

# 全金属动力钻具马达部件制造材料调研分析

梁晨帆<sup>1,2</sup>, 王 瑜<sup>1,2</sup>, 彭志坚<sup>1,2</sup>, 王志乔<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 李云勇<sup>3</sup>

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083;  
3.河北立森石油机械股份有限公司,河北 沧州 061000)

**摘要:**全金属容积式动力钻具是当前深部钻探研究的热点之一,其在井下工作受到金属摩擦、高速冲蚀、高温腐蚀、拉伸、扭转、振动等复杂工况影响,对制造材料提出了较高的要求。本文首先调研了当前井下机具马达部件定转子的常见选材成分、力学特性和加工性能;随后介绍了超深井对全金属动力钻具马达部件的要求并分析了现存难点;初步优选了定子、转子制造材料,并考虑转子部件上采用新型铜基-铁基材料复合结构;调研分析了其加工处理技术发展现状;提出了加工建议。为全金属动力钻具马达部件的设计和寿命研究提供了参考依据。

**关键词:**深部钻探;高温;井下动力钻具;全金属;金属材料;热处理

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0094-07

## Investigation and analysis of the manufacturing process for metal-to-metal downhole drilling motor parts

LIANG Chenfan<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, PENG Zhijian<sup>1,2</sup>,  
WANG Zhiqiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, LI Yunyong<sup>3</sup>

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;  
3.Hebei Lisen Petroleum Machinery Corp., Cangzhou Hebei 061000, China)

**Abstract:** The metal-to-metal volumetric power drilling tool is one of the current hotspots in high-temperature drilling research. It is subject to complex conditions such as metal friction, high-speed erosion, high-temperature corrosion, torsion, and vibration in the well, which places higher requirements on material selection and manufacturing processes. This article first investigates the common material composition, mechanical properties and processing performance of the stator and rotor of the motor in the existing downhole tools, and then analyzes the requirements and difficulties of ultra-deep well drilling for the metal-to-metal drilling motor parts. The material for the rotor and stator is selected with a new copper-iron-based composite for the rotor components. Investigation and analysis is also conducted on the existing machining process with the recommendation put forward, providing a reference basis for the design and service life research on metal-to-metal power drill motor components.

**Key words:** deep drilling; high temperature; downhole motor; metal-to-metal; metallic material; heat treatment

## 0 引言

全金属容积式动力钻具采用全金属动密封结构,具有良好的耐高温特性和动力输出特性,是当前高温钻探研究的热点之一,在超深科学钻探、干热岩钻井等领域具有良好的应用前景。马达作为全金属

容积式动力钻具的关键部件,其在井下工况条件十分恶劣,受到定、转子之间的高速摩擦,钻井液高速磨粒冲蚀,同时受到高温腐蚀、扭转、振动等复杂工况,极易使部件发生磨损失效,导致井下工具事故,增加钻井成本。合理选配马达制造材料,开展摩擦

收稿日期:2020-01-17; 修回日期:2020-03-22 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.014

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题四“小口径高效系列钻具研究”(编号:2018YFC0603404);中央高校基本业务费优秀教师基金项目“全金属动力钻具水力部件旋转振动模型研究”(编号:292018093)

作者简介:梁晨帆,女,汉族,1997 年生,在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事钻探钻具方面的研究,北京市海淀区学院路 29 号,919346796@qq.com。

引用格式:梁晨帆,王瑜,彭志坚,等.全金属动力钻具马达部件制造材料调研分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):94-100.

LIANG Chenfan, WANG Yu, PENG Zhijian, et al. Investigation and analysis of the manufacturing process for metal-to-metal downhole drilling motor parts[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 94-100.

副表面强化技术研究,对于提高使用寿命具有十分重要的意义。

针对深部钻探所需的  $\varnothing 95 \sim 178$  mm 全金属容积式马达部件研发需要,首先调研了当前井下机具常见管材的成分、力学特性和主要用途,随后介绍了超深井对钻具材料的要求并分析了现存难点,初步优选了全金属动力钻具马达部件制造材料,调研分析了其加工处理技术发展现状,考虑到井下环境和当前国内制造技术水平,提出了加工建议,可为该型全金属动力钻具的设计和寿命研究提供参考依据。

## 1 管材基本性能分析

钻具制造材料选择的依据是综合力学性能、加工性能,针对某一特殊工况下的性能,以及价格因

素。常见的用于钻具制造的铁基材料包括 38CrMoAl、4145H、42CrMo、35CrMo、45CrMo 等,而铜合金材料具有良好的耐磨性能,在全金属动力钻具的摩擦学设计中具有潜在的应用价值。本部分对这些常见材料的成分、力学特性、加工性能、用途进行对比,同时考虑行业应用、经济性、环境友好性等方面,为实际工况的管具选材提供依据。

### 1.1 铁基材料成分、力学性能及用途对比分析

对于铁基材料,C 含量是影响材料硬度强度的主要因素。38CrMoAl、4145H、42CrMo、35CrMo、45CrMo 这五种材料 C 含量均在 0.25%~0.60% 之间,属于中碳钢。材料具体成分、力学性能及用途详见表 1~3。

表 1 铁基材料化学成分

Table 1 Chemical composition of iron-based materials

钢号	C	Si	Mn	S(允许残余含量)	Cr	Al	Mo	P(允许残余含量)	Ni(允许残余含量)	Cu(允许残余含量)
38CrMoAl	0.35~0.42	0.20~0.45	0.30~0.60	≤0.035	1.35~1.65	0.70~1.10	0.15~0.25	≤0.035	≤0.030	≤0.030
4145H	0.42~0.49	0.15~0.35	0.65~1.15	≤0.035	0.75~1.20		0.15~0.25	≤0.035		
42CrMo	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	0.90~1.20		0.15~0.25		≤0.030	≤0.030
35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.035	0.80~1.10		0.15~0.25	≤0.035	≤0.030	≤0.030
45CrMo	0.38~0.48	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.035	0.80~1.10		0.15~0.25	≤0.035	≤0.030	≤0.030

表 2 铁基材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of iron-based materials

钢号	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	屈服强度 $\sigma_s$ / MPa	伸长率 $\delta_5$ / %	断面收缩率 $\psi$ / %	HB 硬度	冲击功 $A_{kv}$ / J	冲击韧性值 $\alpha_{kv}$ / ( $J \cdot cm^{-2}$ )
38CrMoAl	≥980	≥835	≥14	≥50	≤229	≥71	≥88
4145H	≥1000	≥880	≥17	≥50	≤270	≥80	≥88
42CrMo	≥1080	≥930	≥12	≥45	≤217	≥63	≥78
35CrMo	≥985	≥835	≥12	≥45	≤229	≥63	≥78
45CrMo	≥930	≥785	≥12	≥50	≤229	≥63	≥78

表 3 铁基材料特性、用途对比

Table 3 Comparison of characteristics and uses of iron-based materials

钢种	特 性	用 途
38CrMoAl	高级氮化钢,强度、硬度、耐磨性、疲劳强度较高,经过渗氮处理后表面 HV 硬度达 1000~1200	用于阀杆、阀门、气缸套及橡胶塑料挤压机等
4145H 钢	强度、硬度高,具有较好的耐磨性和抗疲劳特性,热处理后有较大的抗拉强度和较好的抗冲击韧性	为常见石油钻铤用钢,一般在组成钻柱时加在钻杆和钻铤之间,防止钻柱截面的突然变化,减少钻杆的疲劳。常在定向井中使用,可以在较低扭矩的情况下高速钻进,减少钻柱的磨损和破损
35CrMo	高强度、高韧性、高淬透性、淬火不易变形	用于制作大截面齿轮和重型传动轴,如轧钢机人字齿轮、大电机轴、汽轮发电机主轴等
42CrMo	强度和淬透性高于 35CrMo,具有较高的抗拉强度、塑性和韧性,调质后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力,低温抗冲击韧性良好	国内外油气田环境中常使用的一种钻具材料,用于制作调质断面更大的锻件,如机车牵引用的大齿轮、后轴、连杆、减速器、万向联轴器
45CrMo	具有高强度、硬度和韧性,钢的热强度也较好,在 500 °C 以下具有足够的高温强度,但在 550 °C 时其强度显著下降	用于制造截面较大、在高应力条件下工作的调质零件,如轴、主轴以及受高负荷的操纵轮、螺栓、双头螺栓、齿轮等

综上所述,38CrMoAl是一种高质量的优质钢,其主要特征是钢中铝含量很高,为0.7%~1.1%,是普通钢种的30倍以上,Al含量的增加极大地提高了材料的耐磨性,该钢种具有较高的疲劳强度和相当大的强度,并且具有出色的综合力学性能;4145H钢其他元素含量与42CrMo相似,但合金元素Cr、Mn、Mo等元素含量增加,导致综合力学性能与传统钻具材料相比更为优越;35CrMo具有良好的承受冲击、弯曲、扭转、高载荷的能力;42CrMo是目前国内外油气田环境中常用的钻具材料,强度比35CrMo高,经过淬火和回火后,它具有高疲劳极限和耐多种冲击能力,并且低温抗冲击韧性良好;45CrMo具有高强度、硬度和韧性,钢的热强度也较好,在500℃以下具有足够的高温强度,但在550℃

时其强度显著下降。

## 1.2 铜基材料成分、力学性能及用途对比分析

铜及其合金具有优秀的延展性、导电性、导热性、耐磨损性能,并广泛用于机械工业、航空工业、电子工业,在动力钻具中主要是利用其耐磨性。根据添加元素的不同,铜合金可分为青铜和黄铜。黄铜中添加的元素有锡、铅、铝、硅等,由于所添加元素质量百分数较少,故对基体的力学性能和加工性能影响相对较小。青铜主要是加入了锡、铅、锌、磷、铍等元素铸造而成,添加这些元素后,铜的机械性能、耐磨性和耐腐蚀性大大提高。青铜分为铍青铜、锡青铜、铝青铜、铅青铜、磷青铜等。根据调研,铍青铜、锡青铜、铝青铜具有较高耐磨性和一定耐腐蚀性,其具体成分、力学性能及用途详见表4。

表4 铜基材料成分、性能及用途  
Table 4 Copper-based materials composition, properties and uses

材料	化学成分	力学性能	用途	常用牌号
铍青铜	以铍作为主要合金组元的一种无锡青铜,含有1.7%~2.5%铍及少量镍、铬、钛等元素	铍青铜具有很高的硬度、弹性极限、疲劳极限和耐磨性,还具有良好的耐蚀性、导热性和导电性,受冲击时不产生火花,具有高强度、高硬度,尤其是在被腐蚀后合金力学性能没有明显变化,经过淬火时效处理后,强度极限可达1250~1500 MPa,接近中等强度钢的水平。在淬火状态下塑性很好,可以加工成各种半成品	煤矿井下定向钻探,常使用铍铜钻杆,作为防爆无磁钻杆	QBe2、QBe2.5、QBe1.7、QBe1.9等
铝青铜	含铝量一般不超过11.5%,有时还加入适量的铁、镍、锰等元素	具有高的强度,良好的减摩性和很好的耐蚀性,可热加工,可焊接,但不易钎焊	高强度、耐磨零件,如轴承、轴套、齿轮、涡轮等	QAL7、QAL9-4、QAL10-4-4等
锡青铜	以锡为主要合金元素的青铜,含锡量一般在3%~14%,有时还添加磷、铅、锌等元素	具有较高的强度,良好的抗滑动磨擦性,优良的切削性能和良好的焊接性能,在大气、淡水中有良好的耐腐蚀性能	用于在高负荷(20 MPa以下)和高滑动速度(8 m/s)下工作的耐磨零件,如连杆、衬套、轴瓦、齿轮、蜗轮等	QSn4-3、QSn4.4-2.5、QSn7-0.2、ZQSn10、ZQSn5-2-5、ZQSn6-6-3等

## 2 深井动力钻具材料优选与优化

### 2.1 选材要求及难点分析

当前常见的深井动力钻具主要有涡轮钻具和螺杆钻具。涡轮钻具为非容积式动力钻具,而常规螺杆钻具定子为橡胶件,其定、转子之间均不存在金属对磨问题,不在本文讨论之列。国外已经成功开发出全金属螺杆马达,国内正在研发全金属螺杆马达、全金属齿轮马达和其他新型旋转动力钻具,这种全金属容积式动力钻具的定子和转子之间均为间隙配合,两者之间受到金属对磨、高速冲蚀的同时,还承受者冲击、振动、扭转、高温腐蚀等作用,工作条件恶劣,分析其对管材的要求,主要有以下几个方面:

(1)动力钻具中的转子和定子之间的环形空间关系到输出动力性能,为较好地扩大和利用环形空

间,就需要转子材料具备较好的力学性能,尤其是抗扭强度、抗冲击和抗疲劳能力。

(2)全金属定子和转子之间为间隙配合,两者在工作过程中受到剧烈的摩擦作用,将导致金属动密封快速失效,因此,动静摩擦部件制造材料的选择必须考虑到摩擦学设计,为增加其工作寿命,需要将定子和转子分别做成软硬配合、不同类材料的配合,同时两者配伍要有较好的耐磨性。

(3)全金属动力钻具各部件之间多为间隙配合,高压大流量钻井液通过时将部件产生高速冲蚀磨损、高速雾化,导致部件表面冲蚀、点蚀等,同时使动力钻具容积效率降低。

(4)高温环境下,钻井液以及地层中的腐蚀性介质使得钻具表面,尤其是镀层产生各种腐蚀行为,需要材料具有较好的抗腐蚀能力,或者通过处理具有

较好的抗腐蚀能力。

(5)全金属动力钻具应具有较好的机械加工性能,市场上应有合适的管材或者棒料,行业内应有一定的加工经验,表面强化工艺的选择应充分考虑到水力部件复杂的曲面、加工精度、制造成本等因素。

## 2.2 定转子材料优选与优化

马达中定子和转子相互啮合,磨损是难以避免的,这就要求摩擦副选择合理的材料。摩擦副材料一般要求软硬搭配,铁基材料具有综合性能良好、价格低廉等特点,且在高温高负荷下有着优良的摩擦性能,机械强度高,但在低速时磨损量相当大。铁基的热稳定性高,缺点是与对偶件具有亲和性,容易产生粘着胶合,摩擦系数波动较大,容易出现异常磨损,产生噪声等。故采用两种铁基材料作为定子转子会增加磨损,可考虑在定子转子之间插入铜合金材料。铜基材料虽然成本较高,但其性能稳定、磨合性好,已有研究证明,38CrMoAl 与氟塑料青铜<sup>[1]</sup>组合,具有更好的润滑性和抗磨能力,形成定子—铜棒—转子三者之间的啮合关系,避免硬度较高的两种金属直接接触,这类设计也为高温下全金属摩擦副配合提供了较好的设计思路。

根据对铁基材料、铜基材料各种性能综合分析,笔者优选出两种铁基材料 38CrMoAl 和 4145H 钢分别作为定子和转子,选择锡青铜作为定转子之间的过渡部件或接触部件,避免定子转子直接摩擦。

### 2.2.1 铁基材料优选与优化研究进展

在铁基材料中,38CrMoAl 表现出良好的综合力学性能且耐腐蚀性优于其他材料;4145H 钢由于其合金元素的作用,强度、硬度等力学性能较其他材料表现出了一定优势,故优选出 38CrMoAl 和 4145H 钢分别作为定转子材料。

在钢材的优化方面,首先在生产过程中改善加工工艺、减小生产设备的误差对材料性能的影响。李培斌<sup>[2]</sup>研究了 4145H 钢加工主要不合格项目为抗压强度和冲击功问题,对热处理工艺进行了调整,使一次合格率逐步提升;罗战<sup>[3]</sup>分析了 4145H 钢内孔裂纹产生的主要原因,将 4145H 钢的加工工艺改进为实心调质处理,适当调整了钻具中的化学成分,有效解决了空心内裂问题。调节合金中元素的含量以及在加工过程中加入微量元素可以有效地提高材料的强度、硬度、抗冲击韧性等机械性能,王兆庆等<sup>[4]</sup>研究了 38CrMoAl 中铝成分的控制,通过改进

工艺参数提高了铝的收得率;彭努渊<sup>[5]</sup>发现 4145H 钢中,若 Sn 元素含量较高会明显影响钢材的力学性能,造成冲击功严重偏低。陈林<sup>[6]</sup>发现提高铬含量、降低钼含量的 38CrMoAl 钢强度提高,韧性和塑性稍稍降低,而渗氮层变厚,表面硬度和耐磨性提高;康希纯<sup>[7]</sup>研究了 4145HMOD 钢由于其 Mo 含量的增加,增加了钢的淬透性,使钢的回火抗力增加,钢的二次脆性减轻。

另一方面则是对于基体材料的表面强化处理。在 38CrMoAl 的表面强化工艺中,大多学者对其进行渗氮处理,此处表面强化方式按照其加工工艺分为三类:

(1)渗氮处理。崔国栋等<sup>[8]</sup>在 570 °C 于可控气氛下(氮气与氧气的体积比为 8 : 1)对 38CrMoAl 钢进行了 2 h 氧氮共渗处理,经过氧氮共渗处理后样品的耐磨性和抗蚀性大幅度提高;张宝荣等<sup>[9]</sup>对 38CrMoAl 钢缸套进行了不同气氛的离子渗氮并与气体渗氮相较,渗件质量高、生产周期明显缩短,经济效益显著;陈玮等<sup>[10]</sup>研究了循环等离子渗氮工艺对 38CrMoAl 钢渗氮层组织和性能的影响。HUA Xiaozhen 等<sup>[11]</sup>研究了等离子电解渗氮下氨水浓度对 38CrMoAl 渗氮层的影响;冯治国等<sup>[12]</sup>研究电磁感应加热、等离子轰击以及电阻热效应在氮化过程中对 38CrMoAl 氮化层组织性能的影响规律;CHEN Yao 等<sup>[13]</sup>研究了用 38CrMoAl 采用不同渗氮温度低氮氢比条件下的离子渗氮表面改性技术;王诗茜等<sup>[14]</sup>研究了 38CrMoAl 钢 460 °C 氨气氮碳共渗后的工艺参数,发现氧化 8 h 后,表面层中 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的比例相对较大,耐腐蚀性提高。

(2)激光淬火、电镀、喷涂等方法。王清波等<sup>[15]</sup>研究了 38CrMoAl 钢的激光淬火性能,利用连续波二氧化碳激光束,发现在离焦量 48 mm、激光功率 1.8 kW 时,最佳扫描速度为 20 mm/s;LI Kun 等<sup>[16]</sup>对 38CrMoAl 钢进行了镀铬处理,其耐磨性显著提高;鄢强等<sup>[17]</sup>分析 38CrMoAl 基材与 TiN、TiC、SiC 和 DLC 涂层材料之间的结合力情况,研究了结合力随涂层不同及施加载荷不同的变化;胡霖<sup>[18]</sup>在 38CrMoAl 钢表面沉积了不同膜系的多种薄膜材料,提高了 38CrMoAl 的耐磨性。

(3)复合表面强化工艺。采取复合表面强化工艺可以有效改善单一工艺存在的不足,实现更好的性能。HE Huabo 等<sup>[19]</sup>利用 CO<sub>2</sub> 激光器在

38CrMoAl 钢表面激光熔覆了 Ni35、铁基、钴基和 Ni60A 合金熔覆层,对比研究了不同熔覆层的组织、耐磨性能和耐腐蚀性能;李玉琴等<sup>[20]</sup>提出了激光冲击处理 38CrMoAl 钢增强渗氮的组合方法,发现激光冲击次数为 3 次时,比磨损率降低最多,耐磨性最好;唐继海<sup>[21]</sup>对 38CrMoAl 钢经过氮碳共渗处理的试样表面进行激光淬火处理,氮碳共渗与激光复合改性层表面的耐磨性比氮碳共渗层有显著提升,相比于共渗层,复合改性层的稳定摩擦系数低,磨损率也低;Tong W. P.等<sup>[22]</sup>先在 38CrMoAl 表面制备了纳米晶化表面层,在进行氮化处理性能比常规气体氮化综合性能显著提升;李廷超<sup>[23]</sup>研究混合水射流喷丸预处理和离子渗氮复合处理对 38CrMoAl 钢组织和性能的影响。

对于 4145H 钢的表面强化技术有离子喷涂、激光淬火等方法,目前性能较好的方法是激光淬火。李颖杰等<sup>[24]</sup>用激光淬火工艺对 4145H 钻具钢进行热强化处理,以 2 kW 及 400 mm/min 的激光工艺参数淬火,4145H 钢表层可形成细密的马氏体组织,表层硬度达到 HRC557,磨损量最小,试样表层磨损形式主要以刮擦为主,磨损轻微,表现出较好的耐磨性。王强<sup>[25]</sup>分别研究了 CVD 气相沉积处理、激光淬火处理及 QPQ 盐浴复合热处理三种表面改性处理技术对 4145H 钢性能的影响,发现 CVD 气相沉积后的试样在磨损前期有着较强的耐磨性,整体上激光淬火处理对试样的整体硬度加强最大,对基体硬度影响深度最大。

### 2.2.2 铜基材料优选与优化研究进展

在铜基材料中,含锡的青铜具有良好的自润滑性能,可加工成滑动轴承、轴承衬套、导轨、摇臂等高耐磨的结构件。锡青铜和钢相比硬度小,在对磨时易形成软硬配合关系。锡青铜也具有出色的耐腐蚀性,通常用作高温和高湿环境中的结构件。所以考虑锡青铜作为定子与转子之间的过渡部分使用,但还需要通过表面强化和处理改善其摩擦磨损性能。

调整锡青铜加工工艺参数对锡青铜的力学性能影响显著,殷傲等<sup>[26]</sup>研究了不同热处理退火温度对锡青铜组织和性能的影响,500 °C 下进行热处理退火,锡青铜晶粒大小及其组织分布更加均匀,具有较好的硬度、强度以及塑性,更有利于之后的加工工艺。在锡青铜制备中加入稀土元素也可以细化晶粒达到提高性能的结果。于新丽等<sup>[27]</sup>研究了稀土对

锡青铜的强化及磨损性能,发现稀土 La 的加入量对锡青铜显微组织、冲击韧度和耐磨性影响较大,当  $w(\text{La}) = 0.06\%$  时,试样的综合性能最佳,枝晶细小,黏着磨损相对耐磨性和冲击韧度显著提高。张静<sup>[28]</sup>研究了稀土 Ce 及热处理对锡青铜组织和硬度的影响。在锡青铜表面进行电镀、化学镀、化学气相沉积等方法也可以有效增加锡青铜基体的耐磨性。王敏等<sup>[29]</sup>在锡青铜基体上化学镀 Ni-P 合金镀层,提高锡青铜的耐磨性和耐腐蚀性。王峰等<sup>[30]</sup>在锡青铜表面制备了超疏水薄膜,有效降低了摩擦副的磨损。王智凤<sup>[31]</sup>研究了铸锡青铜表面软氮化前后与 40CrNiMo 的摩擦磨损性能,发现氮化后在相同条件下磨损量减小。此外,在锡青铜中加入石墨、二硫化钨、二硫化钼等非金属润滑剂,可以在摩擦过程中形成保护膜,在锡青铜中加入氮化硼、氧化硅等硬质颗粒可以提高锡青铜摩擦面的机械强度,从而提高锡青铜复合材料的耐磨性。

### 2.3 定转子摩擦副耐磨技术分析

针对 38CrMoAl 钢,热处理多为离子渗氮技术,其机理是通过放电将氮气分解出的氮离子扩散进材料表面,渗氮层由表及里依次为  $\epsilon$  相、 $\gamma$  相、 $\gamma + \alpha$  相和  $\alpha$  相,硬度逐渐降低。渗氮层的物相可以通过调整离子渗氮工艺参数来控制,如气体成分、温度和渗氮时间等。渗层中氮含量由表及里逐渐降低,氮原子在扩散过程中与铁原子结合形成不同的金属间化合物。氮原子由表面向内扩散时,最外侧氮含量最高,铁氮元素结合成以  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  为基的密排六方间隙相  $\epsilon$  相, $\epsilon$  相硬度高、脆性大。随着扩散的进行,氮含量逐渐降低,并在工件近表面形成以  $\text{Fe}_4\text{N}$  为基的面心立方间隙相  $\gamma$  相, $\gamma$  相硬度较高、韧性较好。氮原子继续向试样内部扩散,在试样内部形成体心立方的  $\alpha$  相,其性能与  $\alpha\text{-Fe}$  相似,硬度较低。渗氮处理后,改性层中生成了大量的氮化物、碳化物等以及固溶体,使其表面得以强化,提高了材料的耐磨性,得到的表面强化层综合性能好,但缺点是由于加工工艺复杂、生产周期长、成本高、效率低,所以在实际应用中受到了限制。

针对 4145H 钢,目前表面处理多为激光淬火硬化。其机理是将强激光束照射到工件表面,使得工件表面温度迅速提高到奥氏体转变温度以上,熔点以下,然后快速冷却,完成马氏体转变,得到极细小的马氏体。但激光淬火硬化存在很多缺点,激光功

率过大,容易造成表面熔化;扫描速度慢,也可以导致试样表面温度过高而熔化;激光淬火相变硬化层厚度过大,硬化层与基体结合力不佳等。应合理配合激光的输出功率、激光扫描速度和激光束斑的直径获得最佳的硬化效果。

针对锡青铜材料,表面强化处理的研究较少,可考虑在基体中同时加入非金属润滑剂和硬质颗粒,这样既提高了表面的硬度,又增加了润滑性,降低摩擦系数并减小磨损;也可考虑在选材中加入其它元素,如锌有固溶强化作用、镍可提高合金的强度、韧性与抗脱锌及应力腐蚀开裂能力、铅可增强润滑性、铝可提高耐蚀性、锰可提高热稳定性及强度,进一步改善锡青铜材料的综合性能。

### 3 结论与展望

通过对井下动力钻具制造材料的调研和分析,得出如下结论,为后续动力钻具的制造提供参考。

(1)通过对常见钻具制造管材的成分、力学特性、加工性能经济性、行业习惯等综合分析,依据全金属动力钻具的特殊工况,优选 38CrMoAl 钢、4145H 钢作为定子、转子制造材料,转子部件上采用新型铜基—铁基材料复合结构,并锡青铜作为定转子接触部件材料。

(2)定转子之间的配合要考虑摩擦学设计,转子部件的加工要求,可依据定子的加工情况进行配伍确定,通过合理的材料配伍、表面强化、间隙配合等综合作用,一方面通过改善定转子之间受力条件,另一方面增强耐磨耐冲击能力,提高水力部件工作寿命。

(3)定子曲面孔的精确加工和表面强化是制造需要关注的重点,针对 38CrMoAl 钢,采用渗氮工艺可增强其工作寿命,但对于内孔的渗氮会出现“无限长管电场屏蔽”现象,内孔没有电场,无法电离出带电粒子,达不到内壁渗氮的目的,可采用“独立阳极”技术产生辉光离子放电效应,实现管筒内壁渗氮处理。

(4)对优选的 4145H 钢,可采用激光淬火强化工艺,合理选配激光输出功率、扫描速度、束斑直径获得最佳强化效果,避免强化层过厚造成结合力低和脱落;同时,可考虑转子部件上采用新型铜基—铁基材料复合结构,利用固体—水力自润滑机理,避免两种同基材料的磨损,提高工作寿命。

### 参考文献(References):

- [1] 赵伟国. 氟塑料青铜配油盘材质研究[J]. 煤矿机械与电气, 1980(1):42—46.  
ZHAO Weiguo. Study on the material of fluoroplastic bronze oil pans[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 1980(1):42—46.
- [2] 李培宾. 4145H 钢力学性能试样热处理工艺调整[J]. 四川冶金, 1992(2):69—75.  
LI Peibin. Heat treatment process adjustment for 4145H steel mechanical properties sample[J]. Sichuan Metallurgy, 1992(2):69—75.
- [3] 罗战. 石油钻具的热处理工艺改进[J]. 机械工人, 2002(5):53—54.  
LUO Zhan. Improvement of heat treatment process for petroleum drilling tools[J]. Mechanical worker, 2002(5):53—54.
- [4] 王兆庆, 刘海澜. 38CrMoAl 钢铝成分控制[J]. 大型铸锻件, 1996(4):19—20, 54  
WANG Zhaoqing, LIU Hailan. 38CrMoAl steel aluminum composition control[J]. Large Casting and Forging, 1996(4):19—20, 54
- [5] 彭努渊. ASTM 4145H 钢冲击功偏低的原因分析[J]. 大型铸锻件, 2007(6):42—43.  
PENG Nuyuan. Cause analysis of low impact energy for ASTM 4145H steel[J]. Large Casting and Forging, 2007(6):42—43.
- [6] 陈林. 改变铬和钼的含量对 38CrMoAl 钢性能的影响[J]. 热处理, 2014, 29(3):43—46.  
CHEN Lin. Effect of variation in Mo and Cr contents on properties of 38CrMoAl steels[J]. Heat treatment, 2014, 29(3):43—46.
- [7] 康希纯. 石油钻具大型稳定器的选材及热处理[J]. 金属热处理, 2012, 37(10):127—128.  
KANG Xichun. Selection of raw material and heat treatment for large size stabilizer of oil drilling tools[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(10):127—128.
- [8] 崔国栋, 杨川, 程海明. 38CrMoAl 钢气体氧氮共渗处理的组织与性能[J]. 金属热处理, 2008, 33(12):46—48.  
CUI Guodong, YANG Chuan, CHENG Haiming. Microstructure and properties of 38CrMoAl steel treated by gas oxynitriding[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(12):46—48.
- [9] 张宝荣, 王世清, 孙东升, 等. 38CrMoAl 钢缸套离子渗氮[J]. 山东工业大学学报, 1986(3):60—67.  
ZHANG Baorong, WANG Shiqing, SUN Dongsheng, et al. Ion-nitriding of 38CrMoAl steel cylinder[J]. Journal of Shandong University of Technology, 1986(3):60—67.
- [10] 陈玮, 王蕾, 付勇涛, 等. 循环等离子渗氮工艺对 38CrMoAl 钢渗氮层组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2009, 30(6):55—57  
CHEN Wei, WANG Lei, FU Yongtao, et al. Effect of cycle plasma nitriding process on structure and properties of nitrided layer of steel 38CrMoAl[J]. Special Steel, 2009, 30(6):55—57
- [11] HUA Xiaozhen, ZHOU Lang, CUI Xia, et al. The effect of ammonia water on the microstructure and performance of plasma electrolytic saturation nitriding layer of 38CrMoAl steel[J]. Physics Procedia, 2013, 50:304—314.

- [12] 冯治国,赵驯峰,刘静.加热源对 38CrMoAl 钢氮化层组织及性能的影响[J].表面技术,2019,48(6):173-179.  
FENG Zhiguo, ZHAO Xunfeng, LIU Jing. Effects of heating source on microstructure and properties of 38CrMoAl steel nitrided layer[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 173-179.
- [13] CHEN Yao, JI Qingxin, WEI Kunxia, et al. Plasma nitriding without white layer for 38CrMoAl steel with lower ratio of N<sub>2</sub> to H<sub>2</sub> under different temperature[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 23-28
- [14] 王诗茜,由园,都鑫.38CrMoAl 钢 460℃ 氨气氮碳共渗后氧化改性层制备及表征[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 60-63.  
WANG Shiqian, YOU Yuan, DU Xin. Preparation and characterization of the oxidation modified layer of 38CrMoAl steel after ammonia nitrogen and carbonitriding at 460℃[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2019, 35(2): 60-63.
- [15] 王清波. 38CrMoAl 激光淬火及镍基合金激光熔覆研究[D]. 郑州:郑州大学,2005.  
WANG Qingbo. Study on 38CrMoAl laser quenching and laser cladding with nickel based alloy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005.
- [16] LI Kun, SU Tiexiong. Tribological properties of the plating chromic layer for 38CrMoAl cylinder liner[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2012, 27(6): 1128-1132.
- [17] 鄢强,邓祥丰,宋慧瑾,等.38CrMoAl 与多种涂层材料的结合性能分析[J].成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 308-311.  
YAN Qiang, DENG Xiangfeng, SONG Huijin, et al. Exploration of bonding properties of 38CrMoAl and various coating materials[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2019, 38(3): 308-311.
- [18] 胡霖.三种关键航空材料的电弧离子镀膜改性研究[D].大连:大连理工大学,2012.  
HU Lin. Study on performances of films modification for three kinds of key aviation materials by AIP[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [19] HE Huabo, YANG Mengmeng, HUANG Xiaobo, et al. Wear resistance and corrosion resistance of different laser cladding layers on surface of screw steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(10): 11-14, 19
- [20] 李玉琴,何卫锋,王学德,等.激光冲击次数对 38CrMoAl 钢渗氮耐磨性能的影响[J].高电压技术, 2014, 40(7): 2090-2094.  
LI Yuqin, HE Weifeng, WANG Xuode, et al. Impact of laser shock times on the wear resistance of 38CrMoAl steel[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(7): 2090-2094.
- [21] 唐继海.38CrMoAl 钢氮碳共渗与激光淬火复合改性层的组织与性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.  
TANG Jihai. Microstructure and properties of modified layer produced by duplex treatment of nitrocarbideizing and laser quenching of 38CrMoAl steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [22] Tong W.P., Han Z., Wang L.M., et al. Low-temperature nitriding of 38CrMoAl steel with a nanostructured surface layer induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(20): 4957-4963.
- [23] 李廷超.38CrMoAl 钢混合水射流喷丸和离子渗氮复合处理的研究[D].郑州:郑州大学, 2019.  
LI Tingchao. Research on 38CrMoAl steel by combining treatment of abrasive water jet peening and plasma nitriding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [24] 李颖杰,王瑜,周琴,等.4145H 钻具钢的激光淬火工艺[J].金属热处理,2019,44(8):169-175.  
LI Yingjie, WANG Yu, ZHOU Qin, et al. Laser quenching process of 4145H drilling tool steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(8): 169-175.
- [25] 王强.三种表面改性处理技术对 4145H 钢性能的影响研究[D].成都:西南石油大学,2016.  
WANG Qiang. Study on the effect of three surface modification treatments on the properties of 4145H steel[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [26] 殷傲,冯再新,惠均,等.不同热处理退火温度对锡青铜组织和性能的影响[J].铸造技术,2018,39(12):2854-2856.  
YIN Ao, FENG Zaixin, HUI Jun, et al. Effect of different heat treatment annealing temperatures on microstructure and properties of tin bronze[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2854-2856.
- [27] 于新丽,张兴元,孟庆铸.稀土对锡青铜的强化及磨损性能研究[J].热加工工艺,2008(7):36-38.  
YU Xinli, ZHANG Xingyuan, MENG Qingzhu. Influence of rare earth on properties of tin bronze[J]. Hot Working Technology, 2008(7): 36-38.
- [28] 张静.稀土 Ce 及热处理对锡青铜组织和硬度的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(11):1202-1204.  
ZHANG Jing. Effect of Ce and heat treatment on microstructure and hardness of tin bronze alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(11): 1202-1204.
- [29] 王敏,刘锦云,李文鹏,等.锡青铜化学镀 Ni-P 合金工艺及镀层性能[J].表面技术, 2015, 44(6): 17-21.  
WANG Min, LIU Jinyun, LI Wenpeng, et al. Process and performances of electroless Ni-P alloy coating on tin bronze[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 17-21.
- [30] 王峰,孙士飞,杨霞.锡青铜表面超疏水薄膜的制备及其水润滑减摩性能[J].材料保护, 2015, 48(1): 54-56, 9.  
WANG Feng, SUN Shifei, YANG Xia. Preparation of superhydrophobic coatings on bronze surface and evaluation of its friction-reducing performance[J]. Material protection, 2015, 48(1): 54-56, 9.
- [31] 王智凤.铸锡青铜表面软氮化前后/40CrNiMo 的摩擦磨损性能研究[J].中国新技术新产品,2013(8):124-125.  
WANG Zhifeng. Friction wear performance of 40CrNiMo before and after soft nitriding with the cast tin bronze surface[J]. China New Technologies and Products, 2013(8): 124-125.