | 16                           | ⑦ - ⑧ - 3 | 14                           |    |
| 管体区域硬度<br>实测值 | 从第 9 个检测点到第 15 个检测点,硬度值 ≥ 17 |           | 从第 8 个检测点到第 16 个检测点,硬度值 ≥ 17 |    |

从表5可看出,调制区域段的热处理硬度均匀,过渡热影响区域宽度约为20 mm,范围较小,不会影响管体的正常使用。

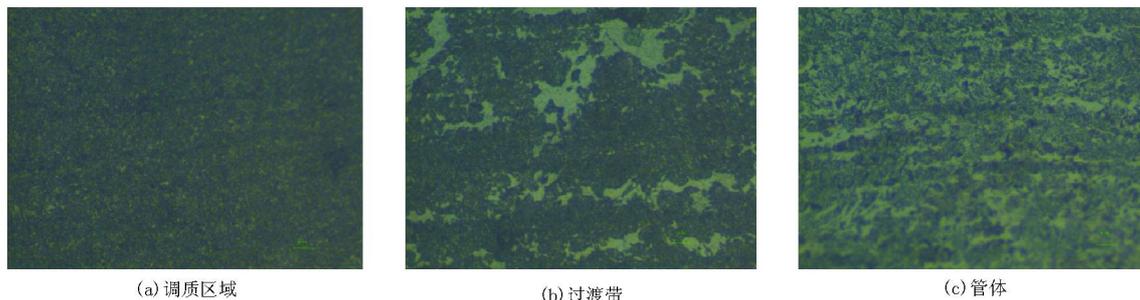


图9 XJY950 钻杆样品1金相照片

分析结果:调制区域为回火索氏体+极细的块状铁素体,晶粒度9级;过渡带区域是回火索氏体+较多条块状铁素体,调质状态未完全转变完成,是过

(2)金相分析。  
样品1的金相检测分析如图9所示。

渡区域的特征,该区域段长度约为20 mm;管体是条块状铁素体+珠光体,为正火状态组织。

样品2的金相检测分析如图10所示。

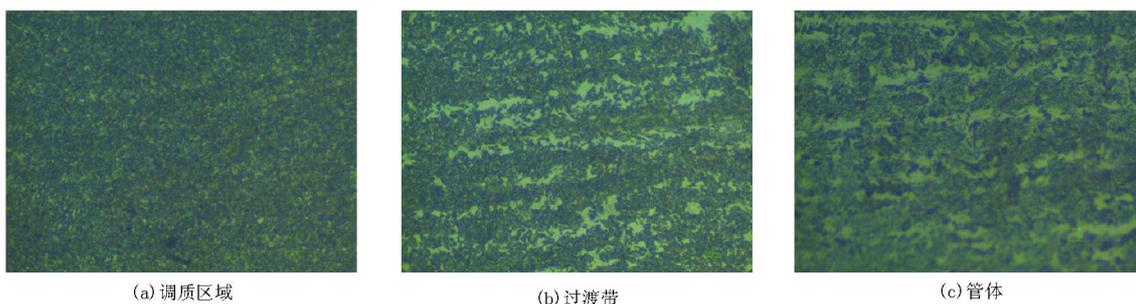


图10 XJY950 钻杆样品2金相照片

分析结果:调质区域是回火索氏体+极细的块状铁素体,晶粒度10级;过渡带区域是回火索氏体+较多条状铁素体,该区域是调质状态未完全转变,是过渡区域的特征,该区域段长度约为20 mm;管体是条块状铁素体+珠光体,为正火状态组织。

### (3)拉伸试验检测。

对上述样品1(HRC30~32)和样品2(HRC33~35)分别进行了抗拉强度测试,测试结果见表6。调质后的钻杆材料抗拉强度均能达到高钢级强度要求,能够满足使用要求。

表6 拉伸测试结果

| 样品编号 | HRC 硬度 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
|------|--------|----------|----------|-------|
| 样品1  | 30~32  | 1030     | 935      | 14.5  |
| 样品2  | 33~35  | 1150     | 1060     | 12.0  |

从表5、表6综合数据看出,对XJY950分别进行了两种硬度区间的金相、硬度和强度测试,目的主要是分析在硬度的区域上线和下限之间,热处理状态如何,经过对比分析,该硬度区间范围的调质区域

晶粒度都在9级以上,均为回火索氏体,过渡段的组织虽然有一些不均匀,该区域不需要加工螺纹,该组织状态下的机械性能完全能够满足钻杆强度的需求。因此,我们在小批量试制钻杆时,硬度区间为HRC30~34,平均硬度基本控制在HRC32左右,保证螺纹加工段的韧性。

### 2.3.3 测试结果

综上所述,对XJY850和XJY950两种材料进行分区调质热处理工艺方式是完全可行的,既能保证调质区域螺纹部分的连接强度和刚性,另一方面,管体部分为正火状态,杆体的韧性较好,能够保证钻杆体在孔内施工时承受复杂的交变应力,可以释放一部分刚性强度。通过硬度和金相检测,热处理过渡带区域较小,过渡带的硬度和金相组织都依次递减排至管体,因此不影响钻杆的使用性能。

## 3 产品试制和野外试验

针对选用高钢级材料进行分区热处理的工艺试

验分析结果,我们选用 XJY850 钢级  $\varnothing 73 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  管料和 XJY950 钢级  $\varnothing 91 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  管料分别进行了小批量的钻杆加工试制。 $\varnothing 73 \text{ mm}$  钻杆加工 1000 m,为自接式钻杆 4.5 m/根, $\varnothing 91 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  钻杆加工 2500 m,为自接式钻杆 4.5 m/根。试制过程中热处理工艺参数严格按照小样测试时的工艺要求对钻杆进行批量加工。钻杆两端盐浴淬火时采用竖直悬吊的加热方式,因此钻杆的直线度控制良好,钻杆校直后直线度能都满足弯曲度  $< 0.7 \text{ mm/m}$  的要求。由于盐浴淬火加热均匀、变形小,加热温度波动小,能实现无氧化、无脱碳加热,因此对杆体的热影响区域小,淬火后又采用箱式炉整体回火方式,可以使金相组织结构进行缓慢过渡,防止发生金相组织突变,保证钻杆热处理后的使用性能。

两种规格的钻杆都已完成了产品加工,其中 N 规格加强型负角螺纹绳索取心钻杆 ( $\varnothing 73 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) 已经在山东黄金地质矿产勘查有限公司莱州市西岭村矿区 ZK120-1 钻孔使用。H 规格加强型负角螺纹绳索取心钻杆 ( $\varnothing 91 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) 在辽宁省朝阳市的松辽外围金羊盆地“羊 D1 井”页岩气钻探工地使用。ZK120-1 钻孔设计孔深 3200 m,是近期国内正在施工中 N 口径最深的钻孔。该孔于 2014 年 8 月 7 日开钻,至 2015 年 3 月 31 日终孔,终孔深度 2845.55 m。使用过程中 N 规格加强型绳索取心钻杆一直放在最上端使用,下端使用普通绳索取心钻杆。经过一个钻孔的应用,钻杆无断裂、无变形,杆体腐蚀轻微,接头螺纹无腐蚀。钻杆拧卸轻松,无粘扣现象。钻杆为双顶肩部密封,保压性能良好,8 MPa 压力下无泄漏。

#### 4 结语

根据薄壁绳索取心钻杆的使用特点,为了满足钻杆深孔及特深孔的钻进使用要求,既要保证钻杆螺纹连接端部有足够的刚性和强度,满足该区域承受复杂的拉、压、弯、扭的交变应力,又要使钻杆体中间部分保持足够的韧性,能够适应钻杆在孔内的扰动回转。在这种复杂的受力环境下,钻杆要实现“刚柔并济”的使用性能,应选用高钢级薄壁管材,对钻杆进行分区热处理的工艺方法能够实现该使用效果。通过对钻杆两端 300 mm 左右的区间内进行盐浴淬火及高温回火处理(即调质热处理),能够保

证调质区域的机械性能强度,并且该区域的硬度和金相组织均匀性良好,同时热处理过渡的热影响区域小,不影响钻杆的整体使用性能。该工艺试制的钻杆成品已用于现场工地使用,完成了 2845.55 m 深孔的钻进施工,使用情况良好。

由于受热处理工艺设备条件的限制,目前所采用的调质方法是局部盐浴淬火和整体高温回火,热处理加工周期较长。随着热处理装备的不断进步,在今后的研制过程中可以试制局部中频感应调质处理,实现在线的连续化作业生产,提高生产效率。

#### 参考文献:

- [1] 孙建华. 大深度复杂地层绳索取心钻探技术[J]. 地质装备, 2008, (4): 19-21, 16.
- [2] 张金昌. 深部找矿关键钻探技术与对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(11): 1-6.
- [3] 肖红, 孙建华, 高申友, 等. XJY950 高钢级精密绳索取心钻杆用无缝钢管的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(6): 12-15.
- [4] 况雪军, 孙建华. XJY950 高强度紧密地质管材的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(5): 28-30.
- [5] 张伟, 王达, 刘跃进, 等. 深孔取心钻探装备的优化配置[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(10): 34-38, 41.
- [6] 樊东黎, 等. 热处理工程师手册[K]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] 任兰泉. 盐浴淬火的新发展[J]. 国外金属热处理, 1995, (6): 4-10.
- [8] 李树中. 关于盐浴淬火的若干问题[J]. 金属热处理, 1991, (5): 59-61.
- [9] 董海燕, 王鲁朝, 杨芳, 等. 国产 CNH(T) 绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 49-53.
- [10] 苏继军. 金刚石绳索取心钻杆接头螺纹的优化研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2005.
- [11] 孙建华, 张永勤, 梁健, 等. 深孔绳索取心钻探技术现状及研发工作思路[J]. 地质装备, 2011, (4): 11-14.
- [12] 满国祥, 杨宏伟. 国产绳索取心钻杆设计与制造技术的分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(2): 49-52.
- [13] 朱恒银, 王强, 杨展, 等. 深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M]. 湖北武汉: 地质出版社, 2014: 133-136.
- [14] 王达. 深孔岩心钻探的技术关键[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1): 1-4.
- [15] 赵大伟, 赵国仙, 赵映辉, 等.  $\varnothing 88.9 \text{ mm} \times 9.35 \text{ mm}$  G105 钻杆内螺纹接头胀扣失效分析[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(6): 56-60.
- [16] 王振东, 马秀中. 高强度钢管的感应加热调质处理[J]. 钢铁, 1985, (6): 25-32, 38.
- [17] 孙建华, 况雪军, 肖红, 等. 高钢级绳索取心钻杆管材残余应力的初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(1): 43-48.