

## 摘 要

油田机采井抽油杆接箍与油管在工作状态下构成滑动摩擦副，同时还承受介质腐蚀和交变载荷，产生磨损、腐蚀和疲劳断裂失效。随着油田开发不断深入，综合含水逐年上升，我国大部分油田机采井管杆偏磨问题日益突出，使得油井免修期明显降低，维护作业量大大增加，明显提高了采油成本。目前的防偏磨措施主要有采用扶正器、涂覆防腐耐磨涂层等，这些方法取得了一定成效，但存在操作复杂、环境污染等问题。为了解决有杆泵井的管杆偏磨问题，本文采用 5kW 横流 CO<sub>2</sub>激光器对油管内壁和接箍表面进行强化处理，以提高油管的整体耐磨耐蚀性能。本文主要从以下三个方面研究了油管与接箍的管杆偏磨问题：

研究了激光表面改性后组织的变化；用硬度计测试试样的宏观硬度与显微硬度。结果发现：相变硬化区的组织为黑色细针状淬火马氏体和少量残余奥氏体，白色铁素体，仍呈带状分布；熔覆层的组织主要由  $\gamma$ -Ni 基固溶体及其上分布着的网状或者针状的硼化物、碳化物和硅化物组成；普通油管的硬度是 HRC24，普通接箍的硬度是 HRC18.8；激光强化处理的油管内壁表面的硬度是普通油管的 1.6 倍；激光熔覆 Ni35 合金粉末后的接箍表面的硬度是普通接箍的 1.95 倍；激光熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍表面硬度是普通接箍的 3 倍，激光熔覆 Ni35 接箍距表层 0.46mm 处硬度最高，在 460HV<sub>0.3</sub> 左右；油管相变硬化层的最高硬度在 550HV<sub>0.3</sub> 左右，随着距离表面的深度增大，硬度随之降低。

研究了水介质下的管杆磨损性能。水介质下的管杆磨损试验表明：相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副比较好，不论是油管还是接箍整体磨损趋势均比较低，且经过五天的磨损后油管的相变硬化层仍大量存在，其磨损率较低、耐磨性较好，进而激光相变硬化处理的油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍相互配合时，抽油杆管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高。通过 SEM 分析可知，在摩擦磨损过程中，磨损接触层形成的氧化膜不断剥落，形成磨屑造成磨粒磨损，进而管杆间磨损以磨粒磨损为主。

研究了 3.5%NaCl 溶液下的管杆磨蚀性能。3.5%NaCl 溶液下的管杆磨蚀试验表明：结合摩擦副整体配合失重，相变硬化处理油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副比较好，抽油杆管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高。

本文验证得出：相变硬化处理油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副较佳。

关键词：激光相变硬化，激光熔覆，管杆偏磨，磨损率

# **Matching Study of Antiwear and Anticorrosion of Laser Surface Modification Tubing and Coupling**

Zhang Guangming (Materials Science and Engineering)  
Directed by Prof. Wang Yong

## **Abstract**

Oil-sucker rod coupling and oil tubing constitute sliding friction pair in the work state in the oil wells, meanwhile withstands corrosion and alternate load, which cause wear, corrosion and fatigue failure. With the exploiting of the oil deposit, the composite water cut of the oil wells is ascending drastically, the eccentric wear condition in oil wells is becoming worse and worse in most oil fields of China. Amount of maintenance work and the fabricating cost are ascending with the service interval of the wells becoming shorter caused by eccentric wear. Centering device and antiseptic wear proof coating are used for prohibiting eccentric wear, and the problems such as complex operation and environmental contamination exist with some effectiveness. In order to solve the problems of the side wear between the oil tubing and coupling in the oil wells, a 5kW transverse-flow CO<sub>2</sub> laser is applied for laser cladding coupling and laser hardening the oil tubing inwall. The paper mainly studied the following three aspects of the partial rod and tubing wear issues:

The change of the major organization after laser surface modification is studied; specimen's macro-hardness and micro-hardness are tested. The results showed: the organizational transformation hardening area is black and fine needle small amount of quenching martensite and residual austenite, ferrite white, continued to show a zonal distribution; Cladding is composed by the  $\gamma$ -Ni based solid solution and distributed on the mesh or the needle of the boride, carbide and silicid; ordinary tubing hardness is HRC24, the hardness of common coupling is HRC18.8; hardness of laser-enhanced processing pipeline inner wall surface is 1.6 times than the ordinary tubing; the coupling surface hardness of Ni35 laser cladding alloy is 1.95 times than ordinary hoop; The coupling surface hardness of laser cladding Ni60 package 30% WC is three times than the hardness of ordinary coupling; the hardness that is 0.46mm from surface of laser Cladding Ni35 hoop is the highest , 460HV<sub>0.3</sub>

around; The highest hardness of transformation hardening tubing is 550HV<sub>0.3</sub> around, the depth of the surface with the distance larger, the hardness decreases.

Rod wear under water is mainly studied. The wear test revealed that transformation hardening tubing and Ni60 package 30% WC clad hoop is the better combination of friction pair, whether tubing or coupling trends in the overall wear is lower, and after five days of wear and tear, the tubing phase hardened still exist in large numbers, lower wear rate, better wear resistance, then laser transformation hardening tubing with the Ni60 package 30% WC clad coupling interaction, the sucker rod friction's anti-bias mill capacity can be improved. It is showed that in the process of friction and wear, oxide film formed on wear contact layer constantly falling off, abrasive wear caused by the formation of wear debris, then between the rod and tubing wear is mainly abrasive wear, by SEM analysis.

Rod abrasion performance under 3.5%NaCl is mainly studied. The abrasion test was found that combined with friction pair as a whole with the weight loss, transformation hardening tubing and Ni60 package 30% WC clad combination of friction pair coupling is better, sucker rod Friction's ability to prevent partial wear can be improved.

The paper is validation obtained that transformation hardening tubing with the Ni60 package 30% WC coupling is the better combination of frictional pairs.

**Key words:** Laser transformation hardening, laser cladding, oil well eccentric wear, rater of wear

## 关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中做出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名： 张志明

日期：2010 年 5 月 26 日

## 学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名： 张志明

日期：2010 年 5 月 26 日

指导教师签名： 王丽

日期：2010 年 5 月 26 日

## 第1章 绪论

### 1.1 课题的来源及意义

有杆泵是在国内应用最为普遍的一种机械采油方式，目前由于斜井，水平井日渐增多，以及受油井高含水、注聚合物等因素的影响，油管与抽油杆间的摩擦与磨损问题日益突出，成为近年来困扰油气生产并被广泛讨论的热点问题之一。油管与抽油杆间的相对运动是发生在冲程范围内的往复运动，运动速度通常在1m/s以下，属于低速运动，在此范围内如果发生管杆间的相对接触，必将发生摩擦现象，此时若管杆间润滑不良，则将会引起磨损。管杆间的表面接触问题十分复杂，因为受井身结构、工作制度、杆柱结构、井液性质等多方面因素的影响，所以摩擦与磨损现象并不仅仅发生于斜井或水平井当中，当油井处于高含水期，或受到注聚合物等因素的影响时，油管内壁与抽油杆间液体润滑条件变差，即使是在直井中，也同样会发生摩擦与磨损现象。偏磨井数量多、分布广泛，近几年来，抽油机井表现出来的抽油杆与油管之间的磨损现象日益严重。这些偏磨增大了油水井管漏、断脱等事故发生率，增加了油水井维修次数和成本，减少了油水井有效工作时间，给油田带来了巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。

抽油杆工作环境极其的恶劣，作业现场的资料分析结果表明，管杆的偏磨，大部分发生在泵上300~700m处，油井抽油杆集中表现在Φ19mm杆的接箍和杆体上。油管多表现在公扣1.5m处左右，且平式管比加大管严重，抽油杆接箍的偏磨程度大于油管的偏磨程度。通过回收、清洗、检测、解剖等可以发现，其偏磨特征大体归纳为以下两个方面：①油管与抽油杆接箍的偏磨约占偏磨总数的70%。 $\Phi 19\text{mm}$ 、 $\Phi 22\text{mm}$ 两种规格的抽油杆发生的偏磨情况居多，前者比后者严重，其原因可能是井身不直，抽油杆在上下运动中接箍磨损油管，造成接箍一面或两面变薄，削弱了接箍与杆头锥承台阶间的预紧力，严重偏磨致使其脱扣，同时将油管磨出沟槽，直至穿孔或开裂。②抽油杆主体或接箍与油管内表面的角度磨损。这种磨损表现为抽油杆和油管的两边磨损，且一边在上，一边在下，磨损面形状似三角形， $\Phi 19\text{mm}$ 、 $\Phi 22\text{mm}$ 抽油杆经常会发生这种偏磨。

目前，大多油田都针对抽油杆、管偏磨现象进行了成因分析，并针对杆、管偏磨采取了减少抽油杆、管偏磨措施，但都不同程度地存有其局限性<sup>[1]</sup>。目前，主要的防偏磨措施包含有使用扶正器、涂覆耐磨耐蚀涂层、优化杆柱组合等，但这些措施存在操作复杂、污染环境、效果不明显等缺点。因此，提出利用激光器对油管内壁及接箍外表面进

行激光强化处理，提高油管与接箍的防偏磨性能，以便最大限度的提高机采井中管杆的防偏磨能力，提高其使用寿命，达到节约能源、材料以便提高经济效益的目的。

激光表面改性技术不仅实现了光、机、电技术相结合，更是一种先进制造技术，而且目前正处于向传统制造技术中许多工艺过程积极渗透的阶段。激光合金化、熔凝及相变硬化可显著提高金属材料的表面硬度，耐磨性及耐蚀性；并且相对于电弧喷涂、渗碳、渗氮等生产工艺来说具有冶金结合强度高、清洁、节约能源、节省材料等诸多优点。

## 1.2 抽油井管杆偏磨成因及治理措施

### 1.2.1 抽油井管杆偏磨成因

油井管杆发生偏磨的因素主要包括以下六个方面：

(1) 井斜角变化较大井段的偏磨：井斜又分为两种情况：①自然井斜引起偏磨：由于井斜的原因，抽油杆质量在油管的径向存在一个分量，即抽油杆与油管之间存在一个压力，当抽油杆在油管中沿油管轴向做往复运动时，便会使抽油管接箍磨损失效，或者油管被磨穿造成管漏；②地层蠕动造成井斜引起偏磨：深井中，由于地层发生蠕动，使套管进而使油管偏移，油井就形成了有一定倾角的斜井，此时与自然井一样，井斜是造成抽油井管杆偏磨的最主要原因<sup>[1]</sup>。

(2) 杆管屈曲失稳导致的偏磨：抽油杆柱与管柱由于长径比过大，在一个运动周期内，杆管交替承受拉压载荷的作用，根据工程力学的压杆失稳原理，当油管柱或抽油杆柱底部受到压载荷达到一定的数值时，便可产生屈曲。屈曲到一定的程度可使抽油杆与油管内壁发生接触，在抽油杆作往复运动时，便可发生偏磨。油管屈曲发生在上冲程过程中，抽油杆屈曲则发生在下冲程过程中<sup>[2]</sup>。

(3) “狗腿”变向引起磨损：在有“狗腿”地方，弯曲度小，油管与接箍产生摩擦，上下冲程是单面摩擦；弯曲度较大时，油管与接箍，油管与抽油杆本体均产生摩擦，上下冲程造成双面摩擦<sup>[1]</sup>。

(4) 套管变形引起偏磨：由于地层蠕动，使井段出现弯曲，继而套管变形，挤压油管使之发生变形，导致油管在井筒内偏移，而抽油杆垂直，在抽油杆与油管间往复运动的摩擦作用下，必然会发生磨损失效现象<sup>[1]</sup>。

(5) 日常管理对偏磨的影响<sup>[3]</sup>：矿化度含砂量、含水率、沉没度、井口回压、结蜡、结盐均会对偏磨产生不同程度的影响。矿化度含砂量：当油井产出液中含有少量砂粒时，可以减缓杆管间的磨损，当抽油杆管在含有大量具有较强磨砾性砂粒的产出液中摩擦

时，这些砂粒会在摩擦表面产生磨粒磨损，产出液中随含沙量的增加，磨损速度增大；高含水率：产出液含水越高，偏磨越严重。产出液含水率低时，杆管摩擦面处于良好的油润滑状态，动摩擦因数较小，磨损较轻；产出液含水高时，杆管摩擦处于水润滑状态，动摩擦因数大大增加，加快了杆管磨损；沉没度：当供液充足时，动液面较浅，泵的沉没度较大，这样不但增加了杆管接触磨损面积，而且加重了抽油机载荷，杆管间的正压力也随着增大，导致偏磨可能性增大。

(6) 油管材质类型、抽油杆材料与扶正器材料的材质、杆管间的正压力、生产参数等对偏磨的影响：J55 钢级油管的磨损率要高于 N80 钢级油管的磨损率；随着正压力的增加，磨损率逐渐增大。这可能是由于在正压力很大的接触面上缺少润滑膜而引起的，当正压力足够大时，就可使抽油杆与油管之间的润滑膜破裂，导致抽油杆与油管内壁直接接触，从而加速了油管的磨损<sup>[4]</sup>；冲程短冲次快时，抽油杆与油管相对摩擦部位的面积较小，摩擦次数增多，磨损较快；而冲程长冲次慢时，抽油杆与油管摩擦部位的面积相对较大，摩擦次数减少，因此磨损较慢，管杆使用寿命相对也较长一些。

### 1.2.2 管杆偏磨治理措施

(1) 采取抗磨接箍、抗磨副、反馈泵、加装抽油杆扶正器（如：KZX 型偏磨扶正器）、内衬管（例如：HDPE 内衬油管<sup>[5]</sup>）等防偏磨治理措施。

(2) 应用新型防偏磨抽油泵：大流道抽稠油整筒防偏磨泵、柱塞底部加重式防偏磨抽油泵、CYB 双冲程平衡防偏磨增效抽油泵、旋流旋转柱塞式防偏磨抽油泵、大反馈力防偏磨抽稠油泵、偏阀式防偏磨抽油泵等<sup>[6]</sup>。

(3) 合理设计并优化工作参数：尽量采用长冲程、慢冲次的工作制度，降低抽油杆所受的惯性载荷。

(4) 在油管方面：在偏磨较严重的深抽油井泵上加油管锚，合理设计尾管长度，改善油管受力状况，减少因交变载荷引起的弯曲变形，进而减少由于油管弯曲造成的杆管偏磨；偏磨不太严重的油井上安装井口油管旋转器，采用油管旋转装置，使油管在生产过程中自动旋转，将杆管之间的线摩擦通过油管的旋转变为面摩擦，让油管全方位摩擦，以延长油管寿命；使用外加厚涂料油管，减少抽油杆接箍与油管内壁摩擦；对于油管腐蚀、结垢严重的井，要进行高压清水除垢或更换新油管，以降低摩擦系数；对于出砂严重，且地层返吐厉害的井，要及时冲砂洗井<sup>[4-6]</sup>。

(5) 在抽油杆方面：为提供在下冲程开始时打开游动阀所需的力，并能使抽油杆柱

在下冲程时处于拉伸状态，建议在杆柱上装加重杆；用抗腐蚀性强、抗拉强度大、耐磨性好的高强杆；优化抽油杆组合；安装井口抽油杆旋转器；使用防磨器，这是目前现场上诸多防偏磨措施中比较实用的一种<sup>[4-6]</sup>。

(6) 防井斜工艺的配套实施：安装井口盘根盒(防喷盒)；应用旋转悬绳器：该装置通过抽油杆的不断旋转，不但可以避免抽油杆与油管的单方向偏磨，还可以有效防止活塞与泵筒的单向偏磨，并具有一定的防抽油杆脱扣功能；应用旋转井口，通过使油管旋转角度，可以使管杆相互均匀偏磨，防止油管被抽油杆磨穿造成躺井，目前旋转井口与旋转悬绳器还可以复合使用，提高了防治偏磨的效果<sup>[4-6]</sup>。

(7) 进一步优化管杆组合：目前油井通常采用抽油杆三级组合方式，19mm杆位于中部，起着关键的连接作用，在运行过程中承受的应力较大，容易出现弯曲和偏磨，最终导致抽油杆断脱，在许多井的作业现场中也可以证实这一点，因此建议将较易发生偏磨的19mm杆更换为高强度杆，以减少其断脱率，延长抽油井的免修期<sup>[4-6]</sup>。

管杆防偏磨技术还有在偏磨油井上推广应用连续抽油杆，润滑防偏磨技术，使用无管采油、柔性杆采油等技术。且在日常管理中应注意：制定合适的生产参数组合，选择合理的沉没度，降低回压，定期实施井筒清理措施等问题。

### 1.3 激光表面改性技术简介

激光表面改性技术的研究始于20世纪60年代，但到20世纪70年代初期才研制出大功率激光器，之后激光表面改性技术才获得实际的应用，并在接下来的十年内得到迅速的发展。激光表面改性技术是在材料表面形成一定厚度的处理层，由于可以改善材料表面的力学性能、冶金性能、物理性能，从而提高了零件、工件的耐磨、耐蚀、耐疲劳等一系列性能。围绕激光表面改性的特点，人们相继研究并开发出一些具有工业应用前景的激光表面处理技术，大致上分为激光相变硬化、激光表面合金化、激光表面熔覆、激光非晶化、激光冲击硬化和激光熔凝<sup>[7-16]</sup>。

激光表面改性的原理<sup>[17-19]</sup>：当激光束照射到材料表面时，激光被材料吸收变为热能，表层材料受热升温。因为功率集中在一个很小的表面上，所以在很短时间( $10^{-1}\sim10^{-7}$ s)内即把材料加热到高温(加热速度高达 $10^5\sim10^9$ °C/s)，使材料发生固态相变、熔化甚至蒸发。当激光束被切断或移开后，材料表面快速冷却(冷却速度高达 $10^4$ °C/s)，自然冷却后就能实现表面改性。根据激光束与材料表面作用的功率密度、作用时间及作用方式的不同，可实现不同类型的激光表面改性。

### 1.3.1 激光熔覆技术

激光表面熔覆技术是指在激光束作用下将合金粉末或陶瓷粉末与基体表面迅速加热并熔化，光束移开后自然冷却的一种表面强化方法，具有以下优点：

- A 冷却速度快(高达  $10^6^{\circ}\text{C/s}$ )，组织具有快速凝固的典型特征；
- B 热输入和畸变较小，涂层稀释率低(一般小于 5%)，与基体呈冶金结合；
- C 粉末选择几乎没有任何限制，特别是在低熔点金属表面熔敷高熔点合金；
- D 能进行选区熔敷，材料消耗少，具有卓越的性能价格比；
- E 光束瞄准可以使难以接近的区域熔敷；
- F 工艺过程易于实现自动化<sup>[20,21]</sup>。

自从20世纪80年代开始，激光熔覆技术得到了迅猛的发展，目前已成为国内外激光表面改性研究的热点。正是由于理论上的支持和实践的需要，激光熔覆技术在工业化上迈出了巨大的一步，其应用领域非常宽，它可用于机械制造与维修、汽车制造、纺织机械、航海与航天和石油化工等领域。在刀具、模具、阀体上熔覆陶瓷层已获得了广泛的应用。此外，对灰铸铁的汽车发动机排气阀进行Cr的激光合金化处理，合金层硬度可达HRC60，节约成本高达80%，在Cu上熔覆Ag作为电接触材料也是激光熔覆的重要应用。中南工学院石世宏<sup>[22,23]</sup>等使用5KW横流CO<sub>2</sub>激光器在石化阀门密封面奥氏体基体上熔覆Ni基自熔合金，并与传统等离子喷焊层进行对比，发现经激光熔覆的石化阀门密封面能获得厚度达3.0mm、表面较光滑平整的合金层。在组织和性能上均明显优于等离子喷焊工艺。王新林<sup>[24,25]</sup>等采用5kW横流CO<sub>2</sub>激光器，对不同基体材料的石化高参数阀门密封面进行激光熔覆，所用合金粉为CoCrWB与NiCrFeBSi。在研究解决了厚层单道熔覆裂纹问题的基础上，得到了厚2~3.5mm、表面平整、无质量缺陷的激光熔覆层。

### 1.3.2 激光相变硬化

激光相变硬化<sup>[26]</sup>(又称激光淬火，或称为Laser Transformation Hardening，简称LTH)是激光热处理的一种，它是以激光为热源，通过高能量的激光束扫描工件，使工件表面极薄一层的小区域内快速( $10^{-1}\sim10^{-7}\text{s}$ )吸收热量而温度急剧上升，工件材料浅表面内的温度在材料的熔点和奥氏体转变临界温度之间的部分发生固态相变。由于加热时速度很快(加热速度高达 $10^5\sim10^9^{\circ}\text{C/s}$ )，进而奥氏体转变临界温度A<sub>C1</sub>升高，材料在奥氏体转变临界温度上停留时间很短，但珠光体晶粒一般都能完成碳扩散，转变为奥氏体组织。此时工件基体仍处于冷态，由于热传导的作用，表面热量迅速传到工件的其它部位上，在瞬间

可进行自冷淬火。在快速冷却过程中，碳原子来不及扩散，使得马氏体含碳量极高，而且残余奥氏体也获得了极高的位错密度，进而实现工件表面的相变硬化。经过激光相变硬化处理后，工件表面硬度可达HRC55~65以上，淬硬层深达0.1~2.0mm，疲劳强度增大，且加工后表面变形小。

激光相变硬化由于以上的优点而得到了较为广泛的应用。1987年由原石油部组织鉴定，油田井下使用结果表明，泵筒经激光淬火后，使用寿命提高了一倍，但变形甚微，耗电量仅为镀铬工艺的12%。他们还进行了整筒45#钢柱塞和球铁钻井泵缸套的激光相变硬化试验，均取得了很好的效果<sup>[26]</sup>。胜利油田钱晖<sup>[27]</sup>对内径44~83mm、长300mm组合抽油泵缸套进行了激光相变硬化处理。缸套内表面硬度达到HRC60~66，硬化层深度达到0.4~0.6mm，缸套直径上变形仅为0.03mm左右，远远低于常规热处理的变形量，大幅度提高了生产效率，降低了生产成本。哈尔滨工业大学王扬<sup>[28]</sup>等介绍了一种采用YAG固体激光器和光纤导光对抽油泵整体泵筒进行激光表面淬火的新方法，该方法将管内机器人技术和激光相变硬化技术相结合，形成了泵筒激光处理系统，并用该系统进行了激光相变硬化工艺实验，结果表明：处理过的泵筒表面硬度和耐磨性均显著提高。

## 1.4 国内外研究现状

### 1.4.1 激光表面改性技术在石油工业中的应用情况

激光表面改性技术从问世以来就得到石油工业的关注并获得了一定应用，如激光切割石油割缝筛管、激光焊接输油管道、高能激光器钻油井、激光测量、激光打标及激光表面强化等。例如：抽油泵泵筒内激光淬火(即相变硬化)，常用的油管和套管材质(P-105, C-75, J-55)的激光表面相变硬化；45#钢作为钻井泵缸套材料在中频淬火的基础上再进行激光相变硬化处理；为解决油管粘扣问题，利用激光淬火工艺对油管螺纹进行淬火；采用高功率CO<sub>2</sub>激光器，利用正交实验法对钻杆表面进行淬火处理；粉碎机锤片上，发动机摇臂表面上，鼓风机叶片上利用激光技术熔覆硬质合金粉末，提高使用寿命；利用激光技术在钢齿钻头表面熔覆碳化钨(WC)；牙轮壳体表面进行的激光熔覆处理；钢齿钻头表面熔覆WC；钻头轴承表面进行激光熔覆处理；抽油泵泵筒内壁通过激光熔覆进行强化和修复等<sup>[7]</sup>。

### 1.4.2 油管和抽油杆接箍表面强化技术研究

(1) 在油管内表面强化方面, 已研发各种技术以提高油管内壁耐磨蚀性, 主要有以下几种:

①油管内壁喷涂一层山西中天公司提供的耐磨涂层<sup>[29]</sup>: 在油管上喷涂耐磨涂层可以有效降低磨损表面受摩擦损坏的程度, 从而提高摩擦副的耐磨性, 故可以大大降低管杆偏磨的程度。45#钢抽油杆与J55油管表面喷涂涂层后的组合, 其耐磨性要明显好于45#钢抽油杆与J55油管的组合, 油管表面喷涂后其耐磨性与不喷涂相比提高近5倍, 同时对45#钢抽油杆的减磨效果也非常明显, 其磨损量降低近1/2, 这说明J55油管表面喷涂后对抽油杆和油管本身的减磨作用非常好; 可看出: 喷涂耐磨涂层可以有效降低磨损表面受摩擦损坏的程度, 从而提高摩擦副的耐磨性。另有北京化工大学颜廷俊等人针对我国东部地区油田抽油杆/油管井下偏磨严重这一实际情况, 提出在抽油杆或油管接触表面进行喷涂耐磨涂层的防磨措施。在摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验。试验证明, 经喷涂工艺处理的管与抽油杆进行摩擦时, 耐磨性能较好, 摩擦系数与磨损率都较低。可以使抽油杆/油管这对摩擦副的磨损状态得到显著改善, 有效的保护了抽油杆和油管、延长了使用寿命, 减少了现场作业费用。

②油管渗氮<sup>[30]</sup>技术: 氮化防腐油管是用于解决油、水井油管腐蚀或偏磨问题的新型防腐油管, 经过胜利油田200余口井的现场试验, 没有出现因油管质量问题导致油、水井重新作业的情况, 平均使用寿命已达到1年以上, 取得了良好的应用效果。

③电镀化学镀技术: 化学镀层有结合力强, 硬度高, 耐磨性能好, 耐蚀性能优良等优点。镍磷合金镀管非晶态镍磷(Ni-P)合金镀层具有良好的耐磨耐蚀性能。

④碳锆复合树脂内涂层油管<sup>[31]</sup>: 碳锆复合树脂涂料是将具有自润滑性能的非金属和超硬金属材料与环氧、尼龙等树脂复合而成。将碳锆复合树脂涂料在一定条件下通过热熔融方式涂覆在油管内表面, 经高温固化后形成碳锆复合树脂内涂层油管技术。固化后生成的保护涂层呈网状交联, 在微观上有一定的孔洞, 具有微观弹性, 能减轻一定的正压力作用产生的磨损, 具有超强耐磨和优良防腐双重性能。

⑤油管内表面激光改性处理<sup>[32]</sup>: 激光相变硬化处理可提高油管内表面的硬度、耐磨性等性能。N80级油管钢经激光相变硬化处理后硬度提高, 且组织晶粒得到细化, 改善了材料表面的机械性能。因此, 具有良好的耐磨性, 抗磨损能力得以大大提高。激光表面热处理工艺在油管上的应用, 既提高了油管产品的耐磨性能, 又提高了油管产品的耐腐蚀性能, 大大提高了油管产品的技术含量。

此外还有HDPE内衬油管、改性玻璃钢内衬油管、双金属复合防腐油管、涂料油管等。

## (2) 接箍表面强化技术主要包括以下几种:

①双向保护接箍<sup>[33]</sup>: 双向保护抽油杆接箍是在普通接箍表面涂覆一层AOC-160耐磨耐蚀减摩涂层，经过特殊表面处理工艺加工而成，严格按照API SM标准制造。AOC-160涂层中特有的成分在涂层(接箍的硬表面)与油管(软表面)摩擦过程中，以片状形式转移到油管表面，并附着在油管表面上，保护和减缓了油管表面的磨损。同时片状物的存在降低了接箍和油管之间的摩擦系数，起到了减摩的作用。

②磷化接箍<sup>[34]</sup>: 磷化膜是磷酸盐溶液与金属铁相互作用生成的。磷化液是由磷酸锰铁盐(马日夫盐)或磷酸二氢锌和少量磷酸二氢铁溶于水中而形成的，它们在水中进行水解，水解出来的大量氢离子与工件表面的铁接触产生化学反应，由于氢气的不断形成，氢离子不断减少，这样水解反应的化学平衡即被破坏，水解过程不断进行，结果在溶液中产生了较多的磷酸氢根和磷酸根，再与溶液中的锰离子作用形成磷酸盐。当磷酸盐在溶液中过饱和时，便在接箍表面上结晶析出形成磷化膜。随着磷化膜的生成并连成一片，使零件表面与溶液隔离。

③抽油杆防脱防磨接箍<sup>[35]</sup>: 此接箍是由接箍本体和防磨架构成。接箍本体由20CrMo或35CrMo钢制成，其外圆面两端各加工有用来安装防磨架的径向止口(台阶)，中间铣出两个对称平面，以便用扳手旋转。内圆面两端各加工成一止口，其中间留退刀槽，两止口之间加工出阴螺纹。该螺纹为一种特殊结构的螺纹，其主要特征是，螺纹带有25°-30°的斜齿根，齿形半角不相等。实践证明，这种特殊结构的螺纹有自锁能力，可有效防止脱扣。防磨架由具有聚四氟乙烯成分的粉末挤压而成，其外圆面均匀分布4个导向防磨筋，内圆面尺寸与接箍本体外圆面相配合。实践证明这种用粉末挤压成型的防磨架，其摩擦系数极小，耐磨性很高。

④接箍表面激光相变硬化处理<sup>[36,37]</sup>: 调质态40Cr表面激光处理后磨损性能较基体具有大幅度提高，40Cr基体表面激光相变硬化处理后，硬化层生成高硬度耐磨马氏体以及对耐磨性有利的残余奥氏体，故耐磨性比基体提高了7.6倍。

⑤接箍表面激光熔覆处理<sup>[36,37]</sup>: 激光熔覆是一种快速熔化、扩展和凝固的过程。40Cr钢表面激光熔覆铁基合金粉末后，强化层显微组织特征是以细小的共晶莱氏体为基底，上面分布着先共晶渗碳体，是一种凝固组织，其强化层中不仅含有大量的合金渗碳体，而且还有马氏体、残余奥氏体和原位析出的颗粒。载荷在300g左右时，熔覆层的摩擦系

数都随着载荷的增加而减小，表现了良好的耐磨性能。

此外还有三面旋转接箍、镀铬处理的抗磨接箍、镀锌接箍、双金属复合接箍等，该类技术特点是通过对抽油杆接箍表面的处理，提高表面硬度，降低表面粗糙度，提高接箍的抗磨和减磨效果。该类技术目前主要用在直井、斜井、高含水井中，起到抗磨、延长抽油杆接箍寿命的目的。

### 1.4.3 抽油井管杆摩擦副耐磨损性能试验研究

青岛理工大学的王优强，刘丙生，王民轩等对油田常用的几种管杆材料在不同温度和径向载荷作用下的磨蚀规律进行了试验研究。选用的油管材料有J55油管、N80油管、氮化油管以及涂层油管；接箍材料有20CrMo，FG20(非调质钢)以及球铁QT-60的试验材料。在腐蚀介质为清水，温度为室温，磨蚀试验在自制的磨蚀试验机上进行，油管和接箍试件的相对运动为往复式试验条件下进行试验。J55油管与20CrMo、非调质钢及QT-60接箍配对，在相同条件下，优先选用QT-60接箍与J55油管配合；N80油管与20CrMo、非调质钢及QT-60接箍配对，在工况条件相同和N80油管选定的情况下，优先采用QT-60接箍；氮化油管与20CrMo、非调质钢及QT-60接箍配对，非调质钢接箍与氮化油管配合；涂层油管与20CrMo、非调质钢及QT-60接箍配对，在相同工况条件下，优先选用非调质钢接箍。实验表明，涂层油管的表面具有良好的耐磨性，同时对相配对的另一方还有比较好的减磨作用；喷涂耐磨涂层可以有效降低磨损表面受摩擦损坏的程度，从而提高摩擦副的耐磨性。若采用涂层油管时，建议优先选用非调质钢接箍<sup>[38,39]</sup>。

喷涂耐磨涂层的油管与非调质钢接箍磨损配合时磨损率最低，若对油管内壁进行激光表面强化，提高其耐磨性，与同样利用激光处理的接箍进行磨损试验，获得最佳配合，不失为另一种减少管杆偏磨的措施。

## 1.5 课题研究目标和研究内容

### 1.5.1 研究目标

对抽油管、接箍的钢材材质特点及抽油井的工作过程深入了解，通过一定的分析手段研究抽油井油管与接箍配合使用时的磨损机理；运用激光器对油管内壁进行激光相变硬化处理及对接箍外表面进行激光熔覆处理，进行强化油管与接箍的磨损实验；根据抽油杆接箍与油管配合使用磨损情况，得到最佳匹配。

### 1.5.2 研究内容

- (1) 用 DL-HL-T5000 激光器对 N80 油管内壁进行激光相变硬化处理，接箍表面进行激光熔覆处理；研究激光表面改性后组织的变化；用硬度计测试试样的宏观硬度与显微硬度；
- (2) 通过课题组设计的磨损试验机对油管及抽油杆接箍进行水介质下的磨损试验，通过失重量分析，结合扫描电镜对各组油管与接箍对磨后磨损表面进行磨损形貌的分析，研究管杆偏磨失效机理；研究摩擦磨损配合使用情况，最终得到最佳匹配；
- (3) 进行 NaCl3.5%溶液介质下的磨蚀试验，通过失重量分析，研究摩擦磨损配合使用情况，最终得到最佳匹配。

## 第2章 试验材料、设备及方法

### 2.1 试验材料

进行管杆磨损试验时,选用的油管材料为普通N80油管和激光相变硬化处理的N80油管,油管短节试件规格为:Φ79×300mm,两孔间距260mm,N80油管牌号为35Mn2V,其化学成分如表2-1所示;选用的接箍材料为普通接箍和激光熔覆接箍,试验中使用接箍为普通接箍,其内径D<sub>1</sub>=31.18mm,外径D<sub>2</sub>=45.60mm,接箍基体材料为40Cr,熔覆层材料为Ni25、Ni35、Ni60包30%WC粉末,其化学成分如表2-2所示。

表2-1 N80钢化学成分 (wt%)

Table2-1 Chemical compositions of N80 steel (wt%)

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
含量	0.315	0.318	1.518	0.011	0.006	0.067	0.033
成分	Mo	Cu	Al	Ti	V		
含量	0.024	0.096	0.011	0.004	0.127		

表2-2 粉末化学成分 (wt%)

Table2-2 Chemical compositions of powder (wt%)

粉末名称 元素含量	C	Cr	Fe	Zn	Sn	Co	Cu
Ni25	0.0798	4.16	3.326	0.0008	0.0002	0.012	0.009
Ni35	0.147	8.320	6.642			0.004	0.003
Ni60+30%WC	1	16	3				
粉末名称 元素含量	Al	Si	B	P	S	Ni	
Ni25		1.2412	0.672	0.0006	0.0007	90.498	
Ni35		2.480	1.344			81.059	
Ni60包30%WC	0.010	4.000	3.4			72.59	

## 2.2 试验设备及方法

### 2.2.1 激光设备

油管内表面和接箍外表面激光强化试验采用大陆激光成套设备有限公司生产的5kW 横流 CO<sub>2</sub>激光加工成套设备(如图 2-1 所示),此设备的主要构成:①DL-HL-T5000 型 CO<sub>2</sub>激光器;②DL-LPM-IV 型多功能激光数控加工机;③DL-L64F 型风冷式激光专用冷水机组;④JGX-1 型激光功率显示仪;⑤总操作控制台。

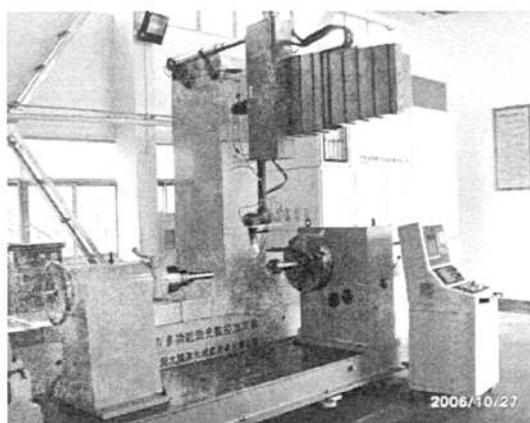


图 2-1 DL-HL-T5000 型激光器  
Fig.2-1 Laser equipment(Model: DL-HL-T5000)

### 2.2.2 金相设备、试样制备及组织观察

在 Nikon EPIPHOT 300 显微镜下进行试样的组织形貌观察,试样制备与组织观察遵从以下步骤:

(1) 切割。用电火花线切割机从普通油管、普通接箍、激光相变硬化油管、熔覆接箍上截取 15mm×15mm 小试块。

(2) 镶样磨平。在金相镶样机上镶成 Φ22 的试样,在砂轮上将镶好的试样磨平。

(3) 试样的磨制和抛光。将试样在水磨砂纸上从粗砂纸(180 目)磨到细砂纸(2000 目),然后再用金刚石抛光剂抛光,并冲洗掉抛光剂,用酒精冲洗,吹干,用镜头纸包好放入试样袋内待腐蚀观察。

(4) 样品腐蚀。对于相变硬化的油管试样,用 4%硝酸酒精腐蚀,在光学金相显微镜下观察相变硬化区、热影响区和基体的显微组织,并拍照观察;对于激光熔覆接箍试样,先用 4%硝酸酒精腐蚀,观察其热影响区和基体显微组织,并拍下金相照片。然后用王水腐蚀熔覆层,将王水(硝酸:盐酸=1:3)滴在试样表面腐蚀,直到样品表面灰白,

立即用清水洗净，再用无水乙醇冲洗试样表面，以去除样品表面的水分。最后，用电吹风将试样吹干，在金相显微镜下观察熔覆层的显微组织，并拍照观察。

### 2.2.3 硬度测试

对线切割截取的普通油管、接箍，激光强化处理后的油管和接箍进行宏观硬度测试。测量试样的宏观硬度时，测量设备为 HR-150A 型洛氏硬度计，加载载荷为 150kg，加载时间为 15s。在一条线上选取五个点，分别测量其硬度值并记录；上述制备的金相试样在拍过金相照片之后，对激光强化层由表及里测试其显微硬度，测量设备为 MH-3 型显微硬度计，载荷为 300g，加载时间为 10s。

### 2.2.4 摩擦磨损试验

油管和接箍磨损试验采用课题组自行设计制造的管杆磨损试验机（如图 2-2 所示），该磨损试验机的主体部分就是电动机、减速器和曲柄滑块机构，工作原理如图 2-3 所示。

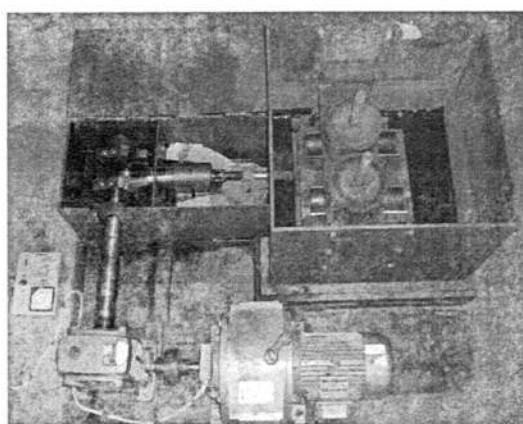


图 2-2 磨损试验机  
Fig.2-2 Wear Testing Machine

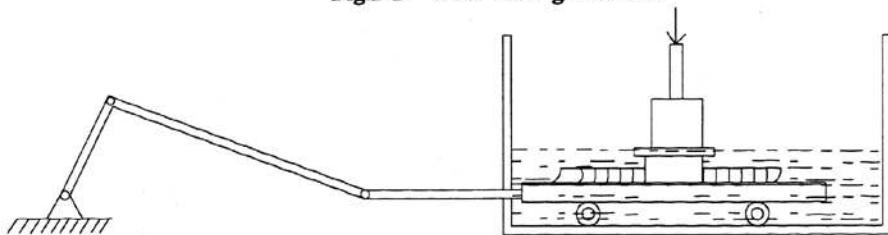


图 2-3 管杆磨损试验机示意图  
Fig.2-3 Diagram of tube and rod wear tester

利用自制的管杆磨损试验机将激光处理的 N80 油管与接箍进行对磨试验，摩擦副组合情况如图 2-4 所示。

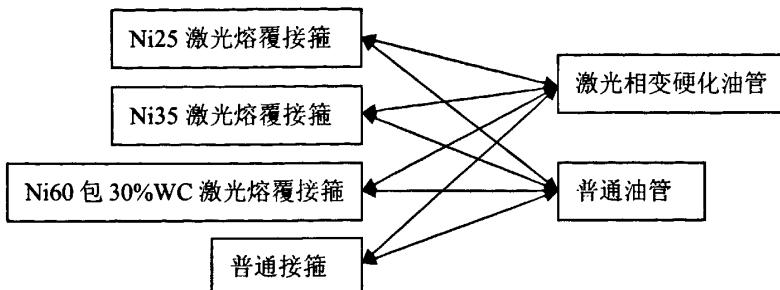


图 2-4 摩擦副组合方式

Fig.2-4 Friction combination

磨损试验条件：磨损试验的介质为水（磨蚀试验的介质为 3.5%NaCl 溶液），室温下在磨损试验机上进行，油管和接箍进行相对往复式运动，试验机的往复频率为 33 次/分，每次冲程为 100mm，试验机转速为 1000r/min，所加的侧向载荷为 100kg，试验周期最少为 120h（5 天）。在进行油管接箍对磨试验之前，用丙酮擦拭油管、接箍的表面以除去两者表面的油和铁锈，先用无水乙醇擦拭，再用吹风机吹干，最后称重并记录。在试验周期内每 24 小时称重一次，测量失重量，试验结束后用数码相机对试件磨损后的表面形貌拍照记录。

## 2.2.5 磨损形貌观察

分别在对磨后的油管和接箍的磨损处用线切割机截取正方形试块（对角线长小于 25mm），用丙酮擦洗去除油污后放到超声波清洗仪里清洗 20min，再用无水乙醇擦拭，然后用吹风机吹干，最后置于 JSM-6380LA 扫描电镜下观察表面磨损形貌。

## 第3章 油管与接箍激光改性处理及其组织性能

为提高机采井中管杆的防偏磨能力，本试验采用激光表面加工技术对油管内表面、接箍表面分别进行强化处理，提高两者磨损配合能力，以期提高二者配合使用寿命。本章主要介绍了油管与接箍的激光改性方法，并分析了油管、接箍经过激光处理后其组织发生的改变及其对材料的性能的影响。

### 3.1 油管内壁激光相变硬化处理

#### 3.1.1 油管内壁吸光涂料喷涂系统及激光导光系统工作原理

(1) 油管内壁吸光涂料喷涂系统<sup>[32]</sup>。图 3-1 为内壁喷涂系统喷涂示意图，内喷涂设备是通过导杆端部的旋杯高速旋转使涂料雾化，并在后部旋转电机的拖动下向后运动，进而对内壁进行喷涂。本试验选用的吸光涂料为： $\text{Y}_2\text{O}_3$ 7.5%，膨润土 5%， $\text{SiO}_2$ 87.5%，球磨 3h。当电机转速为 40r/min，导杆移动速度为 50m/min 时，喷涂层厚度适中，喷涂质量较好，在该参数下对油管内表面进行喷涂，喷涂效果良好。

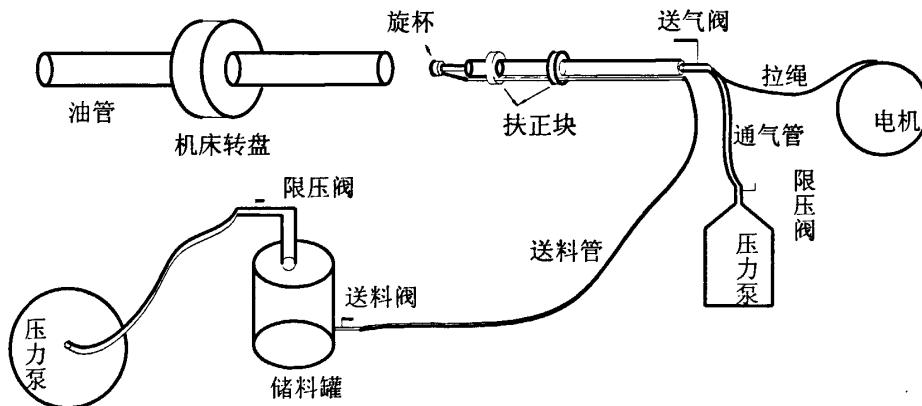


图 3-1 内壁喷涂系统示意图

Fig.3-1 Diagram of the inwall coating system

(2) 油管激光导光系统工作原理<sup>[32]</sup>。激光导光系统可以实现对管道内表面的加工，图 3-2 为其工作示意图。它的工作原理是：通过一导光杆让激光可以在油管内部聚焦，从而实现对油管内部的加工。从图 3-2 中可以看出，在导光系统与激光臂结合的部位，需要一个透镜来改变激光束的直径，以适应导光孔的要求，但由于受到改变激光束直径的透镜技术的限制，其允许通过的最大激光功率亦受到限制，故本导光系统透镜允许通

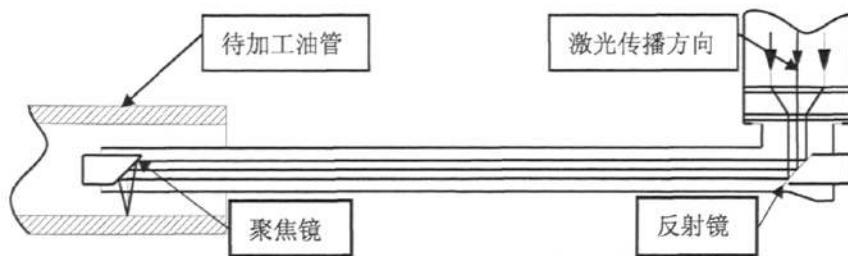


图 3-2 激光导光系统示意图

Fig.3-2 Diagram of laser guiding system

过的大功率为 2000W。同时考虑到激光器自身的波动，为使此导光系统安全工作，本试验中对油管内壁进行相变硬化处理时，设置导光系统的工作功率为 1500W。

### 3.1.2 油管内表面强化处理工艺

图 3-3 为油管内壁加工示意图以及加工好的相变硬化油管图，油管内壁激光表面强化是通过 A 轴的旋转同时配合导光系统在 X 轴方向的进给来实现的。本试验中激光相变硬化处理采用 F 3.5mm 圆形光斑，其数控机床的主程序为：X-1990 A44507 F64.6。其中，X-1990 表示导光系统沿 X 轴负方向进给 1990mm，A44507 表示在导光系统行走了 1990mm 的同时，A 轴旋转了 44507°，F64.6 表示导光系统在 X 轴方向行进的速度为 64.6mm/min。在确定以上几个参数后，就可以计算出激光相变硬化处理的扫描速度为：2671mm/min，螺距为 6mm。



图 3-3 油管内壁激光加工示意图及相变硬化油管

Fig.3-3 Diagram of tube inwall fabricating by laser equipment and phase-change tubing

### 3.2 接箍外表面激光熔覆处理

用 DL-HL-T5000 型 CO<sub>2</sub> 激光器对接箍外表面进行激光熔覆处理，采用矩形光斑，

光斑尺寸为  $10\text{mm} \times 1\text{mm}$ , 离焦量为  $83\text{mm}$ , 不采用气体保护措施, 激光熔覆功率  $P$  在  $3200\sim 3600\text{KW}$  之间, 激光熔覆 Ni25、Ni35、Ni60 包  $30\% \text{WC}$  粉末时扫描速度  $v$  分别为  $250$ 、 $300$ 、 $150\text{mm/min}$ , 其中 Ni60 包  $30\% \text{WC}$  粉末熔覆时接箍还需要预热  $350^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 。为了解决熔覆过程中末端过热的问题, 本试验采取的熔覆方式是: 在一端走两遍封闭圆, 关激光, 光头移到另一端, 再走两圈封闭圆, 然后再走搭接程序, 到中间以后, 扫描速度逐渐加快, 减少接箍表面吸收的热量。这种办法既可以解决末端过热的问题, 还可以解决倒角和外圆相交的棱角熔覆层太薄的问题。激光熔覆后接箍如图 3-4 所示, 为了便于接下来的管杆磨损试验, 熔覆接箍还需要进一步精磨, 精磨后接箍外径为  $D_2=46.00\sim 46.5\text{mm}$ 。

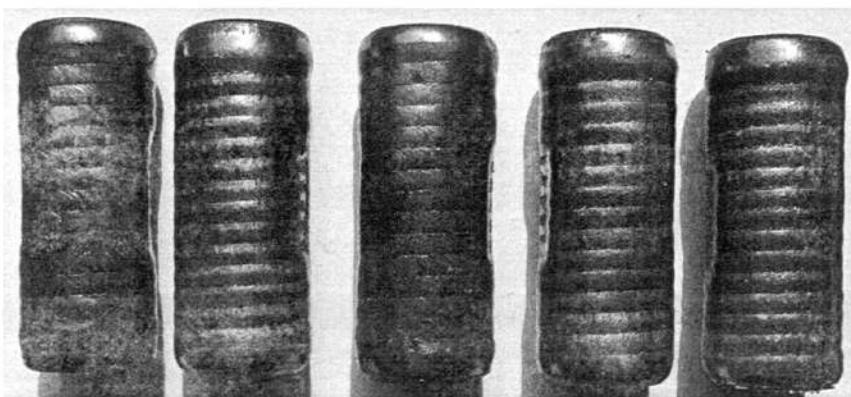


图 3-4 熔覆接箍  
Fig.3-4 Cladding coupling

### 3.3 激光相变硬化油管和激光熔覆接箍组织性能

#### 3.3.1 油管金相显微组织

##### (1) 油管基体显微组织

石油工业中使用的非调质 N80 油井管钢的组织主要为铁素体-珠光体型和铁素体-珠光体-贝氏体型<sup>[40]</sup>。对油管材料取样, 从径向、轴向观察油管的基体组织。普通油管金相显微组织, 如图 3-5、3-6 所示。

图 3-5 为 500 倍油管三维组织图, 可以看出, 在径向方向观察, 组织比较均匀, 而从切向及轴向方向观察, 组织呈现明显的带状特征。图 3-6 中低倍显微镜下, 可以很明显的看出 N80 油管在这两个方向上均呈现非常明显的带状特征; 高倍显微镜下, 可以看出, 其组织主要由黑色片状珠光体与白色铁素体组成, 且珠光体带和铁素体带分布比较均匀。这种组织特征是由油管的轧制工艺造成的, 在油管的加工成型过程中, 接近内壁

的地方变形量很大，因此层带状组织较明显，而接近外壁的地方，变形量较小，因此层带状组织不明显，在外壁附近，甚至观察不到层带状组织。带状组织的存在会使金属的力学性能呈各向异性，沿带状组织的垂直方向上油管与接箍对磨时，承受径向冲击力，但由于带状组织的存在，使油管在径向上的冲击韧性比较差；轴向承受较硬的接箍的沿着带状组织的方向的磨粒切削力，因此，带状组织的存在既有利也有弊。然而，就腐蚀

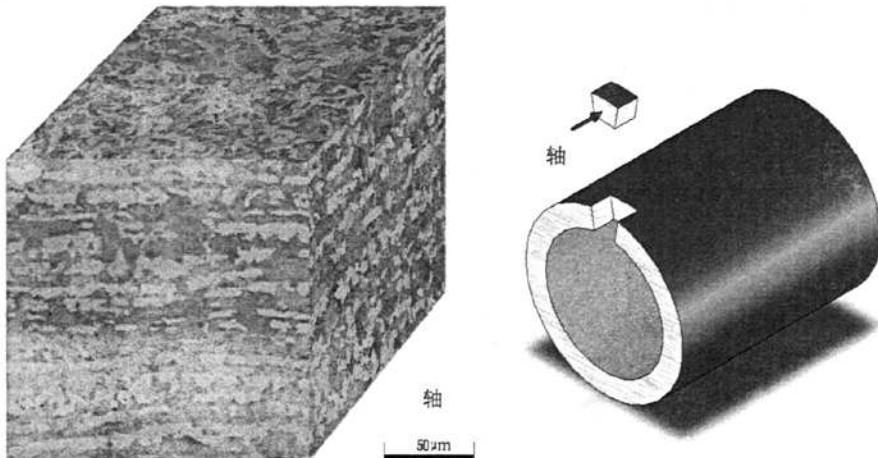


图 3-5 油管材料的三维基体组织

Fig.3-5 Triaxial microstructure of tube material

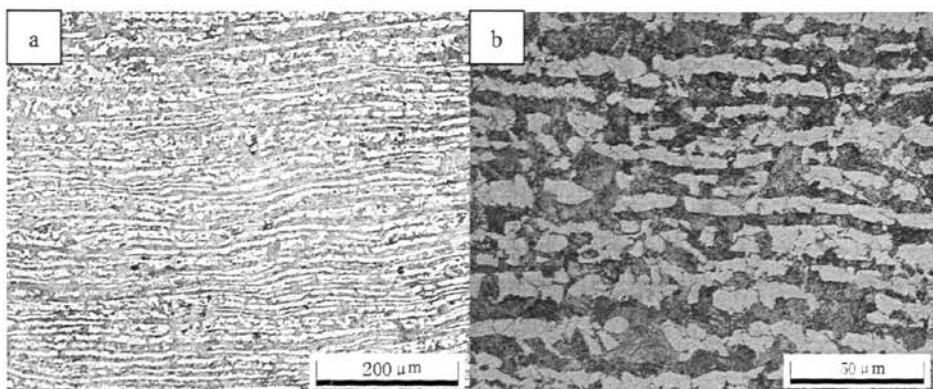


图 3-6 普通油管的金相显微组织

a. 低倍 b. 高倍

Fig.3-6 The optical microstructure of common tube

a. Low magnification b. High magnification

方面来说，在腐蚀介质存在的环境中，这种带状组织的存在又带来了巨大的危害。珠光体和铁素体相之间由于存在电位差而构成微电池，会发生电化学腐蚀。且由于不同组织带之间容易产生应力集中，在周期性工作应力的作用下，腐蚀微裂纹会沿着相带加速扩展，在磨损和腐蚀的交互作用下，使整个相带易呈片状剥落<sup>[41]</sup>。存在 CO<sub>2</sub> 腐蚀的情况下，

带状组织明显的油管更容易发生点蚀，使腐蚀坑不断沿径向发展，易使油管腐蚀穿孔<sup>[42-47]</sup>，由此可见，带状组织的存在，降低了油管的耐腐蚀抗疲劳磨损性能。

## （2）激光相变硬化层组织分析

油管经激光相变硬化处理后，其显微组织如图 3-7 所示。激光辐照过程中，激光作用区表面至内部各层的温度均有所不同，因此，激光淬火后材料表层存在三个区。

图 3-7 (a) 为典型的三区共存形貌：相变硬化区 (I)、热影响区或 HAZ 区 (II)、基体 (III)。

图 3-7 (b) 为相变硬化区和 HAZ 区，热影响区为不完全相变区，靠近相变区部分为马氏体和少量残余奥氏体，靠近基体部分为铁素体和珠光体。

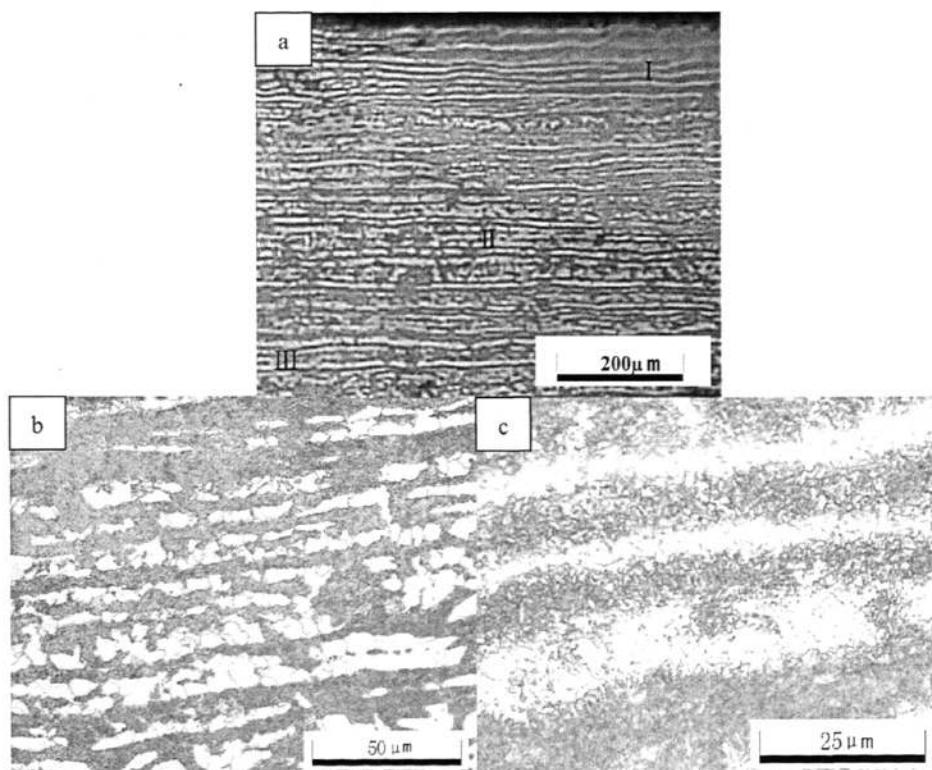


图 3-7 激光相变硬化油管金相显微组织图

(a) 截面形貌 (b) 相变硬化区+HAZ (c) 相变硬化区

**Fig.3-7 Metallographic organization chart of laser transformation hardening tube**  
**(a) Cross-section morphology (b) Hardening zone + HAZ (c) Hardening zone**

图 3-7 (c) 所示为表层的相变硬化区的显微组织：黑色为淬火马氏体和少量残余奥氏体，白色为铁素体，且仍呈带状分布。

因为该 N80 油管 35Mn2V，含碳量较高，所以激光相变硬化后形成的高碳马氏体比

常规淬火马氏体要细小，进而具有更优异的性能。激光快速加热使试样表面至内部的温度梯度相对较大，且加热温度越高，晶粒长大速度也越快，在随后的快速自冷却过程中最终形成的奥氏体晶粒尺寸也就越大。因此，在上部的相变硬化区，当加热温度在  $Ac_1 \sim Ac_3$  之间时，由于激光快速加热时，珠光体带发生了奥氏体转变，且快速冷却时，奥氏体晶粒来不及长大，故冷却后得到细针状的马氏体组织，但是还有少量残余奥氏体未来得及发生马氏体转变<sup>[40]</sup>，所以仍呈带状分布；因为带状的铁素体在激光快速加热过程中，晶粒一般都不能全部完成碳扩散转变为奥氏体，所以在快速冷却时，部分转变为马氏体组织，其余依旧为呈带状分布的铁素体组织。

激光相变硬化过程是在高度受扼的形态下进行的，所获得的马氏体实质上是一种形变马氏体，比常规淬火所得的马氏体具有更高的缺陷密度<sup>[48]</sup>，因此油管内表面经激光相变硬化处理后，硬化区细小的马氏体组织、高度弥散分布的碳化物和大量存在的位错，使此区域硬度得到大幅度提高，并且马氏体的耐磨性，特别是耐磨粒磨损的能力比其它很多组织都要好；并且存在的少量残余奥氏体在磨粒磨损过程中，对提高钢的耐磨性也是有利的，因为在磨损过程中，残余奥氏体向马氏体转变消耗外界所做的功，且形成高应变马氏体，所以提高了抗磨损抗力。

### 3.3.2 接箍金相显微组织

#### (1) 普通接箍显微组织分析

本文中所用普通接箍是油田常用的 40Cr 接箍，其显微组织如图 3-8 所示。

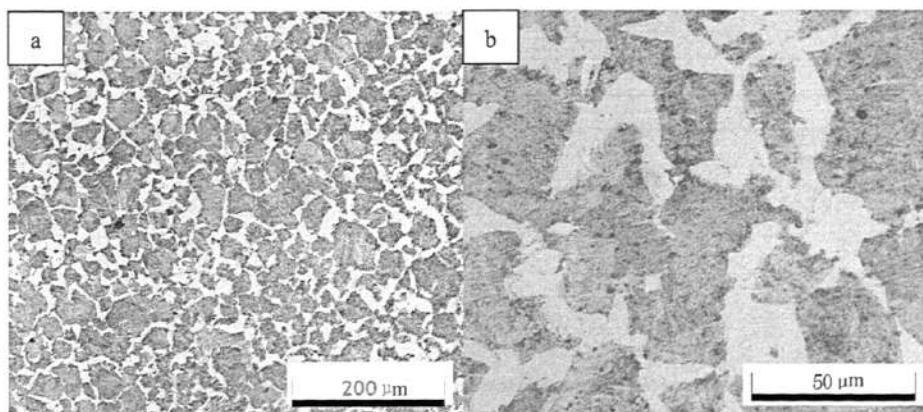


图 3-8 普通接箍金相显微组织图

Fig.3-8 Organization chart of common coupling metallographic

图 3-8 (a) 所示为低倍显微镜下普通接箍的显微组织，由黑色片状珠光体和白色网状分布的铁素体组成。40Cr 钢由于铬的加入，故使钢的  $Ac_1$  升高， $Ac_3$  点降低（40 钢

$Ac_1$  为 724°C、 $Ac_3$  为 790°C，40Cr 钢  $Ac_1$  为 743°C、 $Ac_3$  为 782°C），同时铬还能使相图中 E、S 点的含碳量降低，进而使 40Cr 钢在室温时的珠光体含量相对于 40 钢来说较多，因为珠光体的耐磨性比铁素体的耐磨性要高，所以其强度和硬度相对较高。由图 3-8 (b) 高倍下观察可以发现，珠光体内分布着碳化物颗粒。40Cr 是中碳低合金钢，含碳量高，耐磨性较高，由于钢中的 Cr、Si、Mn 等合金元素固溶于基体，形成固溶强化，因而提高了基体的强度、硬度、耐磨性和淬透性。

## (2) 激光熔覆层组织

激光熔覆区可以分为三个区：熔覆层、热影响区、基体。

热影响区：受表面激光辐照时的热能影响很大。不管激光功率的大小、扫描速度的快慢，只要基材表面微熔，传到此处的热能密度就较大，其热能足以使该区域的温度上升到奥氏体化温度。热影响区的组织为板条状马氏体。

热影响区过渡区域存在一条宽度较窄且在显微镜下较亮呈白色的亮带被称为白亮带<sup>[49]</sup>，这是由于在熔覆层底部温度梯度很高而生长速度很低（接近于零）使得凝固界面以平面状生长的结果；同时也表明熔覆层与基体呈完全冶金结合。

熔覆层：激光熔覆时，合金熔池的凝固过程是一个动态凝固过程，即随着激光束的连续扫描，在熔池前半部分，合金粉末不断进入熔池内形成熔体而熔化；熔池的后半部分，液态金属不断脱离熔池形成固体而凝固。熔覆层上部是无明显方向性的细小枝晶和等轴晶。主要原因是：熔覆过程中，基体具有快速传热的急冷作用，当激光束离开熔池后，底层熔化合金即发生快速凝固生成枝晶。在熔覆层上部，虽然固液界面前沿温度梯度减小，但由于保护气体的流动引起的对流散热作用显著，这样，熔覆层在对流散热及熔覆层已凝固合金和基材热传导的双重作用下，结晶为无明显方向的细小枝晶<sup>[50]</sup>。

### ①Ni60 包 30%WC 粉末激光熔覆层

由图 3-9 (a) 可以看出熔覆层可大致分为与基体交界处的平面晶或胞状晶，然后是近似垂直扫描方向的树枝晶组织，熔覆层组织也是以树枝晶为主要组成部分，组织主要为含 W、Fe、Cr 的碳化物以及  $\gamma$  (Fe-Ni)。热影响区过渡区域存在一条宽度较窄且在显微镜下较亮呈白色的白亮带，如图 3-9 (b) 所示，且热影响区的组织为板条状马氏体。图 3-9 (c) 中的 WC 颗粒由于激光的能量较高，大部分 WC 在熔覆过程中一部分被烧损和稀释，另一部分与 Cr 等元素形成复合相组织存在于枝晶间，还有一部分在凝固过程中，发生  $L \rightarrow M + \gamma$  的共晶反应，形成低熔点的合金化合物，使 WC 完全溶解，即原 WC 是以复合相或共晶形式分布于基体枝晶间或  $\gamma$  共晶体中<sup>[51]</sup>。枝晶间的小颗粒为合金碳化

物，即在 WC 颗粒中溶入了 Fe、Cr、Ni 等元素，而非单纯的 WC 颗粒。由于 WC 的加入，实际上起到非均匀形核核心的作用，而且颗粒状未熔 WC 的存在，也阻碍了枝晶进一步的长大，同时也改变枝晶生长方向。WC 可以细化枝晶，在一般情况下，晶粒越小，则金属的强度，塑性和韧性也越好，达到细晶强化的效果，同时也使枝晶形状变得复杂，从而提高了熔覆层的机械性能<sup>[51]</sup>。

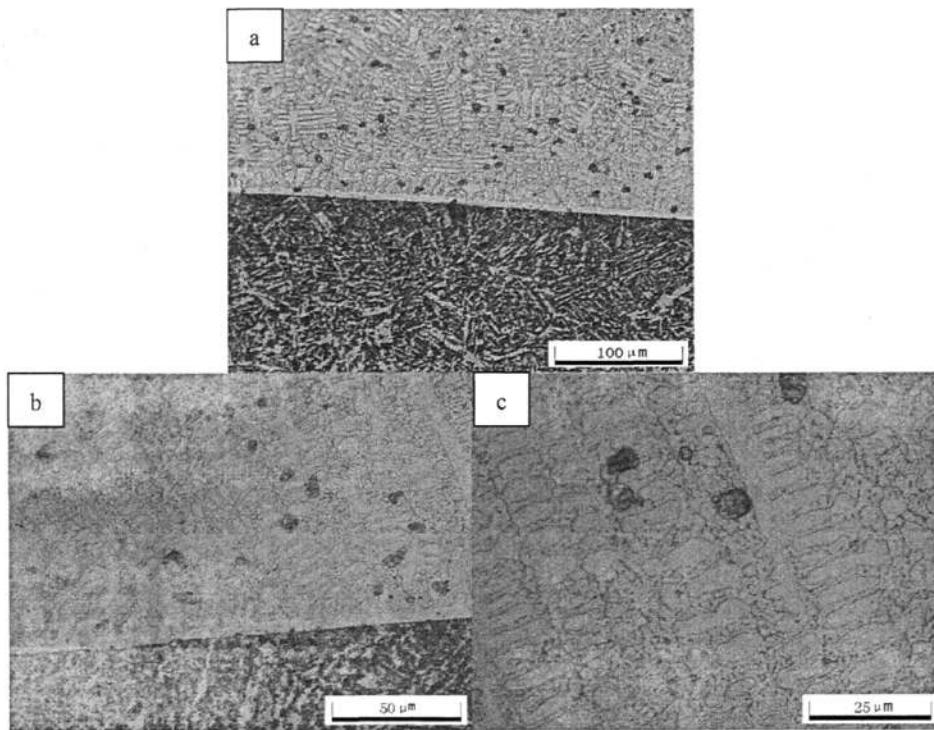


图 3-9 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍金相组织图

(a) 低倍下熔覆层 (b) 高倍下熔覆层 (c) 熔覆层中下部

Fig.3-9 Microstructure Chart of Ni60 package 30% WC clad hoop

(a) Low magnification cladding layer (b) High-power cladding layer (c) Lower cladding layer

## ②Ni35 粉末激光熔覆层

激光熔覆粉末为镍基合金，为自熔性合金，具有耐磨减摩的作用。它的组织主要由  $\gamma$ -Ni 基固溶体及其上分布着的网状或者针状的硼化物、碳化物和硅化物组成<sup>[52]</sup>，如图3-10 (a) 所示，1000倍下，可以清晰看到熔覆层中的  $\gamma$  相及其上分布的碳化物。由图3-10 (a) 所示，此熔覆层组织也是以树枝晶为主要组成部分。热影响区过渡区域，在 Ni 基合金熔覆层与基体界面处形成约为  $1\mu\text{m}$  厚的白亮带，是以平面晶的生长形态沿热流方向生长出来的，白亮带的形成使得基体和涂层之间形成良好的冶金结合<sup>[53]</sup>，如图3-10 (c)。由图3-10 (d) 可以看出，热影响区的组织为细针状马氏体，因为在涂层中由于熔池中对流的存在，熔池的搅拌作用使得涂层中的元素得到了扩散和均匀化；在激光熔覆过程中，

基底靠近熔池的区域虽然未熔化，但是金相组织发生了变化，形成了一定范围的热影响区；由于激光熔池的快速冷却特性，使得基体热影响区呈淬火组织特征，即细小的针状马氏体组织。因为Ni基合金粉末中含有大量的合金元素，激光熔覆属于快速凝固过程，Ni固溶体中固溶大量Cr, Si, B等元素，固溶强化显著，凝固结晶速度快，组织得到了细化，高的硬度也为熔覆层具有较好的耐磨性提供了保证<sup>[53]</sup>。

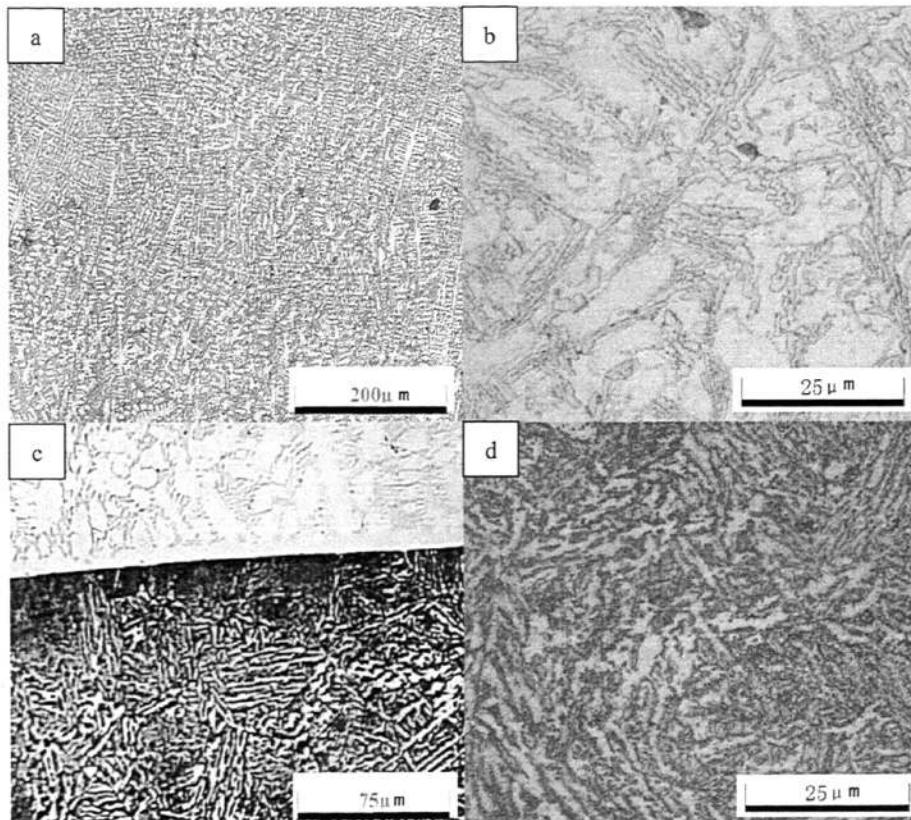


图 3-10 Ni35 熔覆接箍金相显微组织图

(a) 低倍下熔覆层 (b) 高倍下熔覆层 (c) 熔覆层和 HAZ (d) HAZ

Fig.3-10 Organization chart of Ni35 cladding coupling Metallographic

(a) Low magnification cladding layer (b) High-power cladding layer

(c) Cladding layer and the HAZ (d) HAZ

③Ni25 粉末激光熔覆层

由图 3-11 (a) 可以看出，熔覆层分为三个区：熔覆层 (I)、热影响区 (II)、基体 (III)，该熔覆层组织以树枝晶为主要组成部分。当激光离开时，在熔池与基体界面，由于熔覆层通过基体散热，热流方向垂直于界面，界面前沿存在正的温度梯度，树枝晶沿温度梯度最大的方向择优生长，形成和热流方向相反的快速凝固外延生长的枝晶组织 (如图 3-11 (c) 所示)。随着固/液界面的推进和传热传质，熔覆层温度梯度 G 逐渐减小，通过基体的散热已经不占优势，枝晶垂直外延生长的趋势被打断。熔覆层主要通过周围

环境即表层的大气散热。激光熔覆成型中，熔池界面前沿的凝固速率  $V=V_b \cos\theta$  ( $V_b$  为扫描速度,  $\theta$  为固/液界面法线方向与激光束扫描方向的夹角), 在熔池的底部, 因为  $V$  很小, 所以生成了无偏析的平面晶层, 越接近熔池顶部,  $\cos\theta$  值就越大, 沿水平方向的凝固速率也越大<sup>[54]</sup>。这时, 由于大气的冷却作用, 沿扫描速度方向的温度梯度逐渐增大, 枝晶生长的方向发生变化, 与最大温度梯度方向最为接近的方向成为生长的择优取向。沿扫描速度方向水平生长柱状树枝晶组织生长的优势大于垂直向上枝晶的生长, 该方向的枝晶快速凝固竞争生长。激光熔覆工艺参数合适时, 前层的转向树枝晶区被完全重熔, 而外延生长的趋势还可以延续, 层与层之间为外延生长的连续的细长树枝晶(如图 3-11 (b) 所示), 而在熔覆层表面, 凝固速度最大, 且可通过表面散热而凝固, 而形成极细的枝晶区或等轴晶组织<sup>[54]</sup>, 如图 3-11 (d) 所示。

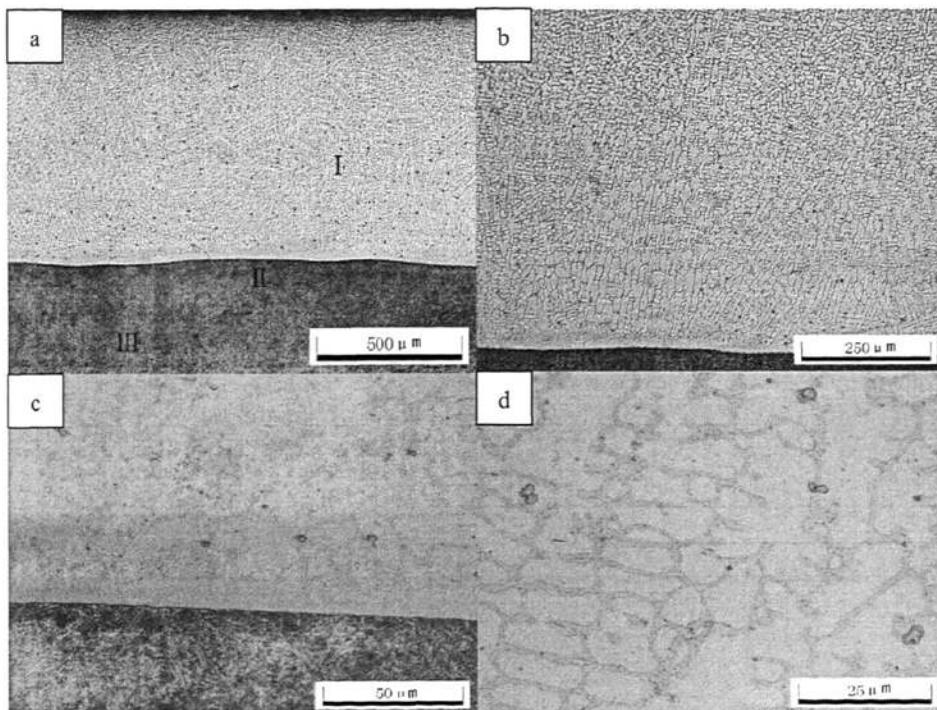


图 3-11 Ni25 熔覆层组织

(a) 熔覆层全貌 (b) 熔覆层底部 (c) 熔覆层与基体结合处 (d) 熔覆层顶部

Fig.3-11 Ni25 cladding layer

(a) Cladding layer (b) Bottom of cladding layer

(c) Junction between matrix and cladding layer (d) Top of cladding layer

### 3.3.3 硬度测试

#### (1) 宏观硬度测试

采用 HR-150A 型洛氏硬度计对普通油管、激光强化处理后的油管、普通接箍、Ni25 熔覆接箍、Ni35 熔覆接箍和 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍进行宏观硬度测试，结果如表 3-1 所示。

由表 3-1 可以看出：普通油管的硬度是 HRC24，普通接箍的硬度是 HRC18.8；激光相变硬化处理的油管内壁表面的硬度是普通油管的 1.6 倍；激光熔覆 Ni25 接箍表面硬度比普通接箍硬接近普通油管的硬度；激光熔覆 Ni35 合金粉末后的接箍表面的硬度是普通接箍的 1.95 倍，跟激光相变硬化油管硬度相当；激光熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍表面硬度是普通接箍的 3 倍，激光相变硬化油管硬度的 1.5 倍。即采用激光熔覆 Ni 基合金获得高、中、低三种硬度的接箍以便找出与之配对的油管组合。

表 3-1 油管和接箍的宏观硬度表  
Table 3-1 Macro-hardness of the table of tubing and coupling

硬度 (HRC)	1	2	3	4	5	平均值
普通油管	24.0	22.8	24.0	23.5	26.0	24.0
激光相变硬化油管	36.5	36.0	40.0	39.3	39.0	38.2
普通接箍	16.6	17.6	19.5	20.5	19.6	18.8
Ni25 熔覆接箍	20.5	19.2	24.2	24.8	24.0	22.5
Ni35 熔覆接箍	38.4	36.0	34.0	37.8	37.0	36.6
Ni60 包 30%WC 熔覆接箍	57.4	55.5	54.5	58.5	56.5	56.5

## (2) 显微硬度

### ① 油管显微硬度

图 3-12 所示曲线为距相变硬化油管内表面 0.13mm 深处，激光强化区横向每隔 0.2mm 取一个硬度值的横向硬度分布曲线。从图中可看出，相变硬化层的硬度最高为 550HV<sub>0.3</sub>，且硬化层中部硬度最高，相当于 HRC51，是普通油管硬度的两倍多；同时该图也反映出，横向不同区域硬度不同，相变硬化区的硬度明显高于 HAZ 区，高于基体。

图 3-13 是从距油管表面 0.06mm 处开始每隔 0.1mm 打一个硬度的纵向深度硬度分布曲线。由图 3-13 显微硬度曲线可以看出，相变硬化层的最高硬度出现在相变层的中部位置，而最表层略低于中部，其原因主要有两个方面：

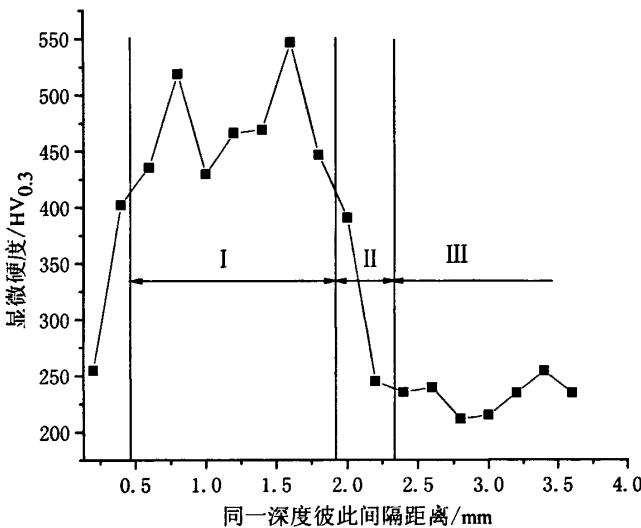


图 3-12 同一深度上油管相变硬化层硬度分布

I—相变硬化区 II—HAZ 区 III—基体

Fig.3-12 Distribution of phase-change the same depth of hardened layer on the tubing hardness

I -Transformation hardening zone II -HAZ III - Matrix

I ) 表层金属暴露于空气中，在相变硬化过程中发生脱碳和烧损现象，表层含碳量低，使得固溶强化作用减弱<sup>[55-56]</sup>。

II ) 由于冷却速度的影响，中部的相变区晶粒细小，形成了大量的细针马氏体，固溶强化作用明显，因此硬度最高。而表层金属由于在相变硬化过程中，冷却速度较低，使得组织较相变区粗大，且固溶强化作用低于相变区。由显微硬度值可以看出，强化层

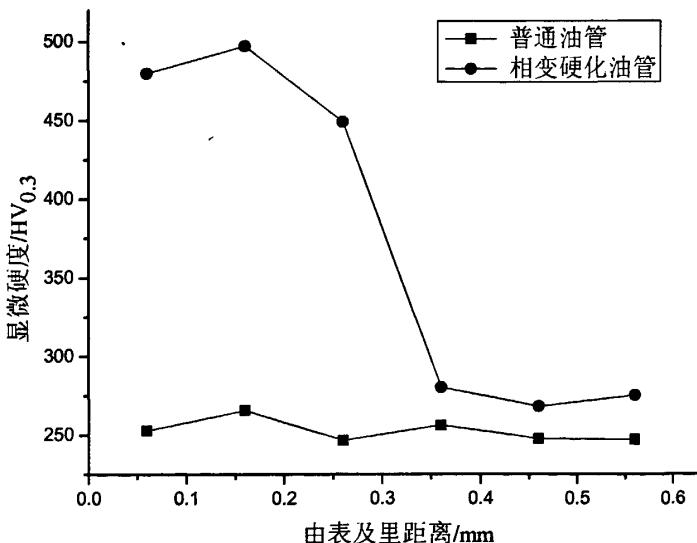


图 3-13 油管纵向深度硬度分布

Fig.3-13 Distribution of the vertical depth of tubing hardness

的显微硬度平均在  $420HV_{0.3}$  以上，最高值可达  $500HV_{0.3}$  左右；基体平均硬度在  $250 HV_{0.3}$  左右，也可看出强化层硬度相对基体硬度提高了一倍。

## ②接箍显微硬度

图 3-14 是从距接箍表面  $0.06mm$  处开始纵向每隔  $0.1mm$  取一个硬度值的纵向深度硬度分布曲线图。从此图中可以看出，普通接箍硬度最低，显微硬度在  $210HV_{0.3}$  左右；其次是 Ni25 接箍硬度较低，显微硬度在  $260HV_{0.3}$  左右；然后是 Ni35 接箍硬度较高，精磨后的熔覆 Ni35 接箍熔覆层硬度距表层  $0.06mm$  处的硬度为  $330HV_{0.3}$  左右，表层下  $0.46mm$  处硬度值最高，在  $460HV_{0.3}$  左右；Ni60 包  $30\%WC$  接箍硬度最高，这是因为 WC 是硬质颗粒，本身硬度高  $HV_{0.2} 1800$ ，虽然激光熔覆条件下已经熔化，激光熔覆过程中部分溶解的 WC 又以第二相的形式在覆层内均匀弥散地析出，同样起到强化覆层的作用，另外由于 WC 加入而引起的枝晶细化，也使晶界和相界得到强化，因此熔覆层的硬度大大提高。进一步证实获得了实验所需的四种硬度的接箍以便跟相应油管构成摩擦副，探究它们的磨损情况。

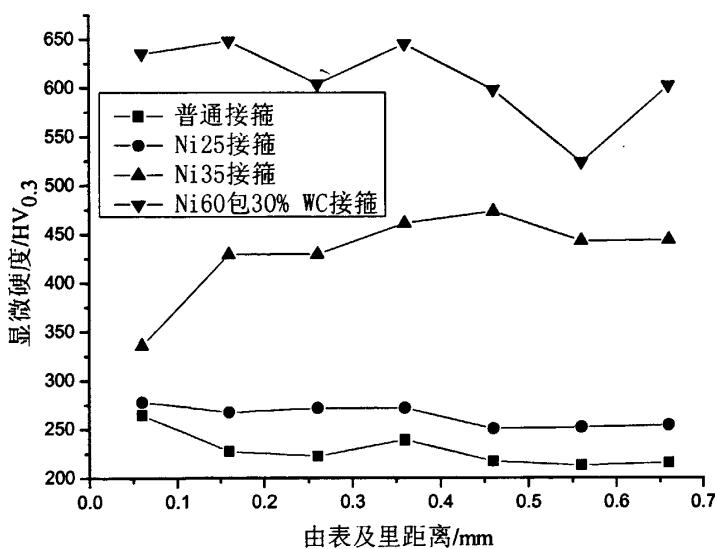


图 3-14 接箍纵向深度硬度分布图

Fig.3-14 Distribution of the vertical depth of coupling hardness

在实际工况条件下，管杆发生偏磨的摩擦行程较长，接箍的摩擦接触面积比油管的小得多，其磨损程度要高于油管的，所以需要接箍的硬度要稍高些，耐磨性要较好些，以提高管杆整体寿命。

### 3.4 本章小结

- 1) N80 油管激光相变硬化处理后, 由表及里可以分三个区: 相变硬化区、热影响区和基体。
- 2) 相变硬化区的组织为黑色细针状淬火马氏体和少量残余奥氏体, 白色铁素体, 仍呈带状分布; 热影响区的组织靠近相变区部分为马氏体和少量残余奥氏体, 靠近基体部分为铁素体和珠光体。
- 3) 接箍激光熔覆镍基合金粉末后, 由表及里分为熔覆层、HAZ 区和基体; 熔覆层的组织主要由  $\gamma$ -Ni 基固溶体及其上分布着的网状或者针状的硼化物、碳化物和硅化物组成, 由表及里为等轴晶、树枝晶、胞状晶和平面晶(白亮带); 热影响区过渡区域存在一条宽度较窄且在显微镜下较亮呈白色的白亮带; 基体组织为黑色片状珠光体和白色网状分布的铁素体。
- 4) 普通油管的硬度是 HRC24, 普通接箍的硬度是 HRC18.8; 激光相变硬化处理的油管内壁表面的硬度是普通油管的 1.6 倍; 激光熔覆 Ni25 接箍表面硬度比普通接箍硬接近普通油管的硬度; 激光熔覆 Ni35 合金粉末后的接箍表面的硬度是普通接箍的 1.95 倍, 跟激光相变硬化油管硬度相当; 激光熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍表面硬度是普通接箍的 3 倍, 激光相变硬化油管硬度的 1.5 倍。激光熔覆 Ni35 接箍距表层 0.46mm 处硬度最高, 在 460HV<sub>0.3</sub> 左右; 油管相变硬化层的最高硬度在 550HV<sub>0.3</sub> 左右, 随着距离表面的深度变大, 硬度随之降低。

## 第4章 抽油井油管与接箍管杆摩擦副磨损性能

### 4.1 引言

试验选择了常用油管和接箍材料以及经激光表面改性后的油管和接箍作为抽油井管杆摩擦副，在水介质中进行耐磨损性能试验研究，期望通过试验选出较为合理的摩擦副材料，以提高机采井中管杆的防偏磨能力，为现场实际应用提供一些参考。本章主要通过计算不同油管和接箍组合时的磨损率，探究它们的磨损情况。

### 4.2 磨损率计算

(1) 摩擦行程 L:

$$L=2n \cdot s \cdot t$$

式中 n-试验机的冲次，次/分； s-试验机的冲程，mm； t-试验时间，min。

(2) 磨损量  $\Delta W$ :

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

式中  $W_1$  为磨损前试件质量，g；  $W_2$  为磨损后的试件质量，g。

(3) 磨损率  $K_w$  ( $g \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$ ):

$$K_w = 10^3 \times \Delta W / L$$

### 4.3 磨损试验结果与讨论

摩擦磨损的实验结果如表 4-1 所示，为了比较直观的分析，把失重磨损率制成直方图的形式，如图 4-1 所示，图 4-1 中代码对应表 4-1 中相应试验号。

由表 4-1 中数据和图 4-1 可以直观的看出：

- (1) 普通油管与熔覆接箍对磨时的磨损失重较之与普通接箍对磨时要高得多；
- (2) 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍对磨，相变硬化油管的磨损率要比普通油管的低，约为普通油管的 1/3~1/2；
- (3) 无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨，激光熔覆 Ni35、Ni60 包 30%WC 合金粉末后的接箍的磨损率明显要比普通接箍的要低得多，约为普通接箍的 1/10；
- (4) 相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍摩擦副为最优配合，与其它摩擦副相比

其磨损失重最低。

表 4-1 摩擦副磨损失重结果  
Table 4-1 Friction wear weight loss results

试验号	摩擦副	质量失重磨损率/( $\times 10^5 \text{ g} * \text{min}^{-1} * \text{m}^{-1}$ )	
		油管	接箍
1	相变硬化油管与普通接箍 A	6.944	7.996
2	普通油管与普通接箍 B	8.838	5.471
3	相变硬化油管与 Ni25 接箍 A	9.680	35.774
4	普通油管与 Ni25 接箍 B	31.776	7.155
5	相变硬化油管与 Ni35 接箍 A	10.522	0.631
6	普通油管与 Ni35 接箍 B	19.360	0.631
7	相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍 A	5.471	0.842
8	普通油管与 Ni60 包 30%WC 接箍 B	17.256	1.263

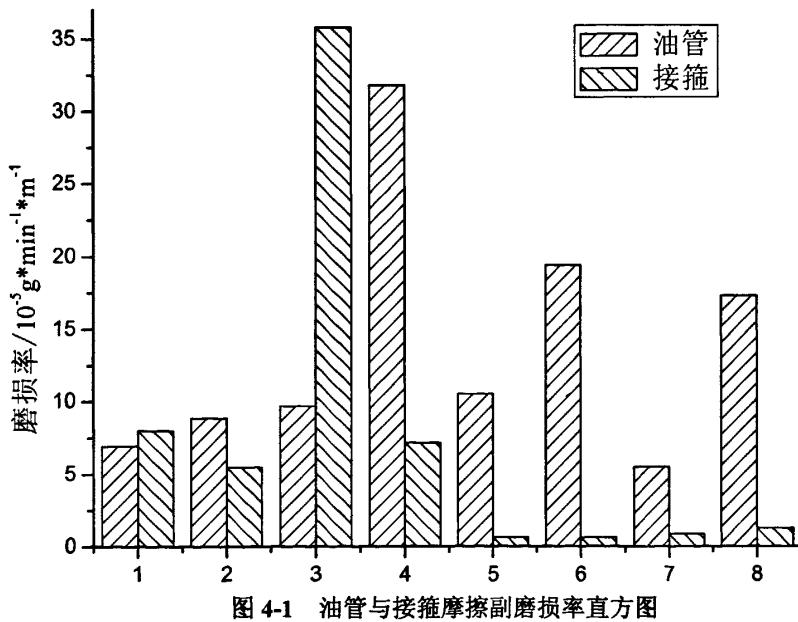


图 4-1 油管与接箍摩擦副磨损率直方图  
Fig.4-1 Wear rate histogram of tube and coupling friction pairs

为了更加直观地比较分析，将最终试验结果分成以下几种情况进行讨论。

#### 4.3.1 普通接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

1 号、2 号试验中，油管和接箍磨损失重曲线如图 4-2、4-3 所示。

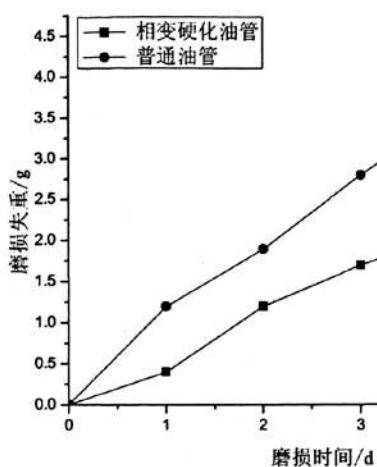
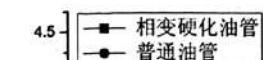


图 4-2 油管磨损失重曲线

Fig.4-2 Weight loss curves of tubing wear

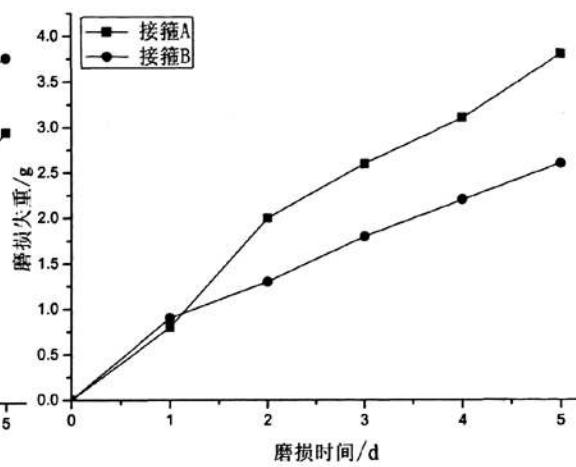
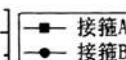


图 4-3 接箍磨损失重曲线

Fig.4-3 Weight loss curves of coupling

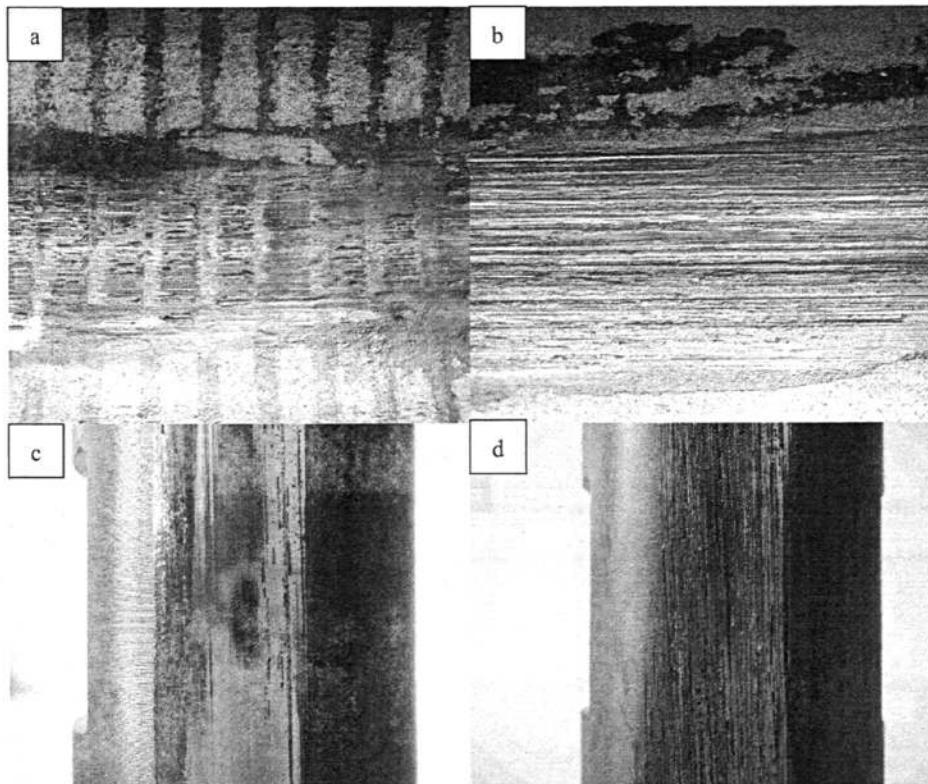


图 4-4 1、2 号油管接箍磨损宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.4-4 1、2 tubing and coupling wear macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

从图 4-2 油管磨损失重曲线上可以看出，与普通接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨损失重要低，普通油管磨损失重曲线呈直线上升趋势，其磨损速率较稳定。从

图 4-4 (b) 可以看出, 普通油管的磨损痕迹很深, 有非常明显的相互平行梨沟, 随着磨损进行, 犁沟内的磨损行为会逐渐向加工硬化层扩展, 且加工硬化层多以长条状大面积剥落, 这是因为疲劳裂纹很容易沿层带组织扩展, 最终使加工硬化层大面积剥落, 其结果就是使加工硬化层变窄, 强化作用减弱。从图 4-2 油管磨损失重曲线亦可看出, 相变硬化油管经过两天的磨损, 在第三、四天时磨损速率降低, 说明从第二天起, 磨损接触面已到达相变硬化区, 从图 4-4 (a) 可以看出第五天结束后, 其硬化层部分被磨去, 两条相变硬化带间的基体部分与接箍接触, 所以在第五天时磨损率有所增大。该区组织特征(淬火马氏体)决定其高硬度, 使其耐磨性增强, 故相变硬化油管得到强化, 磨损失重相对普通油管来说有所减少。

图 4-3 所示为对磨件普通接箍的磨损失重曲线, 可以看出, 与强化处理的油管组合的接箍 A 相应的在第二天, 磨损失重明显增加, 同时也说明, 接箍已接触到油管的硬化区, 剩余几天, 该接箍的磨损速率比较稳定, 由图 4-4 (c) 可以看出, 接箍 A 表面表较光滑, 没有梨沟现象, 粗糙度低, 在磨损配合过程中失重率较之接箍 B 会逐渐降低; 与普通油管对磨的接箍 B 在摩擦磨损过程中, 失重曲线呈直线趋势, 由图 4-4 (d) 可以看出, 接箍 B 表面有很多相互平行的梨沟且梨沟很深。

综上所述, 与普通接箍对磨时, 激光相变硬化处理的油管的磨损失重较未处理的油管维持在一个较低的水平, 且与之配合的接箍 A 磨损后表面比较光滑, 粗糙度低, 在磨损配合过程中失重率较接箍 B 会逐渐降低, 因此两组配合中该组较好。

#### 4.3.2 熔覆 Ni25 接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

3 号、4 号试验中, 油管和接箍磨损失重曲线如图 4-5、4-6 所示。

从图 4-5 油管磨损失重曲线上可以看出, 与熔覆 Ni25 接箍对磨时, 相变硬化油管比普通油管的磨损失重要低, 失重约为普通油管的三分之一, 从其失重曲线上来看, 其磨损失重比较平缓, 与普通油管相比其磨损率始终比较低, 由图 4-7 (a) 可以看出, 经过五天的磨损后相变硬化层依然存在, 部分区域已经磨掉。从普通油管磨损失重曲线上可以看出, 磨损失重大体分为三个阶段: (1) 磨损初期: 此阶段油管失重处于适中阶段; (2) 油管加工硬化期: 此阶段由于加工硬化层的出现, 对磨件磨损失重处于一个较低水平; (3) 磨损加速期: 加工硬化作用减小甚至消失后, 短时间内, 油管内壁很难形成较大面积的新的硬化层, 对磨件的失重上升并维持在一个较高的水平。从图 4-7 (b) 上可以看出普通油管表面有很多相互平行的深而窄的梨沟, 随着磨损进行, 犁沟内的磨损

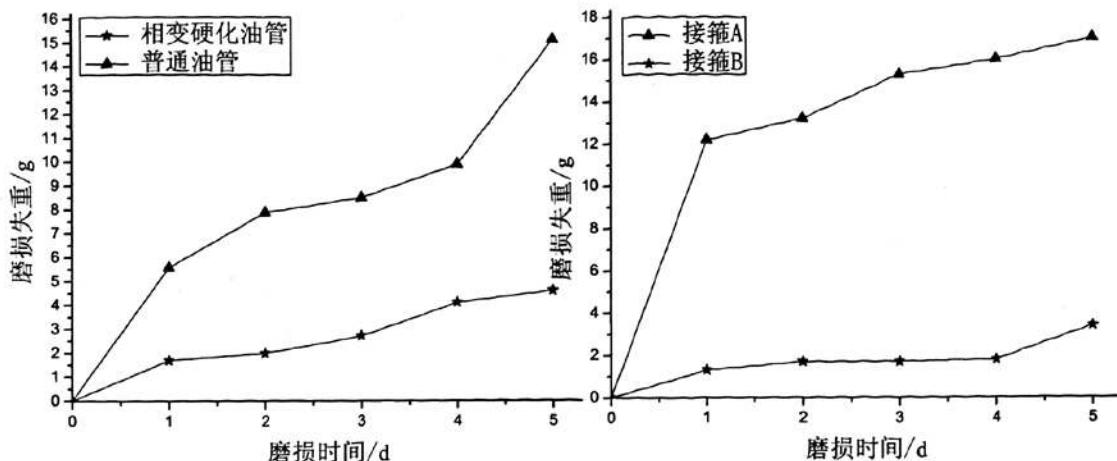


图 4-5 油管磨损失重曲线

Fig.4-5 Weight loss curves of tubing wear

图 4-6 接箍磨损失重曲线

Fig.4-6 Weight loss curves of coupling wear

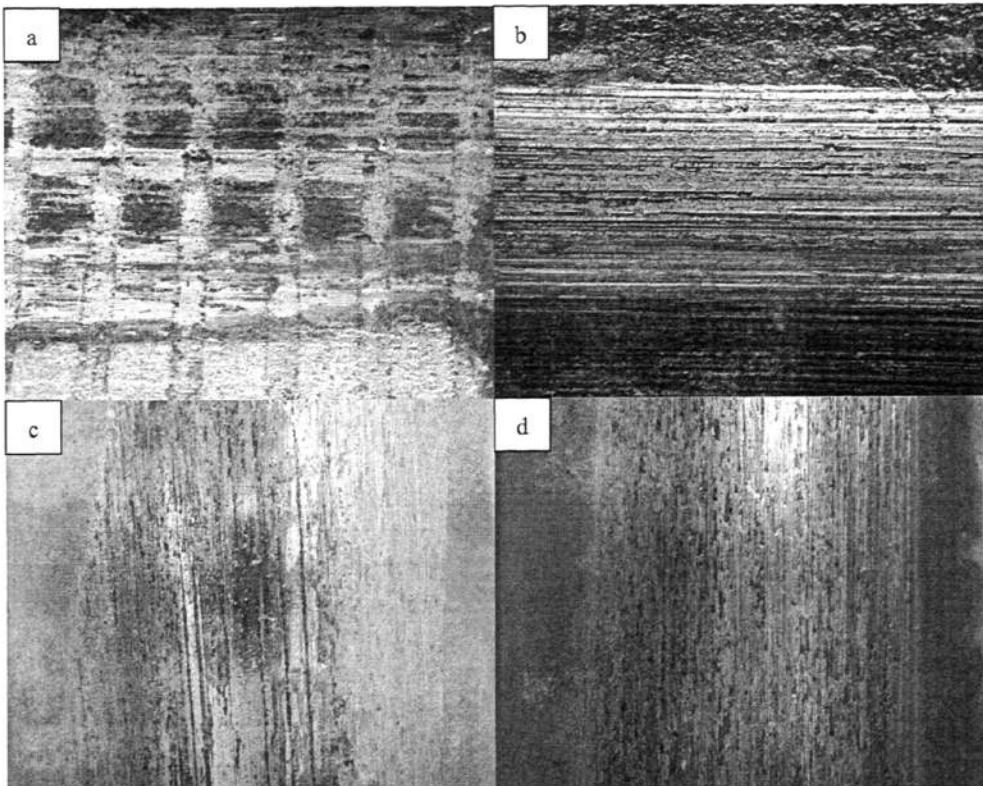


图 4-7 3、4 号油管接箍磨损宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.4-7 3、4 tubing and coupling wear macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

行为会逐渐向加工硬化层扩展，且加工硬化层多以长条状大面积剥落，这是因为疲劳裂纹很容易沿层带组织扩展，最终使加工硬化层大面积剥落。

图 4-6 所示为对磨件熔覆 Ni25 接箍的磨损失重曲线，可以看出，与强化处理的油管组合的 Ni25 接箍 A 在第一天磨损失重非常明显，说明接箍已接触到油管的硬化区，剩余几天，该接箍的磨损速率比较稳定，由图 4-7 (c) 可以看出，Ni25 接箍 A 表面的熔覆层已经被磨去，表面较光滑，梨沟较少，粗糙度相对较低，亦可说明在第一天后接箍磨损率比较稳定；由前章可知，普通油管显微硬度在  $250HV_{0.3}$  左右，Ni25 接箍显微硬度在  $270HV_{0.3}$  左右，在与普通油管对磨的 Ni25 接箍 B 在摩擦磨损过程中，第一天接箍磨损有所失重，随后几天接箍进入磨损稳定期，失重曲线呈平直趋势，与之相对应此时普通油管失重曲线也比较平缓，进一步说明此时摩擦副进入磨损稳定期，最后一天此摩擦副失重均有所增加，由图 4-7 (d) 可以看出，Ni25 接箍 B 表面有很多剥落的磨损坑，也存在一些平行的梨沟。

综上所述，与 Ni25 接箍对磨时，激光相变硬化处理的油管的磨损失重较未处理的油管维持在一个比较低的水平，失重曲线比较平缓但与之配合的 Ni25 接箍 A 磨损比较严重；与普通油管对磨时，虽然 Ni25 接箍失重比较均衡但与之配合的普通油管失重偏大，故此两种摩擦副均不合适。

#### 4.3.3 熔覆 Ni35 接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

5号、6号试验中，油管和接箍磨损失重曲线如图 4-8、4-9 所示。

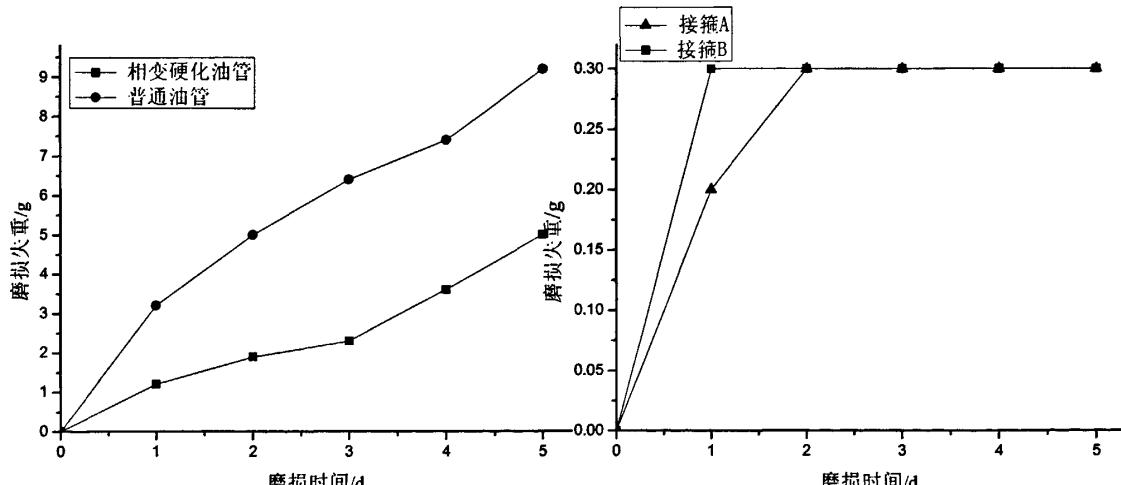


图 4-8 油管磨损失重曲线

Fig.4-8 Weight loss curves of tubing wear

图 4-9 接箍磨损失重曲线

Fig.4-9 Weight loss curves of coupling wear

由图 4-8 油管磨损失重曲线同样可以看出，与熔覆 Ni35 接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨损失重要低，普通油管磨损失重曲线呈直线上升趋势，其磨损速率较稳定，由图 4-10 (b) 可以看出，磨损五天后油管表面有很多相互平行的粗深的梨沟，

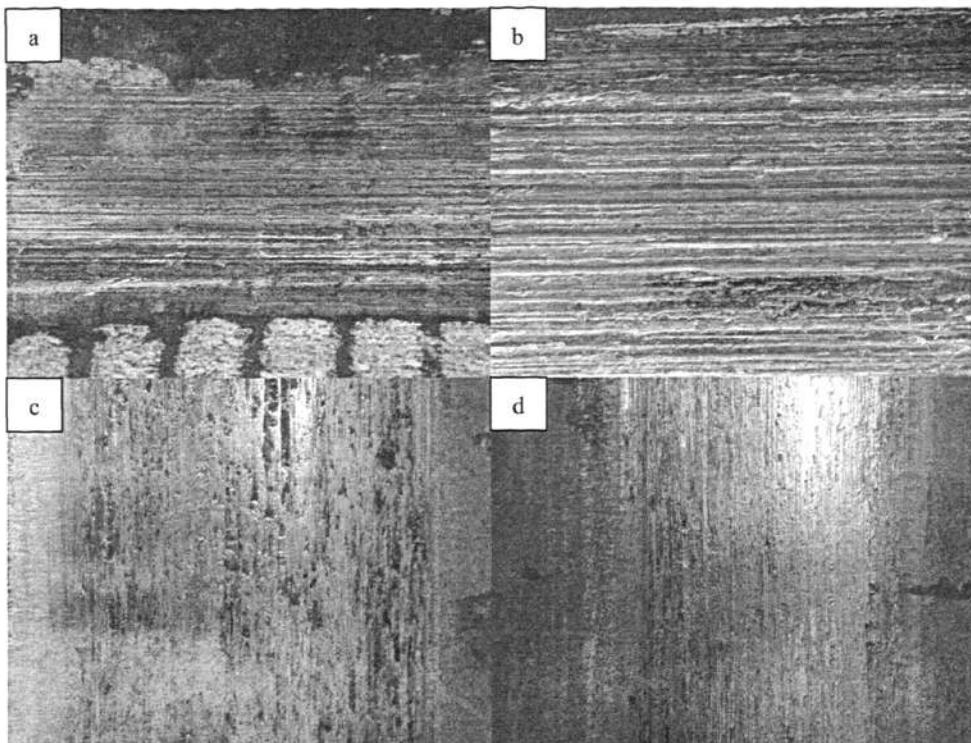


图 4-10 5、6 号油管接箍磨损宏观照片  
 (a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B  
**Fig.4-10 5、6 tubing and coupling wear macro photos**  
**(a)Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B**

很多金属似长条状大面积剥落。相变硬化油管磨损失重曲线可看出，经过前两天的磨损，在第三天进入油管硬化区的磨损，此时磨损速率降低，在第四天开始曲线出现转折点，表明硬化层渐渐被磨去，与 Ni35 接箍接触的是油管基体，磨损失重渐渐增加，从图 4-10 (a) 上可以看出，五天后油管内壁硬化层基本已被磨去，此时已是 Ni35 接箍跟相变油管基体在接触，故磨损失重增加，也可说明对磨件的硬度高于相变硬化油管的硬度。

图 4-9 所示为对磨件接箍的磨损失重曲线，可以看出，在开始磨损试验的前两天，熔覆接箍均有所磨损，与强化处理的油管组合的接箍 A 较晚进入磨损稳定期，进入第三天后，两组接箍几乎都没有失重，从图 4-10 (c、d) 上也可看出，Ni35 接箍表面几乎没有磨损，只有少量磨损坑，同时也说明，Ni35 接箍熔覆层的硬度很高，其耐磨性较好。

综上所述，与 Ni35 熔覆接箍对磨时，激光相变硬化的油管比普通油管的磨损失重低，磨损率低，耐磨性好，且 Ni35 接箍在进入磨损稳定期后两组 Ni35 接箍磨损率一致，因此我们可以看出两组摩擦副中相变硬化油管与 Ni35 接箍组合的摩擦副较好。

#### 4.3.4 熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

7号、8号试验中，油管和接箍磨损失重曲线如图4-11、4-12所示。

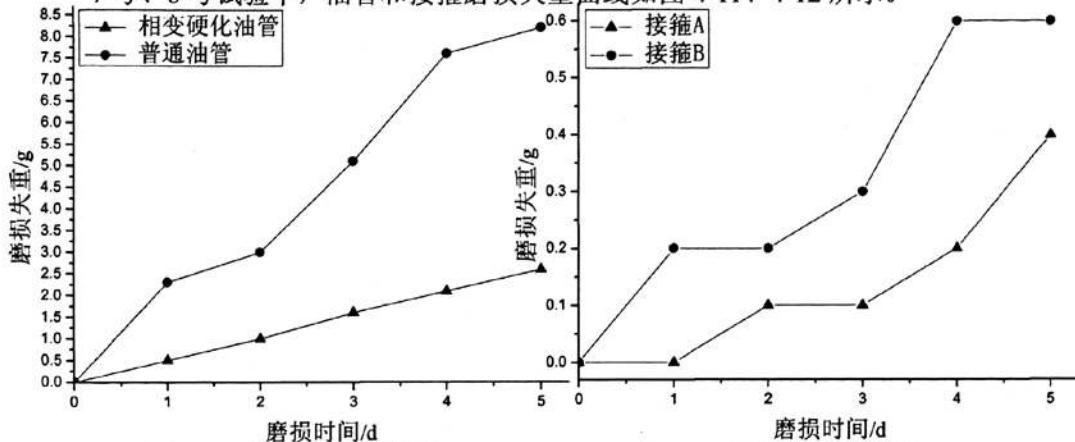


图 4-11 油管磨损失重曲线

图 4-12 接箍磨损失重曲线

Fig.4-11 Weight loss curves of tubing wear Fig.4-12 Weight loss curves of coupling wear

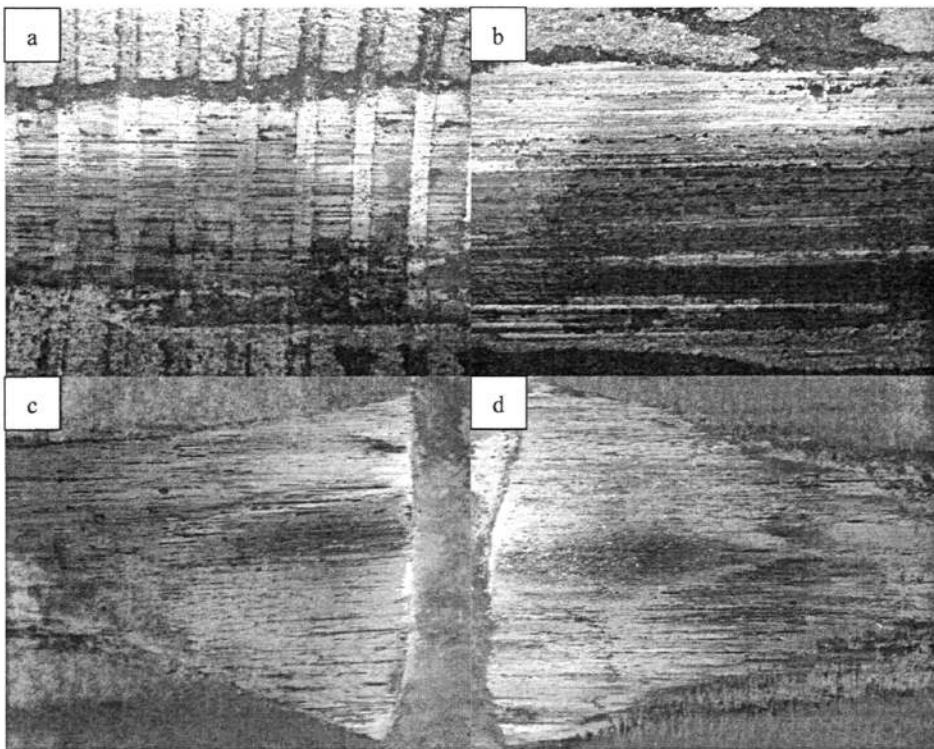


图 4-13 7、8 号油管接箍磨损宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.4-13 7、8 tubing and coupling wear macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

由图4-11油管磨损失重曲线同样可以看出，与熔覆Ni60包30%WC接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨损失重要低，失重约为后者的三分之一，相变硬化油管磨

损失重曲线呈直线上升趋势，其磨损速率较稳定，从图 4-13 (a) 可以看出，磨损五天后油管表面有很多相互平行的深浅不一的犁沟，但是相变硬化层仍依然大量存在，所以相变油管的磨损率较低；普通油管磨损失重曲线呈曲线上升趋势，由图 4-13 (b) 可以看出，经过五天的磨损后其表面有很多相互平行的梨沟，说明在磨损过程中发生了磨粒磨损，这是因为在磨损过程中的磨屑受到切向力的作用而沿摩擦表面产生相对运动，使摩擦表面受到剪切、犁皱或切削<sup>[57,58]</sup>，由此形成一些沟槽，沟槽是由裂纹的扩展和随后表面材料成碎片脱落或者受反复应力作用而产生疲劳所致，在宏观上看就出现了细长的划痕。

图 4-12 所示为对磨件接箍的磨损失重曲线，由图可以看出，虽然 Ni60 包 30%WC 接箍整体磨损失重比较低，但这两者相比，与强化处理的油管组合的接箍 A 磨损失重量要比接箍 B 低，虽然两者磨损趋势均是曲线上升，但接箍 A 一开始并没有失重，因为相变油管比较耐磨，然后由于硬质相的存在，发生了磨粒磨损。由图 4-13 (c、d) 也可看出，Ni60 包 30%WC 接箍表面几乎没有磨损，比较光亮，只有少量磨损坑，这是因为熔覆层耐磨性提高的原因除了弥散强化、晶界强化机制外（激光熔覆过程中部分溶解的 WC 又以第二相的形式在覆层内均匀弥散地析出，起到强化熔覆层的作用，另外由于 WC 加入而引起的枝晶细化，也使晶界和相界得到强化。），WC 部分地熔融于基体中使基体固溶强化，导致熔覆层基体具有强韧性，给硬质点 WC 提供支撑作用，故使硬质点颗粒镶嵌更加牢固。因此，适量 WC 可有效地承受和抵抗硬质磨头的显微切削和反复挤压的塑性变形，减缓了切削过程，磨损表面犁沟变浅，磨损量减少，耐磨性提高<sup>[54]</sup>。

综上所述，与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍对磨时，激光相变硬化的油管比普通油管的磨损失重低，由于五天后相变硬化层仍大量存在其磨损率较低，耐磨性较好，且 Ni60+30%WC 接箍磨损率整体上均比较低，因此我们可以看出两组摩擦副中与相变硬化油管组合的摩擦副较好。

#### 4.3.5 普通接箍和熔覆接箍与激光相变硬化油管配对

由以上分析可以确定 1 号、5 号和 7 号摩擦副比较理想，均为激光相变处理油管组合，接下来我们做进一步分析，油管和接箍的磨损失重曲线如图 4-14、4-15 所示。

由图 4-14 可以看出，整体上 1、5 号相变油管磨损规律相似，前几天曲线较平缓，因为油管内壁硬度很高，耐磨性高的相变硬化带与接箍接触，未强化区没有完全参与磨损，硬化带起支撑作用。在第四天之后，曲线变陡，说明油管相变硬化带渐渐被磨去，

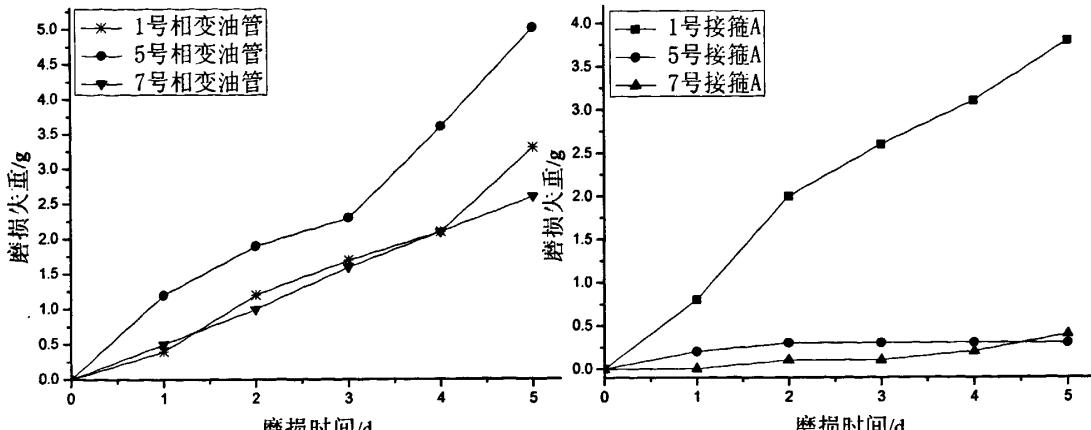


图 4-14 油管磨损失重曲线

图 4-15 接箍磨损失重曲线

Fig.4-14 Weight loss curves of tubing wear

Fig.4-15 Weight loss curves of coupling

强化作用降低，磨损失重增加，即磨损速率加快；7号相变油管磨损曲线呈直线，由图4-13(a)也可看出油管相变硬化区依然大量存在，这是因为Ni60包30%WC熔覆接箍中WC减磨效果比较好，就是说接箍始终与相变区接触，相变硬化带起支撑作用，故7号相变油管的磨损率始终一致；从图中我们也可看出，7号油管的磨损失重趋势始终低于1、5号油管。

由图4-15可以看出，与相变硬化油管对磨时，熔覆接箍失重明显比普通接箍的低，因为Ni35、Ni60包30%WC熔覆接箍表层硬度分别高达460HV<sub>0.3</sub>、648HV<sub>0.3</sub>，为普通接箍的2~3倍；Ni35、Ni60包30%WC熔覆接箍的失重率比较接近，但Ni60包30%WC熔覆接箍整体失重趋势低于Ni35熔覆接箍。受设备空间的限制，试验中设计的冲程仅为200mm，而实际的摩擦冲程要长得多，约为4~5米，油管摩擦部位的面积相对较大，接箍摩擦部位面积相对较小，因此在实际工作环境中，抽油杆接箍的偏磨程度更严重，则需要接箍的耐磨性要比油管的好。

综上所述，相变硬化油管与Ni60包30%WC熔覆接箍组合的摩擦副比较好，不论是油管还是接箍整体磨损趋势均比较低，且经过五天的磨损后油管的相变硬化层仍大量存在，其磨损率较低、耐磨性较好，进而激光相变硬化处理的油管与Ni60包30%WC熔覆接箍相互配合时，抽油杆油管与接箍管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高。

#### 4.4 扫描电镜分析

磨损试验结束后，利用扫描电镜观察试件的表面形貌，以便更好的研究N80油管与接箍磨损后的磨损机制。

#### 4.4.1 接箍与相变硬化油管对磨磨损形貌分析

由图 4-13 可以看出，低倍下基本看不到划痕，高倍下才能发现些微坑洞、细小的划痕和白色的膜状物质，存在坑洞说明在摩擦磨损过程中发生腐蚀而产生的腐蚀坑；相对于强化油管，接箍的硬度很小，在摩擦过程中，会产生磨屑，发生磨粒磨损；因为耐磨试验是在大气中进行，同时采用水介质，因而摩擦表面很易与大气中的氧发生反应而形成一层氧化膜<sup>[59]</sup>，主要是铁锈，在摩擦磨损过程中，该层与氧化膜不断剥落，形成磨屑，磨损机理为磨粒磨损。氧化膜的形成速度小于其剥落的速度，故普通接箍较熔覆接箍失重高。该摩擦副在磨损过程中会遭到腐蚀，是磨蚀的结果<sup>[60]</sup>。

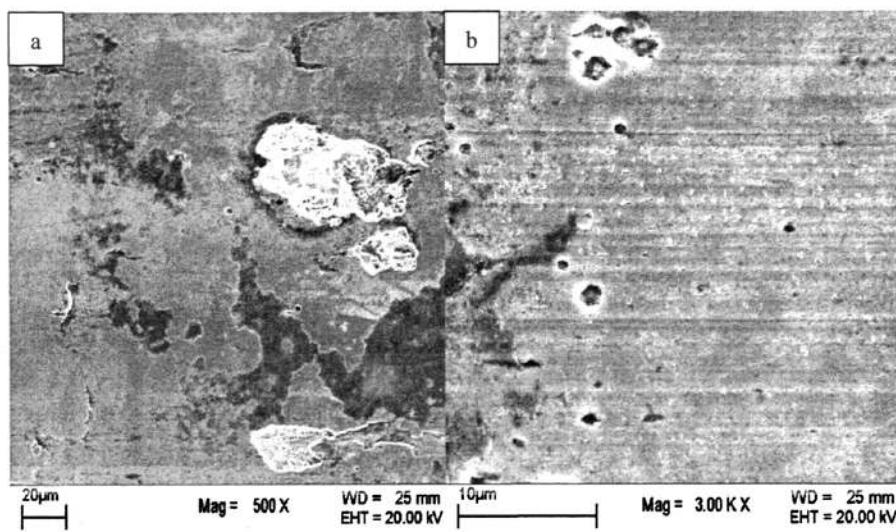


图 4-13 普通接箍微观形貌 (a) 白色氧化膜 (b) 划痕

Fig.4-13 Common coupling morphology (a) White oxide film (b) Scratch

图 4-14(a)、(b) 是激光熔覆 Ni35 接箍与相变硬化油管对磨时，接箍磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。500 倍下可清晰看出磨痕粗而浅，基体处磨损程度很轻，这是由于随着材料表面基体硬度的提高，对偶件的微凸体已经不能对其表面产生严重的犁沟。3000 倍下可观察到黑色膜状物质，图 4-15 黑色膜处成分能谱分析 (EDS) 结果表明：其主要成分为 O、Cr、Fe、Ni，而基体处为：Cr、Fe、Ni、Si，即熔覆层中 Ni35 的主要成分。说明黑色物质为磨损后露出的新鲜表面被氧化生成各种 Cr、Fe、Ni 的氧化膜，由于熔覆的 Ni35 粉末为镍基合金，它具有减摩耐磨的作用，可以说这几种氧化物薄膜对接箍工作表面起到一定的保护作用，因此在磨损过程中减轻了其工作表面受到的损伤程度，只有很浅的划痕<sup>[60]</sup>。

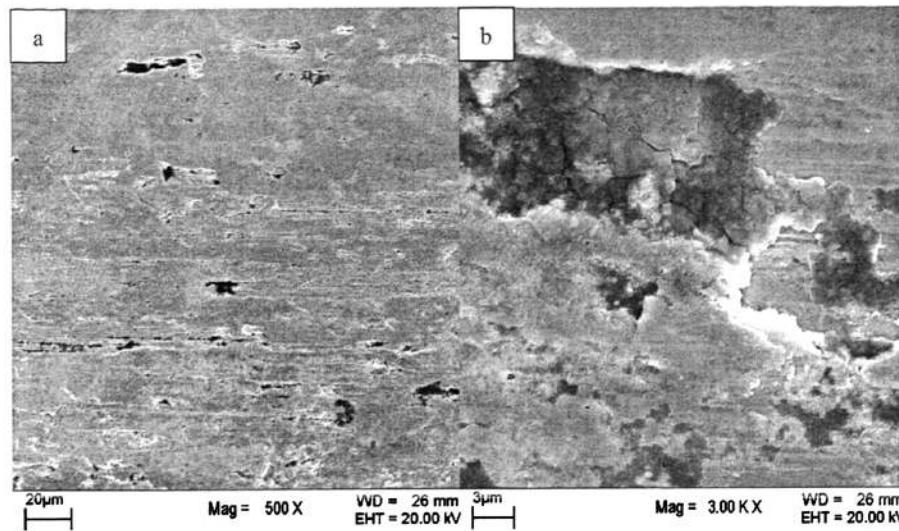


图 4-14 激光熔覆接箍微观形貌 (a) 低倍宏观形貌 (b) 薄膜

Fig.4-14 Laser Cladding hoop morphology

(a) Low magnification macro-morphology (b) Thin film

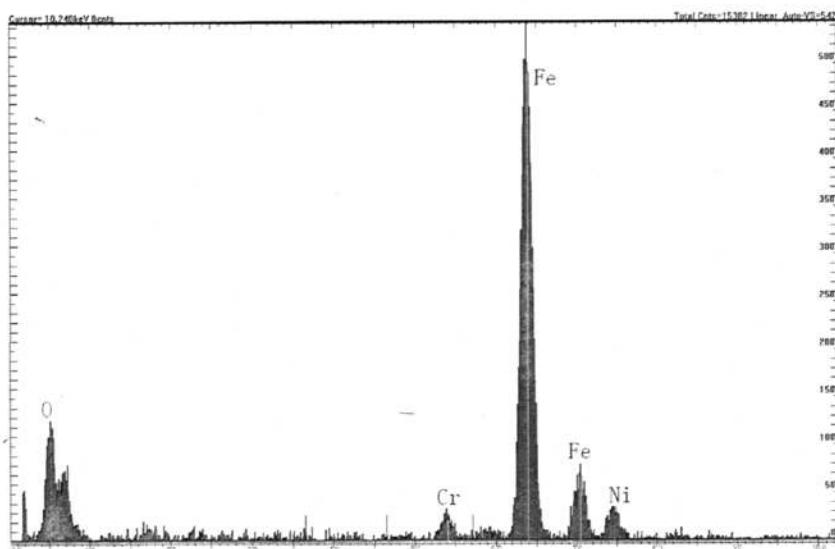


图 4-15 黑色膜处能谱分析

Fig.4-15 EDS of the black membrane Office

#### 4.4.2 油管与熔覆接箍对磨磨损形貌分析

图 4-16 (a)、(b) 是普通油管与熔覆接箍对磨时，普通油管磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。低倍下从油管磨损表面上可看到非常明显的相互平行犁沟。在与摩擦对偶件的摩擦过程中，其对偶件是硬度很高的接箍，接箍表面的微凸体在法向力的作用下压入油管内壁表面，然后在切向力下向前运动，将材料挤压到两侧，形成两边隆起，中

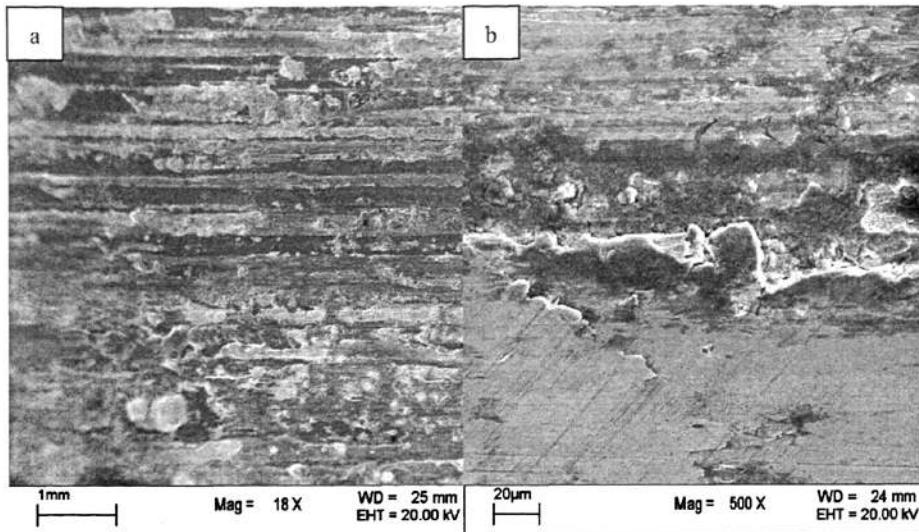


图 4-16 普通油管微观形貌 (a) 低倍宏观形貌 (b) 高倍宏观形貌

Fig.4-16 Ordinary tubing morphology

## (a) Low magnification macro-morphology (b) High magnification macro-morphology

间凹陷的沟槽。显然这种磨损方式不能一次就产生磨屑，磨屑只能通过微凸体对材料表面的反复作用来产生。第一次摩擦形成的沟槽底部和两侧已经发生了一些塑性变形，随着摩擦的继续，微凸体将对沟槽的底部和两侧再次犁沟，使其再次发生变形，如此反复，裂纹就会在材料表面产生，裂纹的扩展最终使材料脱离母体形成磨屑，因此普通油管内壁主要以磨粒磨损为主。高倍下观察到上部白色的地方为磨屑剥落后露出新鲜表面生出的锈层，下部存在斜痕。由于摩擦表面发生变形，存在畸变，因此表面能量很高，此外，表面新鲜，活性大，加之摩擦热的影响，使得摩擦表面处于不稳定状态；又因为摩擦副在水介质中工作，因而摩擦表面很易与水中溶解氧发生反应而形成有一层氧化膜，即所谓的生锈。由于膜太厚，它能封锁位错，使之不能在表面露头，结果在表面膜下面形成高的应力与变形，氧化膜随之破裂剥落，成为磨料造成磨料磨损<sup>[60,61]</sup>。

图 4-17 (a)、(b) 是相变硬化油管磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。低倍下可观察到油管内壁出现的犁沟比普通油管的粗浅，且不均匀，因为经过激光强化处理后，其硬度与接箍的相当，抗磨粒磨损的能力也大大提高了。同时在表面可看到有许多白色膜状物质，图 4-18 白色膜处能谱 (或 EDS) 分析结果显示其主要成分为 Fe、O、Ca、Mn、Mg，其中 Fe、O 含量最多，可判定白色物质为氧化物薄膜，这层膜薄而致密，且与基体的结合牢固，使摩擦系数大大降低，提高摩擦副的耐磨性。可以说这层膜对油管和接箍间的工作表面起到一定的保护作用，因而，在磨损过程中减轻了其工作表面受到的损伤程度，只有很浅的划痕，提高了摩擦副抗磨损的能力。可见，与激光熔覆接箍配合时，

激光相变硬化油管的耐磨性要比普通油管的高<sup>[60]</sup>。

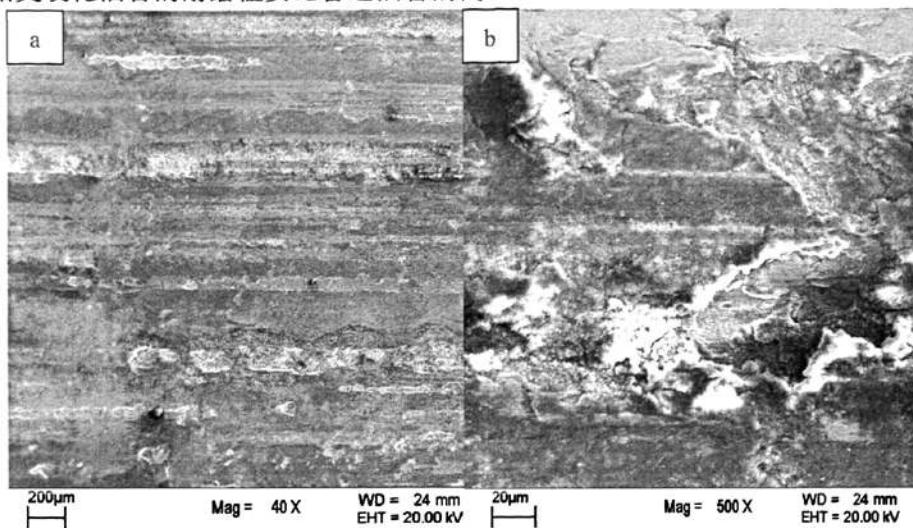


图 4-17 相变硬化油管微观形貌 (a) 低倍宏观形貌 (b) 白色膜处放大

Fig.4-17 Transformation hardening tubing morphology

(a) Low magnification macro-morphology (b) Larger white film

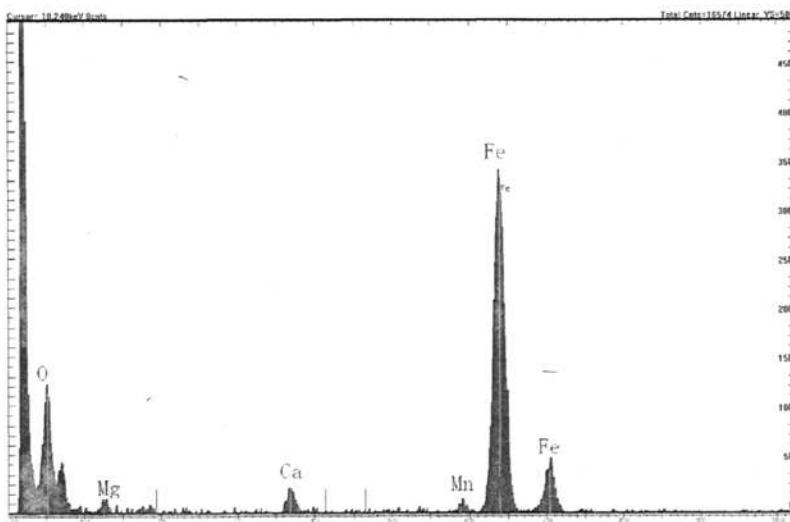


图 4-18 白色膜处能谱分析

Fig.4-18 EDS of the white membrane Office

## 4.5 本章小结

- 1) 普通油管与熔覆接箍对磨时的磨损失重较之与普通接箍对磨时要高得多。
- 2) 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍对磨，相变硬化油管的磨损率要比普通油管的低，约为普通油管的 1/3~1/2。
- 3) 无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨，激光熔覆 Ni35、Ni60 包

30%WC 合金粉末后的接箍的磨损率明显要比普通接箍的要低得多，约为普通接箍的 1/10。

4) 相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副比较好，不论是油管还是接箍整体磨损趋势均比较低，且经过五天的磨损后油管的相变硬化层仍大量存在，其磨损率较低、耐磨性较好，进而激光相变硬化处理的油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍相互配合时，抽油杆管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高。

5) 通过 SEM 分析可知，在摩擦磨损过程中，磨损接触层形成的氧化膜不断剥落，形成磨屑造成磨粒磨损，进而管杆间磨损以磨粒磨损为主。

## 第 5 章 抽油井油管与接箍管杆摩擦副磨蚀性能

### 5.1 引言

前一章以水为介质探究了管杆摩擦副的配合情况，本章为进一步接近实际工况探究以 3.5%NaCl 溶液为介质的管杆摩擦副的磨蚀性能，提高机采井中管杆的防偏磨能力，以便更好的为现场实际应用提供一些参考。

### 5.2 磨蚀试验结果与讨论

管杆磨蚀的实验结果如表 5-1 所示，为了比较直观的分析，把失重磨蚀率制成直方图的形式，如图 5-1 所示，图 5-1 中代码对应表 5-1 中相应试验号。

**表 5-1 摩擦副磨蚀失重结果**  
**Table 5-1 Friction abrasion weight loss results**

试验号	摩擦副	质量失重磨蚀率/( $\times 10^{-5}$ g* min <sup>-1</sup> * m <sup>-1</sup> )	
		油管	接箍
1	相变硬化油管与普通接箍 A	8.418	9.470
2	普通油管与普通接箍 B	12.205	5.682
3	相变硬化油管与 Ni35 接箍 A	11.995	0.631
4	普通油管与 Ni35 接箍 B	15.783	0.421
5	相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍 A	10.943	0.842
6	普通油管与 Ni60 包 30%WC 接箍 B	15.152	0.842

由表 5-1 中数据和图 5-1 亦可直观的看出：

- (1) 无论是普通油管还是相变硬化油管与熔覆接箍对磨时的磨蚀失重较之与普通接箍对磨时要高；
- (2) 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍对磨，相变硬化油管的磨蚀率要比普通油管的低；
- (3) 无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨，激光熔覆 Ni35、Ni60 包 30%WC 合金粉末后的接箍的磨蚀率亦明显要比普通接箍的低得多，约为普通接箍的 1/10；
- (4) 因为在实际摩擦副中接箍的摩擦行程要长的多，因此我们要求接箍要相对耐磨一些，故相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍摩擦副为较优配合。

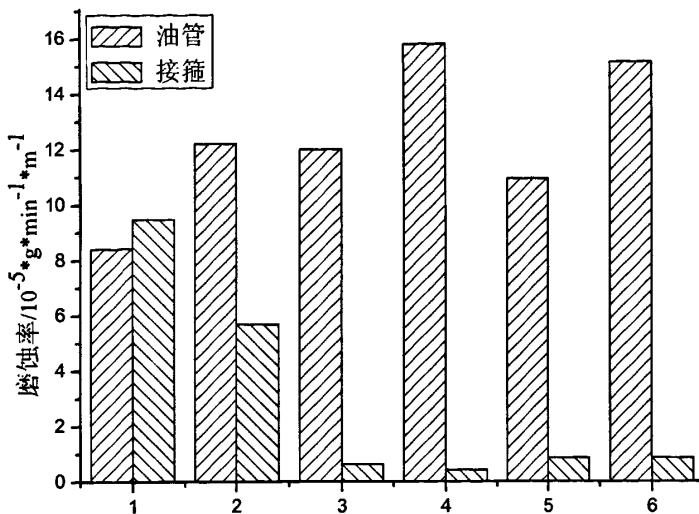


图 5-1 油管与接箍摩擦副磨蚀率直方图

Fig.5-1 Abrasion rate histogram of tube and coupling friction pairs

为了更加直观地比较分析，将最终试验结果分成以下几种情况进行讨论。

### 5.2.1 普通接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

1号、2号试验中，油管和接箍磨蚀失重曲线如图5-2、5-3所示。

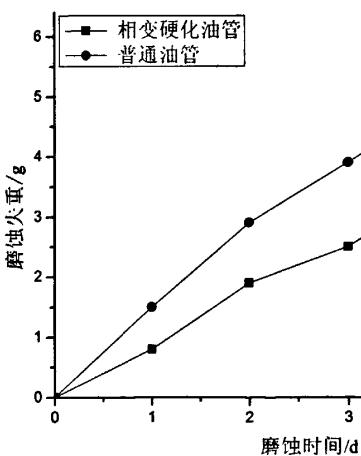


图 5-2 油管磨蚀失重曲线

Fig.5-2 Weight loss curves of tubing erosion

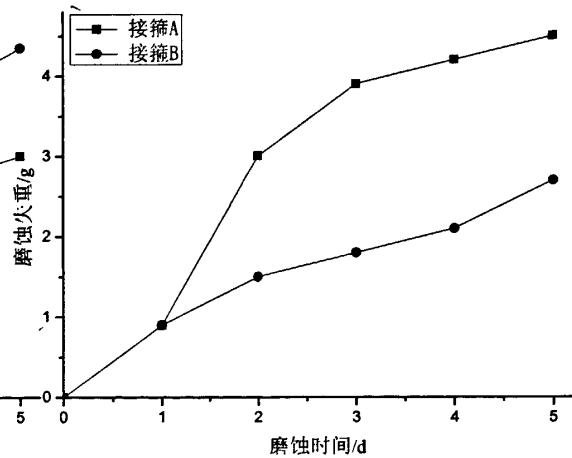


图 5-3 接箍磨蚀失重曲线

Fig.5-3 Weight loss curves of coupling erosion

从图5-2油管磨蚀失重曲线上可以看出，与普通接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨蚀失重要低，普通油管磨蚀失重曲线呈直线上升趋势，其磨蚀速率基本趋于稳定。由图5-4(b)看以看出，普通油管的磨蚀痕迹较深，有比较明显的相互平行梨沟，随着磨蚀进行，梨沟内的磨蚀行为会逐渐向加工硬化层扩展，且加工硬化层多以长条状大面积剥落，这是因为疲劳裂纹很容易沿层带组织扩展，最终使加工硬化层大面积剥落，

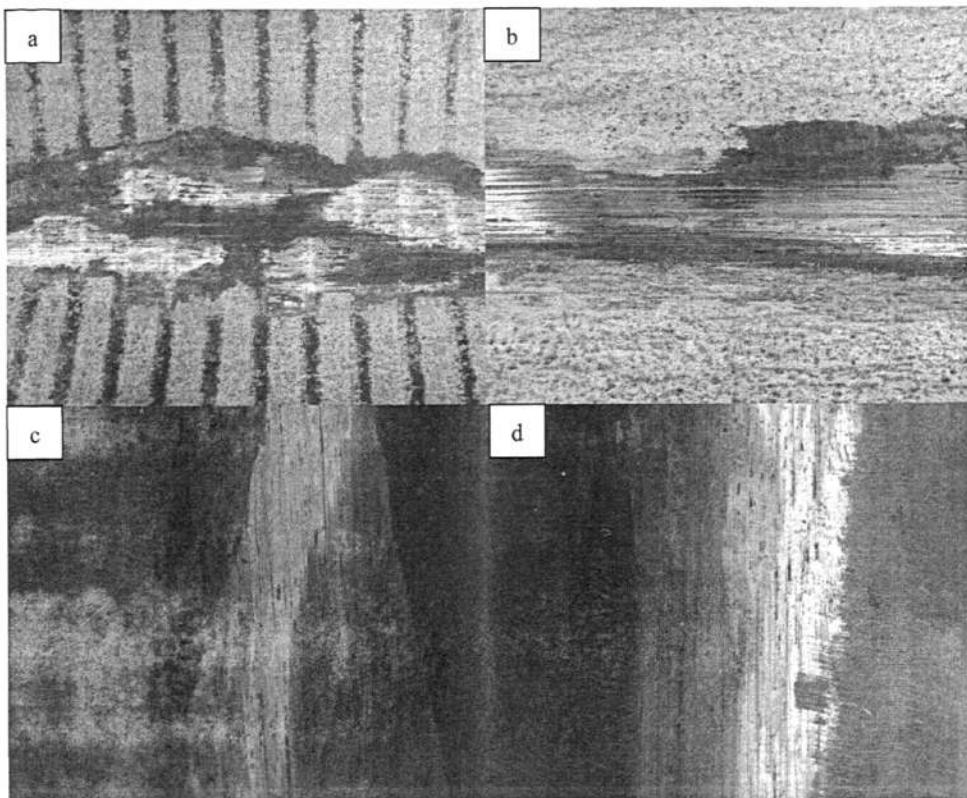


图 5-4 1、2 号油管接箍磨蚀宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.5-4 1、2 tubing and coupling erosion macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

其结果就是使加工硬化层变窄，强化作用减小。从图 5-2 油管磨蚀失重曲线亦可看出，相变硬化油管经过两天的磨蚀，在第三、四、五天时磨蚀速率降低，说明从第三天起，磨蚀接触面已完全到达相变硬化区，从图 5-4 (a) 可以看出第五天结束后，其硬化层仍未被磨去，两条相变硬化带间的基体没有完全与接箍接触，只是油管硬化层与接箍发生相互作用。该区组织特征（淬火马氏体）决定其高硬度，使其耐磨蚀性增强，故相变硬化油管得到强化，进而磨蚀失重有所降低。

图 5-3 所示为对磨件普通接箍的磨蚀失重曲线，可以看出，与强化处理的油管组合的接箍 A 相应的在第二天，磨蚀失重明显增加，同时也说明，接箍已开始接触到油管的硬化区，剩余几天，该接箍的磨蚀速率趋于稳定，由图 5-4 (c) 可以看出，接箍 A 表面较光滑，有少量梨沟，在磨蚀配合过程中失重率较之接箍 B 逐渐降低；与普通油管对磨的接箍 B 在摩擦磨损过程中，前两天失重较快，在第三、四天比较稳定，第五天开始磨蚀失重率上升，由图 5-4 (d) 可以看出，接箍 B 表面有很多相互平行的较浅的梨沟。

综上所述，与普通接箍对磨时，激光相变硬化处理的油管的磨蚀失重较未处理的油管维持在一个较低的水平，且与之配合的接箍 A 磨损后表面比较光滑，在磨蚀配合过程中失重率较之接箍 B 逐渐降低，因此两组配合中该组较好。

### 5.2.2 熔覆 Ni35 接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

3 号、4 号试验中，油管和接箍磨蚀失重曲线如图 5-5、5-6 所示。

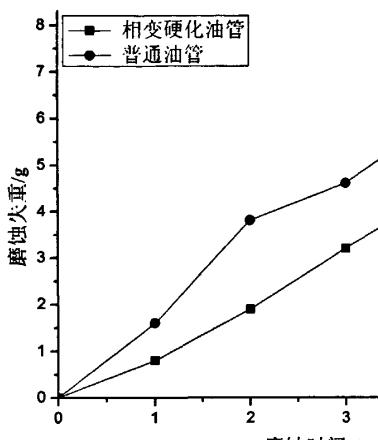


图 5-5 油管磨蚀失重曲线

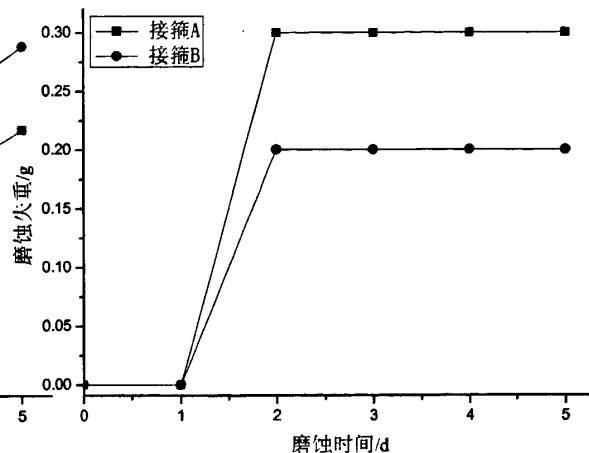


图 5-6 接箍磨蚀失重曲线

Fig.5-5 Weight loss curves of tubing erosion

Fig.5-6 Weight loss curves of coupling erosion

从图 5-5 油管磨蚀失重曲线上可以看出，与熔覆 Ni35 接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨损失重要低，普通油管磨蚀失重曲线呈直线上升趋势，其磨蚀速率较稳定，从图 5-7 (b) 可以看出，磨蚀五天后油管表面有很多相互平行的窄深的梨沟，很多金属似长条状大面积剥落。从相变硬化油管磨蚀失重曲线上可以看出，相变硬化油管磨蚀率比较稳定，磨蚀失重曲线呈直线上升趋势，从图 5-7 (a) 中可以看出，五天后油管内壁硬化层部分已被磨去，此时 Ni35 接箍大部分仍是跟相变油管强化区在接触，故磨蚀失重率基本一致。

图 5-6 所示为对磨件接箍的磨蚀失重曲线，从该图上可以看出，在开始磨蚀试验的前两天，熔覆接箍均有所磨损，进入第三天后，两组接箍几乎都没有失重，均进入磨蚀稳定期；从图 5-7 (c、d) 上也可看出，Ni35 接箍表面几乎没有磨损，只有少量磨损坑，同时也说明，Ni35 接箍熔覆层的硬度较高，耐磨性较好。

综上所述，与 Ni35 熔覆接箍对磨时，激光相变硬化的油管比普通油管的磨蚀失重低，磨蚀率低，耐磨性好，且 Ni35 接箍在进入磨蚀稳定期后两组 Ni35 接箍磨损率一致，因此我们可以看出两组摩擦副中相变硬化油管与 Ni35 接箍组合的摩擦副较好。

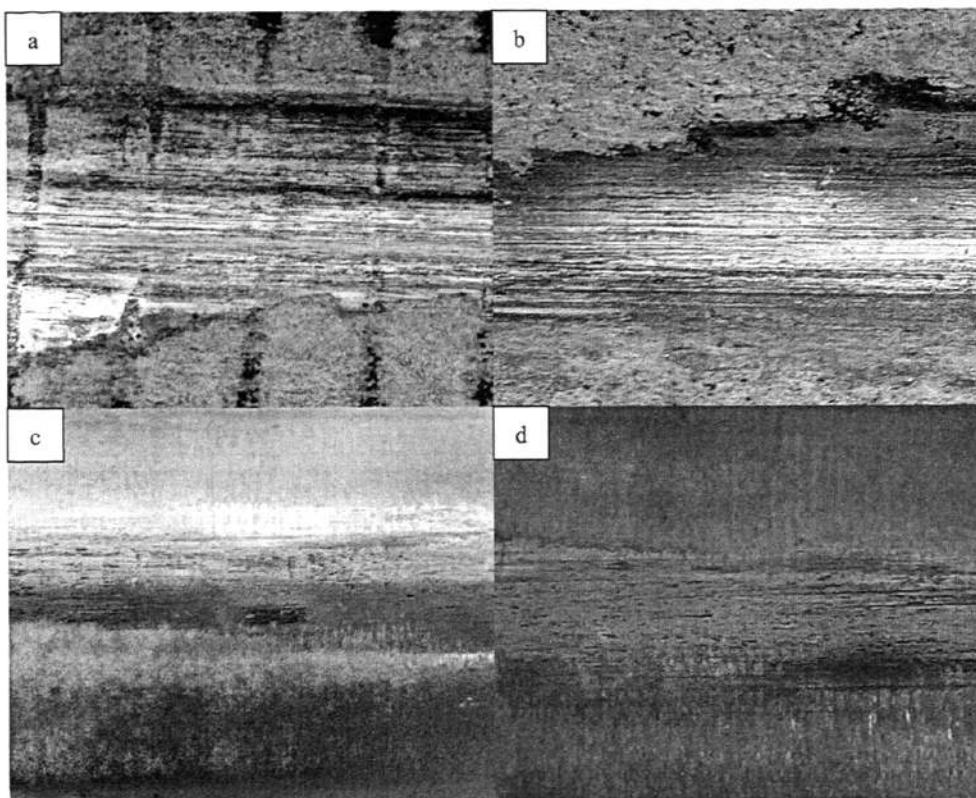


图 5-7 3、4 号油管接箍磨蚀宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.5-7 3, 4 tubing and coupling erosion macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

## 5.2.3 熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍与普通油管和激光相变硬化油管的配对

5号、6号试验中，油管和接箍磨蚀失重曲线如图5-8、5-9所示。

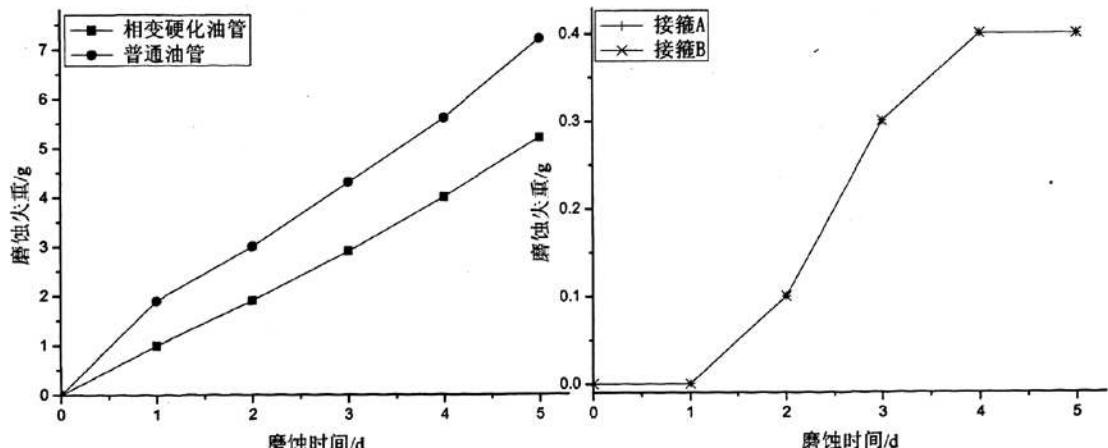


图 5-8 油管磨蚀失重曲线

Fig.5-8 Weight loss curves of tubing erosion

图 5-9 接箍磨蚀失重曲线

Fig.5-9 Weight loss curves of coupling erosion

从图 5-8 油管磨蚀失重曲线上也可以看出，与熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍对磨时，相变硬化油管比普通油管的磨蚀失重要低，失重约为后者的三分之二；普通油管磨蚀失重

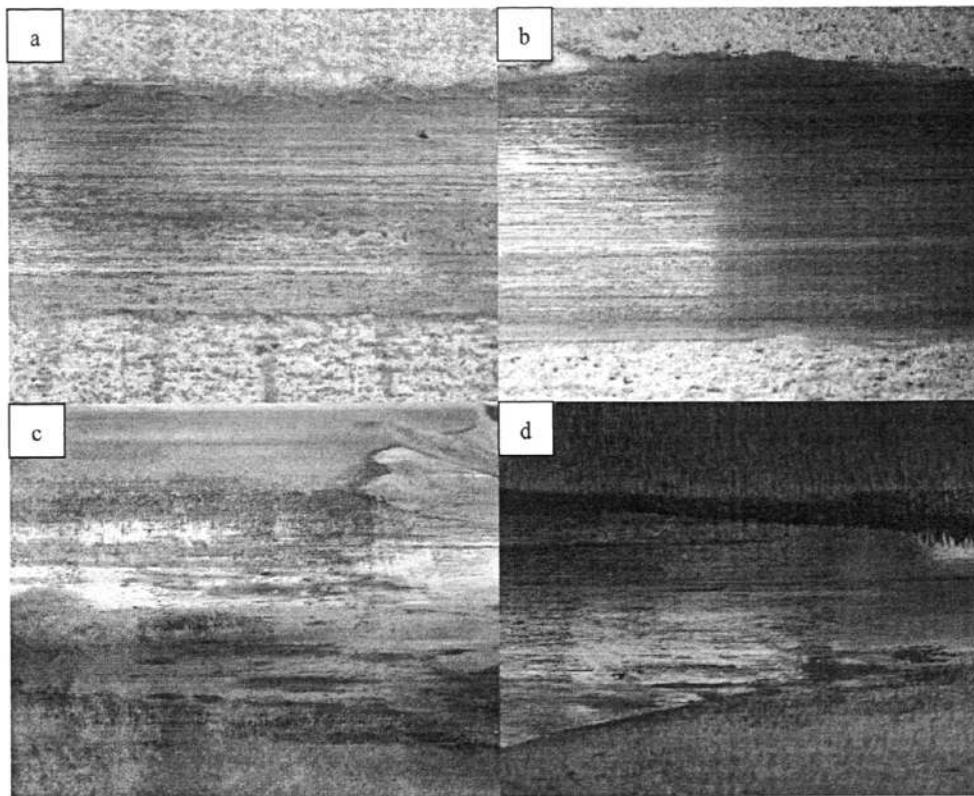


图 5-10 5、6 号油管接箍磨蚀宏观照片

(a) 相变硬化油管 (b) 普通油管 (c) 接箍 A (d) 接箍 B

Fig.5-10 5、6 tubing and coupling erosion macro photos

(a) Transformation hardening tubing (b) Ordinary tubing (c) Coupling A (d) Coupling B

曲线呈直线上升趋势，由图 5-10 (b) 可以看出，经过五天的磨损后其表面有很多相互平行的梨沟，说明在磨蚀过程中发生了磨粒磨损，这是因为在磨损过程中的磨屑受到切向力的作用而沿摩擦表面产生相对运动，使摩擦表面受到剪切、犁皱或切削，由此形成一些沟槽，沟槽是由裂纹的扩展和随后表面材料成碎片脱落或者受反复应力作用而产生疲劳所致，在宏观上看就出现了细长的划痕；相变硬化油管磨蚀失重曲线亦呈直线上升趋势，其磨损速率较稳定，从图 5-10 (a) 可以看出，磨损五天后油管表面有很多相互平行的深浅不一的梨沟，部分相变硬化层已被磨去，但由于相变硬化带的支撑作用，相变油管的磨蚀率较普通油管磨蚀率要低。

图 5-9 所示为对磨件接箍的磨蚀失重曲线，从图上可以看出，两者失重曲线一致，第一天都没有失重，在此后的第二、三、四天有所失重，可能是由于油管被磨蚀下的磨

屑里有硬质相存在发生了磨粒磨损，到了第五天接箍不在失重，维持在一个较低的水平。由图 5-10 (c、d) 也可看出，Ni60 包 30%WC 接箍表面几乎没有磨损，比较光亮，只有少量磨损坑，这是因为熔覆层耐磨性提高的原因除了弥散强化、晶界强化机制外（激光熔覆过程中部分溶解的 WC 又以第二相的形式在覆层内均匀弥散地析出，起到强化熔覆层的作用，另外由于 WC 加入而引起的枝晶细化，也使晶界和相界得到强化。），WC 部分地熔融于基体中使基体固溶强化，导致熔覆层基体具有强韧性，给硬质点 WC 提供支撑作用，故使硬质点颗粒镶嵌更加牢固。因此，适量 WC 可有效地承受和抵抗硬质磨头的显微切削和反复挤压的塑性变形，减缓了切削过程，磨蚀表面犁沟变浅，磨蚀量减少，耐磨性提高<sup>[54]</sup>。

综上所述，与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍对磨时，激光相变硬化的油管比普通油管的磨蚀失重率低，耐磨性较好，且两者 Ni60 包 30%WC 接箍磨蚀失重曲线一致，磨蚀率整体上均比较低，由此我们可以看出两组摩擦副中相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍组合的摩擦副较好。

#### 5.2.4 普通接箍和熔覆接箍与激光相变硬化油管配对

由以上分析可以确定 1 号、3 号和 5 号摩擦副比较理想，均为激光相变处理油管组合，接下来我们做进一步分析，油管和接箍的磨蚀失重曲线如图 5-11、5-12 所示。

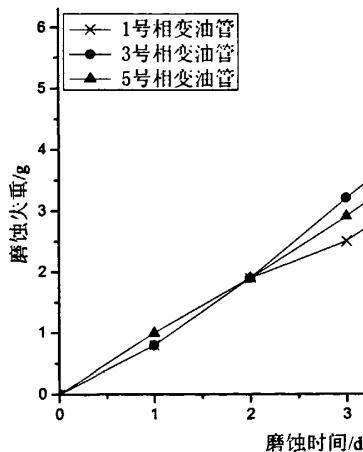


图 5-11 油管磨蚀失重曲线

Fig.5-11 Weight loss curves of tubing erosion

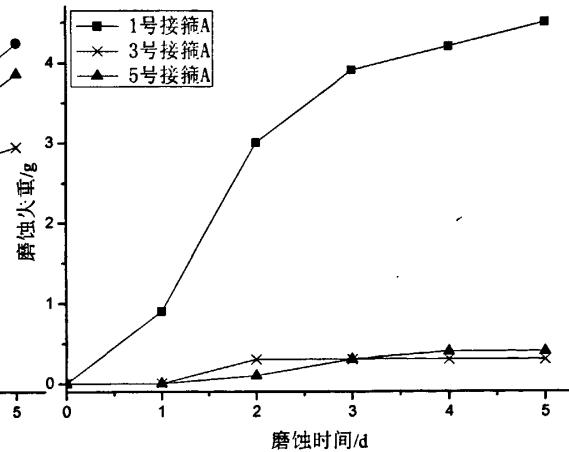


图 5-12 接箍磨蚀失重曲线

Fig.5-12 Weight loss curves of coupling erosion

从图 5-11 上可以看出，1 号相变油管前两天磨蚀率较高，从第三天开始磨蚀率开始降低，可能是因为从第三天开始接箍已与强化区相变层接触，而接箍硬度相对较低造成的；整体上来说，3 号、5 号相变油管磨损规律相似，它们的磨损曲线呈直线，因为熔

覆接箍硬度较高，在很短的时间内接箍就与油管内壁耐磨损性高的相变硬化带接触，未强化区没有完全参与磨损，硬化带起支撑作用，虽然油管相变硬化带渐渐被磨去，强化作用降低，但由于其支撑作用，油管磨蚀失重基本稳定，从图中我们看到 5 号相变油管失重较 3 号相变油管要低，这是因为与 5 号相变油管组合的 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍中 WC 减磨效果比较好；从图中我们也可看出，1 号、5 号相变油管的磨蚀失重趋势始终低于 3 号相变油管。

从图 5-12 上可以看出，与相变硬化油管对磨时，熔覆接箍失重明显比普通接箍的低，因为 Ni35、Ni60 包 30%WC 熔覆接箍表层硬度分别高达  $460\text{HV}_{0.3}$ 、 $648\text{HV}_{0.3}$ ，为普通接箍的 2~3 倍；Ni35、Ni60 包 30%WC 熔覆接箍的失重率比较接近，且熔覆接箍磨蚀失重曲线基本趋于稳定。受设备空间的限制，试验中设计的冲程仅为 200mm，而实际的摩擦冲程要长得多，约为 4~5 米，油管摩擦部位的面积相对较大，接箍摩擦部位面积相对较小，因此在实际工作环境中，抽油杆接箍的偏磨程度更严重，则需要接箍的耐磨损性要比油管的好；从图中我们也可看出 3 号、5 号接箍的磨蚀失重趋势始终低于 1 号接箍。

综上所述，结合摩擦副整体配合失重，5 号相变油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副比较好，即激光相变硬化处理的油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍相互配合时，抽油杆管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高，这与从整体磨蚀率直方图中得到的结论一致。

### 5.3 本章小结

- 1) 无论是普通油管还是相变硬化油管与熔覆接箍对磨时的磨蚀失重较之与普通接箍对磨时要高。
- 2) 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍对磨，相变硬化油管的磨蚀率要比普通油管的低。
- 3) 无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨，激光熔覆 Ni35、Ni60 包 30%WC 合金粉末后的接箍的磨蚀率亦明显要比普通接箍的低得多，约为普通接箍的 1/10。
- 4) 因为在实际摩擦副中接箍的摩擦行程要长的多，因此我们要求接箍要相对耐磨一些，故相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍摩擦副为较优配合。

## 结 论

- 1) N80 油管激光相变硬化处理后, 由表及里可以分三个区: 相变硬化区、热影响区和基体。相变硬化区的组织为黑色细针状淬火马氏体和少量残余奥氏体, 白色铁素体, 仍呈带状分布; 热影响区的组织靠近相变区部分为马氏体和少量残余奥氏体, 靠近基体部分为铁素体和珠光体。
- 2) 接箍激光熔覆镍基合金粉末后, 由表及里分为熔覆层、HAZ 区和基体; 熔覆层的组织主要由  $\gamma$ -Ni 基固溶体及其上分布着的网状或者针状的硼化物、碳化物和硅化物组成, 由表及里为等轴晶、树枝晶、胞状晶和平面晶(白亮带); 热影响区过渡区域存在一条宽度较窄且在显微镜下较亮呈白色的白亮带; 基体组织为黑色片状珠光体和白色网状分布的铁素体。
- 3) 普通油管的硬度是 HRC24, 普通接箍的硬度是 HRC18.8; 激光相变硬化处理的油管内壁表面的硬度是普通油管的 1.6 倍; 激光熔覆 Ni25 接箍表面硬度比普通接箍硬接近普通油管的硬度; 激光熔覆 Ni35 合金粉末后的接箍表面的硬度是普通接箍的 1.95 倍, 跟激光相变硬化油管硬度相当; 激光熔覆 Ni60 包 30%WC 接箍表面硬度是普通接箍的 3 倍, 激光相变硬化油管硬度的 1.5 倍。激光熔覆 Ni35 接箍距表层 0.46mm 处硬度最高, 在 460HV<sub>0.3</sub> 左右; 油管相变硬化层的最高硬度在 550HV<sub>0.3</sub> 左右, 随着距离表面的深度变大, 硬度随之降低。
- 4) 在水介质的磨损环境下, 普通油管与熔覆接箍对磨时的磨损失重较之与普通接箍对磨时要高得多; 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍对磨, 相变硬化油管的磨损率要比普通油管的低, 约为普通油管的 1/3~1/2; 无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨, 激光熔覆 Ni35、Ni60 包 30%WC 合金粉末后的接箍的磨损率明显要比普通接箍的要低得多, 约为普通接箍的 1/10; 相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍组合的摩擦副比较好, 不论是油管还是接箍整体磨损趋势均比较低, 且经过五天的磨损后油管的相变硬化层仍大量存在, 其磨损率较低、耐磨性较好, 进而激光相变硬化处理的油管与 Ni60 包 30%WC 熔覆接箍相互配合时, 抽油杆管杆摩擦副防偏磨的能力得以提高。通过 SEM 分析可知, 在摩擦磨损过程中, 磨损接触层形成的氧化膜不断剥落, 形成磨屑造成磨粒磨损, 进而管杆间磨损以磨粒磨损为主。
- 5) 在 3.5%NaCl 溶液的磨蚀环境下, 无论是普通油管还是相变硬化油管与熔覆接箍对磨时的磨蚀失重较之与普通接箍对磨时要高; 无论是与普通接箍对磨还是与熔覆接箍

对磨，相变硬化油管的磨蚀率要比普通油管的低；无论是与普通油管对磨还是与相变硬化油管对磨，激光熔覆 Ni35、Ni60 包 30%WC 合金粉末后的接箍的磨蚀率亦明显要比普通接箍的低得多，约为普通接箍的 1/10；因为在实际摩擦副中接箍的摩擦行程要长的多，因此我们要求接箍要相对耐磨一些，故相变硬化油管与 Ni60 包 30%WC 接箍摩擦副为较优配合。

## 参考文献

- [1] 马卫国, 杨新冰, 张利华, 等. 抽油杆管偏磨成因及解决措施研究综述[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(1): 22-26.
- [2] 周忠亚, 邓阳坚. 杆管偏磨的分析与防治[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3): 389-390.
- [3] 朱达江, 林元华, 刘晓旭, 等. 抽油杆/油管的磨损机理及其实验研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(11): 123-126.
- [4] 马占东, 张安德, 肖月杰, 等. 抽油机偏磨井防偏磨综合技术[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 41-43.
- [5] 王海文, 赵雷. HDPE 内衬油管防治抽油机井杆管偏磨研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(2): 74-77.
- [6] 孙天奇, 贾胜彬, 吴军财, 等. 抽油井的防偏磨技术研究[J]. 河南石油, 2004, 18(6): 94-95.
- [7] 韩彬, 王勇. 激光表面改性在石油工业中的应用[J]. 石油工程建设, 2008, 34(2): 15-19.
- [8] 王显彬. 激光表面改性技术的应用及发展[J]. 辅助加工, 2007, (10): 26-28.
- [9] 丁阳喜, 周立志, 等. 激光表面处理技术的现状及发展[J]. 热加工工艺, 2007, 36(6): 69-72.
- [10] 应小东, 李午申, 等. 激光表面改性技术及国内外发展现状[J]. 焊接, 2003, (1): 5-8.
- [11] 吴细毛, 崔振扬, 孙永莹, 等. 激光表面改性技术在电厂中的应用前景[J]. 东北电力技术, 2002, (1): 12-14.
- [12] 张松, 王强, 张春华, 等. 激光表面改性对 NiTi 形状记忆合金腐蚀行为的影响[J]. 材料研究学报, 2006, 20(4): 422-426.
- [13] 李富根. 45 钢表面激光熔合层白亮带的组织结构及形成机理[J]. 金属热处理学报, 1988,(1): 1-9.
- [14] Greenwald L E, Breinan E M and Kear B H. Heat Transfer Proper-ties and Microstructures of Laser Surface Melted Alloys[A]. Ferris S D, Leamy H J , Poate J Metal. Laser-Solid Interactions and Laser Processing, 1978[C]. USA, American Institute of Physics, 1979: 189-195.
- [15] Laridjani Metal. Metastable phase formation in a laser-irradiated Silier-germanium alloy.J

- Mater Sci, 1972, (7): 627-635.
- [16] Mordike B L et al. Surface alloying of iron alloys by beam melt-ing. Proc of the Mater Res Soc Annual Metting, Boston, MA, USA, 1982, 8(3): 463-471.
- [17] Dubourg L., Archambeault J. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007[J]. Surface&Coatings technology, 2008, 122(6): 5863-5866.
- [18] Davim J Paulo, Oliveira C., Cardoso A. Laser cladding: an experimental study of geometric form and hardness of coating using statistical analysis[J]. Engineering Manufacture, 2006, 220(5): 1549-1554.
- [19] Yan T. J., Wang K. S. Effect of Produced Fluid on the Wear Behavior of GradeD Sucker Rod and N80 Type Tubing. Petroleum Sience[J], 2005, 2(2): 116-118.
- [20] 张大伟, 雷廷权, 田贵福. 激光熔覆及其在石油机械中的应用现状[J]. 大庆石油学院学报, 1997, 21(4): 60-64.
- [21] 孟庆武, 秦学民, 万泰力, 等. 金属表面激光熔覆技术在油田的应用[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(1): 63-64.
- [22] 石世宏, 王新林. 激光熔覆化工阀门密封面的实验研究[J]. 激光技术, 1998, 22(6): 333-335.
- [23] 石世宏, 郑启光, 王新林, 等. 激光熔覆阀门零件的研究与应用[J]. 中国机械工程, 1999, 10(5): 586-588.
- [24] 王新林, 漆海滨, 石世宏, 等. 激光熔覆石化阀门密封面熔覆层裂纹控制的研究[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 359-363.
- [25] 王新林, 郑启光. 石油化学阀门激光熔覆层凝固组织控制的研究[J]. 光电子激光, 2002, 13(3): 285-287.
- [26] 姜骥凤, 王征祥. 抽油泵缸套的激光热处理[J]. 金属热处理, 1989, (6): 43-44.
- [27] 钱晖. 组合抽油泵缸套的激光淬火[J]. 石油机械, 1997, 25(1): 34-35.
- [28] 王扬, 邓宗全, 曲存景, 等. 抽油泵整体泵筒激光表面淬火[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 40-42.
- [29] 王优强, 李忠晓, 刘立涛. 油管涂层的摩擦学性能实验研究[J]. 润滑与密封, 2002, 32(1): 76-78.
- [30] 肖建洪. 氮化防腐油管的研究与应用[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5): 66-68.
- [31] 魏斌. 碳铬复合树脂内涂层油管技术研究[J]. 石油机械, 2009, 37(3): 8-15.

- [32] 马洪伟. 油管内壁激光表面强化研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009.
- [33] 李洪生, 马建军. 双向保护抽油杆接箍防偏磨技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2006, (6): 88.
- [34] 白连庆. 表面磷化处理技术在油管接箍上的应用[J]. 新技术新工艺, 2005, (4): 59-60.
- [35] 李殿国, 刘广和, 关玉双, 等. 抽油杆防脱落磨接箍[J]. 石油矿场机械, 1996, 25(6): 38-39.
- [36] 宋杰, 张庆茂, 林晓聪, 等. 40Cr钢表面激光熔覆层的磨损性能[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 52-54.
- [37] 吴萍, 姜恩永, 赵慈, 等. 激光参数对Ni基熔覆层结构及耐磨性的影响[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 44-47.
- [38] 王优强, 刘丙生, 王民轩, 等. 油井管杆磨蚀试验研究. 青岛理工大学学报[J], 2005, 26(5): 1-5.
- [39] 刘丙生, 王优强, 宋开利, 等. 抽油井管杆摩擦副耐磨蚀性能试验研究[J]. 润滑与密封, 2005, (5): 50-54.
- [40] 颜廷俊, 王奎升, 郭立谦, 等. 抽油杆/油管耐磨涂层摩擦磨损特性试验研究[J]. 润滑与密封, 2004, 164(4): 46-48.
- [41] 朱丽霞, 李金凤, 韩新利, 等. 非调质N80油井管钢的典型组织缺陷分析及其影响[J]. 钢管, 2008, 37(1): 34-37.
- [42] 单春艳, 李春福, 程立章. 油田用抽油杆断裂分析[J]. 理化检验-物理分册, 2008, 44(4): 203-208.
- [43] Kermani M. B., Morshed A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production-a compendium [J]. Corrosion, 2003, 59 (8): 559-683.
- [44] 周琦, 付希圣, 黄淑菊, 等. 石油专用管中的带状组织对低温区 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26 (11): 472-479.
- [45] Schmitt G. Understanding localized CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steel from physical properties of iron carbonate scales [J]. Corrosion, 1999, 55 (2): 38.
- [46] Hara T., Asahi H., Kawakami A. Effect of alloying elements on carbon dioxide corrosion in 13% to 20% chromium-containing steels [J]. Corrosion, 2000, 56 (4): 419-428.
- [47] Kinsella B., Tan Y. J., Bailey S. Electrochemical impedance spectroscopy and surface

- characterization techniques to study carbon dioxide corrosion product scales [J]. Corrosion, 1998, 54 (10): 835-842.
- [48] 邱星武, 李刚, 陈华, 等. 激光相变硬化技术发展现状及展望[J]. 热处理技术与装备, 2009, 30(1): 4-7.
- [49] 费群星, 张雁, 谭永生, 等. 镍基合金激光熔覆成形的快速凝固组织特征研究[J]. 应用激光, 2007, 27(3): 169-174.
- [50] 郭丽环. 材料表面的激光合金化[J]. 大连大学学报, 2003, 24(2): 16-19.
- [51] 张光钧. 45钢表面激光熔覆镍基纳米 WC/Co 镀层显微组织研究[J]. 机械制造, 2006, 44(497): 59-62.
- [52] 刘怀喜, 闫耀辰, 关飞飞, 等. 激光熔覆Ni基合金的工艺和组织研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(4):33-35.
- [53] 张晓东, 董世运, 徐滨士, 等. 45钢表面激光熔覆Ni35合金涂层的组织及性能[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(3): 73-46.
- [54] 郭伟, 赵田臣, 马宁博, 等. 碳化钨对激光熔覆层组织和耐磨性的影响[J]. 辽宁化工, 2007, 36(1): 16-19, 22.
- [55] 郑双七, 王豫. 45 钢激光熔凝的组织与性能研究[J]. 金属热处理, 2006 (增): 153-155.
- [56] Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat of Solids [M]. Oxlord, clarendon press, 1990: 59-63.
- [57] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 170-178.
- [58] 靳自齐, 尚本立, 王圣雄, 等. 摩擦与磨损[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 4-8.
- [59] 邵荷生, 曲敬信, 许小棣, 等. 摩擦与磨损[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992: 121-123.
- [60] 张光明, 王勇, 韩彬, 等. 激光表面改性油管与接箍磨损配合研究[J]. 润滑与密封, 2010, (4).
- [61] 李建明. 耐磨与减摩材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 189.

## 攻读硕士学位期间取得的学术成果

- [1] 张光明, 王勇, 程义远, 等. 粉芯丝材电弧喷涂参数优化及涂层抗高温性能. 腐蚀与防护, 2010, 31(2): 135-138.
- [2] 张光明, 王勇, 韩彬, 等. 激光表面改性油管与接箍磨损配合研究. 润滑与密封, 2010, (4).

## 致 谢

本文论是在导师王勇教授的悉心指导下完成的，值此论文完成之际，谨向我的导师致以最诚挚的谢意！

我在攻读硕士期间，一直得到导师的精心指导，导师渊博的学识、严谨的治学态度、认真负责的敬业精神都给我留下了深刻的印象。我从他那里学到的不仅是宝贵的知识，而且还学到了做人、做事所必须具备的严谨求实的态度，这必将使我在今后的学习与工作中受益匪浅。此外，导师在课程学习、课题研究和日常生活等方面都给予了我无微不至的关怀和照顾。在此，谨向导师致以深深的敬意和衷心的感谢！

特别感谢课题组的韩彬老师、赵卫民老师、董立先老师、韩涛老师和孙建波老师，本课题在整个研究过程中得到他们的无私关怀和指导；感谢课题组的程义远师兄、李美艳师姐、黎超文师兄、张贵芝师妹和王楠楠师妹在学习和工作中给予我的无私的帮助；还要感谢同课题组的其他同学，在此一并表示由衷的谢意！

感谢我和我生活学习了七年的同学，感谢所有支持和帮助过我的人！