

套管磨损机理及其防磨措施研究*

林元华^{1,3} 付建红¹ 施太和¹ 严仁俊² 贺志刚¹ 董伟² 李润方³

(1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院

2. 四川石油管理局川西北矿区 3. 重庆大学机械传动国家重点实验室)

林元华等. 套管磨损机理及其防磨措施研究. 天然气工业, 2004; 24(7): 58~61

摘要 在大位移井、大斜度井、水平井和深井钻井中, 或者在狗腿严重度较大的井段以及在教学套管下入后的长裸眼钻井过程中, 常常出现套管磨损问题。由此而诱发的套管抗挤强度和抗内压强度降低问题影响了油气井的后续完井测试作业、降低了油气井寿命, 严重时还会导致某段油气井报废或整口油气井报废。为此, 文章提出分别以水基泥浆、油基泥浆、清水作为润滑介质, 用实验手段分别研究了法向载荷、温度、转盘转速、摩擦副材料特性对套管磨损的影响。同时, 在对国内外防磨措施进行研究后, 指出敷焊耐磨带是一种经济可行的防磨措施, 在深井钻井、大位移井钻井和大斜度钻井中应重点推广。

主题词 套管 磨损机理 套管保护 耐磨带 研究

随着石油工业的发展, 深井、定向井和大位移井数量越来越多。在我国现在的井身结构设计中, 主要是 $\varnothing 244.5$ mm 和 $\varnothing 339.7$ mm 技术套管之下的 $\varnothing 215.9$ mm 和 $\varnothing 311$ mm 井段裸眼段较长, 起下钻次数多, 旋转小时数多, 而且出现严重狗腿的几率大, 因此容易引起技术套管严重磨损。其严重后果是: ①套管抗挤强度降低。容易出现套管被挤毁使井眼报废或局部井段报废的情况; ②抗内压强度降低。磨损套管抗内压强度降低, 甚至磨穿而不能承受内压。在井控及中途测试时, 将造成严重后果, 要么使套管破裂、地面窜气的风险, 要么提前下套管或下套管后再测试。这不仅造成经济损失, 而且给加深钻井造成困难, 严重时钻不到设计深度。在我国典型的技术套管磨损的油气井有车古 204 井、新 851、圣科 1 井、英科 1 井、牙哈 7 井、克参 1 井、东秋 5 井、崖城 13—1—3 井、郝科 1 井、却勒 1 井、莺琼 21—1—3、阳霞 1 井、渤海曹妃甸 18—2—1 井和渤中 13—1—2 井等^[1~3]。因此, 为了降低套管磨损, 国内外许多公司研制了系列工具、形成了系列技术。本文在对套管磨损机理研究的基础上, 介绍了国内外的防磨技术和措施, 并认为推广耐磨带是深井、特殊结构井中防磨的较好途径。

套管磨损机理

1. 影响套管磨损的因素

引起套管磨损的因素很多, 但主要因素是钻具组合、井身结构、井眼状况、泥浆成分、套管和钻杆材料等等。经过前人的研究, 基本得到影响套管磨损的共性因素, 包括: ①虽然钻杆接头和钻杆本体对套管的磨损都做了贡献, 但钻杆接头对套管磨损的影响最大。其原因是钻杆接头的直径比钻杆本体大, 一般大 20%~30%, 因此最容易与套管内壁接触, 在接触力的作用下促使钻杆接头和套管都发生磨损。接触力增大, 使钻杆接头和套管内壁之间的钻井液润滑膜的润滑作用降低, 当接触力足够大时, 润滑膜的润滑作用消失, 钻杆接头与套管内壁直接接触。在较大载荷作用下, 两者之间产生干摩擦, 并产生大量热量, 不仅加速套管的磨损, 而且可能导致钻杆接头纵向磨损。②虽然起下钻和正常旋转钻进都会产生套管磨损, 但正常钻井是造成套管磨损的主要因素。③磨损井段既可以在钻柱受拉伸载荷井段, 也可以在钻柱承受压缩载荷井段。只要两者之间存在较大的接触力, 都会加速两者的磨损。钻柱在中和点以上承受拉伸载荷时, 钻杆接头将与靠近曲率中

* 本文受国家自然科学基金资助(项目编号: 50074025), 同时也得到中国石油天然气集团公司中青年创新基金资助。

作者简介: 林元华, 1971 年生, 获博士学位; 1999 年毕业于西南石油学院油气井工程专业, 现为西南石油学院石油工程系副教授, 重庆大学机械传动国家重点实验室博士后研究人员; 主要从事石油管、石油钻井工艺方面的科研和教学工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: (028) 83032796。

心一边的套管接触;当在中和点以下的钻柱在压缩载荷作用下,将与远离曲率中心一边的套管接触。但他们都将承受套管施加的法向力,引起接头和套管的磨损。在狗腿严重度大的井段或钻杆发生屈曲的井段,尤其严重。④钻井液的性能对套管的磨损影响较大。在套管和钻杆的磨损摩擦过程中,钻井液扮演着润滑剂的角色。因此,钻井液的润滑性能较好比如油基钻井液,则两者间的摩擦系数较小,磨损的速度也较小。⑤狗腿严重度对套管的磨损。在狗腿严重度大的井段,钻杆接头与套管内壁的接触压力相对增大,从而加快了钻杆与套管之间的磨损。同时在狗腿度较大的井段,除钻杆接头将与套管内壁接触外,而且将使部分钻杆本体与套管内壁接触,加速了套管的磨损。因此,钻井过程也应该严格控制井眼轨迹,减小狗腿严重度,这在大位移井、深井和大斜度井钻井中意义更大。

2. 摩擦系数对套管磨损的影响

(1)润滑剂的影响。不同的润滑剂导致同一种摩擦副的摩擦系数有很大差异,对同一种润滑剂不同摩擦副的摩擦系数也不同^[10]。为此,本文选择不同的润滑剂,对不同的摩擦副进行试验。摩擦副类型分为钻杆和钢、钻杆和泥质砂岩、钻杆和硬砂岩、钻杆和灰岩4种,润滑介质分为7种,其性能见表1所示,室内实验结果见图1。

表1 润滑剂性能一览表

项 目	Φ600	Φ300	Φ200	Φ100	Φ100	Φ100
I (水基泥浆)	84	65	57	46	33	30
II (水基泥浆)	63	51	46	40	32	29
III (水基泥浆)	45	35	31	26	19	17
IV (油基泥浆)	225	141	109	74	27	24
V (井浆, 2800 m)	98	68	53	36	12	10
VI (水基泥浆, 加润滑剂, 3% RH-4)	80	61	52	41	20	16
VII (清水)	/	/	/	/	/	/

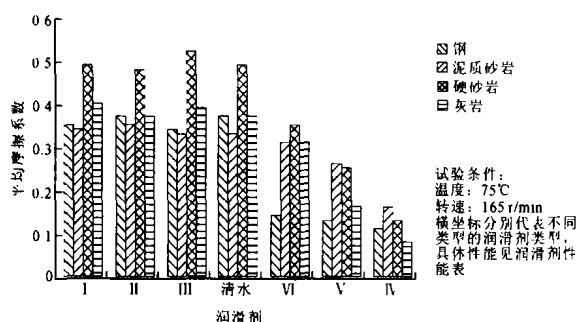


图1 不同摩擦副和润滑剂类型对摩擦系数的影响

由实验数据分析可得,相同的摩擦副在各种润滑介质下的摩擦系数差异较大,而且在同一种润滑介质下,不同摩擦副的摩擦系数影响也很大。造成这种差异的原因主要有以下几方面:①不同的摩擦副材料对润滑剂中的极性分子的吸附能力不同,从而形成的物理吸附膜、化学反应膜不同,影响润滑特性;钻杆与钢材形成的摩擦副的摩擦系数最低,钻杆与硬砂岩间的摩擦系数最大。②润滑剂加入量的影响:金属单位表面上所吸附的极性分子数量(比吸附)是吸附能力的量度,比吸附随着极性分子的浓度增大而增加。当金属表面上的极性分子达到饱和吸附量时,摩擦系数最低。因此润滑剂量应适当,太少减摩效果不理想,加入量超过饱和吸附量时,摩擦系数也不会减小,造成润滑剂的浪费。③润滑剂本身的分子结构的影响:润滑剂的分子链越长,吸附膜越厚,两摩擦表面就被隔开得越远,摩擦系数下降。

(2)转盘转速的影响。图2表明4种摩擦副材料在不同转盘转速下的摩擦系数变化规律。实验结果表明,对于金属与岩石形成的摩擦副而言,随着转盘转速增大,摩擦系数有增大趋势,随后随转盘转速进一步增大,摩擦系数逐渐减小,并且不同的岩石性能受转盘转速影响的程度不同;对于金属与金属形成的摩擦副,随着转盘转速增大,摩擦系数首先是减小,而后摩擦系数将随着转盘转速增大而出现增大的趋势。从实验的整体情况看,转盘转速对摩擦系数的影响并不突出,它对摩擦系数的影响程度有限。但是转速加快,单位时间内的磨损量增多,同样会增大套管磨损的速度。

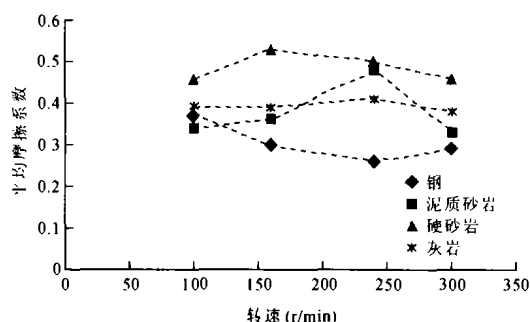


图2 滑动速度对摩擦系数的影响

(3)温度影响。各种边界膜都只能在一定的温度范围内使用。对吸附膜而言,所有的吸附膜都有一定的临界温度,超过这一温度将使吸附膜脱吸、乱向,使润滑失效。对化学反应膜而言存在一个反应温度,只有在反应温度以上才能生成稳定的化学反应膜,起到良好的润滑作用。

由吸附膜随温度升高摩擦系数变化情况分析,随着温度的升高,本来就弱的物理吸附膜脱吸,使得摩擦系数也随之提高^[10]。由温度影响曲线分析,曲线Ⅱ为化学吸附膜随温度升高摩擦系数变化情况。在化学吸附膜熔点温度以下,摩擦系数很低,但当超过化学吸附膜熔点温度以后,摩擦系数急剧增加。由温度影响曲线分析,曲线Ⅲ为极压润滑膜随温度升高摩擦系数变化情况,在某一反应温度以下极压润滑剂的化学反应很慢,当达到极压反应温度时,就开始发生化学反应,随着反应膜不断生成并承担载荷,摩擦系数下降,直到高温摩擦系数都能保持恒定的低值,起到有效的润滑作用。在实际工况中,通常加入几种润滑剂,以期达到综合效果,使得在不同的温度段均能达到很好的润滑作用,降低摩擦系数值。

3. 法向载荷的影响

在钻杆与套管之间形成的边界摩擦,物理吸附膜对两者之间摩擦系数影响较大^[10]。一般情况下,法向载荷没有导致物理吸附膜破裂时,法向载荷对摩擦系数的影响较小。但是,实验表明:钻杆与钢材的摩擦系数随法向载荷增加而明显增大。其主要原因是钢与岩石之间的分子吸附膜很薄,甚至很难形成吸附膜,当施加载荷时,很薄的分子吸附膜很容易就脱吸,从而摩擦系数主要取决于摩擦副材料的表面特性(机械特性),而摩擦副的机械表面特性是稳定的,因此摩擦系数受载荷的影响较小,保持为某一定值;对于钻杆与钢形成的摩擦副,两者间比较容易形成吸附膜,当施加正压力时,吸附膜要逐渐被破坏,摩擦副表面机械特性对摩擦系数形成的贡献越来越大,而分子吸附膜对摩擦系数的贡献越来越小。当载荷达到一定值时,摩擦副表面上形成的吸附膜与被破坏的吸附膜达到一个平衡时,摩擦系数趋于恒定。实验表明:润滑介质的特性对摩擦系数的影响也较大,油基泥浆的润滑性能较好,因此摩擦副的摩擦系数也较小,远远低于水基泥浆的摩擦系数。

总之,以水基泥浆、油基泥浆、清水作为润滑介质,研究了法向载荷、温度、转盘转速、摩擦副材料特性对套管磨损的影响,用实验手段验证了影响套管磨损的主要因素。这些因素包括钻杆与套管的材料特性、法向载荷泥浆润滑性能。因此,在现场钻井作业中,应该采取措施减少套管磨损,包括:①保证井眼质量,减小狗腿严重度,使两者的接触力降低到最小;②采用优质并具有很好润滑特性的钻井液,降低摩擦系数;③使用旋转扶正器,将滑动摩擦变为滚动

摩擦,较少摩擦系数;④设计合理钻具组合,避免钻具发生屈曲。

减缓套管磨损的措施

1. 安科耐磨带

耐磨带起源于一种耐磨接头,耐磨接头可以安装在钻柱任意位置,用于减轻钻柱扭矩^[4]。在20世纪30年代,钻杆接头耐磨带技术得到了广泛使用,其实质是在钻杆公接头或母接头上敷焊一层50.8~76.2 mm宽的硬质合金材料。因此,耐磨带可将钻杆接头本体与套管壁或井壁隔离,避免钻杆与套管壁或井壁直接接触。但此时的耐磨带主要被用来保护钻杆和其它井下工具以防止过早的磨损,主要采用钨钴系列硬质合金。虽然对钻杆接头确实起到了很好的保护作用,但也会导致套管壁的严重磨损。因此,在1992年,ARNCO公司新材料从设计思路、设计原理、材料选取和焊接工艺等方面进行了突破和改进,其宗旨是平衡磨损设计,其概念是尽量减小套管的被动磨损,同时允许钻杆接头适度磨损。并首次推出新耐磨带材料 ARNCO 200 XT,敷焊 ARNCO 200 XT 的钻杆在降低钻杆接头本身磨损的同时,有效地降低了套管的磨损。迄今为止,该技术已经在世界各地得到了应用,在深井、特殊结构井技术套管防磨方面起到了很好的作用。随后,公司又开发出 ARNCO 100 XT 钻杆接头耐磨带材料,可用于钻杆、加重钻杆、钻铤、扶正器、减震器以及其它各种井下工具。美国权威机构 MAURE ENGINEER DEA—42 套管磨损研究中证明 Arnco 耐磨带技术既可以用于保护钻杆接头并延长其寿命,也能保护套管,避免套管磨损^[5,6]。耐磨带技术是深井、特殊结构井钻井的主要减磨措施,应得到进一步推广。

2. 钻杆保护器

钻杆保护器利用橡胶材料来避免套管磨损,一般分为旋转钻杆保护器和非旋转钻杆保护器,前者被刚性地固定在钻柱上,随钻柱的旋转而旋转。后者为非旋转钻杆保护器,一般由三部分组成:①内壁带槽的橡胶滑套;②金属加强衬管;③两个铝制的止推轴承环。滑套位于两轴承环之间,轴向上有足够间隙,允许滑套和钻杆有相对转动。滑套内表面的槽可以保证钻井液进入滑套与钻柱的环形空间,起到润滑作用。其减摩机理主要是:保护器外径比钻杆接头外径大,其外壁将和套管内壁接触,而钻杆接头与套管内壁不发生接触。同时,保护器材料和套

管内壁之间的摩擦系数约为0.10,因此,减少了套管内壁的磨损,对套管起到了保护作用^[7~8]。

3. 旋转钻柱接头

为减少大斜度井、大位移钻井的扭矩损失和降低套管磨损,将钻柱与套管或裸眼壁的滑动摩擦转变为滚动摩擦,降低工具接头和套管、裸眼井壁之间的摩擦系数,一些公司已成功地研制并采用了特殊旋转钻柱接头等技术措施。最早可以列入这一类接头的工具是滚轮扶正器,分为整体式和分体式两种。通过滚轮将常规扶正器与井壁或套管的滑动摩擦转变为滚动摩擦,因此可以降低钻柱扭矩,减少套管磨损,减少扭转振动的发生。比较现代化的旋转钻柱接头(DSTR)主要包括心轴、非旋转套筒。两者之间安装有轴承使其有较好的相对运动,其中心轴材料的力学性能远远比钻杆材料好,强度较高而不会成为钻柱中的薄弱环节。因此,使用该工具后,可以节省驱动能源、减少套管磨损、减少钻杆磨损和疲劳^[4]。

结 论

本文针对大位移井、大斜度井、水平井和深井钻井容易出现的套管磨损问题,分别以水基泥浆、油基泥浆、清水作为润滑介质,用实验手段分别研究了法向载荷、温度、转盘转速、摩擦副材料特性对套管磨损的影响,得出了影响套管磨损的因素及其控制措施,这些实验结果对套管防磨的钻具组合设计、钻井液设计和工具研制方面具有较好的指导意义。同

时,在对国内外防磨措施进行研究后,指出敷焊耐磨带是一种经济可行的防磨措施,在深井钻井、大位移井钻井和大斜度钻井中值得推广。

参 考 文 献

- 1 张明江,彭新明. 非旋转钻杆保护器的应用. 石油钻采工艺,1998;(20)增刊:49~51
- 2 姜伟. 渤海地区套管磨损问题的研究. 中国海上油气(工程),2002;(14)1:31~34
- 3 黄伟和. YK1井技术套管磨损分析. 石油钻探技术,1997;(25)4:27~29
- 4 Rodman D W, Swietlik G. Extended reach drilling limitations: a shared solution. SPE 38466
- 5 John G Mobley. Hardbanding and its role in deepwater drilling. SPE 52882
- 6 John G Mobley. Hardbanding and its role in directional/horizontal drilling. SPE 52187
- 7 N, Moore B, Western well tool, P. S W. Mock. Reduction of drillstring torque and casing wear in extended reach wells using non-rotating drillpipe protectors. SPE 35666
- 8 Schneider F F, Coilins G J. Drillpipe protectors successfully used to reduce casing wear in deep directional well. SPE 23903
- 9 王卫,马清明,徐俊良等. 套管减摩接头的研制与应用. 石油钻探技术,2003;(31)3:38~39
- 10 周锡容,杨启明. 摩擦磨损与润滑. 北京:石油工业出版社,1997:52~58

(收稿日期 2004-02-08 编辑 钟水清)