

深井钻杆接头耐磨防护技术研究综述与展望

覃泳杰, 王 瑜*, 张 凯, 薛 婷, 刘长硕

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 在深井、特深井钻探过程中, 井下钻具处于高温、高压、高腐蚀环境, 钻杆与外部岩层以及套管发生激烈的碰撞和磨损, 钻具耐磨防护是需重点关注的问题。目前在钻杆接头上敷焊耐磨带是深井钻具防护的主要方法, 对减少钻具磨损、延长钻具寿命起着重要作用。本文综述了国内外耐磨带技术发展研究现状, 阐述了耐磨带失效原因以及关键性能评价测试方法, 分析目前耐磨带技术发展的关键为耐磨带防脱落、耐磨带修复技术和套管友好型耐磨带材料研究。最后对耐磨带技术在深井、特深井应用发展趋势进行展望。

关键词: 钻具防护; 钻杆接头; 耐磨带; 防脱落; 修复; 套管友好型; 特深井

中图分类号: P634.4; TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0054-10

Review and prospect of anti-wear and protection technology of drill pipe joint for deep well

QIN Yongjie, WANG Yu*, ZHANG Kai, XUE Ting, LIU Changshuo

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the drilling process of deep and extra-deep well, the downhole drilling tools are in a situation of high temperature, high pressure and high corrosion, and the drill pipes are intensely collided and worn with the external rock layers and casing. Therefore, the anti-wear and protection of the drilling tools is a problem that needs to be focused on. At present, welding anti-wear belt on drilling tools is the main method of drilling tool protection for deep wells, which plays an important role in reducing drilling tool wear and prolonging drilling tool life. This paper summarizes the development and research status of anti-wear belt technology at home and abroad, expounds the failure causes of anti-wear belt, the evaluation and test methods of key performance. Moreover, the key points of the development of anti-wear belt technology at present are also analyzed, which are anti-shedding, anti-wear belt repair technology and casing-friendly anti-wear belt material research. Finally, the development trend of anti-wear belt technology in deep and extra-deep wells is prospected.

Key words: drilling tool protection; drill pipe joint; anti-wear belt; anti-shedding; repair; casing friendly type; extra-deep well

0 引言

在深井、特深井钻井过程中, 井下钻杆柱处于高温、高压、高腐蚀等复杂井下环境; 深井井眼轨迹复杂, 钻杆柱在井内不是竖直的, 钻杆弯曲导致一

部分钻杆与井壁和套管接触; 井下钻杆柱不仅受动静荷载作用, 还受拉、压、弯、扭等交变荷载的作用; 在进行钻进、划眼等操作时, 钻杆与套管发生多种形式的磨损, 造成钻杆和套管损坏, 严重时引起井

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-06-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.008

基金项目: 国家重点研发计划“深地油气资源勘探用高强度钢管材及应用技术研究”(编号: 2023YFB3711700, 2023YFB3711704)

第一作者: 覃泳杰, 男, 土家族, 2001年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, 从事钻杆耐磨带研究, 北京市海淀区学院路29号, 2002230032@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979年生, 教授, 博士生导师, 主要从事钻探工程领域教学与科研工作, 北京市海淀区学院路29号, wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式: 覃泳杰, 王瑜, 张凯, 等. 深井钻杆接头耐磨防护技术研究综述与展望[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 54-63.

QIN Yongjie, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Review and prospect of anti-wear and protection technology of drill pipe joint for deep well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 54-63.

下事故,造成巨大的经济损失^[1-3]。

目前有多种减少井下钻杆和套管磨损的措施,如在钻杆接头焊接耐磨带、加装钻杆保护器或旋转钻柱接头^[4]。这些措施一定程度都能减少钻杆和套管在井下的磨损。由于钻杆上焊接耐磨带防磨效果明显,操作方便,经济成本低,耐磨带技术在深井、大位移井和大斜度井钻井工程中得到广泛应用。如何保证耐磨带具有良好的综合抗磨性能,高效、稳定地服务于深井钻探工作是耐磨带技术的关键问题。

1 耐磨带技术发展

1.1 常规耐磨带技术

国外耐磨带材料的发展过程分为2个阶段:第1阶段为从1930年代到1990年代初的硬质合金材料阶段,如碳化钨;第2阶段为1990年代至今的“套管友好型”材料阶段^[5]。我国耐磨带材料发展历程与国外相似,但起步较晚,经过近年来的发展,也研发出性能优异的国产耐磨带材料,解决了进口耐磨带材料昂贵的问题。耐磨带材料发展至今,各项技术指标发展逐渐完善,后又发展出无磁耐磨带材料,满足不同钻探工作环境需要。

1.1.1 国外发展现状

硬质合金材料耐磨带在1930年代由休斯工具公司发明并投入市场,其实质上是在钻杆接头处敷焊一层50~76 mm宽的硬质合金材料,硬质合金材料主要采用钨钴系列硬质合金,如碳化钨等^[6]。碳化钨颗粒硬度高,具有良好的耐磨性,但由于耐磨带本体材料较软,经过一段时间后,碳化钨颗粒出露与套管直接接触,造成套管严重磨损甚至磨穿。国外已开始停用硬质合金耐磨带,探索新型耐磨带材料,使得耐磨带具有良好耐磨性的同时,具备减磨能力。至此钻杆接头耐磨带材料的发展进入“套管友好型”材料阶段。

为满足充分保护钻杆和其他井下工具的迫切需求,ARNCO TECHNOLOGY TRUST公司利用其姊妹公司的先进合金开创了套管友好型耐磨带行业,自1992年开始,依次推出ARNCO 200 XT、ARNCO 100 XT、ARNCO 300 XT、ARNCO 150 XT、ARNCO 350 XT耐磨带产品。产品性能经过不断升级优化,耐磨性能不断增强、减磨性能不断提高,自ARNCO 150 XT推出,其耐磨带产品进入

套管友好型阶段;耐磨带产品的焊接性能不断提高,焊接过程产生的裂纹不断减少,与管体的粘性不断增强,ARNCO 350 XT能够达到焊接100%无裂纹,在井下不发生剥落;从ARNCO 100 XT、300XT只能在相同产品堆焊层上补焊,到ARNCO 150XT、350XT能够在大部分主流耐磨带产品上直接进行焊接,耐磨带产品的重复可焊性和兼容性不断提升;耐磨带产品的功能不断丰富,能够满足复杂井下环境钻进的需求,如ARNCO 150 XT具有卓越的抗硫化氢能力^[7]。ARNCO部分耐磨带产品与碳化钨硬质合金耐磨带、光钻杆的耐磨性、减磨性能比较见图1。

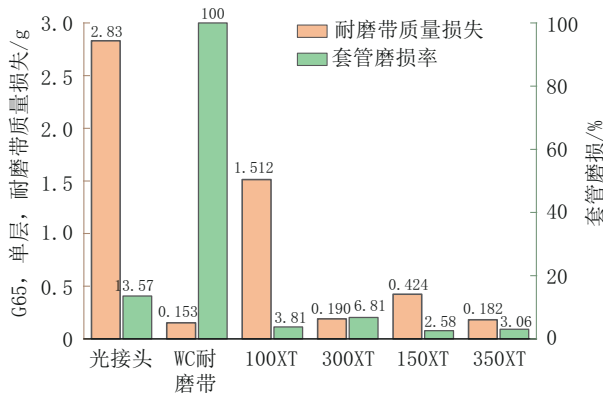


图1 耐磨性-套管磨损对比

Fig.1 Comparison of abrasion resistance and casing wear

Duraband NC 和 Tuffband NC 是美国 POSTLE INDUSTRIES 公司生产的耐磨带产品,已在全球数千个钻井项目中使用。前者可在其本身和各种其他材料上重新应用,能够做到堆层100%无裂纹、堆层耐磨性好、与套管之间摩擦系数低、钻井工作时对套管能有效保护,属于套管友好型耐磨带;后者适用于酸性环境中,在裸眼钻进时还能与碳化钨一起用作焊接基体,提高整体耐磨性能^[8]。

英国 NOV Tuboscope 公司研发的 TCS-XL、TCS-8000、TCS-Titanium 三款耐磨带均为套管友好型耐磨带;其中 TCS-Titanium 耐磨带为优质套管友好型耐磨带,具有高应力耐磨、抗冲击、抗裂、抗剥落、重复可焊性好、极低的摩擦系数等特点,适用于各种复杂环境工况,但成本较高;TCS-XL 是一款高经济效益的耐磨带产品,降低钻井成本的同时,能够提供出色的钻具与套管保护^[9]。

1.1.2 国内发展现状

国内钻杆耐磨带技术兴起较晚,最早出现的耐磨带是在钻铤中部和两边对称位置焊接的电焊条,起到一定的防磨作用^[1]。后通过对国外寿命较长的钻杆进行全面解剖分析,结合国内钻杆磨损情况,提出在钻杆接头处焊接碳化钨硬质合金,可极大提高接头部位耐磨性能^[10]。随着钻井技术的提高以及对钻具性能要求提高,需要高性能的接头耐磨材料。

国内研究机构合作开发PT100耐磨带材料,其价格低廉,焊接工艺简单,焊前无需预热,焊后不需保温。室内试验和现场使用结果表明该产品具有重复可焊性,耐磨带工作时性能稳定,敷焊层未出现掉块和剥块现象,在保护钻杆接头的同时,能够有效的降低对套管的磨损^[11]。

北京智双科技发展有限公司研发出鸣锐系列耐磨带焊丝,其中鸣锐160GH药芯焊丝加工而成的耐磨带焊道平整、焊接层光滑、无气孔、无裂纹、堆焊层硬度平均值为HRC62.1,与进口产品相比具有更强的耐磨粒磨损性能。具有套管友好型耐磨带特性^[12-13]。

无锡帝宝应用材料高科技研发的MX-100、MX-300、MX-500耐磨带材料均为套管友好型材料,加工的耐磨带具有耐磨性好、堆焊层无裂纹、补焊时无需去除原有耐磨带、重复可焊性较好等特点,一定程度上能够满足国内钻井使用需求。

上海博腾焊接材料有限公司研发的BoTn1000、BoTn3000、BoTn5000耐磨带焊丝,抗裂性优异,堆焊耐磨带表面无肉眼可见裂纹,耐磨性能优良,有效地减少钻杆磨损,延长钻杆接头寿命,与钻杆接头本体材料结合牢固,不剥落、不掉块,与没有裂纹的耐磨带完全兼容,重复焊接性好。

国内耐磨带材料的发展过程基本与国外一致,但是发展时间相对滞后,也有一些相对成熟的耐磨带产品,如固本系列耐磨带、鸣锐系列耐磨带、博腾系列耐磨带、纳特系列耐磨带、固邦系列耐磨带等。国内耐磨带材料研究已经取得了很大的进步,部分性能甚至超过了国外同类耐磨带材料,但一些材料仍然停留在研究和试验阶段,总体技术水平与国外相比还有一定差距。

1.2 无磁耐磨带技术

随着水平井、定向井、超深井等复杂结构井数量的增加,无磁钻具在油气勘探和开发中的应用越来越广泛。无磁钻具由于具有低磁导率的特性,能够在井下创造无磁环境,为磁性测量仪器提供准确可靠的测量数据创造条件^[14-15]。然而,无磁钻具本身的硬度较低,抗磨性差,导致其使用寿命较短,大量早期报废,产生巨大的经济损失。

实践证明,通过在无磁钻具易磨损位置直接焊接无磁耐磨带焊丝,能够有效地解决无磁钻具磨损问题。因此无磁耐磨带技术的研究至关重要。

美国安科公司研发的NonMagXT无磁耐磨带材料焊接过程无飞溅,焊层光滑无裂纹,焊接操作简单,无需过多清理和准备,适合野外工作;且耐磨性能优异,同时能对套管起到有效保护^[7]。

孙德文^[14]研制了一种可用于制作无磁钻具耐磨带的药芯焊丝,其加工而成的耐磨带磁导率、硬度等性能均满足设计要求,经过现场试验,钻具得到有效防护;孟庆瑜^[15]对无磁钻具磨损机理以及防护措施进行研究,确定了合适的防磨方式、焊接工艺、耐磨带在无磁钻具的焊接位置、无磁合金粉末,通过现场应用验证,防磨效果明显;刘海波等^[16]针对随钻仪器本体磨损严重的情况,通过优选无磁硬质合金、耐磨无磁不锈钢以及热装工艺等研制出具有高耐磨性的无磁耐磨套,并在LWD上成功应用,解决了LWD磨损问题,提高了使用寿命;郭劲松等^[17]提出利用激光覆焊技术在LWD仪器钻铤外表面覆焊碳化钨合金粉耐磨带的方法,以提高LWD仪器寿命;郝勇等^[18]通过对无磁钻具磨损原因分析,提出了无磁钻具耐磨解决措施,其中给出了无磁钻具焊敷耐磨带防磨时相应的技术要求;巴鲁军^[19]以国产WanHai无磁耐磨带药芯焊丝为例,从硬度、金相、磁导率及耐磨性能等方面对其性能进行评价分析,给出无磁耐磨带的评价方法。

目前,国内无磁耐磨带技术的发展取得了一定成绩,无磁耐磨带国产化打破了国外的技术垄断。但与国外先进水平相比,仍存在一定差距,需要进一步提升技术水平,目前采用的工艺和材料选择仍存在一定的局限性。对于成熟的国产无磁耐磨带产品应该积极进行产业化推广与应用,提高国产无磁耐磨带的知名度。

1.3 其他防护技术

1.3.1 耐磨垫

耐磨垫是在钻杆管身采用专有低热输入焊接工艺,焊接两处耐磨带,两个耐磨带组成钻杆管体耐磨垫,每处耐磨带由两层组成,第一层为类似管体的材料堆积组成,第二层为性能良好的耐磨材料。钻杆管体耐磨垫见图2。Wells^[20]通过仿真试验确定了两处耐磨带距管体中心的最佳距离。耐磨垫在美国东德克萨斯州某井使用后,解决了在该井钻进钻杆管身出现磨损的问题,证明耐磨垫可以应用于钻杆管身,不会影响其机械性能,能较好地防止管体中心磨损。

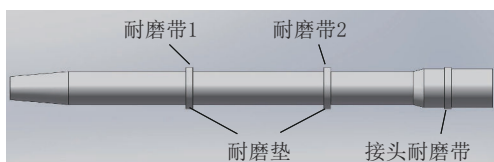


图2 钻杆管体耐磨垫

Fig.2 Anti-wear mat of drill pipe

1.3.2 搅拌摩擦加工D2工具钢

Sanderson等^[21]通过搅拌摩擦加工技术(FSP)将D2工具钢与钻杆接头连接,D2工具钢对钻杆接头起到防护作用。D2工具钢富含Cr和C,具有高硬、高耐磨性、耐腐蚀性能,其中合金元素具有良好的韧性,使其保持高硬度的同时保持良好的耐冲击性能,可作为传统硬质耐磨带的替代材料。FSP技术(见图3)是利用搅拌头剧烈的搅拌作用,造成加工区材料发生剧烈塑性变形、混合、破碎和热暴露,实现材料微观组织的细化、均匀化和致密化^[22]。搅拌摩擦加工过程中,D2工具钢金属组织结构细化,产生微小晶粒,焊接处硬度与母材相比明显提升。搅拌摩擦加工过程中可通过增强相的添加,制备出具有高表面硬度、耐磨损、套管友好型的表面复合层材料,对钻具起到防护作用。

2 耐磨带性能评价研究

耐磨带性能评价是耐磨带研究到投入生产使用过程中非常重要的一环。深井、特深井钻探工作时,井下环境复杂,长裸眼段钻进、强研磨性地层、高硬度岩屑和钻井液固相颗粒要求耐磨带具有优异的耐磨性能,为了兼顾对套管的保护,耐磨带减

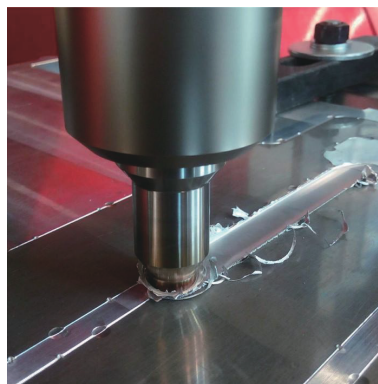


图3 搅拌摩擦加工(FSP)^[22]

Fig.3 Friction stir processing (FSP)

磨性也是重点关注的性能;深井钻进地层温度高、压力大,部分地层含有CO₂、H₂S等腐蚀性气体,这对耐磨带耐高温、耐高压、耐腐蚀等性能提出更高要求;此外井下复杂的管柱运动要求耐磨带具有良好的抗冲击耐疲劳性能。耐磨带的性能评价需要综合考虑多种因素,并且需要通过实验室测试、现场试验以及实际使用情况的监测来进行全面评估,以确保其能够在复杂的井下环境中发挥良好的作用。

2.1 耐磨带失效原因分析

钻杆耐磨带失效与井下地层环境、钻井液成分、井眼全角变化率(狗腿度)、井下复杂的管柱运动(见图4)以及耐磨带自身性能、耐磨带焊接工艺等因素密切相关。井下耐磨带失效往往不是单一因素影响导致,而是在多种因素耦合下发生失效。耐磨带自身抗冲击性能较差时,耐磨带与井壁地质层摩擦和碰撞后,耐磨带在易磨损处部分脱落产生凹坑,如图5所示。耐磨带出现凹坑后,无法起到保护钻杆的作用,会造成钻杆接头偏磨^[23]。

鄂尔多斯北部大牛地地区钻井施工中钻杆耐磨带就是由于该地区地层研磨性强,钻井液中固相颗粒硬度较高,耐磨带发生严重的磨料磨损;加上钻具的反转运动使得耐磨带频繁的敲击井壁,在高频应力作用下发生疲劳破坏,造成耐磨带失效^[24]。井下腐蚀环境也是导致耐磨带失效的因素之一。如在井下H₂S环境下,耐磨带易发生腐蚀坑静态失效和应力腐蚀开裂动态失效,其中后者会使耐磨带在井下受到较低应力的情况下发生破坏。毛坝8井所用抗硫钻杆经过1口井的使用,其抗硫耐磨带被腐蚀已不存在,完全与接头本体齐平^[25]。耐磨带

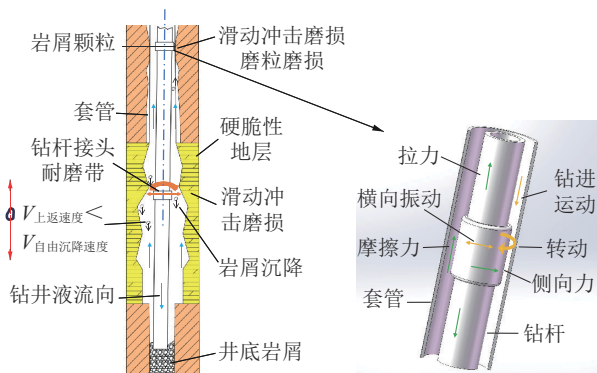


图4 钻杆接头耐磨带与套管/井壁作用示意

Fig.4 Interaction between the anti-wear belt and casing/borehole wall

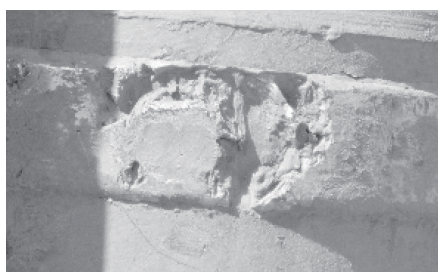
图5 耐磨带碰撞后脱落的凹坑^[23]

Fig.5 Pits after anti-wear belt falling off due to collision

在焊接加工过程中的不规范操作会导致耐磨带内部以及附近热影响区产生裂纹,在井下交变应力作用下,裂纹会迅速向内壁扩展,不仅使得耐磨带在后续工作时强度降低,有剥落掉块风险,甚至直接扩展刺穿钻杆接头^[26]。

2.2 耐磨性

耐磨性是钻杆耐磨带在裸眼井壁中抵抗地层岩石磨损的能力。钻杆在井下裸眼井段工作时,接头处与井壁相互接触,承受剧烈的磨料磨损,在狗腿度严重、研磨性较强的长裸眼井段,钻杆弯曲产生的侧向力使得钻杆偏磨,加剧耐磨带失效,影响钻杆寿命。在新的钻杆耐磨带产品投入使用前,往往会经过多项测试,对其性能进行考察。对于钻杆耐磨带耐磨性的评价通常通过试验台测试和井下测试来进行。

Zhang等^[27]采用自主研发的SD-1型模拟深井和超深井实际工况的试验台,对耐磨带的摩擦学性能进行了评价。SD-1型试验台如图6所示。该试验台可根据深井、超深井实际井况,在钻井液润滑的条件下进行试验,试验过程中钻速和载荷均可调

节,摩擦样本中包含了岩石材料和套管材料。通过对耐磨带样本试验结束前后称重,计算出单位时间内的重量损失。计算公式如下:

$$H_s = W_s / T$$

式中: H_s ——耐磨带的耐磨性值,g/h; W_s ——耐磨带在摩擦时间内的总失质量,g; T ——摩擦时间,h。

H_s 值越低,表示耐磨带的耐磨性能越好。

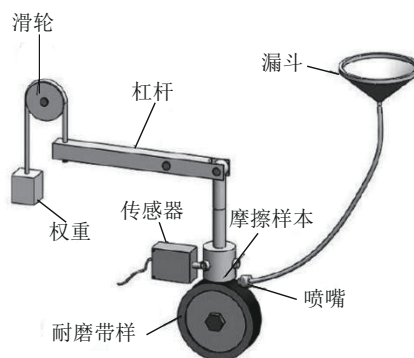
图6 SD-1型试验台示意^[27]

Fig.6 Schematic diagram of the SD-1 type test rig

张善仁^[28]采用干砂胶轮代替岩石样本作为耐磨试验工具,方便对接触力进行控制,维持在稳定的范围内,分别对新耐磨带产品和普通耐磨带产品进行相同转的打磨,通过对打磨前后样品称重,计算掉屑比,对新耐磨带产品的耐磨性进行评价。Haberer等^[29]使用符合ASTM G65要求的橡胶轮磨损试验装置对来自4个不同制造商的9种不同的套管友好型合金材料进行测试,其中规定接触载荷为130 N,测试持续时间为2000轮转,综合分析表明碳化钛基合金具有最高的耐磨性。Jiang等^[30]使用UMT摩擦磨损试验机对钛合金钻杆耐磨带和敷焊Arncol100XT耐磨带的S135钢钻杆进行摩擦磨损试验,S135钻杆的磨损量为0.1667,钛合金钻杆的磨损量为0.0055 g,磨损试验结果表明钛合金钻杆耐磨带具有优异的耐磨性^[30]。姚宇等^[12]对国产鸣锐160GH耐磨带药芯焊丝加工而成的耐磨带在MLS-225型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机上进行耐磨性测试,与国外耐磨带产品对比,鸣锐160GH具有更强的耐磨粒磨损性能;又将鸣锐160GH焊丝敷焊后的钻杆在龙岗70井、双探8井、磨溪022-H4井进行试用,入井累计使用16820 m,耐磨带工作性能稳定,磨损量小;井下试用结果证明,该焊丝敷焊质量和使用效果能达到进口焊丝ARNCO 350XT的

水平。李玉民等^[11]为评价国产PT100耐磨带的耐磨性,对其进行井下测试,通过测量钻井前后耐磨带厚度变化,计算磨损率,与相同钻井条件下其他耐磨带磨损率进行对比,磨损率越低,耐磨性越好。

关于钻杆耐磨带耐磨性评价的实验室测试和井下测试,二者各有利弊。井下测试的数据真实,测试结果可靠性高,但是费用高,实验周期长;实验室测试实验周期短,成本较低,但实验室无法模拟井下复杂的工况条件,实验结果理想化,实用性不高。在对耐磨带耐磨性评价时,可结合二者优点,在实验室测试结果符合要求的条件下再进行井下测试,提高实验的成功率,同时能够降低实验成本。

2.3 减磨性

减磨性是钻杆接头耐磨带与套管接触过程中,减少套管摩擦损失的能力。目前钻杆耐磨带发展处于“套管友好型”阶段,即保证良好耐磨性,同时注重减磨能力,减少套管磨损,保证其强度不受影响。由于井下套管磨损会产生安全隐患,同时井下套管的磨损情况不易观测,耐磨带减磨性能难以直接在井下测试,关于耐磨带减磨性能的评价方法主要为实验室开展磨损试验。

国外很早就通过小型试验机进行钻杆接头耐磨带与套管磨损试验,如Falex试验机和TNO试验机,但是该试验条件与实际工况差距较大,模拟试验简单,所得出的套管磨损情况与实际结果出入较大^[31]。美国Maurer公司研制开发的套管全尺寸磨损试验机,工作原理见图7,是目前国内外认可度较高的套管磨损试验设备^[32]。

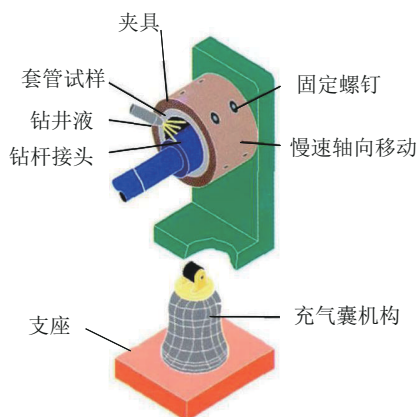


图7 套管磨损试验机工作原理^[32]

Fig.7 Working principle diagram of casing wear testing machine

Zhang等^[27]通过自主研发的SD-1型试验台对PCD复合材料和其他两种传统耐磨带材料在常用套管材料42Mn2V钢进行摩擦测试,通过计算单位时间内套管减重量反映耐磨带的减磨性能,其公式为:

$$H_t = W_t / T$$

式中: H_t ——耐磨带的减磨能力,g/h; W_t ——套管材料在摩擦时间内的总失质量,g; T ——摩擦时间,h。

H_t 值越低,表示耐磨带的减磨性能越好。测试结果表明PCD复合材料的减磨性能较其他耐磨带材料较好。

申维佳^[33]通过单因素对比法,采用套管全尺寸磨损试验机开展不同耐磨带在多种钻井液环境下与套管的磨损试验,经过C-Wear磨损数据分析软件计算得到的磨损率、磨损系数、摩擦系数,分析得出ARNCO 350XT耐磨带的减磨效果比ARNCO 100XT耐磨带好。肖国章等^[34]采用美国Maurer公司的套管全尺寸磨损试验机,进行不同钻杆接头对套管的磨损试验,分析磨损情况,评价不同钻杆耐磨带的减磨性能。

目前关于耐磨带减磨性测试都是利用套管全尺寸磨损试验机。美国Maurer公司研发的全尺寸套管摩擦磨损试验机是根据连续性接触造成的钻柱偏心磨损模型研发的,在实际钻井中,钻杆在井内运动状态复杂,会产生横向振动、扭转振动等运动形式^[35],因此该设备不能很好模拟实际钻井条件磨损环境,故对耐磨带产品减磨等性能的评价不够全面。中国石油大学(北京)研发的滑台式石油套管摩擦磨损试验机,该试验机在Maurer试验机已有的功能基础上实现了钻杆接头外壁与套管内壁之间以恒定加载、脉动加载或冲击加载工况下的磨损条件。但该设备在国内使用率不高,还需更多的井下测试去反馈其试验效果,进一步完善发展^[36]。

2.4 其他性能

摩擦系数是反映摩擦材料摩擦磨损特性和摩擦阻力的重要指标。耐磨带具有较低的摩擦系数对于减少钻杆套管磨损、降低钻进时旋转阻力,提高钻井效率有重要作用。Zhang等^[27]通过自主研发的SD-1型试验台对PCD复合材料和其他两种传统耐磨带材料在常用套管材料的42Mn2V钢进行摩擦测试,给定一个接触压力,摩擦系数与摩擦力成正比,用摩擦力的高低来表示不同耐磨带材料之间

的摩擦系数差异。申维佳^[32]通过钻具接头与套管试样所组成摩擦副的稳定态扭矩测定值和侧向力计算得出不同耐磨带材料的摩擦系数。

深井、超深井钻探井底地层温度高、钻井液的腐蚀与高腐蚀地层等复杂井下环境,要求耐磨带具有良好的耐高温、耐腐蚀性能。目前关于耐磨带耐高温性能的测试工作较少,对于耐腐蚀性能的测试主要通过观察耐磨带在腐蚀性钻井液环境中工作后产生的腐蚀磨损来判断耐腐蚀性能的优劣。

2.5 小结

根据上述对耐磨带性能评价的研究方法,国内外对耐磨带产品耐磨性、减磨性等性能的评价主要通过行业内普遍认可、性能优异耐磨带产品在相同工况下进行测试对比,对产品的性能进行评价。我国钻具耐磨带标准中对耐磨带耐磨性、减磨性的要求为岩石对耐磨带的磨损速率应小于岩石对钻杆接头材料磨损速率的50%;耐磨带对套管的磨损速率应小于钻杆接头材料对套管的磨损速率^[37]。该要求对于深井、特深井应用的耐磨带产品的性能评价无太大参考价值。对于耐高温、耐腐蚀等性能测试环境与实际井况还有较大差距,还需进一步研究。目前我国钻探发展正向着“深地”迈进,对于这些特殊井使用的耐磨带产品应有详细的评价方法和明确的评价指标,这对于耐磨带产品的筛选使用以及升级优化具有重要帮助。

3 耐磨带关键技术

3.1 耐磨带防脱落

陈猛等^[26]、王兴军^[38]、李亚敏等^[39]的研究表明,耐磨带焊接过程中产生的裂纹是导致耐磨带脱落的主要原因。在深井、超深井钻井作业中,钻杆接头受力以及管柱运动规律复杂,钻杆柱弯曲和高摩擦扭矩导致接头与套管磨损压力增大,钻杆的横向振动、扭转振动导致接头与套管产生连续性冲击磨损,长时间的各种形式的磨损加速裂纹的形成与扩展,同时导致接头耐磨带抗疲劳性能下降,耐磨性能降低,出现耐磨带剥落现象。在一些应力集中的区域,这些裂纹可能会逐渐扩展并导致耐磨带脱落,甚至裂纹穿入基体,将钻杆接头刺穿,严重影响井下管柱寿命。

目前钻井行业常用的耐磨带材料有合金粉末和耐磨带焊丝^[40]。国内常用的合金粉末为铁基合

金粉末,采用等离子喷焊在钻杆接头加工形成耐磨带,其耐磨性好,适合裸眼段钻探;但是喷焊后脆性大,开裂问题严重,易发生喷焊层脱落,造成井下事故。张铁军等^[41]对山西某井队发生的钻杆接头铁基喷焊层脱落原因从喷焊材料与工艺两方面进行分析,提出采用相同成分药芯焊丝代替喷焊粉末,MAG(熔化极活性气体保护电弧焊)代替等离子喷焊,优化焊接工艺等措施可有效解决耐磨带喷焊层脱落问题。

耐磨带焊丝是常用的耐磨带焊接原料,其加工的耐磨带不仅耐磨性好,还具有减磨功能,同时保护钻杆与套管,起到双向防护的作用。耐磨带焊丝发展已经较为成熟,目前国内外耐磨带焊丝产品经过升级换代,材料上能够做到喷焊层100%无裂纹,喷焊层与基体结合强,无剥落,同时可在原有耐磨带基础上进行焊接,性能较好,但焊接工艺的缺陷以及焊接操作不规范常常导致耐磨带加工过程中裂纹产生。

焊接工艺是保证耐磨带使用性能的关键因素,焊接时应根据厂家规定焊接工艺参数进行加工,特别注意焊接预热、焊层温控、以及焊后冷却工作,保证焊接过程规范性。Wells^[42]对高低预热温度下,热影响区进行硬度测试和光学金相分析,结果表明高预热温度能减少热影响区未回火的马氏体形成,防止脆化开裂,并确保热影响区中的微观组织变化很小,不影响钻杆本体材料性能。

控制钻杆接头耐磨带加工过程裂纹产生,是为了保证耐磨带及附近区域在井下复杂工况下整体强度不受影响,防止耐磨带脱落导致井下事故。综上,可以通过发展升级耐磨带焊接材料、选择合适的焊接工艺、规范焊接流程、以及提高操作人员技术水平这些措施控制裂纹产生,提升钻杆接头耐磨带使用过程中产品整体稳定性。

3.2 耐磨带修复技术

钻杆耐磨带在井下工作中经常与地层或套管摩擦,产生磨损。通过修复耐磨带,可以恢复其原有的耐磨性能,延长钻杆的整体使用寿命,减少因频繁更换钻杆而带来的成本和时间损失。目前国内外耐磨带材料,如美国安科公司150XT、350XT耐磨带药芯焊丝、国产的BoTn系列焊丝、PT100焊丝均可在原有的耐磨带技术上进行焊接,重复可焊性好。耐磨带材料的进步对降低耐磨带的修复工

作难度起着重要的作用。耐磨带在井下磨损情况复杂,并不是单一的均匀磨损,会产生偏磨、剥落、腐蚀磨损等复杂磨损形式,而目前市场上的自动化的焊接设备只适用于耐磨带均匀磨损的修复,无法解决其他磨损情况的耐磨带自动化修复。李明辉等^[43]依据现有设备DP-500型喷焊机设计开发一套钻杆耐磨带自动修复系统,在耐磨带修复过程中能够自动采集分析钻杆耐磨带偏磨数据,并根据偏磨程度不同实时调整焊接工艺参数,以调整和优化敷焊金属量,完成偏磨耐磨带的自动修复,偏磨耐磨带修复原理见图8。针对其他磨损形式的耐磨带自动化修复系统还有待研究。

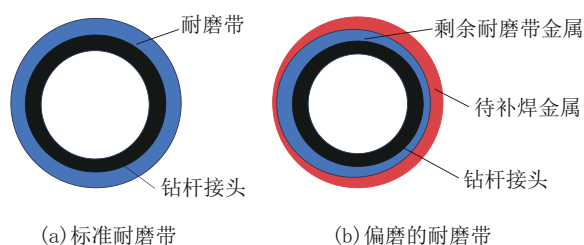


图8 偏磨耐磨带修复原理^[43]

Fig.8 Repair principle of eccentric wear anti-wear belt

3.3 “套管友好型”耐磨带材料

套管友好型耐磨带材料是指在保护钻杆接头的同时对套管造成较低磨损的材料。国外的套管友好型耐磨带材料产品种类较多,如Liquidmetal科技有限公司开发的Armacor MTM 铬合金非晶态耐磨带材料^[6],美国安科公司研发的150XT和300XT系列晶态耐磨带材料^[6,13]以及英国NOV公司研发的TCS系列耐磨带材料^[9]。国外的研究在套管友好型耐磨带材料方面起步较早,发展较快,并朝着高套管友好型的方向不断发展。

近年来,国内套管友好型耐磨带材料的发展也迅速,国内企业和高校已经自主研发出了一系列国产套管友好型耐磨带材料。例如,西安纳特石油科技有限责任公司研制的Nate505J和Nate707J系列材料,上海博腾焊接材料有限公司生产的BoTn3000无铬耐磨带材料,北京智双科技发展有限公司研发的鸣锐160GH药芯焊丝以及中国石油大学(北京)王镇全开发的金刚石复合材料钻杆接头防磨材料^[6]。国产材料在一定程度上解决了进口材料昂贵的问题,并且在某些工况下能够作为替代品,降低了钻井施工成本。

然而,与国外产品相比,国产套管友好型耐磨带材料仍存在较大差距,且国内使用场景较为有限。为缩小这一差距,国内各研究机构应密切关注国外产品的动态,加强与国外先进企业和研究机构的合作交流,借鉴和引进国外先进技术和经验,推动国产套管友好型耐磨带的技术提升和产业发展。

4 结论与展望

焊接耐磨带是目前深井、超深井井下钻具防护的主要方法。自耐磨带出现至今,耐磨带技术发展越来越成熟,耐磨带功能性更强,性能更加优异,能够满足深井、超深井复杂井工况下的钻具防护需求。耐磨带产品从研发到投入生产使用已有完整的技术流程,耐磨带产品横向对比测试能够对耐磨性、减磨性这两个重要性能进行评价,能够为耐磨带产品优化设计提供支持。

目前耐磨带应用时存在的主要问题为耐磨带材料与加工工艺缺陷等原因导致焊接过程中产生裂纹,耐磨带与钻杆基体结合较差,在深井复杂井况下,出现耐磨带剥落的现象。防止裂纹产生,增强耐磨带与钻杆接头结合能力能够最大程度发挥耐磨带的强度,提高工作时的稳定性,起到更好的防护作用。深井钻井工作时,钻杆耐磨带磨损不可避免,因修复原因造成钻杆降级、停用,造成浪费,影响钻进施工;耐磨带自动化修复技术能够有效解决这一问题,使得钻杆能够再次快速投入使用。耐磨带材料正处于套管友好型材料发展阶段,国外正向高套管友好型耐磨材料阶段发展,国内相应的技术与国外相比还有差距。根据耐磨带技术研究现状,未来耐磨带产品的发展可以参考以下几个方面。

(1)耐磨带新材料研发。深井、特深井钻探井下钻具磨损问题严重,对耐磨材料的要求不断提高,在改善原有耐磨材料性能的同时,探索新型耐磨材料,如耐磨性、耐腐蚀性、热稳定性更好的高熵合金^[44],功能性更强的金属陶瓷复合材料^[45],为深井钻具防护提供新的可能性。

(2)耐磨带结构创新。优化钻杆耐磨带的结构设计,提高其与钻具的结合和井下工作稳定性。目前通常是通过焊接耐磨药芯焊丝的方式加工耐磨带,未来可以结合新工艺、新材料研究深井、特深井新型耐磨带结构或耐磨防护方法。

(3)耐磨带修复技术研究。钻杆耐磨带的自动

化修复对于保证深井、特深井钻井高效施工、减少钻杆浪费具有重要意义。目前的自动化修复技术可修复失效耐磨带形式有限,对于深井钻探中可能出现的各种磨损形式的耐磨带,急需更高效全面的修复技术。

(4)耐磨带评价标准确立。目前国内关于耐磨带性能评价没有具体标准,制定耐磨带产品性能评价方法与明确具体的评价指标,对于耐磨带行业的发展和更好服务“深地”钻探具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 徐祖炳.减少钻铤柱与地层及套管间磨损问题的探讨[J].石油钻采工艺,1984(5):29-33.
XU Zuqi. Discussion on reducing wear between drill collar and formation and casing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1984(5):29-33.
- [2] 刘婉颖.油气井钻柱失效分析研究[D].成都:西南石油大学,2011.
LIU Wanying. Failure analysis of drill string in oil and gas wells [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [3] 刘强,谢俊峰,赵密峰,等.超深井钻采工况下钛合金钻杆模拟工况摩擦磨损行为对比研究[J].稀有金属材料与工程,2023,52(1):195-205.
LIU Qiang, XIE Junfeng, ZHAO Mifeng, et al. Comparative study on tribology behavior of titanium alloy drill pipe under simulated working conditions in ultra-deep well drilling [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023,52(1):195-205.
- [4] 仵雪飞,林元华,巫才文,等.套管防磨措施研究进展[J].西南石油学院学报,2004,26(4):65-69.
WU Xuefei, LIN Yuanhua, WU Caiwen, et al. Research development of the preventing wear measures of casing[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004,26(4):65-69.
- [5] 谢卫平.钻杆用药芯焊丝堆焊合金耐磨性及机理研究[D].南京:南京航空航天大学,2021.
XIE Weiping. Study on wear resistance and mechanism of flux-cored wire hardfacing alloy for drill pipe[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [6] 王镇全,张凯,王德国,等.钻杆接头耐磨带材料研究进展[J].石油矿场机械,2016,45(2):94-98.
WANG Zhenquan, ZHANG Kai, WANG Deguo, et al. Research progress of wear-resistant belt materials in drill joint[J]. Oil Field Equipment, 2016,45(2):94-98.
- [7] Arnco Technology Trust Ltd. Wear resistant hardbanding alloys for the worldwide petroleum industry[EB/OL]. [2024-04-11]. <http://www.arncotech.cn>.
- [8] Postle Industries Inc. Hardbanding solution[EB/OL]. [2024-04-11]. http://www.hardbanding solutions.com/postle/in-dex_pi.php.
- [9] Tuboscope (UK) NOV. TCS™ hardbanding retrieved[EB/OL]. [2024-4-11]. <https://www.nov.com/products/tcs-hardbanding>.
- [10] 袁鹏斌,冯耀荣,宋治,等.对提高钻杆工作寿命的建议[J].石油矿场机械,1992(2):24-29.
YUAN Pengbin, FENG Yaorong, SONG Zhi, et al. Suggestions for improving the working life of drill pipe[J]. Oil Field Equipment, 1992(2):24-29.
- [11] 李玉民,李飞,郭建军,等.钻杆接头PT100耐磨带的敷焊工艺与应用[J].石油机械,2003(5):20-22.
LI Yumin, LI Fei, GUO Jianjun, et al. Welding process and application of drill pipe joint PT100 wear-resistant belt[J]. China Petroleum Machinery, 2003(5):20-22.
- [12] 姚宇,夏培培,周文华,等.鸣锐160GH石油钻杆耐磨带堆焊药芯焊丝性能研究及应用[J].焊接技术,2019,48(8):69-71.
YAO Yu, XIA Peipei, ZHOU Wenhua, et al. Research and application of Mingrui160GH flux cored wire for wear resistant surfacing of petroleum drill pipe [J]. Welding Technology, 2019,48(8):69-71.
- [13] 孙威.钻杆接头耐磨带焊接材料的选择及应用[J].焊管,2022,45(10):30-39.
SUN Xian. Selection and application of welding consumables for wear resistant hardbanding of drill string joint [J]. Welded Pipe and Tube, 2022,45(10):30-39.
- [14] 孙德文.无磁钻铤耐磨材料和堆焊工艺研究与应用[D].大庆:东北石油大学,2016.
SUN Dewen. Research and application of non-magnetic drill collars wear-resistant materials and welding technology [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [15] 孟庆瑜.无磁钻具磨损机理及防护措施研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.
MENG Qingyu. The wear mechanism and protective measures research of non-magnetic drill[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [16] 刘海波,刘兆强.LWD电阻率新型耐磨带的研制[J].西部探矿工程,2011,23(9):61-62.
LIU Haibo, LIU Zhaoqiang. Development of LWD resistivity new wear-resistant belt [J]. West-China Exploration Engineering, 2011,23(9):61-62.
- [17] 郭劲松,吴冬凤.利用激光覆焊技术提高LWD仪器寿命[J].设备管理与维修,2018(3):51-52.
GUO Jinsong, WU Dongfeng. Using laser overlay welding technology to improve the life of LWD instrument [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(3):51-52.
- [18] 郝勇,廉仕信,刘学虎,等.无磁钻具的耐磨解决方案[J].科技创新导报,2013(15):61.
HAO Yong, LIAN Shixin, LIU Xuehu, et al. Wear-resistant solutions for non-magnetic drilling tools[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(15):61.
- [19] 巴鲁军.无磁耐磨带焊丝性能研究及应用[J].焊接,2017(7):49-52.
BA Lujun. Research and application of non-magnetic wear-resistant welding wire[J]. Welding & Joining, 2017(7):49-52.
- [20] Wells A J. A new way to extend the life of pipe[C]. Offshore Technology Conference Asia, Virtual and Kuala Lumpur, Malaysia, 2022.
- [21] Sanderson S, Steel R, Keshevan K, et al. Friction stir welding/processing for hardbanding in oil and gas applications[C]. The 21 International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, HI (US), 2011.
- [22] 搅拌摩擦加工(FSP)介绍[EB/OL]. <https://eduai.baidu.com/view/2c9183ab11661ed9ad51f01dc281e53a5902510d>.
- [23] 杨进能.钻杆偏磨的原因及其对疲劳寿命的影响[J].金属材料与冶金工程,2008,36(3):16-18.

- YANG Jinneng. The reason of partial abrasion of drill pipe and the influence on weariness life[J]. *Metallic Materials and Metallurgical Engineering*, 2008, 36(3):16-18.
- [24] 李建山. 大牛地气田钻杆耐磨环失效原因分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2005(3):44-47.
- LI Jianshan. Analysis on the causes of failures of abrasion resistant ring on drilling pipes in Daniudi Gas Field[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2005(3):44-47.
- [25] 孙浩玉, 温林荣, 孙旭, 等. 抗硫钻杆在毛坝8井应用中的失效分析[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(6):108-111.
- SUN Haoyu, WEN Linrong, SUN Xu, et al. Failure analysis of sulfur resistant drillpipe used in Well Maoba 8[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(6):108-111.
- [26] 陈猛, 余世杰, 欧阳志英. 某井S135钢级钻杆接头耐磨带区域刺漏原因分析[J]. *钢管*, 2018, 47(6):45-49.
- CHEN Meng, YU Shijie, OUYANG Zhiying. Analysis of causes for washout failure of hardbanding area of S135 drill pipe joint as happened in a certain oil well[J]. *Steel Pipe*, 2018, 47(6):45-49.
- [27] Zhang K, Wang Z Q, Wang D G. Friction and wear behavior of wear-resistant belts in drill joints for deep and ultra-deep wells[J]. *Strength of materials*, 2018, 50(1):72-78.
- [28] 张善仁. 一种新型石油钻具耐磨带的实用性研究[J]. *石化技术*, 2022, 29(2):22-23.
- ZHANG Shanren. Practical exploration of a new wear belt for oil drilling tool[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 29(2):22-23.
- [29] Haberer J F, Gates J, Fifield R. Resistance to abrasive wear and metallurgical property assessment of nine casing-friendly hard-banding alloy chemistries: Abrasion resistance assessment using ASTM G65 methodology (standard test method for measuring abrasion with dry sand/rubber wheel apparatus)[C]. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, 2014.
- [30] Jiang W, Yanjun L, Hexing L, et al. Comparative analysis of friction and wear properties of titanium alloy drill pipe and steel drill pipe[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2587(0):012001.
- [31] 李昆成. 大斜度井套管磨损预测研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.
- LI Kuncheng. Research on casing wear prediction in highly deviated wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [32] 张建兵, 韩勇, 肖国章. 两种主要高强度套管的耐磨性能试验[J]. *天然气工业*, 2015, 35(2):64-69.
- ZHANG Jianbing, HAN Yong, Xiao Guozhang. Wear resistance of two kinds of high-strength casings: An experimental study[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2):64-69.
- [33] 申维佳. 某油田超深井钻杆套管磨损规律实验研究[D]. 西安:西安石油大学, 2019.
- SHEN Weijia. Experimental study on casing wear law of ultra-deep well drilling in an oilfield[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [34] 肖国章, 许文妍, 韩勇, 等. 全尺寸套管磨损试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2007, 36(10):65-67.
- XIAO Guozhang, XU Wenyan, HAN Yong, et al. Study on full scale test of casing wear[J]. *Petroleum Field Machinery*, 2007, 36(10):65-67.
- [35] 王先安. 考虑钻柱屈曲及涡动效应的套管磨损程度研究[D]. 西安:西安石油大学, 2023.
- WANG Xian'an. Research on casing wear degree considering drill string buckling and whirling effect[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [36] 储胜利, 樊建春, 张来斌, 等. 全尺寸石油套管冲击滑动复合磨损试验机的研制[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(7):125-128, 155.
- CHU Shengli, FAN Jianchun, ZHANG Laibin, et al. The development for a type of sliding-impact wear test machine for petroleum casing in real size[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(7):125-128, 155.
- [37] SY/T 6948—2013, 石油钻具耐磨带[S].
- SY/T 6948—2013, Hardbanding for petroleum drilling tool[S].
- [38] 王兴军. 石油钻杆接头喷焊层耐磨带脱落原因分析[J]. *中国石油石化*, 2017(5):164-165.
- WANG Xingjun. Analysis on the cause of wear-resistant belt falling off of spray welding layer of oil drill pipe joint[J]. *China Petrochem*, 2017(5):164-165.
- [39] 李亚敏, 张然, 支鹏鹏, 等. 钻杆接头喷焊层耐磨带脱落情况分析[J]. *设备管理与维修*, 2021(10):52-53.
- LI Yamin, ZHANG Ran, ZHI Pengpeng, et al. Analysis of wear belt shedding of spray welding layer of drill pipe joint[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2021(10):52-53.
- [40] Omojuwa E, Acquaye J, Hart J, et al. PTA powder hardbanding provides cost savings and extends life of drill pipes in Permian Basin formations [C]. *SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium*, Oklahoma, USA, 2017.
- [41] 张铁军, 何旭. 合理解决钻杆铁基喷焊层脱落的方法[J]. *电焊机*, 2021, 51(11):141-144.
- ZHANG Tiejun, HE Xu. Reasonable solution to the problem of iron base spray welding layer falling off of drill pipe[J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(11):141-144.
- [42] Wells A J. Workstring tubing: The new drill pipe (and how to protect it) [C]. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*, Virtual, 2020.
- [43] 李明辉, 向桂毅, 李春啸, 等. 钻杆耐磨带偏磨自动修复系统的开发[J]. *石油管材与仪器*, 2024, 10(1):18-22.
- LI Minghui, XIANG Guiyi, LI Chunxiao, et al. Development of automatic repair system for eccentric wear of drilling pipe hardbanding [J]. *Petroleum Pipe Materials and Instruments*, 2024, 10(1):18-22.
- [44] 鲁一荻, 张骁勇, 侯硕, 等. 高熵合金的发展及工业应用展望[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(1):333-341.
- LU Yidi, ZHANG Xiaoyong, HOU Shuo, et al. Perspective on industrial applications and research progress of high-entropy alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(1):333-341.
- [45] 周永宽, 康嘉杰, 岳文, 等. 超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(4):72-79.
- ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4):72-79.

(编辑 王文)