

油管内涂抗磨新材料及涂覆工艺的研究与应用

(石油与天然气工程)

指导老师: 王业飞(教授)

陈 军(高级工程师)

摘 要

胜利油田经过 40 余年的开发, 已进入开发中、后期, 随着油井含水的上升和提液强度的加大, 有杆泵抽油井中管杆的磨蚀问题越来越严重。这不仅缩短了油井的生产周期, 增加了作业井次及作业费用, 而且使油管、抽油杆报废严重, 造成了油田开发成本的大幅增加。为解决高含水期油井管杆偏磨问题, 文章分析了碳锆复合树脂涂料的成分及特性, 通过试验的方法研究了以碳锆复合树脂为核心的油管涂层高温高压防腐性能、附着强度和抗磨、减磨性能; 并根据其特性研究规划、设计了油管涂层生产线系统, 为碳锆复合树脂涂层油管的产业化提供了生产保证。该技术经过产业化现场应用, 能有效减缓管杆偏磨作用, 延长偏磨井免修期, 减少管杆投入, 有效解决油管腐蚀和冲刷问题, 为油田开发进入高含水期抽油机井管杆偏磨问题提供了一种性能优良、配套简单、施工方便的抗磨蚀油管生产技术, 对油田降本增效具有显著的经济效益和社会效益。

关键词: 油管抗磨 新材料 涂覆 应用

The study and application of blanketing new material resisting-scrape inside the oil-tube and the blanketing technology

(Oil and Natural Gas Engineering)

Directed by Professor WANG Ye-fei and CHEN Jun

Abstract

With the 40 years development, the shengli-oil-field has gone into the intermediary and later stage, and the containing water rate of the oil well is increasing, the difficulty to raise the liquid has enhanced, the etch has become seriously when the rod pump whips the polished staff. That cuts down the production period of the oil well, increases the operation expense and the operation time, makes the oil tube and whipping staff become waste sooner. Therefore it increases the exploitation cost. In order to resolve the partial scraping problem of the rod and casing in the well, this text analyses the component and the character of the composite resin paint with carbon and zirconium. By means of the test, we studied the performance of the oil tube blanket with the composite resin paint, which includes the high temperature-high pressure-resisting etch, adhere intensity, resisting and reducing scrape. Based on the character, we plan and design the manufacture system of oil-tube paint. It supplied the guaranty for the industrialization of the component and the character of the composite resin paint with carbon and zirconium. After the industrialization, this technique is applied

on the spot, which can induce the partial scraping of the rod and casing, prolong the exempt-from period, decrease the rod and casing expense, resolve the problem of tube-etch and scour. That can supply the producing technique which has better resisting etch and resisting scrape for the oil-field exploitation, and since the auxiliary is simple, and the operation is convenient, the technique has significant economic and social benefits in the decreasing-cost and increasing-benefit aspect of the oil-field.

Key word: oil tube resisting scrape, new material, the blanketing technology, The study and application

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国石油大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 王可强 2007年 5 月 20 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国石油大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件及电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

学生签名： 王可强 2007年 5 月 20 日
导师签名： 王可强 2007年 5 月 20 日

第1章 前言

1.1 目的及意义

胜利油田经过 40 余年的开发,已进入开发中、后期,随着油井含水的上升和提液强度的加大,有杆泵抽油井中管杆的磨蚀问题越来越严重,因此造成的油井维护工作量大幅上升,而且有逐年上升的趋势。2006 年上半年的调研统计数据表明,胜利油田分公司 10 个采油厂总油井数是 17940 口,现开井 14083 口,其中抽油机井 12381 口,占总开井数的 87.9%,在这些抽油机井中存在明显管杆偏磨问题的油井有 2537 口,占抽油机井开井数的 20.5%,且偏磨油井遍及 10 个采油厂各类油藏。随着油田开发的不断深入,胜利油田处于高含水开发期,油田综合含水达到 90%以上。油井井液含水大幅度上升,杆管间的工作环境逐渐恶化,润滑性能变差,而且由于侧钻井、斜井的增多等多种因素的综合作用,使得抽油机井管杆偏磨问题越来越严重。抽油机井的管杆偏磨主要危害有以下两方面:

一方面由于管杆偏磨造成了油井生产周期缩短,大大增加了作业井次及作业费用。据统计,管杆偏磨井中生产周期小于 180d 的偏磨油井 1397 口井,占总偏磨井数的一半以上,达到了 55.7%。偏磨井生产周期统计见表 1-1。

表 1-1 偏磨井生产周期统计

采油厂	偏磨井按生产周期分类			
	井数, 口	<90d	90~180d	>180d
现河	390	110	172	108
桩西	111	0	4	107
胜利	169	43	93	33
滨南	261	10	67	184
孤岛	388	35	121	232
东辛	502	134	325	43
孤东	100	13	20	67
临盘	376	63	120	193
纯梁	156	19	32	105
河口	55	0	16	39
合计	2508	427	970	1111
占偏磨井比例, %		17	38.7	44.3

由于生产周期的大幅缩短，造成了偏磨井多轮次作业井数逐年增多，维护作业工作量大大增加。胜利油田因管杆偏磨造成的年作业井次为 3395 井次，因此产生的作业费用约 14200 万元。偏磨井作业井次及作业费用统计见表 1-2。

表 1-2 偏磨井作业井次及作业费用统计

采油厂	现河	滨南	纯梁	孤岛	河口	桩西	胜采	东辛	临盘	孤东	合计
作业井次, 井次	652	250	270	221	66	87	567	716	514	52	3395
作业费用, 万元	单井作业劳务费用 4.2										14259

另一方面因抽油机井管杆偏磨造成了油管、抽油杆报废严重，增加了生产成本。年报废抽油杆 $98.8 \times 10^4 \text{m}$ ，报废油管 $132.8 \times 10^4 \text{m}$ ，管、杆年投入费用 18195 万元，见表 1-3。

表 1-3 胜利油田分公司偏磨井材料成本统计

单位	偏磨井抽油杆			偏磨井油管		
	年用量 10^4m	年报废 10^4m	年投入 万元	年用量 10^4m	年报废 10^4m	年投入 万元
现河	75.8	16	728	86.8	25	1302
滨南	24.0	7.8	298	35.7	9.6	1191
纯梁	26.2	7.5	236	26.5	7.5	709
孤岛	33.3	1.3	134	52.8	0.36	253
河口	2.3	2.3	63	1.4	1.4	39
桩西	4.1	3.2	104	4.5	3.42	137
胜采	31.9	23	880	28	25	2038
东辛	115.3	25.6	2016	194	43.1	6936
临盘	30.7	11.4	195	33.5	16.22	632
孤东	3.8	0.7	225	4.1	1.1	79
合计	347.4	98.8	4879	467.7	132.8	13316

通过上述分析可以看出,管杆偏磨问题已成为高含水期抽油机井开采的主要矛盾之一。因此,如何研究一种新技术以提高油管、抽油杆的抗磨防腐性能,对延长偏磨油井免修期、节约作业费用及管、杆投入费用,具有重大意义。

1.2 国内外现状

1.2.1 胜利油田油井管杆偏磨现状

胜利油田管杆偏磨问题普遍存在,通过调研统计表现为如下规律:

1.2.1.1 井身结构的变化必然造成管杆接触偏磨

①由于油井井斜角的变化,在造斜点以下造成了抽油杆和油管的必然接触,产生管杆偏磨。据统计,胜利油田偏磨斜井占到总偏磨井数的69.1%,达到1628口。斜井井斜角从几度到几十度不等,桩西采油厂桩139块井斜角最大达到60°左右。通过对占同类抽油机井的比较可以看出,井斜角越大,偏磨越严重。为适应油井生产的需要,油田开发进入中后期,斜井、定向井的比例越来越大,且造斜点越来越浅。以东辛采油厂为例,目前斜井比例已达到开井数的40%,造斜点在300m~400m,多数井的泵挂已下到造斜点以下。

②对于直井,由于方位角的不断变化造成管杆的接触偏磨。另外由于注水开发、酸化压裂等措施造成老井地应力的变化,挤压套管产生变形,造成管杆的接触磨损。

现场统计资料表明,对于泵挂下到造斜点以下的油井均存在偏磨问题,所以,井身结构的影响是造成油井管杆偏磨的固有因素,也是造成油井管杆偏磨的主要因素。

1.2.1.2 管杆运动受力失稳弯曲造成管杆的接触磨损

在直井或斜井的直井段,抽油杆与油管的相对运动构成了管杆偏磨的基本条件,而抽油杆往复运动的受力状况则是管杆偏磨的必要条件。细长的抽油杆在狭小的油管空间内作往复运动,由于受各种力的综合作用,抽油杆在下行过程中往往产生失稳弯曲,造成管杆的接触产生偏磨。

①管杆失稳弯曲现象随着抽油泵泵径的增大、冲次的增加和泵挂深度的

增加而加重。泵挂越深管杆失稳偏磨现象越严重。据统计,各种泵挂深的油井均普遍存在偏磨现象,泵挂大于 1500m 的偏磨井占到同泵深抽油机井的 37.7%,比例最高。东辛采油厂平均泵挂达到 1467m,泵挂达到 2300 米以上的小泵深抽井约 100 口井,泵挂最深达到 2800m。这部分井普遍存在偏磨问题。孤东、孤岛等采油厂抽油机类型以六型和八型机为主,由于受抽油机参数的限制,其生产参数大多为短冲程、高冲次的生产模式。孤东采油厂偏磨油井中冲次在 6min^{-1} 以下的占同冲次油井数的 4.0%, $6\text{min}^{-1}\sim 9\text{min}^{-1}$ 的占同冲次油井数的 8.6%, 9min^{-1} 以上的占同冲次油井数的 14.8%。由于冲次过高不仅加快了抽油杆疲劳老化的速度,而且使管、杆偏磨情况更趋严重。据统计,偏磨井偏磨部位一般分布在中下部,偏磨井段在管柱中、下部的偏磨井占到总偏磨井数的 79.4%,管柱下部偏磨占到总偏磨井数的 51.6%。

②对于注聚合物抽油机井,由于产出液中聚合物的影响,粘度增大,导致抽油杆柱在下行过程中阻力过大,失稳弯曲造成管杆的接触磨损现象严重。目前孤东、孤岛、胜利等采油厂这个问题比较普遍。例如:孤岛采油厂注聚驱偏磨井 215 口,占注聚驱抽油机井开井数的 58.58%,非注聚驱偏磨井 172 井次,占非注聚驱抽油机井总开井数的 11.18%,注聚单元偏磨几率高于非注聚单元 47.4%。

1.2.1.3 井液介质的腐蚀加剧了管杆偏磨

研究表明,随着井液含水的上升,油井产出液含水在 60%~70% 时,产出液物性由油包水型转换为水包油型。此时,管杆壁失去了原油的保护,直接与产出水接触,腐蚀速度加快,同时摩擦的润滑剂由原油变成产出水,管杆壁失去了原油的润滑作用,磨损速度加快。由于胜利油田高含水、高矿化度开发普遍存在,电化学腐蚀是井下管杆腐蚀的主要形式之一,这种腐蚀加剧了管杆的磨损。据统计,当矿化度大于 20000mg/L 时偏磨井的比例明显增加,占到了同类别井的 61%。

通过上述统计表明:胜利油田油井管杆偏磨的原因复杂多样,其原因归结起来可分为三个大的方面:一是井身结构的影响;二是管、杆运动受力的影响;三是产出液物性和杂质的影响。这三方面并不是相互独立的,而是相辅相承、相互作用的。这三方面因素的共同作用加剧了抽油机井的管杆偏磨。

1.2.2 防偏磨技术现状

胜利油田经过多年的偏磨治理,综合运用了多种防止油井管杆偏磨的技术和工具,按照防偏磨技术原理可分为锚定类、加重类、扶正类、旋转类、抗磨类等技术类别。通过不同的技术组合形成了直/斜井防偏磨配套技术系列,对于特殊偏磨井采用转型的举升工艺技术。

1.2.2.1 抽油机井偏磨治理工艺配套技术

根据胜利油田杆管偏磨治理现状,防偏磨工具配套技术应用最多、效果最好的是:“抽油杆扶正类+杆柱加重类+油管锚定类”的管杆配套模式。

其原理是,通过锚定油管,避免油管柱弹性伸缩弯曲造成油管、抽油杆接触偏磨;通过杆柱底部加重,减轻杆柱受压弯曲,增强杆柱中和点以下稳定性,减轻管杆偏磨;通过扶正类技术防止抽油杆柱失稳弯曲,避免油管、抽油杆接触磨损。该工艺较为实用,在油田各采油厂的偏磨井上大量应用,总计应用近 870 井次,平均延长生产周期约 70d。

该套技术中,其核心技术是扶正类,各采油厂配套应用的扶正类技术,主要有尼龙扶正器、滚轮扶正器、碳纤维扶正器、HW 防磨扶正杆技术等。这些技术大多采用了抗磨性能较好的扶正器材料,其原理是首先消耗掉扶正体自身,在扶正体磨蚀到一定程度后,管杆再接触磨损,达到减缓管杆偏磨的目的。这套技术在使用中虽起到了一定的效果,但不够理想,总体延长偏磨井生产周期仅为 30d 左右。

1.2.2.2 旋转类

主要包括旋转井口、抽油杆技术:这类技术通过对井下油管定时旋转或定期转动抽油杆,达到油管、抽油杆由径向单向点式磨损改为均匀周向磨损,延长偏磨井生产周期。这类技术在孤岛、现河、临盘、东辛、胜利等采油厂应用,年用量达到 350 余井次,平均延长生产周期约 60d。该类技术不能在真正意义上解决管杆偏磨问题,存在故障率高,短期内失效等问题。

1.2.2.3 抗磨类

抗磨类技术主要有硬质合金喷焊抗磨接箍和表面镍磷镀、镀铬处理的抗磨接箍等。该类技术特点是通过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。该技术目前在胜利油田各采

油厂都进行了应用,年用量约 6.3 万个,近 1000 井次。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。

该技术与普通油管配套应用时,由于其硬度较高,经常出现将油管磨穿问题。例如:在现河采油厂河 68-斜 53、河 3-22 井使用双向接箍,分别使用 105d、163d 后均出现了对应部位油管被磨漏的情况。2006 年 1-5 月双向接箍技术应用 31 井次,因磨损油管严重,检泵周期明显缩短,使用前为 163d,使用后生产周期为 135d。目前,现河、胜采等采油厂均已停用。

1.2.2.4 偏磨治理转型采油工艺

在井身轨迹复杂、油藏状况差、偏磨严重的油井上,采取有别于机杆泵的偏磨治理采油工艺。

①连续抽油杆采油技术:该技术具有抗拉强度高、重量轻、耐疲劳、耐腐蚀等特点。在小泵深抽偏磨井中应用,可以显著降低抽油机悬点载荷,消除了接箍的活塞效应,减缓偏磨,泵挂最深已下到 2800m。另外,连续杆配套大排量螺杆泵用于偏磨井,解决管杆偏磨问题。目前在胜利油田应用约 34×10^4 m, 180 余井次,平均延长生产周期 80d。

②螺杆泵采油技术:该技术将抽油杆的上下往复运动改为旋转运动,用于偏磨井大大减缓了磨损,且流量均匀。在高粘度原油中能以较高的效率工作,节能效果显著,目前已在胜利油田应用 130 余井次,平均延长生产周期约 110d。

③小电泵采油技术:应用小电泵不存在管杆的相对运动,用于严重偏磨井,能从根本上解决管杆偏磨问题。该项技术已在各采油厂应用 87 井次,平均延长生产周期 160d,但该技术存在的最大问题是能耗大。

1.2.2.5 防腐技术

由于油井高含水、高矿化度的开发现状,大大加剧了管杆偏磨问题,所以油井防腐非常重要。目前针对电化学腐蚀问题主要应用了固体长效缓蚀剂、阴极保护等防腐技术。

①固体长效缓蚀剂:是将无机固体缓蚀剂(经高温合成法制备而成),装入尾管中,通过缓慢溶解、缓慢释放和工具控流等方法达到长效缓蚀的效果。该技术目前主要在东辛、现河、孤岛等采油厂应用,大大减轻了高含水

期的管杆腐蚀问题。例如：孤东采油厂以八区馆下、东营组及沙河街油井为防腐防偏磨配套示范区，通过治理，2005年共实施55井次，措施井的平均生产周期达到了220d，比措施前121d的平均检泵周期延长了99d。

②阴极保护，是将防腐短接随管杆下入井中，与管杆连接形成原电池，在油管柱上每隔50m-100m加装一节防腐短接，通过牺牲阳极达到防止管杆腐蚀的目的。

1.2.2.6 特种油管技术

特种油管技术的共同特点是通过处理油管内表面，增强油管的耐磨防腐性能，延长管杆的使用寿命。如：涂层油管、镀层油管、玻璃钢内衬油管、不锈钢内衬油管等技术。目前应用较广泛的有涂料和镀层工艺生产的特种油管技术。

①镍磷镀油管

镍磷镀是应用电化学的原理，利用合适的还原剂使溶液中的 Ni^{2+} 和 H_2PO_2^- 有选择性的在经催化剂活化的金属表面上还原析出金属镀层的一种处理方法。这种防腐工艺加工费用相对较低，具有镀层均匀、结合力强等优点，在运输和下井过程中镀层不易被损坏，能起到较好的防腐效果。镍磷镀油管就是利用这种原理在油管表面均匀地涂镀一层镍磷合金防腐层的防腐油管。根据镀层可以分为：全镍磷镀油管和镍磷内镀防腐油管两种。镍磷镀油管该防腐层解决了高温防腐问题，具有镀层致密、均匀光亮、耐腐蚀、耐高温和防腐、防垢等特点，具有较好的耐磨性能，现场应用规模大，防腐效果好且价格低廉。但在应用过程中发现：

一是全镀油管外镀层电位高，容易与套管内壁形成原电池，加剧套管的腐蚀；

二是镀层较脆，管钳夹持部分镀层易脱落，裸露部分的腐蚀降低了整条管柱强度。

三是根据现场对比油管防腐效果受油层温度、注入水矿化度的影响比较大。温度越高、矿化度越高防腐效果越差。

②氮化油管

抗蚀氮化后在油管内壁及管螺纹表面形成含氮、碳的 ϵ 相和 γ 相以及含氮奥氏体淬火层，称为白亮层。由于该层晶格密度高、均匀致密，铁原子

难以失去电子,从而在一般侵蚀剂中具有良好的抗蚀性能。处理层厚约 0.4mm,表面硬度高,抗腐蚀性能好。根据试验氮化油管具有以下特性:

一是由于在油管表面形成了致密均匀的耐蚀白亮层,有氮化层时腐蚀速率大大降低,比无氮化层存在时腐蚀速率降低 4 倍-7 倍;氮化层在实验室采用的油田模拟腐蚀环境中有很好的抗蚀性;

二是不粘扣特性:由于经过氮化处理的油管螺纹不改变尺寸精度,保证管螺纹正常啮合,而且表面硬度高,对油管螺纹副失效有良好的保护作用。但现场应用反映由于表面硬度高,用液压钳上扣时容易打滑。

③不锈钢内衬油管

不锈钢内衬油管是在普通油管的内表面焊接一层厚度为 0.5mm 的不锈钢内衬,内衬是将不锈钢皮卷成筒状后在连接处进行焊接而成。一般具有以下特点:

一是在保证长焊缝的密封性能情况下,防腐效果良好。

二是由于长焊缝的密封性能不能保证,试验效果不很理想而没有得到推广应用。试验中发现其缺点主要在以下几个方面:不锈钢皮连接处焊缝长,焊后密封性很难保证,井液中的水质容易通过焊缝缺口进入油管与内衬的环空中而腐蚀油管;受油管弯曲变形的影响,内衬两端焊口处容易破损;内衬薄,容易弯曲变形,且焊口不平整,管柱有效途径减少。

④玻璃钢内衬防腐油管

玻璃钢内衬防腐油管是在普通油管内壁粘结一层厚度约 1mm 的玻璃钢内衬。这种油管曾经于 2001 年至 2002 年在胜利油田东辛采油厂应用过 20 多井次,后由于多种原因而没有得到推广应用。其主要缺点有三方面:

一是由于井下温度的变化以及井底压力的波动都易引起油管的弯曲变形,玻璃钢内衬随着油管的变形,经过多次伸缩后极易断裂、脱落。

二是随着时间的推移,井液中的水质容易侵袭到内衬与油管的粘结面处,从而引起油管的腐蚀。

三是玻璃钢内衬易老化,耐温低(约 90℃),在高温井中的应用受到限制。

总体来说,目前应用的防偏磨技术复杂多样,大多从管杆柱结构上进行优化设计,或局部采用抗磨技术达到延长油井免修期的目的,取得了一定的

效果。目前应用的特种油管技术大多主要用于防腐，解决油管在井下的腐蚀问题，应用于偏磨井具有抗磨、防腐双重特性的特种油管技术未见报道。

第2章 油管内涂抗磨新材料的试验研究

为满足高含水期油田对抗磨防腐油管涂层新材料的需求，通过对用于油管内涂的抗磨新材料进行研究，形成了以碳锆复合树脂涂料技术为核心的碳锆复合树脂内涂层油管生产技术。碳锆复合树脂涂料技术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，粉末涂料涂覆在油管内表面，形成一层具有超强耐磨和优良防腐性能的保护层，使油管具有防腐、抗磨的双重作用。

碳锆复合树脂涂料属于绝缘性粉末材料，生产涂层油管时采用管体旋转加热、后退式喷涂工艺，喷涂温度 230℃~250℃，固化温度 180℃~200℃，涂层厚度 0.7mm~0.8mm。其主要成分有二氧化硅、石墨、复合尼龙、环氧树脂及稀有金属等材料。碳锆复合树脂涂料性能参数见表 2-1。

表 2-1 碳锆复合树脂涂料性能参数

序号	项目	质量指标
1	外观	色泽均匀、无结块
2	密度, g/cm ³	1.3~1.65
3	粒度分布	>150 μm 的不大于 3.0% >250 μm 的不大于 2.0%
4	不挥发物含量, %	≥99.4
5	胶化时间, s	≤180 (180℃) ≤120 (200℃) ≤60 (230℃)
6	水平流动性, mm	22~28
7	磁性物含量, %	≤0.002

碳锆复合树脂涂料作用机理是：

- 一是添加二氧化硅提高涂层的抗磨能力和防腐能力；
- 二是采用超细、低吸水率多元复合尼龙粉来提高涂层的抗冲击能力和耐磨性能；
- 三是应用 E 型环氧树脂和特种固态润滑剂来提高涂层表面的光洁度，降低涂层摩擦系数；
- 四是使用多元固化聚合物来保证环氧树脂固化强度以及涂层与油管内壁的

结合强度，提高涂层的附着力。

通过试验研究的方法来研究碳钎复合树脂油管涂层在井下应用的抗磨和防腐性能，达到用于偏磨井具有抗磨防腐作用，用于注水井具有防腐防垢作用。具体试验测试内容包括：油管涂层及涂料表面形貌分析、油管涂层高温高压性能试验、油管涂层耐磨性能标准试验、管杆配对往复模拟耐磨试验、油管涂层物理机械性能试验等。

2.1 油管涂层及涂料表面形貌分析研究

2.1.1 试验目的

用扫描电子显微镜对比碳钎涂料粉末、及涂料油管的表面形貌，分析抗磨涂层的抗磨防腐机理。

2.1.2 试验设备

扫描电子显微镜

型号：S-3500N；主要性能：

- a. 分辨率 3 nm
- b. 放大倍数 15倍~20万倍
- c. 景深 比光学显微镜大100倍~500倍，比投射电镜的景深大10倍
- d. 阴极 钨灯丝

扫描电子显微镜主要由电子光学系统（包括电子枪、电磁透镜、电磁线圈、样品室），信号检测放大系统，真空系统和电源系统三个基本部分组成。其工作原理是利用扫描电子束在样品表面激发出的物理信号调制成像，来显示样品的微观形貌。

2.1.3 试验方法

试验材料：原始涂料，N80 涂层油管。

试件制备：由于涂料中非金属成分偏多，导电性不好，用扫描电子显微镜观察时会造成电荷积累，图像不稳定，对仪器也有损坏。故需对粉末材料进行处理，首先用双面胶纸贴在一小块玻璃上，再放上少量涂料粉末，粘好后放入离子溅射

仪中，半个小时后，表层会喷涂上一层极薄的金属，使涂料的导电性能加强，SEM图像稳定，粉末材料试件编为1号。

将 N80 涂层油管制成 15mm×15mm 的试件 2 份，编为 2 号和 3 号。将 3 号试件放入 90℃~℃95 清水中，保持 48h。2 号试件作为参照试件。

2.1.4 扫描结果

三个试件的表面形貌扫描结果分别见图 2-1~图 2-3。

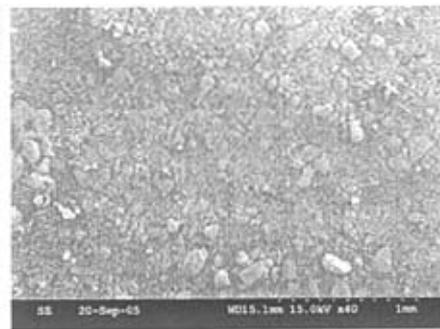


图 2-1 1 号试件表面形貌



图 2-2 2 号试件表面形貌

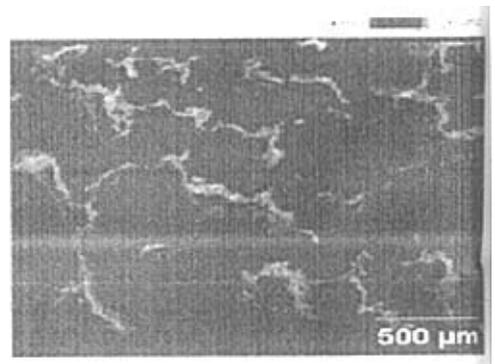


图 2-3 3 号试件表面形貌

由图 2-1 可以看出，碳钎复合树脂涂料为颗粒状粉末形态，颗粒直径大小不一，尺寸差别较大，涂料的各种物质呈混相状态，是一种混合物质。

由图 2-2 可以看出，碳蜡复合树脂粉末经过在一定条件下熔融、固化后生成的涂层为固态物质。该物质呈网状交联，有一些孔洞，具有微观弹性，能吸收一定的正向压力。

由图 2-3 可以看出，经过在 90℃~95℃水中保温 48h 后的涂层性能稳定，表面平整，没有膨胀、起皱现象，证明该涂层具有较好的热稳定性。

2.2 油管涂层高温高压性能试验研究

2.2.1 试验条件

2.2.1.1 试验环境

试验介质采用胜利油田胜采三矿污水处理站的污水，总矿化度达到 30807 mg/L，其离子含量如表 2-2 所示。

表 2-2 腐蚀介质组成

种类	K ⁺ +Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Fe ²⁺	Fe ³⁺
mg/L	18304.1	9.7	20.0	11036.9	163.3	961.1	303.0	5.3	4.0

2.2.1.2 试验条件

试验时间为 120h，压力 34mPa，温度 130℃，CO₂ 分压 3.0mPa。

2.2.1.3 试验装置

试验装置采用美国 Cortest 公司生产的 34.4×10⁶Pa 的动态高压釜，示意图见图 2-4。

2.2.1.4 试验试样

在涂层油管上截取 30mm 长涂层管体，另制环形、平板试样各一。

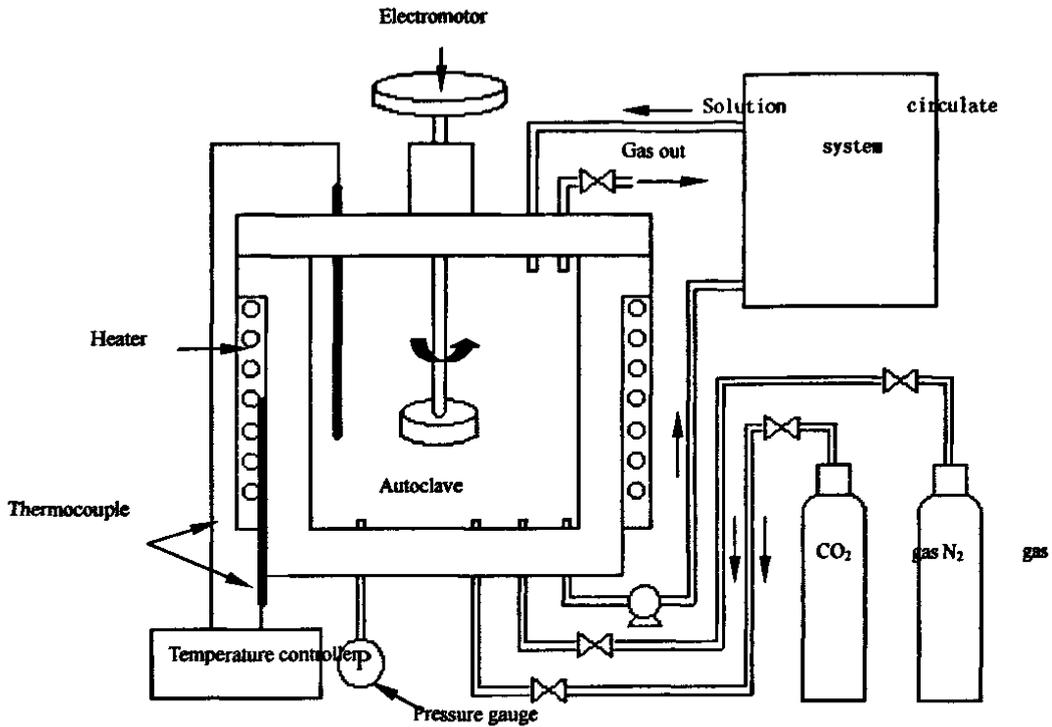


图 2-4 试验装置示意图

2.2.2 试验过程

将试样除涂层以外的所有面用环氧树脂密封，以保证介质不从涂层和管壁之间浸入。将三个平行试样相互绝缘放入高压釜内的溶液中；通 N_2 除氧 2h 后，将高压釜密封，升温升压。试验温度为 $130^\circ C$ ， CO_2 分压 3.0mPa ，试验时间 120h。试验结束后，将釜体自然冷却到 $25^\circ C$ 缓慢降压，将试样取出，用清水冲洗，立即进行外观检查，随后进行附着力测试。方形平板样也按类似方法进行试验和检测。

2.2.3 试验结果

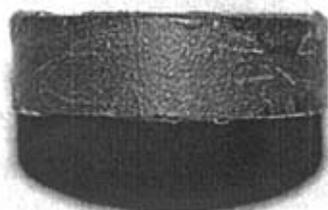
试验前对试样的外观进行检测，涂层均匀、未发现气泡、桔皮和流挂等可见缺陷见图 2-5。试验结束后，将试样从釜内取出，立即进行外观检查，三个试样均未发现涂层变软、膨胀和涂层内部起泡沫状气泡或疏松现象，但涂层颜色轻微泛红。如图 2-6 所示。涂层颜色变化原因主要是由于试验溶液中 Fe^{3+} 离子和 Fe^{2+} 离子沉积及 Fe^{2+} 离子在空气中的氧化所致。



图 2-5 试验前原始管样



平板试样



环形试样

图 2-6 试验后涂层表现

试验前和高温高压试验后，按 SY/T 0544-1995 标准附录 A《涂层附着力检验方法（刀挑法）》对涂层材料的附着力测试。结果表明，高温高压试验并没有改变该涂层附着力，检验结果均为 A 级，试样外观见图 2-7。



图 2-7 试验后涂层结合力测试

在经过 120h 高温高压试验后，涂层外观变化很小，未发现变软、膨胀和内

部起泡沫状气泡或疏松现象。

按 SY/T 0544-1995 标准,在高温高压试验前和试验后,涂层的附着力基本无变化,测试结果均为 A 级。

2.3 油管涂层耐磨性能标准试验研究

2.3.1 试验目的

对抽油杆和油管的不同材料及表面喷涂处理后组成的摩擦副进行耐磨性试验,并根据试验结果,评价抽油杆和油管材料及表面喷涂处理后的耐磨性。

2.3.2 试验设备与仪器

2.3.2.1 试验机: MG-200 型高温高速摩擦磨损试验机

技术参数: ①最大负荷 2kN, 精度 1%。

②主轴转速 320r/min~3200 r/min, 精度 2%。

③电机: Z2—32 直流电动机, 功率 4kW, 转速 3000 r/min。

④外形尺寸: 主机 956mm×594mm×1580mm;

控制柜 900mm×500mm×2000mm。

2.3.2.2 试验设备

试验装置的组成部分见图 2-8, 包括摩擦试验机主机、测控部分、介质循环系统、加热及温度控制系统。

①测控部分 包括温度、压力、转速等各种传感器、变送器、微机, 以及数据采集、处理和系统控制软件等。

②介质循环系统 包括玻璃水浴、电机-泵系统、吸入管和排出管、吸入和排出控制阀门、介质收集器等, 通过介质循环泵向试样的摩擦界面提供介质。

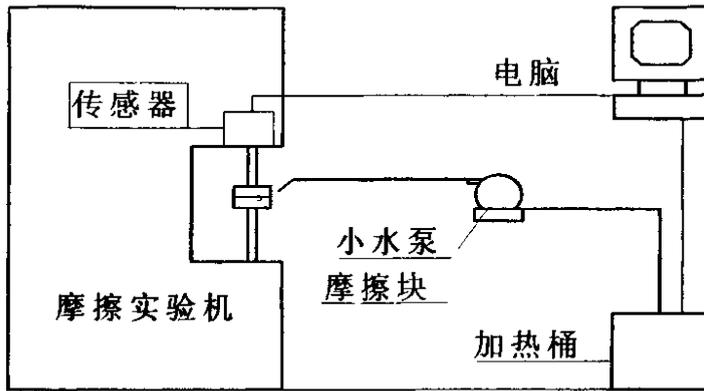


图 2-8 试验装置示意图

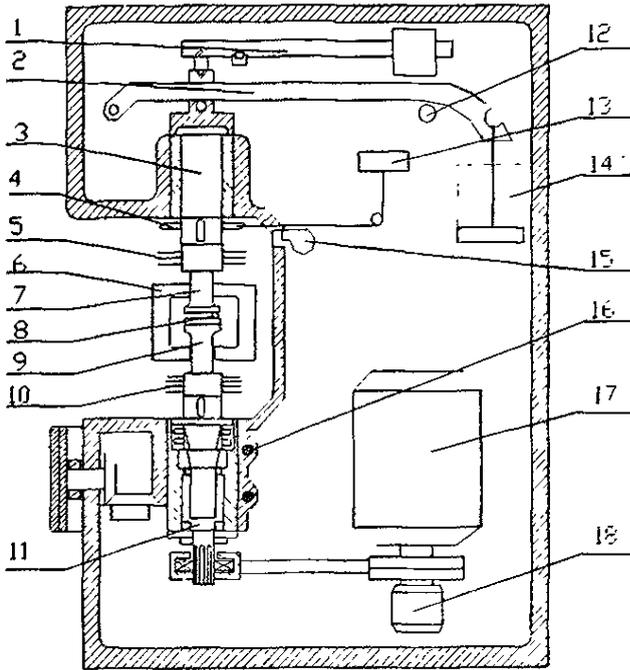
③加热及温度控制系统 包括玻璃水浴、加热器、搅拌器以及热电偶、温控器等。

加热器和热电偶：装在玻璃水浴。热电偶通过 WMZK-01 型温度指示控制仪连接到计算机上，通过计算机设定和控制介质的温度。

搅拌器：76-1 型恒温玻璃水浴电动搅拌。

温控器：自动控制和调节循环介质的温度。

试验机由直流电机通过皮带传动直接驱动下主轴旋转。试验负载由标准砝码通过杠杆机构加在上主轴上。上、下主轴的锥孔内分别装着试样销和试样盘，上主轴固定一压力传感器用来间接测量摩擦力。图 2-9。



1-平衡杠杆；2-加载杠杆；3-上主轴；4-弦线盘和弦线；5-散热片；6-加热炉；
7-上试样轴；8-试样盘；9-下试样轴；10-下散热片；11-下主轴；12-凸轮轴；
13-传感器；14-砝码；15-吹风机；16-刹车块；17-直流电机；18-测速电机

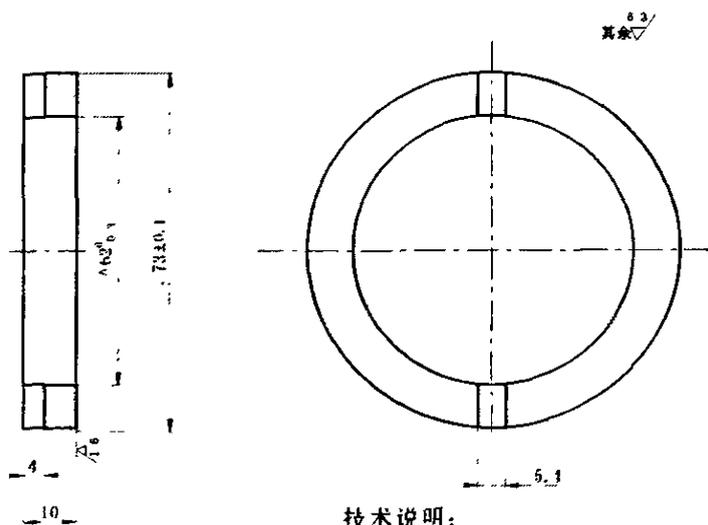
图 2-9 MG200 高温高速试验机原理简图

试件安装完成后，通过计算机设定主轴的转速和转数，试验机按照设定的参数开始运行，待试件达到所要求的设置参数时，试验机自动停止。

为达到试验工况接近实际工况，在对偶摩擦时添加液体介质，介质为现场提供的污水。

2.3.3 试验用试件和试验介质

2.3.3.1 试件形状：试验试件为环状对环状，其尺寸如图 2-10 所示。



技术说明:

1. R16圆环面不倒角, 其余尖角倒钝, 去毛刺。
2. 两圆环面平行度不大于0.05

图 2-10 环状试件

2.3.3.2 试件材料及表面处理

在试验中, 对 45# 钢调质处理制成的抽油杆材料及表面喷涂与由 J55 和 N80 油管材料及表面喷涂进行配对, 在相同的工况条件下进行耐磨性对比试验。选用材料及其表面处理工艺和配对情况如表 2-3。

表 2-3 各种材料及其表面处理工艺

序号	抽油杆	油管	试验对数
1	45# 钢调质	J55	3
2		N80	3
3		J55 喷涂, 厚 0.7mm	3
4		J55 喷涂, 厚 1.0mm	3
5		J55 喷涂, 厚 1.5mm	3
6	45# 钢喷涂, 厚 1.0mm	J55	3
7		N80	3

(3) 试验介质

为模拟抽油杆、油管工作的磨蚀环境, 试验介质选采用油田产出的污水, 其离子含量: Cl^- 11000 mg/L、 Ca^{2+} 25 mg/L、 HCO_3^- 30 mg/L、 Mg^{2+} 13 mg/L、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 8 mg/L。

2.3.4 试验方法

2.3.4.1 试验条件

- ① 试验介质：油田污水；
- ② 试验介质温度：常温；
- ③ 试验载荷：150N；
- ④ 试验转速：300r/min；
- ⑤ 总转数为 7×10^4 r。

2.3.4.2 试验内容

- ① 对表 2-3 所列的七对摩擦副在同样的工况条件下进行耐磨性对比试验；
- ② 对表面喷涂 J55 油管与 45# 钢组成的摩擦副，在载荷为 100N，转速为 400r/min 条件下进行涂层寿命试验。

2.3.4.3 评价方法

试验以测量磨损量为评价方法。在分析天平上分别测量试件在磨损前、后的质量。试验前后质量的变化为磨损量，用 g 或 mg 作计量单位。为确保称重准确，称重测量时对试件作如下处理：

- ① 称重之前对试件进行认真的去污，用丙酮清洗。
- ② 清洗过的试件应晾干或烘干，然后称重。
- ③ 在装卸过程中要小心，不要碰掉尖角，划伤表皮，以免影响测量结果。

2.3.5 试验数据与处理

2.3.5.1 试验参数与计算公式

① 滑动速度 V

$$V = \pi \frac{(D_2 + D_1)}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad (1)$$

式 (1) 中： V —— 滑动速度，m/s

n —— 试验转速，r/min；

D_1 、 D_2 —— 环状试样的内径和外径，m。

② 摩擦行程 S

$$S = \pi \frac{(D_2 + D_1)}{2} \cdot N \quad (2)$$

式（2）中： N ——试验的总转数，本次试验 $N=70000r$ 。

③磨损量

$$\Delta W: \Delta W = W_2 - W_1 \quad (3)$$

式（3）中： W_1 ——磨损后试件质量，g；

W_2 ——磨损前试件质量，g。

④磨损率

$$k_w = \frac{\Delta W}{S} \quad (4)$$

式（4）中： k_w ——质量磨损率，g/m；

由式（1）得到环状试件的滑动速度 $V=1.06 \text{ m/s}$

由式（2）得到摩擦行程 $S=14837 \text{ m}$ 。

2.3.5.2 试验结果

试验结果见表 2-4。

表 2-4 抽油杆、油管不同表面处理的配合耐磨性对比试验结果

试验摩擦副			磨损量, g	重量磨损率, 10 ⁻⁶ g/m	平均摩 擦系数
45 [#] 与 J55	1	45 [#] /J55	0.054/0.044	3.640/2.966	0.29
	2	45 [#] /J55	0.052/0.050	3.505/3.370	0.27
	3	45 [#] /J55	0.046/0.049	3.100/3.303	0.27
45 [#] 与 N80	1	45 [#] /N80	0.035/0.043	2.359/2.898	0.27
	2	45 [#] /N80	0.036/0.040	2.426/2.696	0.27
	3	45 [#] /N80	0.042/0.041	2.831/2.763	0.26
45 [#] 与 J55(0.7)	1	45 [#] /J55(0.7)	0.022/0.008	1.483/0.539	0.17
	2	45 [#] /J55(0.7)	0.025/0.010	1.685/0.674	0.19
	3	45 [#] /J55(0.7)	0.026/0.007	1.752/0.472	0.17
45 [#] 与 J55(1.0)	1	45 [#] /J55(1.0)	0.021/0.009	1.415/0.607	0.18
	2	45 [#] /J55(1.0)	0.029/0.011	1.955/0.741	0.18
	3	45 [#] /J55(1.0)	0.026/0.009	1.752/0.607	0.20
45 [#] 与 J55(1.5)	1	45 [#] /J55(1.5)	0.025/0.010	1.685/0.674	0.29
	2	45 [#] /J55(1.5)	0.029/0.013	1.955/0.876	0.29
	3	45 [#] /J55(1.5)	0.028/0.011	1.887/0.741	0.31
45 [#] (1.0) 与 J55	1	45 [#] (1.0)/J55	0.017/0.036	1.146/2.426	0.14
	2	45 [#] (1.0)/J55	0.016/0.034	1.078/2.292	0.17
	3	45 [#] (1.0)/J55	0.014/0.033	0.944/2.224	0.16
45 [#] (1.0) 与 N80	1	45 [#] (1.0)/N80	0.007/0.027	0.472/1.820	0.14
	2	45 [#] (1.0)/N80	0.010/0.026	0.674/1.752	0.20
	3	45 [#] (1.0)/N80	0.007/0.020	0.472/1.348	0.16

注：表中 J55(a)表示 J55 油管表面喷涂涂层的厚度为 a mm。下同

2.3.6 结果分析

将表 2-4 中的试验结果进行整理，将 3 组试验数据取平均，得到以下整理结果（见表 2-5）。

表 2-5 整理后的试验结果

试验号	试验摩擦副	重量磨损率, 10^{-6} g/m		平均摩擦系数
		抽油杆	油管	
1	45#钢与 J55	3.415	3.213	0.28
2	45#钢与 N80	2.540	2.786	0.27
3	45#钢与 J55(0.7)	1.640	0.562	0.17
4	45#钢与 J55(1.0)	1.707	0.652	0.18
5	45#钢与 J55(1.5)	1.842	0.764	0.29
6	45#钢(1.0)与 J55	1.056	2.314	0.16
7	45#钢(1.0)与 N80	0.539	1.640	0.17

为了更加直观的进行比较分析, 将最终试验结果分成以下几种情况进行分析讨论, 并把磨损率制成直方图。

2.3.6.1 45#钢抽油杆分别与 J55、N80 油管配对

磨损率的直方图见图 2-11, 从图可以看出, 45#钢抽油杆分别与 J55 和 N80 油管组合时, 45#钢与 N80 组合的耐磨性要高于与 J55 的组合, 而且在同样条件下对 45#钢制成的抽油杆的减磨作用更明显。这两对组合的摩擦系数基本相同, 45#钢抽油杆与 N80 油管配合使用耐磨性能较好。

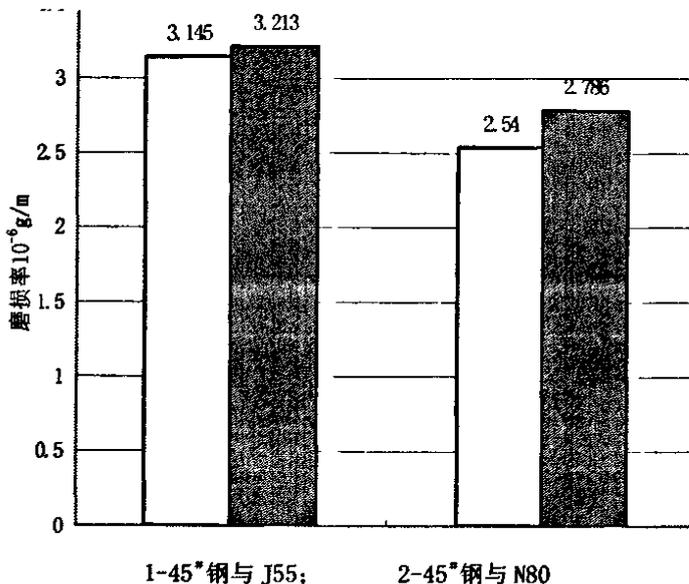
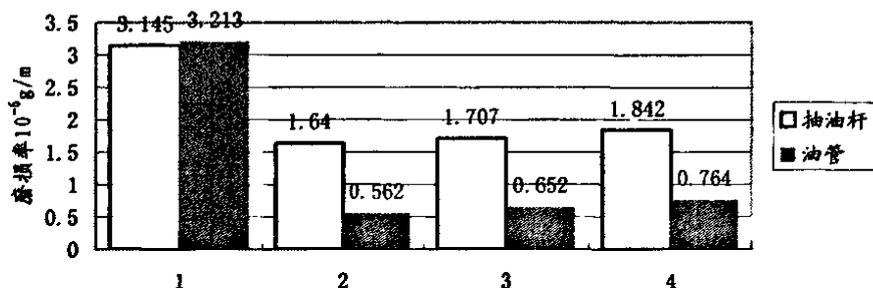


图 2-11 45#钢与 J55、N80 组合磨损率直方图

2.3.6.2 45[#]钢抽油杆分别与 J55 和 J55 喷涂油管配对

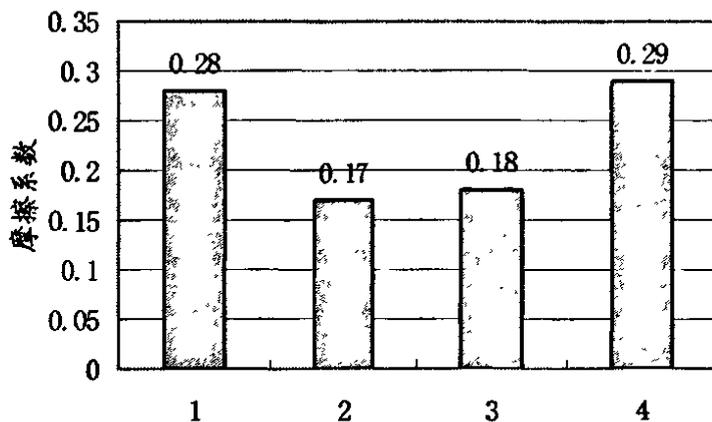
磨损率的直方图见图 2-12，从图可以看出，45[#]钢抽油杆与 J55 油管表面喷涂涂层后的组合，其耐磨性要明显好于 45[#]钢抽油杆与 J55 油管的组合，油管表面喷涂后其耐磨性与不喷涂相比提高近 5 倍，同时对 45[#]钢抽油杆的减磨效果也非常明显，磨损量降低近一半，这说明 J55 油管表面喷涂后对抽油杆和油管本身的减磨作用较好。



1-45[#]钢与 J55；2-45[#]钢与 J55(0.7)；3-45[#]钢与 J55(1.0)；4-45[#]钢与 J55(1.5)

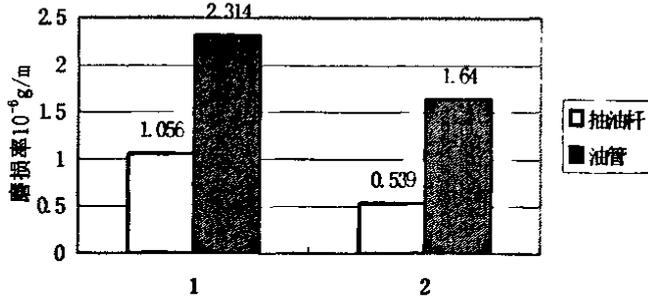
图 2-12 45[#]钢抽油杆与 J55 和 J55 喷涂油管组合磨损率直方图

从图 2-12 中试验号 2、3、4 比较还可以看出，随着 J55 油管表面喷涂的涂层厚度的增加，45[#]钢抽油杆和油管表面的涂层磨损量都有不同程度的增加，另外，从图 2-13 中能看到，随着涂层厚度的增加，不同组合的摩擦系数也有很大的变化，涂层厚度为 0.7mm 和 1.0mm 时，其摩擦系数比较接近，而且摩擦系数的值也比较小，而当涂层厚度为 1.5mm 时，其摩擦系数增大很多，大小与没有涂层的 J55 油管的摩擦系数相接近，见图 2-13、2-14。



1-45[#]钢与 J55；2-45[#]钢与 J55(0.7)；3-45[#]钢与 J55(1.0)；4-45[#]钢与 J55(1.5)

图 2-13 45[#]钢抽油杆与 J55 和 J55 喷涂油管组合摩擦系数图



1-45#(1.0)钢与 J55; 2-45#钢(1.0)与 N80

图 2-14 45#钢喷涂抽油杆与 J55 和 N80 油管组合磨损率直方图

从上述磨损率和摩擦系数的分析可以看出，油管表面喷涂涂层具有很好的减磨效果，但涂层厚度并不是越厚越好，当涂层厚度在 0.7mm~1.0mm 之间时，涂层抗磨性能最佳。

由图 2-14 45#钢表面喷涂抽油杆与 J55 和 N80 油管组合的摩擦副磨损率直方图看出，45#钢表面喷涂抽油杆与 N80 组合的耐磨性要明显好于与 J55 的组合，而两种组合的摩擦系数基本相等。

通过对比可以看出，对于 45#钢与 J55 和 N80 组合，45#钢表面喷涂比 45#钢不喷涂耐磨性提高显著。当与 J55 组合时，45#钢表面喷涂后耐磨性提高 3 倍，当与 N80 组合时，45#钢表面喷涂后耐磨性提高 5 倍。同时 45#钢表面喷涂抽油杆对 J55 和 N80 油管还有很好的减磨作用，与 45#钢不喷涂相比，油管磨损量减小近三分之一。

综合图 2-11、图 2-12 和图 2-14 可以看出，无论是 J55 油管喷涂，还是 45#钢抽油杆喷涂，都能显著提高油管或抽油杆本身的耐磨性，同时对与之相配对的喷涂油管或喷涂抽油杆具有有效的减磨效果，而且对于 45#钢抽油杆和 J55 油管组合使用时，喷涂在 J55 油管上效果更好。

2.3.7 涂层寿命试验

采用相同的试验方法对涂层的耐磨寿命进行试验。在正压力 100N、转速 400r/min 的条件下，分 4 个阶段进行了试验，各阶段的转数分别为 $30 \times 10^4 \text{r}$ 、 $30 \times 10^4 \text{r}$ 、 $20 \times 10^4 \text{r}$ 和 $30 \times 10^4 \text{r}$ ，经历总转数 $110 \times 10^4 \text{r}$ ，总摩擦行程 233145m 后，期间分别测了磨损量，具体数据见表 2-6。

表 2-6 涂层寿命试验结果

阶段	转数 10 ⁴ r	磨损量, g		磨损率, 10 ⁻⁶ g/m	
		45 [#] 钢	J55(1.0)	45 [#] 钢	J55(1.0)
1	30	0.070	0.025	1.100	0.393
2	30	0.068	0.026	1.080	0.409
3	20	0.042	0.019	0.991	0.448
4	30	0.064	0.025	1.010	0.393
合计	110	0.244	0.095	1.046	0.407

试验结果表明, 经历总转数 $110 \times 10^4 r$, 总摩擦行程 233145m 后, 涂层未见损坏, 产生轻微磨损。

2.3.8 耐磨性与温度关系试验

为了更好地模拟井下抽油杆与油管偏磨时的工况, 试验温度对涂层耐磨性的影响, 通过对试验介质加温的方法, 对 45[#]钢与涂层厚度为 1.0mm 的 J55 试件在 60℃ 恒温条件下进行了磨损试验, 试验结果如表 2-7。

表 2-7 温升后 45[#]钢与 J55(1.0) 对磨时试验结果

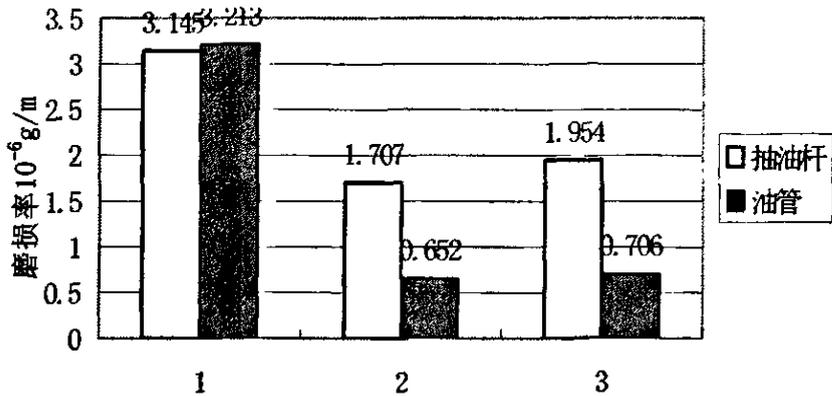
试验摩擦副		磨损量, (g)	磨损率, 10 ⁻⁶ g/m	平均摩擦系数	
45 [#] 与 J55(1.0)	1	45 [#]	0.030	2.022	0.17
		J55	0.010	0.674	
	2	45 [#]	0.028	1.887	0.15
		J55	0.011	0.739	

将常温(20℃左右)的 45[#]钢与 J55、45[#]钢与 J55(1.0)的磨损情况和 60℃时 45[#]钢与 J55(1.0)的磨损情况进行对比, 结果见表 2-8。

表 2-8 不同温度情况下磨损对比

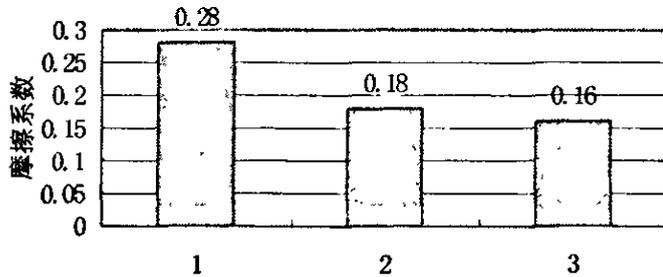
试验号	试验摩擦副	磨损率, $10^{-6}g/m$		平均摩擦系数
		抽油杆	油管	
1	45°钢与 J55	3.145	3.213	0.28
2	45°钢与 J55(1.0)[常温]	1.707	0.652	0.18
3	45°钢与 J55(1.0)[60°C]	1.954	0.706	0.16

将表 2-8 数据绘制为磨损率直方图与摩擦系数变化图, 见图 2-15、图 2-16。



1-常温下 45°钢与 J55; 2-常温下 45°钢与 J55(1.0); 3-60°C下 45°钢与 J55(1.0)

图 2-15 45°钢抽油杆与 J55 喷涂油管组合在不同状态下磨损率直方图



1-常温下 45°钢与 J55; 2-常温下 45°钢与 J55(1.0); 3-60°C下 45°钢与 J55(1.0)

图 2-16 45°钢抽油杆与 J55 喷涂油管组合在不同状态下摩擦系数

从图 2-15 可以看出, 45°钢与 J55 直接配对时的磨损量明显高于 45°钢与喷涂耐磨涂层的 J55 配对; 而 45°钢与喷涂耐磨涂层的 J55 (1.0) 配对时在常温下与 60°C 时两者比较, 耐磨涂层的磨损量在不同温度下基本一致, 而 45°钢在 60

℃时的磨损量稍高于常温时的磨损量，产生这一变化的原因主要是常温下 45#钢与喷涂耐磨涂层的 J55 配对摩擦时 45#钢发生的是粘着磨损，而在 60℃时 45#钢发生的是粘着磨损并伴有一定氧化与腐蚀磨损。

从图 2-16 看出摩擦系数按图中配对序号呈现下降趋势，由于耐磨涂层的作用，常温下 45#钢与喷涂耐磨涂层的 J55(1.0) 配对时摩擦系数明显小于 45#钢与 J55 配对，而 45#钢与喷涂耐磨涂层的 J55(1.0) 配对时在 60℃时的摩擦系数略小于常温时的摩擦系数。

2.3.9 磨损后表面微观形貌

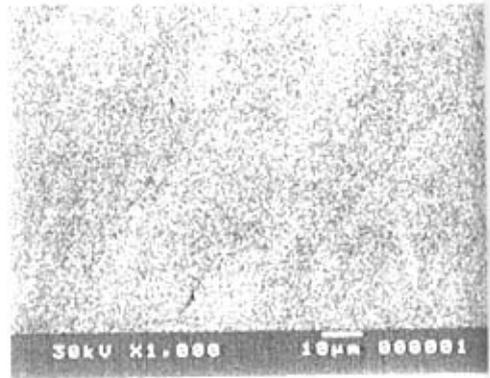
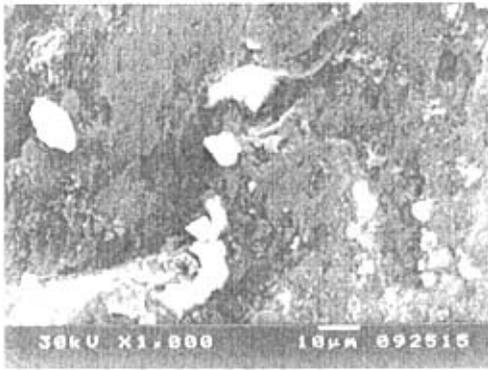


图 2-17 45#钢与未喷涂耐磨涂层 J55 配对磨损后的表面形貌

图 2-18 45#钢与喷涂耐磨涂层 J55 配对磨损后的表面形貌

图 2-17 是 45#钢与未喷涂耐磨涂层的 J55 油管对磨时，磨损表面的扫描电镜（SEM）照片。从图中可以看出，当 45#钢与未喷涂耐磨涂层的 J55 油管对磨时，表面发生了明显的粘着磨损，不规则的疤痕和材料堆积是粘着磨损所造成的。

图 2-18 是 45#钢与喷涂耐磨涂层的 J55 油管对磨时，磨损表面的扫描电镜（SEM）照片。从图中可以看出，当 45#钢与喷涂耐磨涂层的 J55 油管对磨时，表面光滑平整、无任何损伤，而且上面出现了一层喷涂的耐磨涂层材料的转移膜。这层转移膜对 45#钢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。



图 2-19 J55 与未喷涂耐磨涂层 45#钢配对磨损后的表面形貌

图 2-19 是 J55 与未喷涂耐磨涂层 45#钢对磨时，磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。从图中可以看出，其磨损表面发生了明显的粘着磨损，图中深浅不一的沟槽为磨粒磨损所致，这主要是由于 45#钢进行了调质处理，硬度较高而 J55 钢级油管硬度较低，当摩擦表面发生明显的粘着磨损后，出现材料的聚集，产生很硬的小颗粒嵌入 J55 软材料中，在对磨过程中有一定的切削作用，从而出现深浅不一的沟槽。

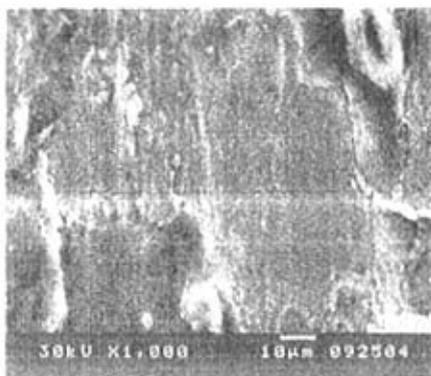


图 2-20 45#钢与未喷涂耐磨涂层 N80 磨损后的表面形貌

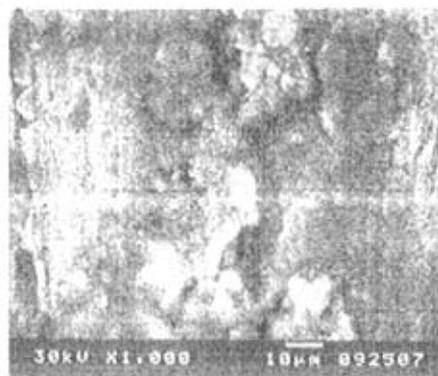


图 2-21 N80 与未喷涂耐磨涂层 45#钢磨损后的表面形貌

图 2-20 和图 2-21 分别是 45#钢和 N80 油管对磨时, 45#钢和 N80 磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。从图中可以看出, 两者发生了粘着磨损, 但未见明显的磨粒磨损出现。

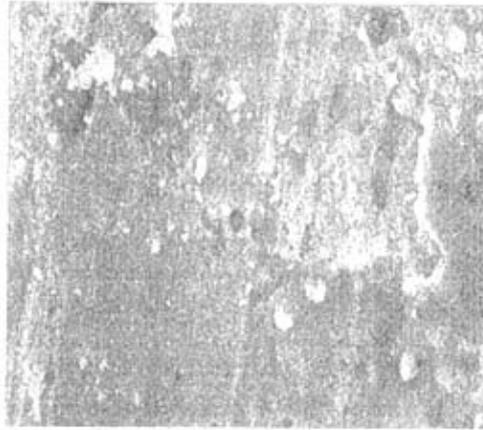


图 2-22 J55 与喷涂耐磨涂层 45#钢磨损后的表面形貌

图 2-22 是 J55 与喷涂涂层的 45#钢对磨时, 磨损表面的扫描电镜 (SEM) 照片。从图中看出, 磨损表面平整, 有轻度的粘着磨损出现, 但无严重的损伤。

从上述磨损表面的形貌表明: 在相同试验条件下, 喷涂耐磨涂层可以有效保护磨损表面受摩擦损坏的程度, 从而提高摩擦副的耐磨性。

2.3.10 试验结论

通过对抽油杆和油管摩擦对偶试件在多种条件下的磨损试验, 可得到如下结论:

(1) 在常温下, 载荷为 150N, 相对滑动速度为 1.06 m/s 时, 摩擦对偶试件耐磨性能如下:

① 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。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, 其磨损量降低近一半。

② 油管表面喷涂涂层具有有效减磨的效果。随着 J55 油管表面喷涂的涂层厚

度的增加, 45#钢抽油杆和油管表面的涂层磨损量都有不同程度的增加, 而且摩擦系数也有很大的变化, 当涂层厚度为 0.7mm 和 1.0mm 时, 摩擦系数比较接近, 摩擦系数值也较小; 而当涂层厚度为 1.5mm 时, 摩擦系数增加较大, 几乎与没有涂层的 J55 油管的摩擦系数相接近。其主要原因是当涂层厚度增大到一定程度时, 表面受挤压变形量增大, 导致运动时摩阻增大。

③45#钢抽油杆表面喷涂涂层与 J55 和 N80 组合, 与不喷涂的相比, 耐磨性也提高显著。当与 J55 组合时, 表面喷涂后抽油杆耐磨性可提高 3 倍; 当与 N80 组合时, 表面喷涂后抽油杆耐磨性可提高 5 倍。同时 45#钢表面喷涂抽油杆对 J55 和 N80 油管还有很好的减磨作用, 与不喷涂涂层的抽油杆相比, 对油管磨损量减小三分之一。

(2) 在常温, 正压力 100N、相对滑动速度为 1.41 m/s 的条件下, 对 J55 油管表面喷涂 1.0mm 涂层与 45#钢对磨的寿命试验, 在经历总转数 $110 \times 10^4 r$, 总摩擦行程 233145 m 后, 涂层未见损坏。

(3) 在 60℃, 载荷为 150N, 相对滑动速度为 1.06 m/s, 45#钢与喷涂耐磨涂层厚度为 1.0mm 的 J55 配对时, 与常温下比较耐磨涂层的磨损量变化不大, 两者基本一致, 而 45#钢在 60℃时的磨损量稍高于常温时的磨损量, 产生变化的原因主要是在 60℃时 45#钢磨损时伴有一定氧化与腐蚀磨损。摩擦系数随温度升高呈下降趋势, 主要是耐磨涂层材料所具有的热衰退作用所致。

(4) 通过对磨损试件表面 SEM 照片分析, 喷涂耐磨涂层可有效解决管杆表面磨损问题, 从而提高涂层管杆的抗磨性能。

综上所述, 无论是油管表面还是抽油杆表面喷涂涂层, 涂层本身具有良好的耐磨性, 同时对相配对的试件具有较好的减磨作用, 在试验条件下对 45#钢抽油杆和 J55 油管组合使用时, 在 J55 油管上喷涂厚度为 0.7mm~1.0mm 的涂层抗磨性能更好。

2.4 管杆配对往复模拟耐磨试验研究

2.4.1 试验目的

根据抽油井实际生产需要, 模拟抽油井的运动状况, 采用往复运动的方法, 对油管和抽油杆接箍进行配对试验, 评价涂层油管的抗磨蚀性能。

2.4.2 试验设备

往复模拟试验使用的往复模拟试验机结构简图见图 2-23，在试验机上同时连接三个抽油杆接箍和相配对的三套油管试件，并分别用夹具夹持牢固，在液压千斤顶的作用下，使得油管试件与接箍之间相互接触，并保持一定的侧向压力。电机带动曲柄旋转，曲柄连杆机构带动抽油杆作往复运动，从而使得油管试件与接箍在一定压力作用下产生运动磨损。

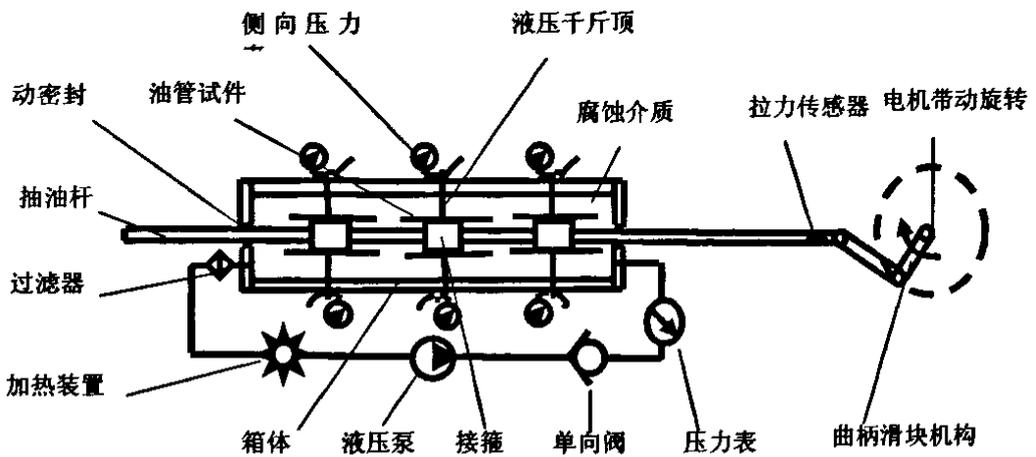


图 2-23 往复模拟试验机结构简图

试验机的往复次数为 $0\sim 100\text{min}^{-1}$ 可调，冲程为 110mm，侧向载荷范围为 $0\sim 1200\text{N}$ 可调，油管试件固定在装有腐蚀介质的长方形箱体中。

2.4.3 试验材料

油管试件：J55 油管、N80 油管、氮化油管、涂料油管；

抽油杆试件：20CrMo、非调质钢以及球墨铸铁-60 抽油杆接箍。

试验介质：选自郝现联合站的污水。经成分分析确定介质的化学成分，见表 2-9。

表 2-9 介质分析

取样地点			郝现联合站			
检测依据		SY5523-1992		SY/T5329-1994		
分析项目		ρ (B) mg/L	C(1/z B ^z) mmol/L		ρ (B) mg/L	C(1/z B ^z) mmol/L
阴 离 子	HCO ₃ ⁻	766.31		阳 离 子	Mg ²⁺	121.26
	Cl ⁻	20915.5			Ca ²⁺	869.99
	SO ₄ ²⁻	47.93			Na ⁺ +K ⁺	12653.63
	OH ⁻	0				
	CO ₃ ²⁻	0	0			
PH 值		7.47		30℃密度		1.0242
总矿化度 ρ (Σ B), mg/L				35374.62		

2.4.4 试验条件

- ①冲程: 110mm
- ②冲次: 90 min⁻¹
- ③介质温度: 80℃
- ④侧向载荷: 600N
- ⑤实验时间: 72h

2.4.4 磨蚀量和磨蚀率的计算方法

2.4.4.1 磨蚀率

①磨蚀量:

$$\text{质量磨蚀量 } \Delta W: \Delta W = W_2 - W_1 \tag{5}$$

式(5)中:

- ΔW ——质量磨蚀量, mg;
- W_1 ——磨蚀后试件重量, mg;
- W_2 ——磨蚀前试件重量, mg。

②磨蚀率:

$$\text{质量磨蚀率: } k_w = \frac{\Delta W}{S} \tag{6}$$

k_w ——质量磨损率, mg/m;

S——摩擦行程， m。

2.4.4.2 摩擦系数的计算方法

在一定工况条件下，根据压力传感器测取的作用在试件上的侧向压力 N ，以及作用在试件的摩擦力 f ，根据下式计算摩擦系数：

$$\mu = f / N \tag{7}$$

式 (7) 中：

f ——作用在试件的摩擦力， N；

N ——作用在试件上的侧向压力， N。

2.4.5 磨蚀试验结果及数据分析

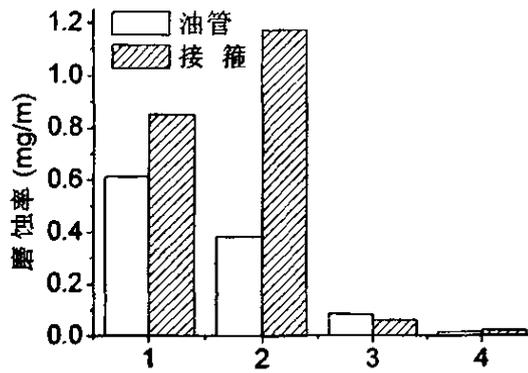
试验数据结果如表 2-10 所示。

表 2-10 油管 and 接箍配合磨蚀率

油管/接箍材料	20CrMo, mg/m	非调质钢, mg/m	QT-60, mg/m
J55	0.611/0.850	0.321/0.313	0.041/0.040
N80	0.381/1.170	0.289/0.646	0.032/0.037
氮化	0.082/0.060	0.013/0.054	0.011/0.144
涂层	0.013/0.020	0.008/0.018	0.009/0.021

注：表中数字 A/B 中，A 为油管试件的磨蚀率，B 为接箍试件的磨蚀率。

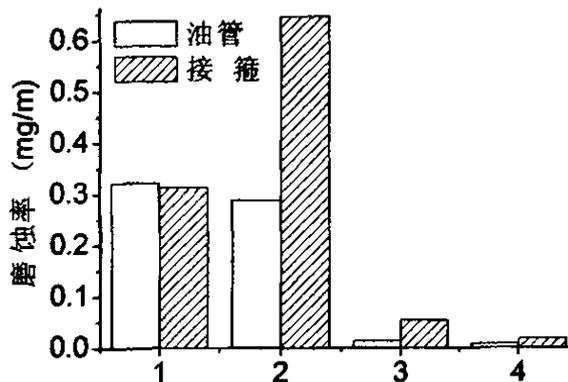
20CrMo 接箍分别与 J55、N80、氮化、碳铝涂层油管配对，磨蚀率直方图见图 2-24，从图中可以看出，20CrMo 与 N80 组合时，接箍的磨蚀率最高，而 20CrMo 与涂层油管组合的耐磨蚀性要高于其它三种组合，而且在同样条件下涂层油管对 20CrMo 接箍的减摩作用更加明显。涂层油管与 20CrMo 接箍配合较好。



1-20CrMo与J55 2-20CrMo与N80 3-20CrMo与氮化 4-20CrMo与涂层
图 2-24 20CrMo 接箍与 J55、N80、氮化、涂层油管组合磨蚀率直方图

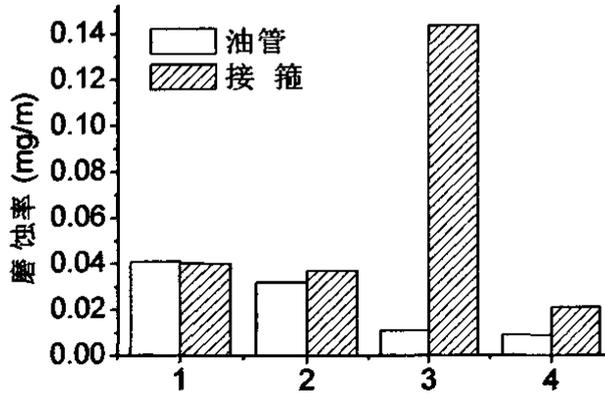
非调质钢接箍与 J55、N80、氮化、碳铬涂层油管配对，磨蚀率直方图见图 2-25，从图中可以看出，非调质钢与 N80 组合时，其耐磨蚀性最差，明显高于其它三种组合，而非调质钢与涂层组合的耐磨蚀性要高于其它三种组合，同样在相同工况条件下涂层油管对非调质钢的减摩作用更加显著。

在相同工况条件下，选用涂层油管与非调质钢接箍配合更加合理。



1-非调质钢与J55 2-非调质钢与N80 3-非调质钢与氮化 4-非调质钢与涂层
图 2-25 非调质钢接箍与 J55、N80、氮化、涂层油管组合磨蚀率直方图

QT-60 接箍与 J55、N80、氮化、涂层油管配对，磨蚀率直方图见图 2-26，从图中可以看出，QT-60 接箍与氮化油管油管摩擦副组合时，接箍的磨蚀率是其它组合中接箍磨蚀率的 3 倍~7 倍，而 QT-60 接箍与涂层油管组合的耐磨性要高于其它三种组合，这说明涂层油管对 QT-60 接箍起减摩作用。在相同工况下，选用涂层油管与 QT-60 接箍配合比较合理。

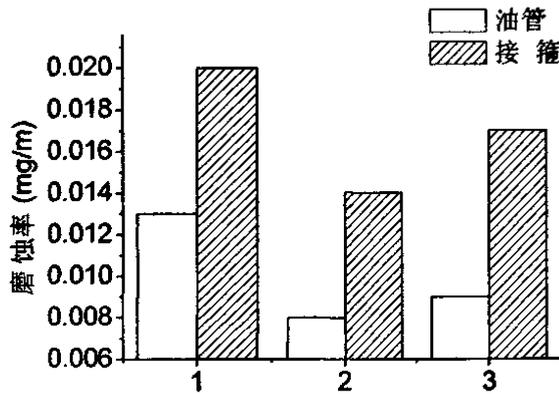


1-QT-60与J55 2-QT-60与N80 3-QT-60与氮化 4-QT-60与涂层

图 2-26 QT-60 接箍与 J55、N80、氮化、涂层油管组合磨蚀率直方图

涂层油管与 20CrMo、非调质钢及 QT-60 接箍配对，腐蚀率直方图见图 2-27，从图中可以看出，涂层油管与非调质钢接箍的磨蚀率在 0.01mg/m 左右，而涂层油管分别与 20CrMo 和 QT-60 接箍组合的磨蚀率均高于与非调质钢接箍的组合。

在相同工况条件下，优先选用非调质钢接箍与涂层油管配合。



1-涂层与 20CrMo 2-涂层与非调质钢 3-涂层与 QT-60

图 2-27 涂层油管与 20CrMo、非调质钢及 QT-60 接箍磨蚀率直方图

综合图 2-24、2-25、2-26、2-27 可以看出，不论与哪种接箍对磨，涂层油管都是最耐磨的，并且与非调质钢接箍组成摩擦副时，接箍的耐磨蚀性是最好的。

2.5 油管涂层物理机械性能试验研究

2.5.1 试验目的及设备

为试验碳铝涂层油管内涂层抗拉伸性能,采用标准拉伸试验机对 N80 和 J55 两种油管进行了拉伸试验。

2.5.2 试验方法

将长度为 0.5m 的碳铝涂层油管连接在拉伸试验机上,启动机器,首先加压到 200mPa,稳压 1min,接着以 50mPa 为间隔逐渐进行加压,直到达到管材自身的抗拉强度。

2.5.3 试验结果

见表 2-11

表 2-11 拉伸试验数据记录

N80 涂层油管		J55 涂层油管	
拉力, kN	变形, mm	拉力, kN	变形, mm
150	6	157	6
200	7	203	7
250	8	255	7
300	9	300	8
350	10	350	9
400	11	400	10
450	12	450	11 (屈服)
550	未屈服		

从表 2-11 可以看出,对于 N80 油管,拉力最大达到 450kN 左右,变形量为 12mm 时,未达到 N80 油管材料的屈服强度,经剖开检查,内涂层表面完好如初,未破坏。

对于 J55 油管,拉力在 400kN 左右,变形量达到 10mm 时,达到 J55 油管材料的屈服强度,经剖开检查,在 480mm 油管的一端螺纹处,内涂层有断裂纹,内涂层表面破坏。

通过涂层油管的拉力试验证明，涂层油管的碳铝涂层在未达到抗拉极限之前，或不产生永久变形之前将不易损坏，也就是说，涂层的抗拉强度依赖于基体油管的强度。

2.6 本章小结

通过系统地研究、分析碳铝复合树脂涂料的成分及特性，以试验的方法研究了以碳铝复合树脂为核心的油管涂层的高温高压防腐性能、附着强度和抗磨、减磨性能，表明该技术能很好地满足水井油管防腐的需要和油井管杆防偏磨的要求，涂层物理延展性能好，能等同于普通油管进行各种井况的应用，达到了现场推广条件。

第3章 油管涂覆生产工艺研究

要达到碳蜡复合树脂涂层油管的产业化生产,必须根据碳蜡复合树脂油管涂层的技术参数和特性研究设计相应的生产工艺。

3.1 生产工艺流程

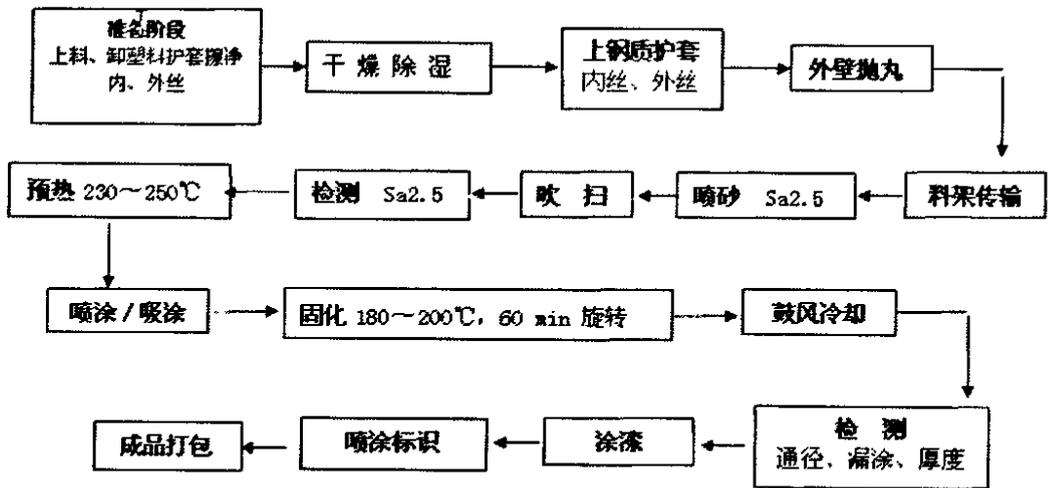
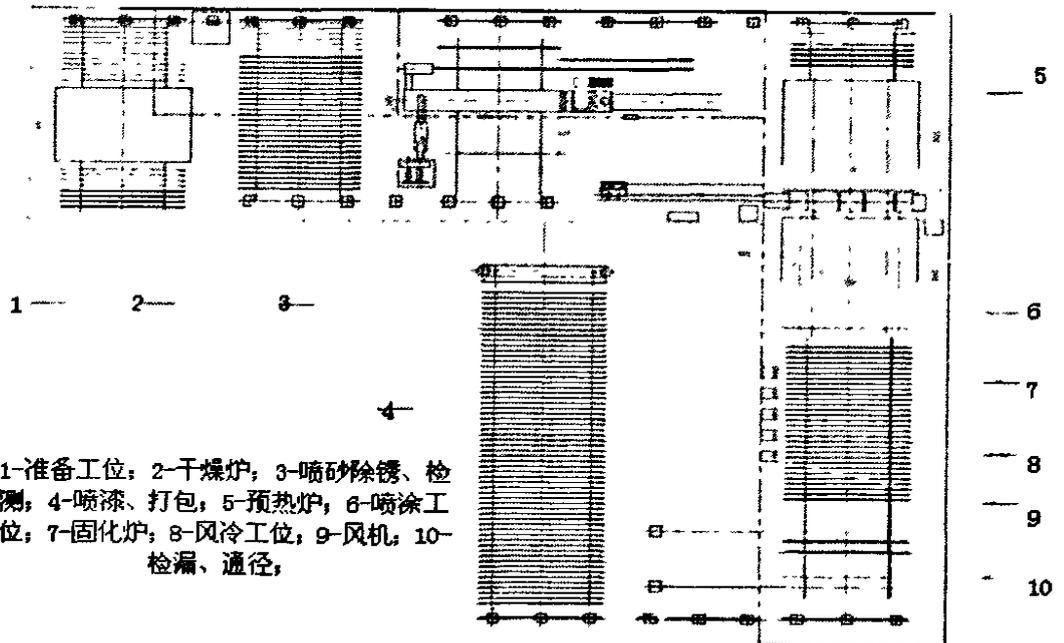


图 3-1 涂层油管工艺流程框图



1-准备工位; 2-干燥炉; 3-喷砂除锈、检测; 4-喷漆、打包; 5-预热炉; 6-喷涂工位; 7-固化炉; 8-风冷工位; 9-风机; 10-检漏、通路;

图 3-2 涂层油管工艺流程平面布置

3.1.1 准备阶段

主要包括：上料、丝扣清洗

3.1.2 干燥

主要设备包括：干燥炉、传动系统（链条、托架、链轮及调速电机）、电控及温控系统等。其工作流程为：擦净的管子由链条上的拨齿拨至干燥炉内，进行除湿干燥，为保证除锈质量做好准备。干燥炉为连续炉，炉顶上设置通风口（通风口大小可调）。然后干燥的管子滚至料架。

3.1.3 外抛丸除锈

主要设备包括：上料分配拨料装置、外除锈机、下料拨料装置。其工序是对油管进行外表面除锈。

3.1.4 油管内孔喷砂处理

3.1.4.1 主要设备及工作原理

这道工序是本套生产线的主要工序之一，保证除锈质量是提高涂料附着强度的基础。主要设备包括：清理室、除尘系统、密封长门、油管自动螺旋装置、入端密封装置、气动分料托架、倾斜气动落料托架、输送螺旋、长杆喷枪、电动台车、连续自动喷砂器、储砂斗、气动供砂闸门、拨料机构、斗式提升机、离心风机、螺旋筛选分离器、电气控制系统、大平台、空压机、储气罐、监视系统等。

其工作流程：通过轨道传输料架及辊道将上道工序传送来的管子由拨料装置拨到喷砂清理室。经过抽风，使该清理室内呈负压状态，确保灰尘不外溢。由气动分离托架将依次进入室内的管子按 270mm 中心距 6 根排好，落入自旋转装置。自旋转装置使管子自旋并且向喷枪方向移动，使管子紧贴入端密封系统。6 支枪以设定速度往复喷砂。管子喷砂结束，落料托架将其托起，落料托架与吹扫料架接轨。管子自动向前滚动，一组 6 根油管喷砂结束。喷枪由电动台车驱动，台车上有三个自动喷砂器，每个喷砂器带两把喷枪。台车每往复一个周期，自动加料一次。

磨料自动循环加砂：钢砂由喷枪经清理室尾端的收集室，依次进入回收

螺旋、输送螺旋、变向螺旋、钢砂提升机、螺旋筛选分离器、过渡储砂斗,最后进入喷砂器(台车上的)上的储砂斗(每往复一次加砂一次),自动按需进入喷砂器。

3.1.4.2 技术特点

①除锈环节是本套生产线的生产速度瓶颈之一,本套系统实现了同时对6根油管的内孔除锈,提高了除锈效率,为生产线的满负荷、协调生产提供了保证;

②本套内除锈系统自动化程度高,喷枪进给系统、砂料循环系统及砂、气比例分配供给系统均程序控制,提高了除锈加工质量、减轻了劳动强度。

3.1.4.3 除锈表面的吹扫

为进一步除尘及将残余钢砂、管壁吸附物处理干净,采用高压气流吹扫的方式。其工作流程:喷砂后的管子由气动输送装置送至吹扫工位,由电动小车驱动吹扫喷管进入管子进行吹扫。

3.1.4.4 表面粗糙度检验

为确保涂层与管体的附着强度,油管除锈表面粗糙度一般要达到Sa2.5以上。为保证持锈质量的合格,首先对每一根油管通过便携式粗糙度仪进行检验,并定期采用内窥镜对除锈质量进行抽检。

3.1.5 油管内喷涂

主要包括:油管预热、表面涂覆、保温固化三个工位。

3.1.5.1 油管预热

其主要设备是预热炉。经过喷砂、吹扫、检测合格的油管通过辊道输送到预热工位,由机械手将管子拨至预热炉上料架,预热炉为连续炉。目的是将管子加热到规定温度,以便表面涂覆。

3.1.5.2 表面涂覆

表面涂覆是整个生产系统的又一个主要环节,在保证涂层厚度和均匀程度的前提下,涂覆速度的快慢直接影响到产品质量和整个生产线的生产效率。喷涂方式分为喷枪喷涂和真空吸涂两种方式:

①喷枪喷涂:主要包括流化系统、喷枪系统、管架系统和自动控制系统。流化系统通过气流控制,使粉末涂料“沸腾状”,确保出粉均匀;喷枪系统

通过喷枪装置将均匀的粉末涂料喷出,热熔于油管表面;管架系统能实现将预热后的管子由机械手拨至喷涂工位的旋转装置的摩擦轮上,使油管在旋转状态下喷涂;自动控制系统通过程序设计,能根据需要调整喷涂工序各动作的先后和参数,包括自动控制喷枪移动速度、机械手的动作、摩擦轮的转速以及预热炉管子的运移速度等。

该涂覆工艺具有涂层厚度均匀的特点,主要用于对涂层厚度大于0.5mm以上的油管的涂覆生产。其缺点是涂覆速度较慢,涂覆一根油管需要2min左右。

②真空吸涂:主要包括供粉系统、回收系统。供粉系统由流化床、气动系统、电控系统、计量系统等组成。计量系统自动控制供粉时间,实现涂料粉末的定量供给;回收系统由吸风机、旋风分离器、脉冲除尘系统等组成,通过吸风机的作用,在油管内孔形成真空,使涂料粉末在旋转的管内壁快速流动并均匀地涂覆在管子内壁,完成涂料涂覆。

该涂覆工艺的优点是生产速度快,一根油管的涂覆时间仅需要1s~3s左右,其缺点是涂层均匀程度差。主要用于涂层厚度在0.2~0.5mm涂层油管的生产。

3.1.5.3 保温固化

该工序主要由固化炉、传动系统(链条、托架、链轮及调速电机)和电控及温控系统组成。根据涂料性能的要求,完成涂覆后的油管需要在一定温度下旋转固化60min的特点,在固化炉内设置走向相反的两对链条,正传动链条以一定的速度带动管子在炉内运动,正传动链条上设置拨齿,每个拨齿上装有2个圆轮,管子处于两个拨齿之间,管子架在逆向传动的链条上,通过摩擦管子使其自转。油管旋转链条结构原理图见图3-3。

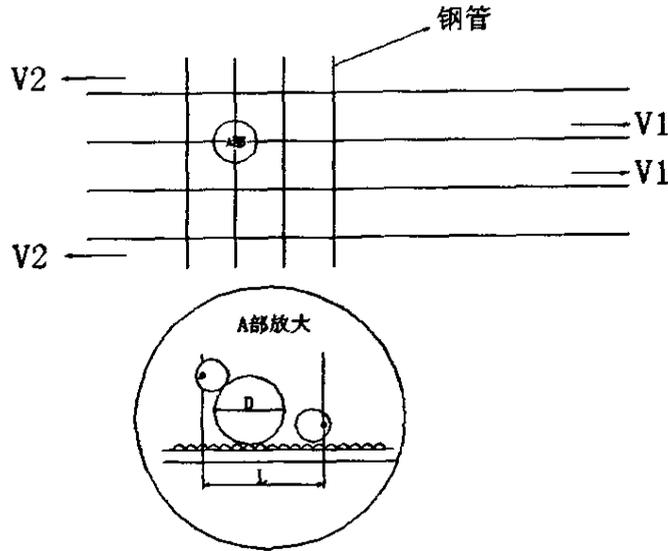


图 3-3 油管旋转链条结构原理

3.1.6 厚度、通径、漏点检测

为确保质量，完成固化的油管，在降温管架上降至常温后，必须经过厚度检测、通径检测和漏点检测。主要设备包括 QuaNix 7500 型内涂层测厚仪、长度 1067 mm 标准通径规和 D270-4 型检漏仪。三项数据中有一项不合格，即确定为不合格产品。

3.2 涂覆生产线

主要技术参数

- 1、年生产能力： $100 \times 10^4 \text{m/a}$;
- 2、适用油管长度： 8.5m~11m;
- 3、适用油管规格： 以为 73mm、89mm 为主，也可生产 101mm~219mm 的其它钢管。

根据碳蜡复合树脂油管涂层特性研究形成的油管涂层生产线系统，通过合理的规划和创新设计，达到了提高生产效率、减少劳动强度的目的，实现了油管喷砂除锈的自动化高效处理和不同管径同工位内孔喷涂的自动化控制，为碳蜡复合树脂涂层油管的产业化推广提供了可靠的生产保障。

第4章 现场应用

4.1 现场应用分析

通过油管内涂抗磨新材料及涂覆工艺的研究,目前已分别形成了适用于油井防偏磨、水井防腐蚀的碳锆复合树脂内涂层油管技术系列,并通过涂覆生产工艺的研究具备了能对各种不同规格油管进行产业化批量生产的能力,年生产能力能达到 $80 \times 10^4 \text{m} \sim 100 \times 10^4 \text{m}$ 。该技术自2005年8月首次在现场应用以来,已在胜利油田分公司东辛、滨南、胜采、纯梁等采油厂进行了配套应用,应用井况涉及到注水井油管防腐、偏磨井油管抗磨蚀、电泵井油管防冲蚀等多方面,截止到2006年12月共下井应用210井次,到目前为止所有下井应用的涂层油管均在正常运行。碳锆复合树脂涂层油管现场实施典型井例统计表见表4-1。现场应用情况表明:

(1) 能有效解决注水井油管腐蚀问题

胜利油田分公司于2005年10月~2006年7月,分别在156口注水井中进行了大范围应用。通过应用该涂层油管,防腐效果良好,到目前为止所有下井涂层油管均在正常生产。

(2) 能有效解决偏磨油井管杆偏磨问题

2005年9月~2006年10月碳锆复合树脂内涂层油管分别在滨南、东辛、现河等采油厂进行了抽油机管杆偏磨井的现场应用试验,应用井况包括全井偏磨井、高含水、高矿化度腐蚀偏磨井等,共现场应用46井次,共应用涂层油管约36200余米,目前46口井全部正常运行,效果良好。

目前通过偏磨井的治理,已经形成了碳锆复合树脂内涂层油管治理偏磨井的配套模式:

“碳锆复合树脂内涂层油管+普通抽油杆”常规配套模式,解决油井的一般偏磨问题;

“碳锆复合树脂内涂层油管+抗腐蚀抽油杆”防腐配套模式,解决油井严重腐蚀偏磨问题;

表4-1 碳蜡复合树脂涂层油管现场实施典型井例统计表

序号	井号	类型	生产情况			作业时间 年-月-日	免修期, d			备注
			液量 t/d	油量 t/d	含水 %		治理 前	治理 后	对比 延长	
1	SDB75-2	偏磨井	23.2	4.5	80.5	2005-09-25	179	442	263	继续有效
2	Y12-203		38.4	2.9	92.4	2005-09-26	80	261	181	转注水井
3	SDS6-172		7.5	1.6	78.9	2005-09-27	291	440	149	继续有效
4	LFLZ11-6		22.1	10.1	54.4	2005-09-28	200	439	239	继续有效
5	LFLN102X10		12	6.8	43	2005-09-30	212	437	225	继续有效
6	PF4-9-11		17.7	3.9	78	2005-11-29	92	326	234	继续有效
7	SDS4-182		19.6	5	74.3	2006-01-06	120	339	219	继续有效
8	SDB79-42		3.8	2.6	32.2	2006-01-10	112	335	223	继续有效
9	LFLN7-5		17.5	3.7	79	2006-01-12	147	333	186	继续有效
10	BNB648-9		16	3.9	75.6	2006-01-15	60	330	270	继续有效
11	LFLN6N11		38	6.5	82.9	2006-01-23	137	322	285	继续有效
12	BNB672X5		2.4	2.2	8.33	2006-02-18	230	296	66	继续有效
13	PFB242X5		11	3.6	67	2006-02-23	214	291	77	继续有效
14	PF4-8-7		5	4.4	13	2006-03-15	271	275	4	继续有效
15	YAA12-P7	电泵井	390	9.5	380.5	2005-08-02				电改抽
			116	3	113	2006-07-03				继续有效
16	YAA12-P1		340	15	325	2005-09-18				电改抽
			93.9	0	93.9	2005-09-14				继续有效
17	YAA3-P1		220	3.7	216.3	2005-08-28				继续有效
18	GLL14-2		305	8.8	97	2005-11-16				继续有效
19	纯56-3					2005-05-26				继续有效
20	T3-7-48					2005-08-10				继续有效
21	Y12-C65					2005-09-12				继续有效
22	DXX100-G20					2005-10-21				继续有效

注： 数据统计截止到2006.12.31.

“碳蜡复合树脂内涂层油管+连续抽油杆”减磨配套模式，解决深井偏磨问题；

“碳蜡复合树脂内涂层油管+普通抽油杆+抗磨副+加重杆”综合配套模式，综合解决大斜度油井偏磨问题。

井例 1：营 12-203

该井为管杆偏磨、腐蚀井，2005 年最长生产周期 89d，本次为本年度第



图 4-1 营 12-203 井原井油管磨损图

三次作业，油管在泵上 200m 处磨穿孔见图 4-1。曾采用过抽油杆下部加重、旋转井口、抗磨扶正杆和防蜡器（该井结蜡较为严重）等工艺，效果不明显。本次作业，为验证碳蜡涂层油管的抗磨蚀性能，在前次工艺不变的基础上，在泵上偏磨段应用涂层管 260m，生产参数 $\Phi 56\text{mm} \times 3\text{m} \times 5\text{min}^{-1}$ ，正常生产日产液 38.4t，含水 92.4%。试验过程中在 2006 年 1 月 22 日因泵上第 26 根油管，即在碳蜡涂层管上第一根未涂层油管磨漏作业，而涂层油管完好无损，涂层油管继续下井应用，到 2006 年 5 月 25 日转注水井，安全生产 261d，超过前期最长生产周期 2 倍多，目前继续在注水井中继续应用。

井例 2：滨 648-9 井

该井 2005 年因偏磨造成作业了 4 次，采取了多种防磨措施，效果不显著，生产周期平均不到 60d，2006 年 1 月 15 日作业，经与滨南作业中心结合，不配套其它防偏磨工艺，仅在泵上 560m 偏磨段更换碳蜡涂层油管 600m，配套应用普通抽油杆，生产参数 $\Phi 44\text{mm} \times 5\text{m} \times 25\text{min}^{-1}$ ，已正常生产 330d，现仍在正常生产。

(3) 对电泵井具有防冲蚀效果

高含水、高矿化度、大排量电泵井生产存在的主要问题是油管的冲蚀问题。由于普通油管抗冲蚀性能差,造成早期管漏失效作业。2005年8月开始,碳铬涂层油管在东辛采油厂的电泵井上进行应用,主要用于解决大排量高含水、高矿度介质对油管的冲蚀问题。目前共下井应用4口,涂层油管约5400m,到目前为止全部正常运转。

4.2 经济效益及社会效益

通过碳铬复合树脂内涂层油管技术在油井防偏磨、水井防腐蚀的产业化现场应用情况证明,碳铬复合树脂内涂层油管技术具有较好的抗磨、防腐特性,用于注水井、电泵井能有效解决油管腐蚀、冲刷的问题,用于偏磨井能起到有效减缓管杆偏磨的作用。

通过现场统计结果表明,156口注水井中,目前最长生产周期为纯梁采油厂的纯56-3井达到了17个月,而且继续有效,其余井目前均在正常生产;46口偏磨井中,目前除东辛采油厂Y12-203井2006年5月25日因高含水转注水井外,其余各井均在正常生产,可对比偏磨井的平均生产周期延长136d,其中生产周期超过原生产周期2倍以上的偏磨井3口井,生产周期超过原生产周期1倍以上的偏磨井5口井,即生产周期超过原生产周期1倍以上的偏磨井占到可对比井数的57%,且目前继续有效生产。在所下的电泵井中,除YAA12-P1井、YAA12-P7井因高含水改抽油机井生产,其余井均正常生产。

在注水井、电泵井中应用,能有效延长油管使用寿命,减少油管材的投入,按节约20%的油管投入计算,油管价格按 0.8×10^4 元/t

$$\text{节约油管投入} = 33.5 \times 10^4 \text{m} / 105 \text{m/t} \times 20\% = 638 \text{t}$$

$$\text{节约油管投入费} = 638 \text{t} \times 0.8 \times 10^4 \text{元/t} = 510.4 \times 10^4 \text{元}$$

在偏磨井上应用具有延长偏磨井生产周期、减少油管投入的效果。按节约50%的管杆投入计算,减少油管投入 $= 3.62 \times 10^4 \text{m} / 105 \text{m/t} \times 50\% = 172.4 \text{t}$

$$\text{减少管杆投入费用} = 172.4 \text{t} \times 0.8 \times 10^4 \text{元/t} = 137.9 \times 10^4 \text{元}$$

单井延长生产周期2倍以上,以单井节约作业费用5万元、作业一次需3d、每天生产原油5t计算:

增油: $5\text{t/d} \times 3\text{d/井次} \times 46\text{井次} \times 2 = 1380\text{t}$

延长生产周期增油: $1380\text{吨} \times (2500 - 800)\text{元/t} = 234.6 \times 10^4\text{元}$

延长生产周期节约作业费用: $5 \times 10^4\text{元/井次} \times 46\text{井次} \times 2 = 460 \times 10^4\text{元}$

应用碳蜡涂层油管一年增加经济效益: $510.4 + 137.9 + 460 + 234.6$
 $= 1342.9 \times 10^4\text{元}$

通过现场的实际应用证明,因碳蜡涂层油管在抗拉、抗压和抗冲击强度上等同于常规油管,所以能代替普通常规油管在各类油井、注水井中进行广泛应用。特别是由于油管内涂层的抗磨、防腐特性,使得碳蜡复合树脂内涂层油管不仅在注水井中应用具有防腐、防垢的特点以及在电泵井中应用具有防冲蚀的效果,更重要的是为油田开发到高含水期普遍存在的抽油机井管杆偏磨问题提供了一种抗磨防腐性能优良、防偏磨配套简化、施工方便的抗磨蚀油管技术。该技术的产业化应用前景广阔,对油田的降本增效意义重大。

第5章 结 论

通过油管内涂抗磨新材料的试验研究和油管涂覆生产工艺的研究,取得了以下研究成果:

(1) 通过试验研究的方法,研究形成了以碳锆复合树脂涂料技术为核心的碳锆复合树脂内涂层油管技术。碳锆复合树脂涂料技术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,粉末涂料涂覆在油管内表面,形成一层具有超强耐磨和优良防腐性能的保护层,使油管具有防腐、抗磨的双重作用。

(2) 针对碳锆复合树脂涂料的特点,研究形成了技术先进、自动化程度高、生产效率高的油管涂覆生产工艺,能实现各种规格油管涂覆的产业化生产,年生产能力可达 $80 \times 10^4 \text{m}$ 以上。

(3) 研究形成了系列化碳锆复合树脂涂层油管技术,分别适用于偏磨油井的抗磨防腐涂层油管和适用于注水井的防腐涂层油管的需求。现场应用表明,能有效解决注水井、电泵井油管腐蚀问题,有效减缓偏磨井管杆偏磨,延长偏磨井生产周期2倍以上。

(4),碳锆复合树脂内涂层油管在现场应用中无特殊配套要求。尤其在偏磨井解决管杆偏磨问题时,工艺配套和现场施工均为常规方式,方便施工,降低了工艺配套成本。

(5) 建议扩大碳锆复合树脂内涂层油管使用范围。对具有防腐、防磨要求的各类井况,均可采用该技术。必要时,可适当采取措施提高涂层油管生产能力,力求效益最大化。

参考文献

- [1] 高国华,李琪,张建仁.管柱在垂直井眼中的弯曲分析.西安石油学院学报,1996;11(1):33~35
- [2] 张永弘,刘恩.管柱螺旋屈曲时接触压力的研究.石油学报,1998;(3):131~134
- [3] 丛蕊,董世民.抽油杆柱稳定性问题的研究.石油机械,2002;30(8):17~19
- [4] 冯耀忠.延长有杆泵井免修期的措施.油气田地面工程,1990;(3):21~24
- [5] 陈春江,黎陞炎,李雪燕.抽油杆防腐扶正器的研制与应用.石油机械,2002;(12):41~42
- [6] 张晓芳,白钢,周家驹.油管旋转器的研制与应用.石油机械,2002;(3):41~42
- [7] 李泉美,姜学明,黄成凯等.抽油井偏磨腐蚀机理分析及防治对策.试采技术,2000;(4):43~47
- [8] 冯耀忠,胡龙光,卮冠贞.减缓有杆泵井腐蚀和磨损的措施.油气田地面工程,1995;(1):30~31
- [9] 卢刚,陈杰,曾保森,胡义.有杆泵井偏磨腐蚀原因探析及防治.钻采工艺,2002;(3):90~91
- [10] 陈玲,陈作荣,康杰.直井管杆偏磨成因分析.江汉石油学院学报,2001;23(3):54~55
- [11] 孙爱军,李士瑞,徐英娜等.抽油杆管磨损问题的探讨及预防措施.钻采工艺,2001;(3):59~61
- [12] 靳从起,赵普春,王世录.W22 区块油井管杆腐蚀偏磨治理技术.钻采工艺,2000;(1):32~35
- [13] 杨正友,郑登才,杨传让.抽油井井下管杆偏磨问题分析.断块油气田,1996;13(5):58~62

- [14] 李秀竹,杨建华.抽油机井防偏磨综合配套技术.石油矿场机械,2002;31(4):54~55
- [15] 张金中.机采油井管杆偏磨分析与研究.润滑与密封,2002;6:24~25, 28
- [16] R. W. Hornbeck, Numerical Method, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, Jew Jersey, 1975: 288~289
- [17] Axelson. Ribbon rod development for beam pumping applications. 41th Ann.South Wester Pet.Shout Course,1994.4.20:44~55.
- [18] Henaley H N. Craphite Composite Tape in beam-pumped oli weils. 1984.SPE13200

致 谢

本论文是在王业飞、陈军两位导师的亲切关怀和细心指导下完成的。在这里，我要向王业飞教授、陈军高工两位导师表示感谢；对给这篇论文提供了帮助的中国石化胜利油田分公司采油院姜东、科技处马波、开发管理部杜荣光等有关人士致以特别的感谢！又及，我还要对在我编写这篇论文过程中提供方便的有关领导及同事表示感谢！

最后感谢所有关心和帮助过我的人们，并致以最衷心的感谢！

个人简历、在学期间的研究成果

何磊，男，1969年11月出生，山东省高青人，1990年毕业于大连大学物资管理专业，同年分配到胜利油田物资供应处工作，中共党员，高级经济师，现从事物资供应与管理工作。

参与的科研项目包括：

《交联聚合物调驱技术现场应用研究》。