

普通高等院校机械类“十三五”规划教材

机械装备摩擦学设计及 典型失效案例分析

主 编 朱旻昊
副主编 蔡振兵

机械装备摩擦学设计及 典型失效案例分析

主 编 朱旻昊
副主编 蔡振兵

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

机械装备摩擦学设计及典型失效案例分析 / 朱旻昊
主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2019.9
ISBN 978-7-5643-6948-4

I. ①机… II. ①朱… III. ①机械设备—摩擦—机械
设计②机械设备—失效分析 IV. ①TH117②TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 130561 号

Jixie Zhuangbei Moxaxue Sheji ji Dianxing Shixiao Anli Fenxi

机械装备摩擦学设计及典型失效案例分析

主编 朱旻昊

责任编辑 李 伟
特邀编辑 傅莉萍
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 61 0031
发行部电话 02 8-87600564 0 28-87600533
网址 <http://www.xnjdcbs.com>
印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 14.75
字数 368 千
版次 2019 年 9 月第 1 版
印次 2019 年 9 月第 1 次
定价 59.00 元
书号 ISBN 978-7-5643-6948-4

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

本书编委会

主 编 朱旻昊

副主编 蔡振兵

编委会成员（按姓氏笔画为序）

王庆良（中国矿业大学）

刘 莹（南昌大学）

刘 焜（合肥工业大学）

朱旻昊（西南交通大学）

朱爱斌（西安交通大学）

朴钟宇（浙江工业大学）

李红轩（中国科学院兰州化学物理研究所）

沈明学（华东交通大学）

张执南（上海交通大学）

张德坤（中国矿业大学）

岳 文（中国地质大学（北京））

周仲荣（西南交通大学）

孟祥慧（上海交通大学）

姚屏萍（中南大学）

段德莉（中国科学院金属研究所）

钱 浩（上海核工程研究设计院有限公司）

董光能（西安交通大学）

蔡振兵（西南交通大学）

序

设计是一切知识（含高新技术和科学发现）进入产品（含创新）的纽带和桥梁，摩擦学知识也不例外。我想这就是英国 F. T. Barwell 教授、我国郑林庆教授一直倡导摩擦学设计研究的原因。当一个产品的设计已经基本完成，通常不会给后处理留下多少可改变的空间，如果将摩擦学问题的解决作为后处理，不论是多么好的摩擦学研究成果，再想采用它们就比较困难。

摩擦学研究的对象是摩擦副。摩擦副在机械装备中看起来好像是很小的子系统，然而其结构之复杂，往往是其他子系统难以比拟的，更不是“界面”这个概念所能涵盖的。一个机械装备中的全体摩擦副构成了它的摩擦学系统。摩擦学系统的功能是保证机械装备各部分具有确定性的运动，没有运动不称其为机械，各部分运动不确定，这个机械装备就是“废物”，因此机械装备的运动保证功能的重要性是不言而喻的。现在市面上很热闹的人工智能（AI），在机械装备里的重要程度并不一定能够超过摩擦学系统。不管多么现代化的智能机械装备，人工智能在其中仅仅起一个控制器的作用，而执行器的行为最终要通过运动实现。摩擦副的性能不能达到要求，整个装备只能停摆，不管其中有多么高级的人工智能。市场上的喧闹常常掩盖了人们对摩擦学设计重要性的认识。

摩擦学设计，更完整地说是摩擦学系统设计，就是要制定摩擦学系统的结构和实现结构的途径，并得到实践检验认可。它有别于对某个摩擦学现象的研究、某个摩擦学行为的分析、某个摩擦学方法的探讨。现象研究的认知，行为分析的数据，方法探讨的结果，等等，统称为摩擦学知识，都是摩擦学设计成功的基础。没有充分的摩擦学知识供给，就没有摩擦学设计的竞争力。

推进摩擦学设计要做好两方面工作：一方面是做摩擦学设计的人参与整个机械装备的设计，但侧重于其中的摩擦学系统设计，因为摩擦学知识的拥有、取得和高效运用是摩擦学设计成功的关键。要在机械装备设计中建立摩擦学设计，需要改变机械设备设计中的顶层功能架构，需要顶层决策人能够充分认识到机械装备的运动保证功能与摩擦学系统设计之间的关联，这就需要摩擦学设计工作者收集尽可能多的系统运动保证功能和摩擦学设计关联的实例，以实例充分做好宣传工作，以教育机械装备设计顶层决策人提高对摩擦学设计的认知，这是推进摩擦学设计开展的非常重要的方面。本书就是这方面努力的一个组成部分。

当然不可能所有做摩擦学研究的都参与机械装备设计，摩擦学设计也不可能脱离整个机械装备设计单独进行。根据设计以已有知识为基础定律，摩擦学知识供给对摩擦学设计的竞

争力和成败至关重要，推进摩擦学设计的另一方面重要工作就是将研究成果处理成便于在设计中应用的知识，并以最便捷的方式送到设计里，这就是摩擦学设计知识处理和摩擦学设计知识服务。践行“要把论文写在祖国的大地上，把科技成果应用在实际现代化的伟大事业中”的号召，这个处理和服务都是所有摩擦学工作者无可推卸的责任，我们不能只想着写大文章投到国外高影响因子的杂志。应该想到：一个工程师在设计任务十分紧迫的情况下，要满足现在还不能满足的需求，面对以前没有出现过的难题，怎么可能马上从那些浩如瀚海的外文文献中检索到与他当前设计问题有关的文章，读懂以后，再在字里行间找到对设计可能有用的内容，有时甚至还需要经过艰难消化和转换过程才能够集成到他的设计里，以这种文章提供知识，能够怪工程师们不重视摩擦学设计吗？所以做好摩擦学设计知识处理和摩擦学设计知识服务也是对摩擦学设计的极其重要的贡献。

摩擦学设计专委会多年来在这方面做了大量工作，成绩可喜可贺。不过应该看到，我们的机械装备制造业和国家发展需要还有很大差距，首先是认知上的差距。这其中对摩擦学认知上的差距，有对机械装备中摩擦学元器件制造水平认知上的差距，有对机械装备制造中摩擦学设计水平认知上的差距，有对摩擦学知识在提高机械装备设计竞争力作用认知上的差距，等等。机械装备制造业从跟随发展到超越发展，需要克服的困难很多，越过这些困难首先要越过认知上的差距，这需要各方面的不懈努力。国家兴亡，匹夫有责，包括我们这些摩擦学设计工作者。在过去已有成绩基础上，相信摩擦学设计专委会今后的工作会推进得更好。



上海交通大学、西安交通大学教授

中国工程院院士

2019年7月于上海

前 言

摩擦学 (Tribology) 是研究做相对运动的相互作用表面上的各种现象 (主要是摩擦、磨损、润滑及其相关现象) 产生、变化和发展的规律及其应用的一门科学和技术。磨损是材料的主要失效形式之一, 据统计, 摩擦消耗掉全世界 1/3 的一次性能源, 约有 80% 的机器零部件都是因为磨损而失效的, 而且 50% 以上的机械装备的恶性事故都是起因于润滑失效和过度磨损。部件之间发生摩擦磨损、润滑失效直接导致结构界面松动、咬合、材料损失等, 并使构件的疲劳寿命大大降低。在一些重要领域, 如核电、建设工程、交通工具、航空航天等领域, 摩擦、磨损给重大装备的安全、可靠运行带来了较大的安全隐患和严重的经济损失。

随着科学技术的快速发展, 人们逐渐利用新科技深入研究摩擦学行为及机理, 并进行了大量的研究。磨损过程非常复杂, 像磨粒磨损、黏着磨损、冲击磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、微动磨损等形式的研究受到大批学者关注的同时, 一些摩擦学新兴的研究领域也受到越来越多的关注, 如纳米摩擦学、生物摩擦学、先进表面技术、绿色润滑、智能润滑与超滑等, 这些为摩擦学带来了新的发展机遇, 并产生了大量研究成果和实际应用。近年来, 不少学术期刊和学术会议都发表了大量摩擦学研究论文, 可谓是研究成果丰富。摩擦学强大的生命力在于其能有效地节约资源和能源、提高设备服役的可靠性、减少环境污染, 这与我国的可持续发展战略目标是一致的。在工业文明高度发展的今天, 摩擦学的研究已经成为各工业领域的研究重点, 摩擦学及其设计科学每前进一步, 都将为人们带来更高效、安全的生产和更美好的生活。

本书以实际工程出现的损伤实例及相关案例为背景, 详细介绍了多种装备摩擦接触界面的失效原因, 总结出多领域机械及装备部件的损伤机制与解决办法, 其内容反映了我国科研人员近年来在机械装备摩擦学设计和失效分析方面的最新研究成果。本书在实际应用与理论分析相结合的基础上, 突出问题的本质, 为分析解决现实中所遇到的摩擦学问题提供了重要的参考, 同时也希望本书的出版能促进摩擦学设计领域的研究与发展, 使摩擦学设计成为现代设计理论与方法中极为重要的一环。

本书可供机械工程、摩擦学、表面工程、材料科学、生物医学工程等专业以及在核电、

航天航空、交通运输、建筑工程等工业领域从事产品设计、制造、使用及维护服务等方面的科技工作者、工程师、研究生参考使用。

本文在结集出版过程中得到了很多单位同仁的大力支持，我谨代表编委会向他们的辛勤努力表示最衷心的感谢和敬意；同时，感谢中国机械工程学会摩擦学分会摩擦学设计专委会对本书的支持和帮助。

由于本书结集、编撰时间仓促，书中难免有不足之处，望同行批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name '朱轶' (Zhuo Yi), written in a cursive style.

2019年5月于成都

目 录

第 1 部分 机械摩擦件失效分析案例

抽油杆接箍失效分析	高祺洋	薛伟海	李 曙	段德莉	1
涡轮压气机中镍/石墨涂层与钛合金叶片封严摩擦副的失效机制分析	高祺洋	薛伟海	李 曙	段德莉	10
大跨度斜拉桥拉索损伤的失效分析	蔡振兵	吕为乔	朱旻昊	周仲荣	17
含间隙铰接副关节轴承的磨损失效分析	朱爱斌	何胜利	邹 超	陈 渭	27
含缺陷滚动轴承内部载荷分布与支撑刚度变化	张执南	丁为民	潘帅航		41
橡胶密封圈失效典型案例分析	沈明学		彭旭东		55
内燃机活塞组-缸套摩擦力无线检测方法	孟祥慧		谢友柏		63

第 2 部分 摩擦学优化设计

重型车辆车桥推力垫片的损伤分析及其改进方案	吴红星	董国忠	董光能		71
重型车辆齿轮垫片的织构化设计及润滑优化	张 辉	董国忠	吴红星	董光能	80
抗微动损伤的表面工程设计	朱旻昊	徐 进	周仲荣		90
热喷涂层抗疲劳磨损表面完整性设计	朴钟宇	王海斗			98
直升机主减行星减速级下垫片的摩擦学设计及应用	姚萍屏	赵 林	周海滨		113
刀具表面织构设计及刀-屑界面摩擦调控	刘 焜	杨 超	刘小君		122
空间机械部件的冷焊效应与润滑设计分析	李红轩	周惠娣	陈建敏		134
车用发动机低摩擦设计	孟祥慧		谢友柏		145

第 3 部分 摩擦学及表面工程实验研究

采煤机滑靴失效分析及等离子熔覆耐磨层的研究	张德坤	刘 源	刘洪涛		152	
蒸汽发生器传热管微动磨损和微动疲劳研究进展及存在的问题	钱 浩	李 晨	谢永诚	唐力晨	张可丰	161

排污泵球阀的低摩擦表面处理分析·····	曾群锋	董光能	168		
刮板输送机中部槽用耐磨中锰钢的磨损性能及应用分析 ·····	王庆良	强颖怀	王军祥	岳宏霖	174
基于拓展有限元的齿轮点蚀磨粒形态学特征模拟 ·····	程俊	王硕	武通海	陈峰	183
铝合金钻杆腐蚀磨损失效及其防护方法·····	岳文	梁健	孙建华	王成彪	194
风力发电机主轴制动器摩擦副热力耦合分析方法 ·····	刘莹	刘静娟	杨威	章丹亭	215

第1部分 机械摩擦 件失效分析案例

抽油杆接箍失效分析

高裸洋 薛伟海 李曙 段德莉*
(中国科学院金属研究所)

【摘要】抽油杆接箍或油管的失效是杆式泵系统存在的主要问题，在世界范围内的油田中经常发生。失效带来了繁重的维修工作，导致石油生产成本提高。目前，尚未有既经济又有效的解决方案。本文分析了3个来自加州油田的具有不同服役时间的接箍样品的磨损机制。通过尺寸和宏观形貌的比较，揭示了接箍的失效机制。通过分析样品的微观照片、显微硬度、微观组织和化学成分，讨论了失效机制。结果显示，损伤首先由接箍与油管间接触导致的磨粒磨损造成；随着直径的减少，接触载荷降低，此时磨损与腐蚀之间的交互作用成为主要的损伤源。材料上存在的大量缺陷（孔隙）会同时加速磨损与腐蚀对接箍的损伤。交变应力会在某种程度上降低材料的机械性能，但不是失效的主要因素。

【关键词】抽油杆；接箍；失效分析

1 引言

由于其结构简单、操作简便，杆式泵伊始便成为石油工业的重要组成部分；目前绝大多数的油井中，仍在使用杆式泵。由于杆式泵系统的大部分结构、零部件处于运转状态中，因而非常容易出现油管泄漏、杆（接箍）失效等许多显而易见的严重磨损问题，导致杆式泵发生故障，无法工作。当进入服役中、后期后，受到上述问题影响的油井数量逐年增多，其中尤以斜井、斜直井、气驱井和稠油井突出^[1-3]。油井故障将会带来繁重的维修、养护工作，导致石油生产成本提高。为解决上述问题，学者、工程技术人员开展了大量的研究工作，但直到今天，尚未提出一种既经济又有效的解决方案。

抽油杆柱（sucker rod string）是一种位于油井底部，用于驱动杆式泵的装置。通常情况下，每根抽油杆长约7 m，杆与杆之间通过接箍连接。由于接箍的直径大于抽油杆，在某些

油泵的往复循环过程中，接箍可能与油管内壁间发生接触。通常情况下，接箍的磨损程度最严重，油杆次之，油管的磨损相对轻微。70%的损坏是在接箍与油管接触过程中造成的，如接箍被磨平甚至被磨穿。接箍的磨损形式及损伤来源，主要包括如下几个方面：

(1) 磨粒磨损：在杆式泵循环运行过程中，抽油杆在油管内做往复滑动。由于接箍的直径大于抽油杆，接箍与油管内壁之间将出现法向载荷，该载荷通常由油管内壁的弯曲和抽油杆柱的拉伸而产生。法向载荷与抽油杆的往复运动的耦合，使得接箍与油管内壁之间发生磨粒磨损。显然，选取相对于油管内壁硬度较低的材料作为接箍，使得接箍与内壁发生接触时，以接箍作为牺牲材料来保证内壁不受磨损，是一种经济的设计方案。

(2) 腐蚀：在使用杆式泵的油井中，产液中通常含有来自井底的地下水或人工注入的水。因此采出水中通常会溶解诸如二氧化碳、硫化氢、氧、氯离子、硫酸盐离子、细菌等腐蚀剂和腐蚀物。这些腐蚀剂和腐蚀物可能引起接箍与油管内壁表面发生电化学腐蚀过程，并加剧接箍和油管的失效。

(3) 交变应力：在上行的过程中，所有的抽油杆都要承受自身质量以及采集的油的质量，此时抽油杆受到拉应力；下行过程中，油被取出，抽油杆不再承受油重，此时最上面的抽油杆承受拉应力，而底部的抽油杆受到由上部抽油杆质量造成的压应力。接箍的受力状态与运行中的抽油杆相似。处于交变应力状态下的材料，组织可能发生变化，造成机械性能及其他性能下降。

尽管接箍的磨损原因众所周知，但是对应于不同工况环境下的不同类型的抽油杆的接箍，其失效过程及失效机制不同。本文主要分析3个拥有不同服役时间的接箍样品，样品的服役时间分别为1个月、3个月和5个月。这3个样品均来自美国加州油田的一个小型实验厂。其中，服役周期为5个月的样品因被磨穿而断裂成两段。本文的研究目的在于通过调查接箍的损伤过程及机制，提出相关的选材建议及保护措施。

2 失效分析

2.1 失效过程

图1为接箍样品的实物照片。通过照片可以观察到，服役期为1个月的样品表面可以观察到表层剥离现象，而服役期为3个月和5个月的样品表面则相对光滑。随着接箍服役时间的增加，接箍样品的外径逐渐减小而内径保持不变。当接箍的服役时间达到5个月时，接箍的壁厚变得非常薄，以至于无法承受抽油杆和油的质量，此时接箍断裂成两部分。因此，接箍的损坏为连续失效过程。



2.2 失效机制

2.2.1 磨粒磨损

图1中服役期为1个月的样品表面，可以观察到局部磨损；样品一侧可以观察到严重的损伤，而样品的另一侧，几乎观察不到磨损。但

图1 不同服役时间的接箍样品的实物照片

是服役期为 3 个月和 5 个月的样品表面，几乎观察不到局部磨损。

表 1 为利用无限聚焦显微镜 (Infinite Focus Microscope) 测试的 3 个样品及原始未经服役的接箍样品的表面粗糙度情况。由表可见，原始样品的表面非常光滑，粗糙度仅为 $2.23 \mu\text{m}$ ；服役 1 个月后，样品的表面粗糙度增大到了 $12.44 \mu\text{m}$ ；此后，随着服役时间的继续增大，样品的表面粗糙度逐渐降低。

表 1 不同服役时间下，接箍样品的表面粗糙度

服役时间/月	$Ra/\mu\text{m}$
0	2.23
1	12.44
2	6.07
3	3.54

分别将 3 个接箍样品切割后，利用环氧树脂将 3 个切割的小样品封装起来。利用砂纸和金刚石抛光膏对封装的截面样品抛光，以备后续光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 观察之用。图 2 为服役 1 个月的接箍样品外缘不同位置处的截面光学显微镜照片；图 3 为服役 3 个月和 5 个月的接箍样品的外缘截面光学显微镜照片。

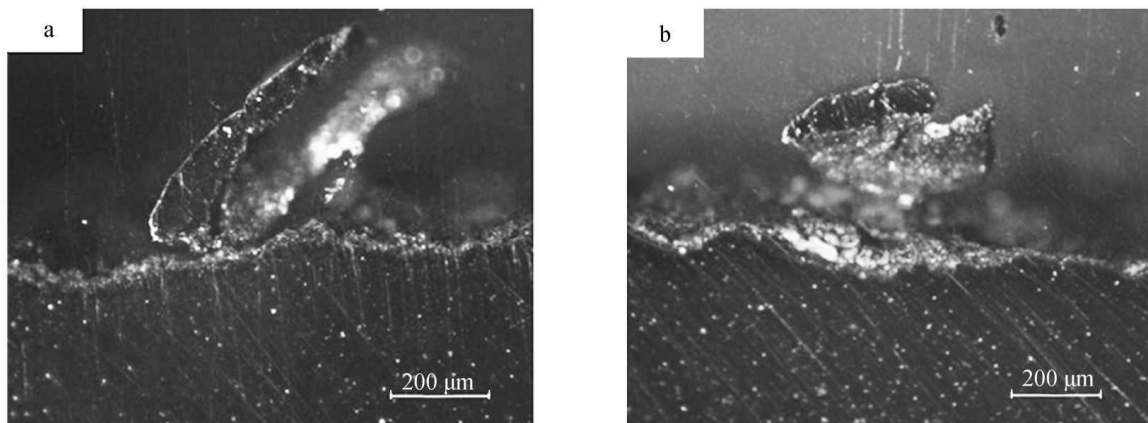


图 2 光学显微镜下，服役 1 个月的接箍样品外缘的截面形貌，其中 a、b 代表不同的位置

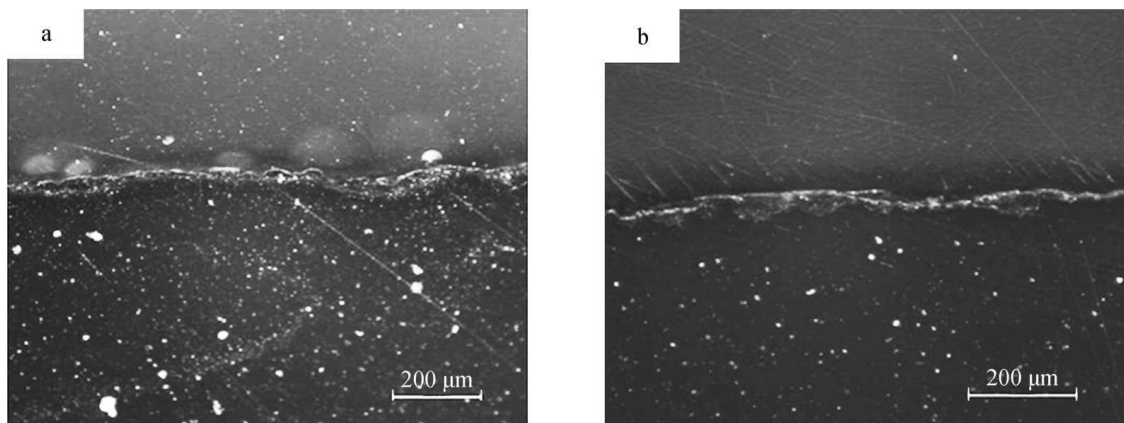


图 3 光学显微镜下，服役 3 个月 (图 a)、5 个月 (图 b) 的接箍样品外缘的截面形貌

对比图 2、图 3 可见，服役 1 个月的接箍样品表面可以观察到明显的金属鳞片，而服役 3 个月和 5 个月的样品表面则基本观察不到金属鳞片。

图 4 为服役 5 个月的样品经 Clark 溶液漂洗后的表面 SEM 形貌，通过照片可以观察到样品表面有明显的金属涂抹和塑性变形特征。

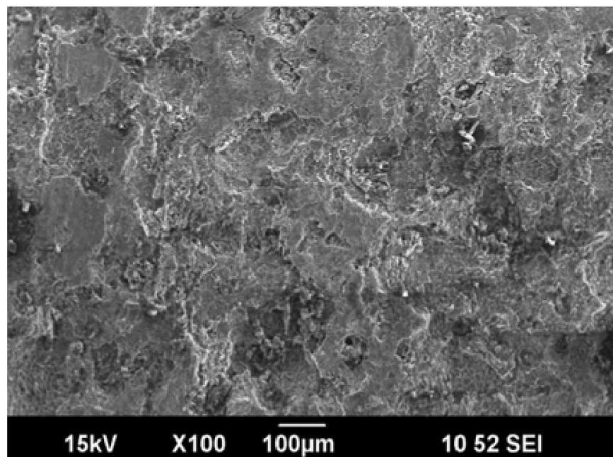


图 4 服役 5 个月的接箍样品的表面 SEM 形貌照片

结合表面形貌与粗糙度信息，可以推测接箍的磨损机制由初始的金属鳞片剥落转变成金属涂抹和塑性变形。服役初期，接箍的外缘直径远大于抽油杆，此时当接箍与油管内壁接触时，法向载荷较大。当接箍的外缘直径逐渐减小时，法向载荷随之降低。因此，接触载荷对磨损机制影响由严重转变成轻微。

2.2.2 腐 蚀

图 5 为服役 5 个月的接箍样品的表面 SEM 形貌及其能谱分析结果。由能谱分析结果可见，样品的磨痕表面出现了大量的碳、氧元素，表明接箍的表面被腐蚀产物层所覆盖。

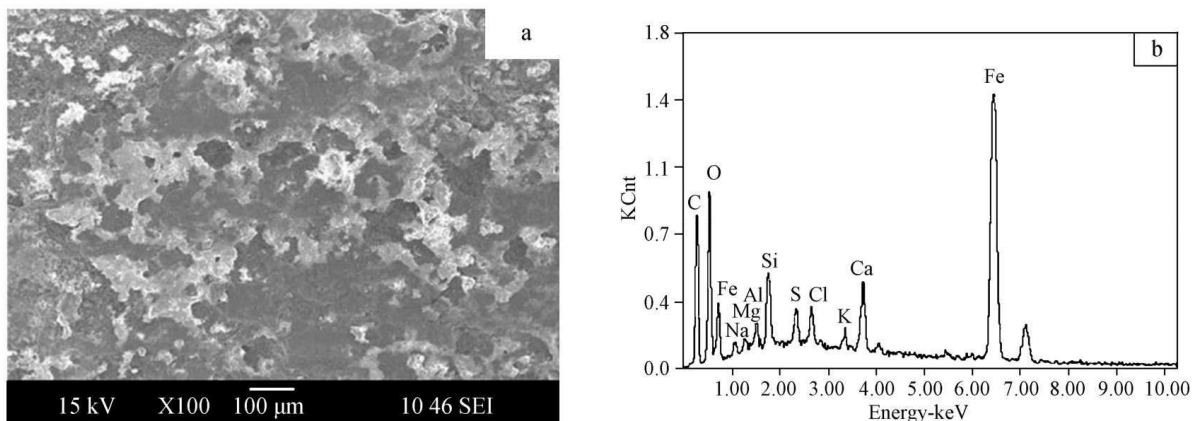


图 5 服役 5 个月的接箍样品的表面 SEM 形貌及能谱分析结果

图 6 为接箍的截面 SEM 形貌。由图 6 可见，腐蚀层比较疏松。其中，图 6 (c) 可以观察到接箍截面的腐蚀层非常厚，表明腐蚀层无法阻止腐蚀向样品的内部发展。另外，腐蚀层非常疏松、易碎并容易与接箍分离。因此可以推断腐蚀促进接箍的磨损过程。对比图 6 (a) 和 (b) 发现，仅在磨损区域内可以观察到腐蚀层，而非磨损区域内则观察不到腐蚀层，表明

磨损会加速腐蚀过程，其原因是磨损会产生新的表面以及强烈的变形。因此，磨损与腐蚀之间存在着交互作用^[9]。

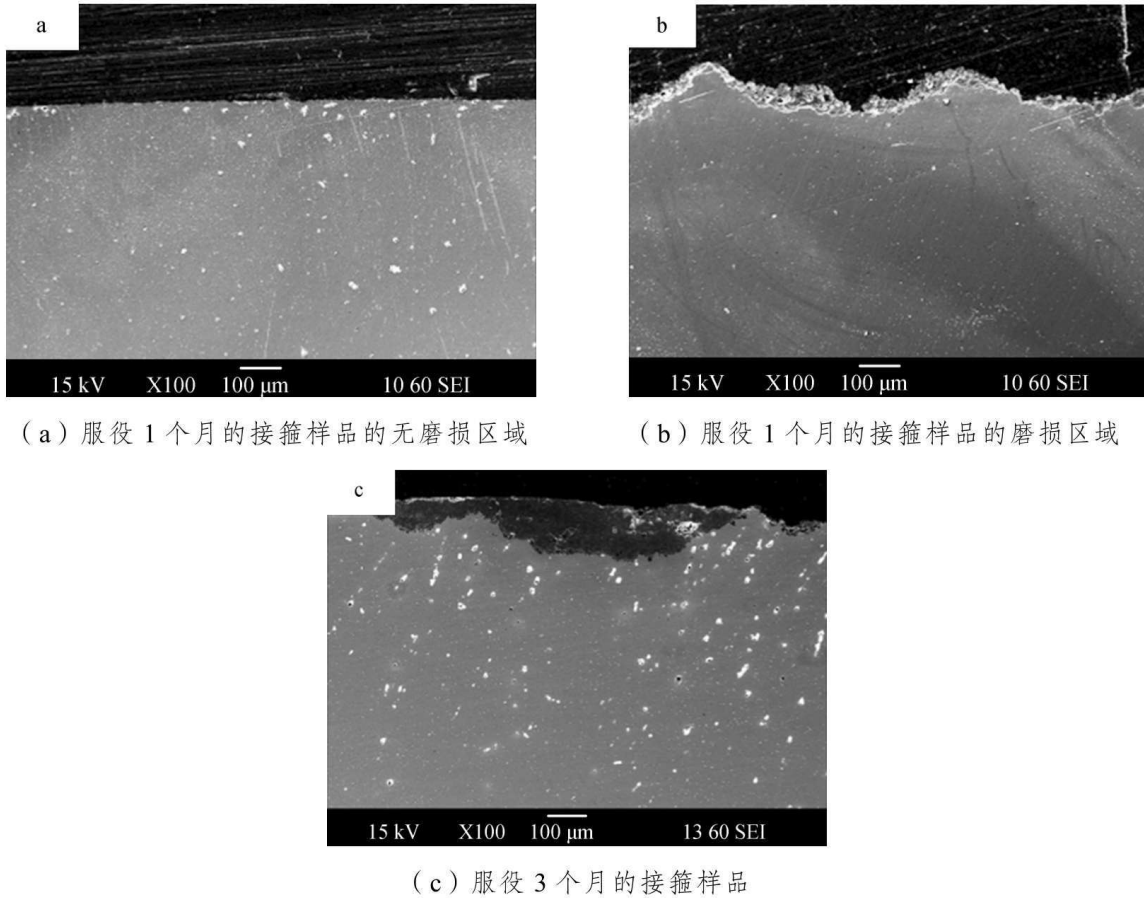


图 6 接箍的截面 SEM 形貌

由图 6 还可以观察到接箍样品中存在大量的孔隙。这些孔隙可能源于样品的生产加工过程。孔隙的存在不仅会降低接箍材料的强度，而且还会加速腐蚀。因为腐蚀液会进入孔隙中，并造成点蚀，如图 7 所示。图 7 为接箍样品在光学显微镜下的截面照片。点蚀的存在会加速腐蚀，并造成更严重的腐蚀^[10, 11]。

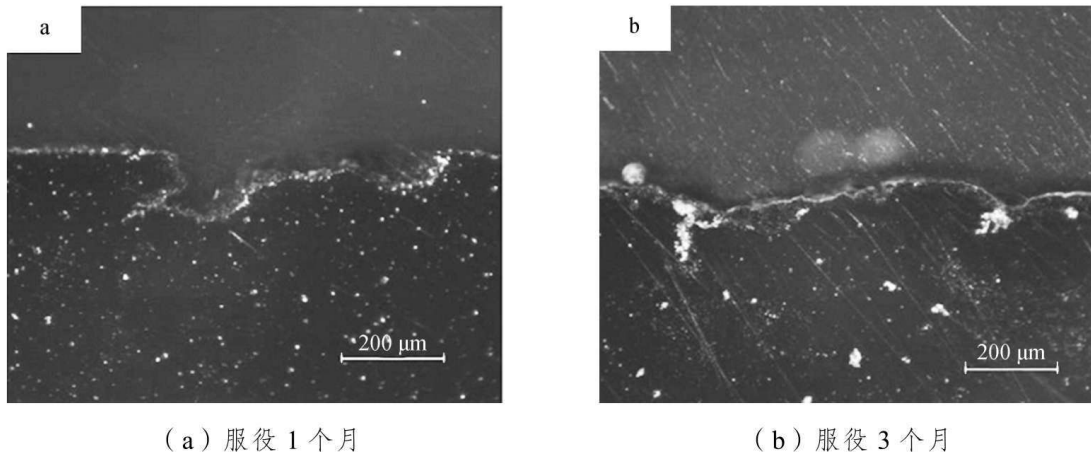


图 7 光学显微镜下，接箍样品的截面形貌

2.2.3 交变应力

图 8 为不同服役时间的接箍样品的微观组织形貌。图中可以观察到两个明显的区域：亮色区域和暗色区域。基于碳钢中典型的铁素体-珠光体组织，可以推断亮色区和暗色区分别对应铁素体和珠光体组织。随着服役时间的增加，铁素体与珠光体逐渐累积增多，并在接箍与油管间由磨粒磨损造成的表面加工硬化的作用下，形成了“带状”组织。换句话说，表面的加工硬化会形成“带状”组织^[12]。需要指出的是，这种显微偏析对材料的机械性能和抗腐蚀性有不良影响。

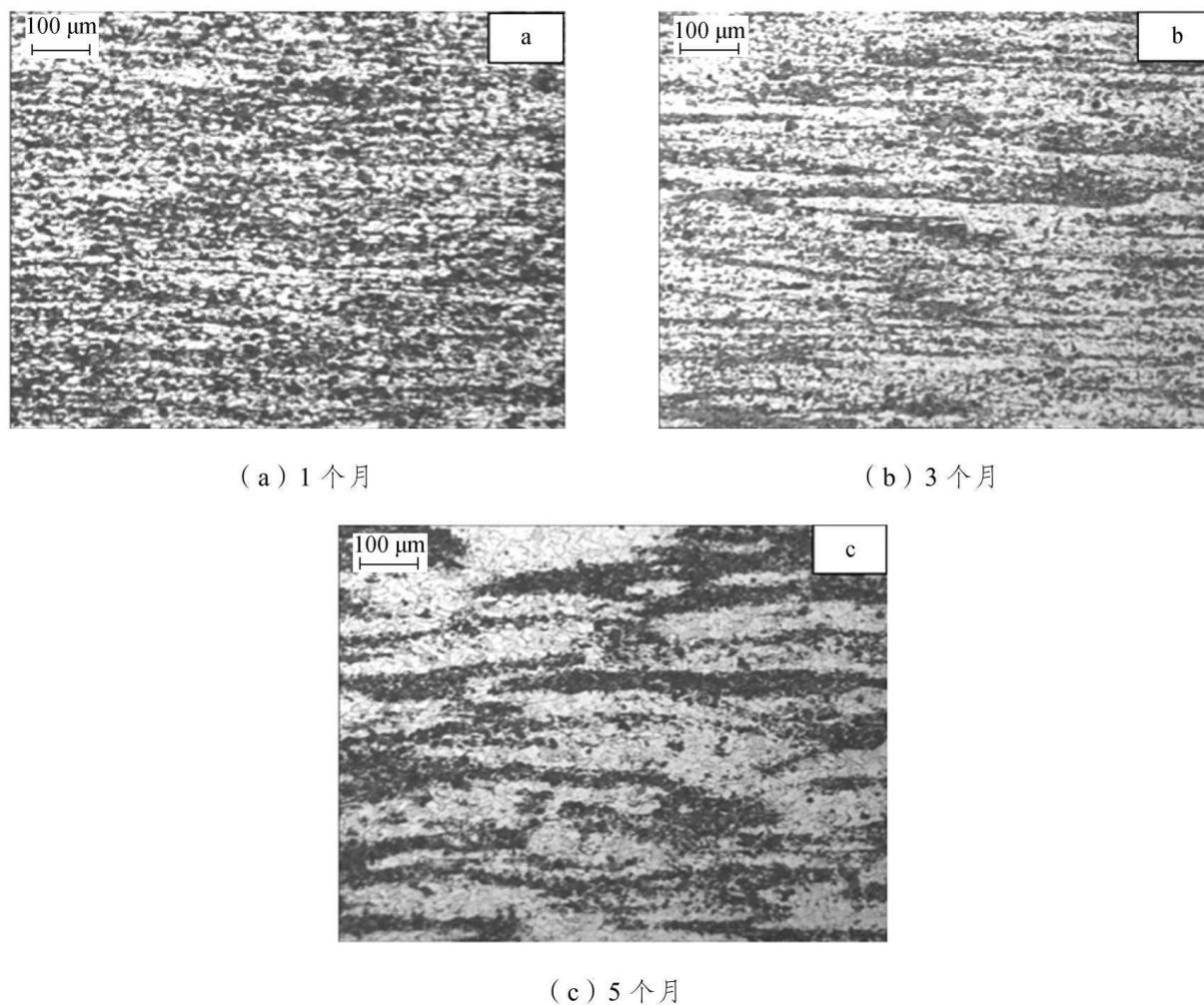


图 8 不同服役时间的接箍样品的微观组织

通过 Leco-LM-247AT 硬度测量仪，对接箍样品的表层及附近的显微硬度进行测量，所加载荷为 200 g，保压时间为 13 s，通过计算压痕面积得到显微硬度值。图 9 为不同服役时间的接箍样品的表层及其附近的硬度情况。由图可见，所有接箍的平均维氏显微硬度约为 245。显微硬度值沿接箍径向方向存在波动，且波动随服役时间的增加而轻微增大，其原因可能与接箍组织的带状化以及初始存在的孔隙有关。

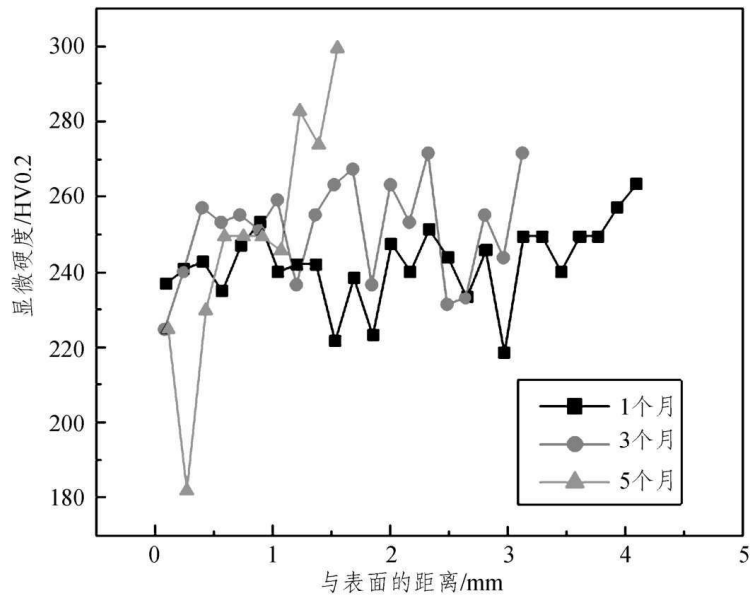


图 9 接箍样品的径向切面及其附近的显微维氏硬度值

从图 10 中可以观察到，服役 5 个月的样品表面存在若干微小的裂纹。这些裂纹最初由交变应力造成；裂纹沿着接箍表面向内部扩展并穿过整个接箍壁，最终当接箍薄到一定程度的时候，造成接箍的失效。

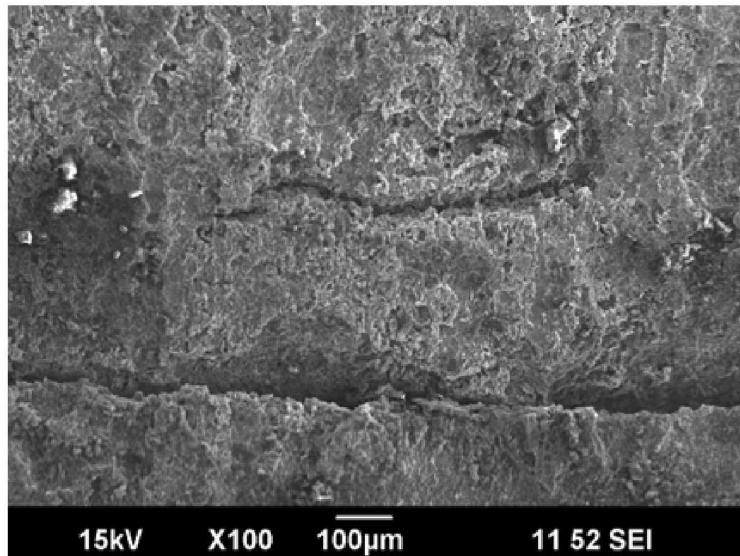


图 10 服役 5 个月的接箍样品的表面微裂纹

接箍的失效机制包括磨损、腐蚀和交变应力。考虑到接箍的失效过程为均匀过程，且接箍的损坏是渐变过程，因此交变应力不是主要因素。磨损与腐蚀间的交互作用，比单独的磨损或腐蚀更为严重^[9, 13-18]。因此，腐蚀磨损是接箍的主要失效机制。为了减小磨损，接箍与油管之间的接触力越小越好，但这取决于杆式泵系统的设计^[19, 20]。为了减少腐蚀，应该降低产液中的腐蚀剂含量，或者向产液中加入缓蚀剂^[21]。在选择接箍材料的时候，材料的耐蚀、耐磨性及产液的材料性能应同时考虑。