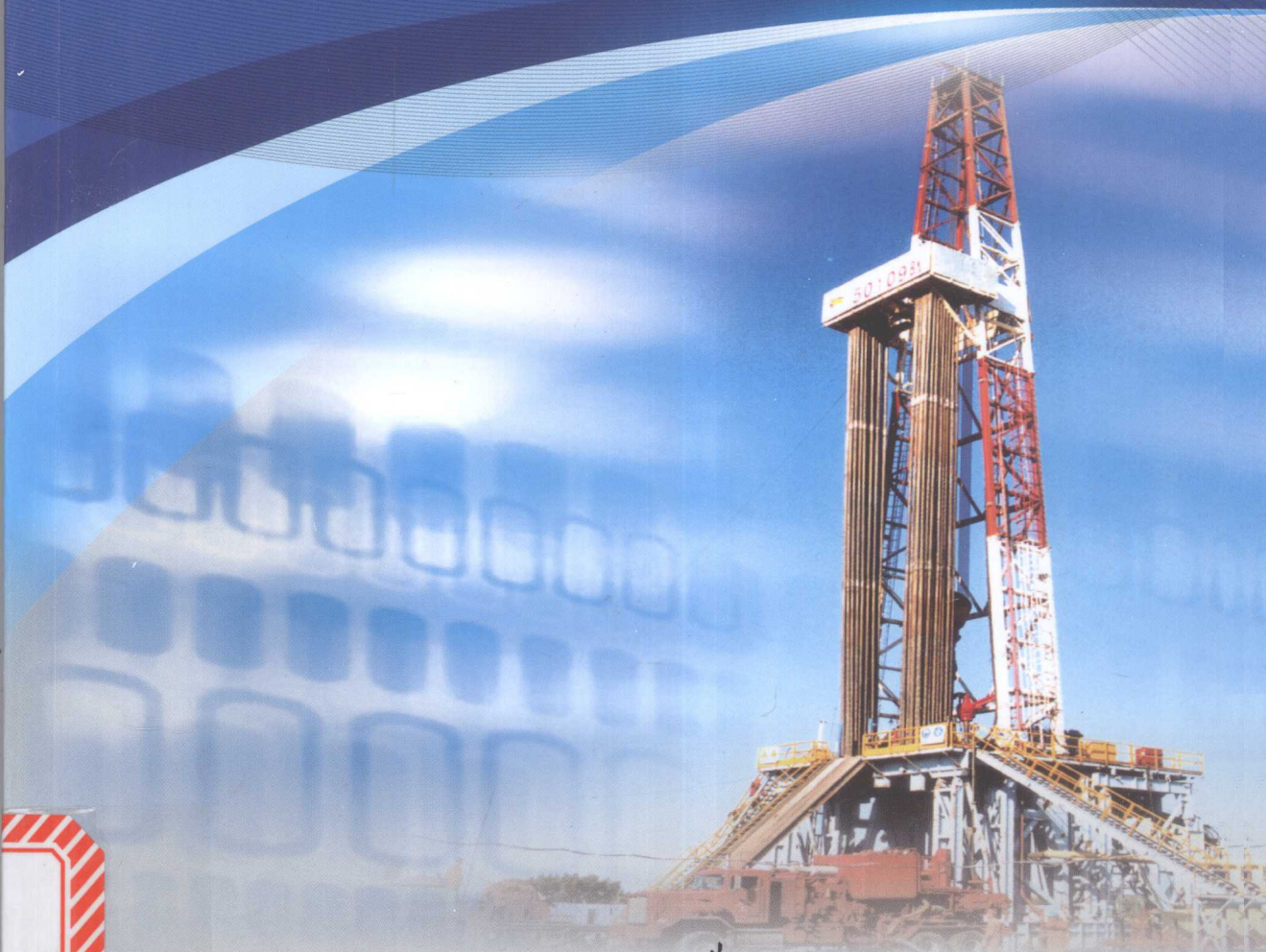


深井、超深井 钻柱损伤机理研究

SHENJING CHAOSHENJING ZUANZHU SUNSHANG JILI YANJIU

练章华 魏臣兴 张颖 林铁军 ■ 著



石油工业出版社

深井、超深井钻柱损伤机理研究

练章华 魏臣兴 张颖 林铁军 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了深井、超深井钻柱损伤所涉及的部分基础理论及其研究成果,论述了深井、超深井钻柱失效机理和裂纹扩展等方面的理论,为实现安全、高效的深井、超深井钻井提供理论依据。与油田现场实际相结合,采用计算机仿真模拟技术,重点进行了深井、超深井钻柱刺漏失效机理研究,金属材料细观力学研究,细观条件下含微裂纹金属材料裂纹扩展研究,含夹杂的金属材料细观力学研究,钻柱疲劳寿命及其预防措施研究等,是作者课题组近年来在深井、超深井钻井技术研究方面的成果总结。

本书适合于油气田开发工程、油气井工程技术人员参考,也可以作为石油院校相关专业高年级本科生、研究生和教师参考书。

图书在版编目(CIP)数据

深井、超深井钻柱损伤机理研究/练章华等著.

北京:石油工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-5183-1180-4

I. 深…

II. 练…

III. 深井钻井-钻柱-破损机理-研究

IV. ① TE245

② TE921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 056034 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523535 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:328 千字

定价:90.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

随着国内外勘探开发的深入和钻井技术的不断发展,向更深地层找油找气成为必然趋势,但随着深井和超深井的增加,钻柱疲劳破坏失效的频率也迅速地增加,因此对钻柱性能的要求也越来越高。而钻柱材料宏观性能与其细观尺度下的力学性能具有密切的关系。本书采用宏观尺度分析和细观尺度分析相结合的方法,对钻柱材料开展多尺度分析。本书主要针对深井、超深井钻井钻柱失效的根源及变形与破坏的机理进行讨论,重点进行金属材料细观尺度下微裂纹扩展机理研究、细观尺度下含夹杂的金属材料对材料宏观性能影响研究,结合塔里木油田钻井钻柱断裂和刺漏失效案例及其数据,进行了钻柱刺漏失效机理研究、钻柱疲劳寿命预测研究和深井超深井预防钻柱失效措施研究,并研制了钻具失效专用打捞工具。本书是作者近10年来在钻柱断裂力学和损伤力学研究方面的成果总结。

本书主要分10章对深井、超深井钻柱损伤机理进行介绍:第1章绪论,概述了钻柱断裂失效和损伤机理的国内外研究现状;第2章深井、超深井钻柱的损坏统计分析,从不同角度系统地分析和研究钻柱失效的规律和机理;第3章钻柱刺漏失效机理研究,对钻杆刺漏位置进行了系统的力学机理研究,讨论钻杆刺漏与井眼狗腿度的关系;第4章细观力学模型的建立,研究晶核集的凸壳、三角剖分和Voronoi图算法,建立任意数目晶体的细观尺度有限元模型;第5章金属材料细观力学方法,对比S135金属材料的应力应变力学特性,实例验证程序的可靠性和模型的准确性;第6章断裂力学基本理论,介绍了断裂力学的基本理论和计算方法,探讨了有限元法在断裂力学中的应用;第7章含微裂纹的金属材料细观扩展有限元分析,研究微裂纹的动态扩展过程以及相应的应力应变分布以及微裂纹扩展对钻柱材料宏观性能的影响;第8章含夹杂的金属材料细观力学分析,建立了真实的含非金属夹杂物细观尺度下晶粒模型,研究非金属夹杂物对材料宏观性能的影响;第9章钻柱疲劳寿命预测研究,建立了不同裂纹尺寸下钻柱疲劳寿命预测模型,研究钻柱疲劳寿命随裂纹尺寸变化和钻柱转速变化的关系;第10章预防钻柱失效措施研究,研究了钻杆接头结构与钻杆本体刺漏关系,开发了新的钻杆接头,并针对钻柱中螺杆钻具的断裂失效,开发了“多功能螺杆钻具打捞工具”。

本书由国家教育部博士点基金项目“基于XFEM和细观力学的超深井钻工具疲劳破坏机理研究(编号:20135121110005)”以及国家自然科学基金项目“极端条件下气井油套管端力学行为及其螺纹密封机理研究”(编号:51574198)资助完成。

参加项目的研究人员有练章华教授和魏臣兴博士、张颖博士、林铁军博士和陈世春博士等。书中的研究成果有每一位研究人员的贡献。全书由“油气藏地质及开发工程国家重点实

验室”固定研究人员(西南石油大学)练章华教授等著。另外,在本书的编写过程中,得到了塔里木油田四勘钻井公司的大力支持和帮助,同时也得到了我国钻井界的著名专家施太和教授和孟英峰教授的大力支持与帮助,借此机会表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中缺点、不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 10 月于成都

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 国内外研究现状	(5)
1.3 材料细观力学简介	(14)
第2章 深井、超深井钻柱的损坏统计分析	(16)
2.1 2001—2011 年钻柱失效统计分析	(16)
2.2 事故复杂井统计分析	(21)
2.3 塔里木油田钻具断裂失效案例分析、影响因素及其预防措施	(23)
2.4 小结	(36)
第3章 钻柱刺漏失效机理研究	(38)
3.1 钻杆内加厚过渡带应力集中研究	(38)
3.2 钻杆刺漏位置力学机理研究	(46)
3.3 井眼狗腿度对钻杆受力的影响	(58)
3.4 小结	(65)
第4章 细观力学模型的建立	(66)
4.1 Abaqus 脚本接口简介	(66)
4.2 Voronoi 图的建立	(71)
4.3 晶体生长模型的建立	(77)
4.4 小结	(80)
第5章 金属材料细观力学方法	(81)
5.1 金属材料细观力学分析	(81)
5.2 细观力学模型的后处理	(84)
5.3 材料的弹塑性变形行为	(87)
5.4 Python 脚本程序的验证	(89)
5.5 小结	(93)
第6章 断裂力学基本理论	(94)
6.1 断裂力学理论与计算方法	(94)
6.2 有限元方法在断裂力学中的应用	(109)
6.3 小结	(112)

第7章 含微裂纹的金属材料细观扩展有限元分析	(113)
7.1 扩展有限元力学理论与计算方法	(113)
7.2 断裂力学的细观有限元分析	(115)
7.3 小结	(127)
第8章 含夹杂的金属材料细观力学分析	(128)
8.1 夹杂问题的等效方法	(128)
8.2 单向受拉的细观有限元分析	(129)
8.3 拉扭作用的细观有限元分析	(133)
8.4 小结	(136)
第9章 钻柱疲劳寿命预测研究	(137)
9.1 概述	(137)
9.2 断裂力学基本理论	(137)
9.3 钻柱上的交变应力及其应力强度因子	(141)
9.4 钻柱疲劳寿命预测模型	(145)
9.5 钻柱疲劳寿命预测应用实例分析	(147)
9.6 小结	(152)
第10章 预防钻柱失效措施研究	(153)
10.1 有限元基本理论	(153)
10.2 钻杆接头开圆弧槽的新结构研究	(164)
10.3 钻具失效专用打捞工具研制及其有限元力学分析	(175)
10.4 小结	(190)
参考文献	(192)

第1章 绪 论

1.1 概述

钻柱是从钻头到地面全部管柱的总称。钻柱是优质快速钻井的重要工具,是连通地面与地下的枢纽。近年来,塔里木油田钻井数量不断增加,对钻杆的需求量也不断增加,同时随着深井和超深井的增加,钻柱失效频率也迅速增加,因此对钻柱性能的要求也越来越高。目前,塔里木油田共有各种规格的钻杆 176340 余根^[1],能够保障 100 多口超深井同时施工。其中, $\phi 127.0\text{mm}$ 钻杆 22000 根, $\phi 139.7\text{mm}$ 钻杆 6000 根, $\phi 88.9\text{mm}$ 钻杆 20000 根,在用钻杆全部为 S135 钢级。

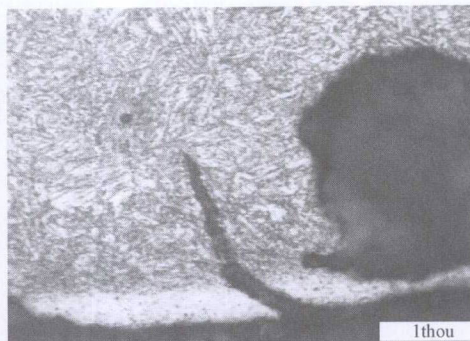
塔里木油田地质条件复杂,高压盐水层、盐膏层分布广泛,山前构造带地层夹层多、断层分布广、有巨厚的砾石层等。在钻井过程中井下蹩钻、跳钻严重,钻柱承受很大的拉伸、扭转和冲击等交变载荷;在钻井过程中采用大钻压、高转速的大尺寸 PDC 钻头钻进的井段较长,钻杆受力条件十分苛刻。由于井下的各种复杂工况交织在一起,导致钻杆的使用环境非常恶劣,失效事故频繁发生^[2]。大量统计分析和失效分析研究结果表明,塔里木油田 90% 以上的钻杆失效是钻杆内加厚过渡带刺漏^[3,4],刺漏的主要井段在 $\phi 244.475\text{mm}$ (9.625in) 套管内,钻杆刺穿属于疲劳裂纹失效钻杆刺穿的原因与钻杆的材料性能和内加厚成型质量较差有关,影响钻杆材料性能的主要指标是韧性和有害元素含量,影响钻杆内加厚成型质量的主要参数是加厚过渡带长度 Miu 和过渡圆弧半径 R 。

钻杆内螺纹接头热裂是困扰塔里木油田钻井工程的难题之一^[1],在 2005 年之前,每年发生钻杆接头热裂的数量都超过了 40 根。试验研究结果表明^[5-7],钻杆内螺纹接头热裂是摩擦力和摩擦热共同作用的结果,钻杆内螺纹接头热裂实际上是摩擦裂纹(图 1.1)。钻杆内螺纹接头热裂的原因主要与钻杆的旋转速度、侧向接触力和材料横向韧性有关。由于新钻杆接头外径大,与井壁摩擦的线速度高,热裂往往发生在新钻杆的内螺纹接头上。由于钻杆在狗腿度严重的井段承受的侧向力大,因此钻杆内螺纹接头热裂大多数都发生在狗腿度严重的井段。钻杆接头横向冲击功是影响接头热裂的一项重要指标。研究表明,接头横向韧性越低,越容易发生热裂;接头横向韧性越高,越不容易发生热裂。目前,API Spec7,SY/T 5290 和 ISO/CD 11961 标准^[8-10]都没有对钻杆接头横向冲击功提出要求,因此,这些标准越来越不适应油田钻井的要求。

从全国各油田的资料收集、调研可知^[11-27],钻杆失效形式为断裂失效和刺漏,在钻井液钻井中,钻杆失效的主要形式是钻杆刺漏,占钻杆失效的 70% ~ 80%^[11]。在气体钻井中,钻杆的失效形式主要是断裂失效,占钻杆失效的 80%,失效位置多在焊缝和加厚过渡带及其附近区域。根据中国石油集团石油管工程技术研究院对历年钻杆失效案例分析统计的结果,当钻杆



(a)发光部分为摩擦磨损和黑色氧化物



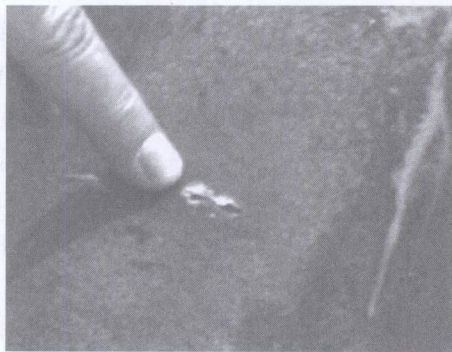
(b)产生的热裂纹金相分析(1000×)

图 1.1 由于摩擦热裂纹引起的内螺纹接头失效^[7]

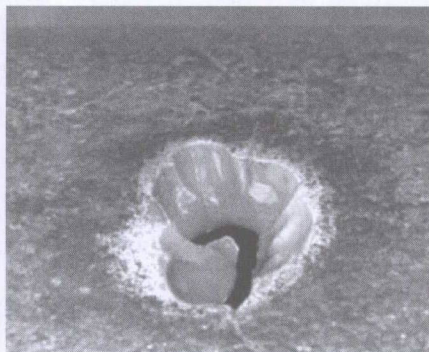
的轴向冲击韧性值达到 78J 以上时,钻杆在刺漏后仍有相当长的使用寿命,会引起钻井液泵压有 1~2MPa 的下降。因此,钻台上的操作人员能很容易观察到泵压的异常变化,起钻检查并甩下已刺漏的钻杆,避免钻杆断裂事故的发生。

对于塔里木油田^[15,16],钻具失效类型以螺纹断裂、刺漏和本体断裂、刺漏为主,往往是钻具先裂后刺再失效的过程。钻具失效位置以外螺纹、内螺纹刺漏和断裂失效为主。螺纹是整个钻柱上最薄弱的环节,其寿命一般难于同钻具本体相抗衡,钻具在承受复杂交变应力(疲劳)频繁作用的同时,还要输送高压钻井液,因此,螺纹及其台肩密封问题也与刺漏失效必然存在着内在联系。

根据国外大量资料可知^[28-30],国外同样存在钻柱断裂失效和钻柱刺漏失效,图 1.2 是印度某井管柱早期刺漏和后期刺漏的形貌,早期为很小的裂纹口,到后期变成较大的圆孔。其原因主要是由于裂纹从钻杆内壁向外壁不断扩展,剩余厚度越来越薄,到一定程度时,管内高压钻井液会把这些局部剩余材料冲开而刺穿,刚出现一个或几个小刺穿孔时,因泄漏不大,泵压下降不明显,操作者如能及时发现,一般可以避免断裂。但如果发现不是很及时,在提升进程中,因轴向应力加大,钻杆会从那些较弱的面断开。



(a)早期刺漏



(b)后期刺漏

图 1.2 钻杆刺漏照片^[27]

如果继续钻井,一方面,这些刺孔在高压钻井液冲刷下不断向周围扩大;另一方面,由于裂纹中部刺穿孔的出现使孔两侧的应力急剧增大,孔两侧的裂纹将以很快的速度进行疲劳扩展,不久会把相邻的刺孔连接在一起;同时,在其他部位新的刺孔仍在继续产生。刺穿发展的结果,使钻杆有效断面不断缩小。当发现泵压明显降下来时,刺孔加裂纹的总长度已超过其临界裂纹尺寸,即发生了失效断裂,根据塔里木油田钻杆刺漏统计可知,钻杆本体刺漏主要发生在钻杆加厚过渡带,主要原因是由于钻杆结构尺寸在此处发生变化而引起的应力集中。

钻柱是钻井系统中一个非常重要的组成部分,钻柱失效是钻井作业中经常出现的问题,破坏性极大,带来较大的直接和间接经济损失。美国 2000 年的一项统计和估算表明,钻井费用占总勘探开发费用的 50% ~ 80%,大约 14% 的井都会发生钻具断裂事故,每次断裂事故总损失约为 106000 美元^[27,31]。据 2006 年的文献统计^[27],我国各油田至少发生钻柱疲劳断裂事故 500 起/a,直接经济损失 4000 万元以上^[27]。

国际上把井深超过 4500m 的井称为深井,超过 6000m 的井为特超深井,超过 9000m 的井为特超深井。随着国内外勘探开发的深入和钻井技术的不断发展,向更深地层找油找气成为趋势,但随着深井和超深井的增加,钻柱疲劳破坏失效频率也迅速地增加,因此对钻柱性能的要求也越来越高,尤其是超深井。

井下钻柱是 9000m“特超深井”能钻达设计井深和可实施完井的关键技术及手段,钻柱应具有高抗冲击、高抗振动性能以及高抗疲劳寿命,这就对特超深井钻柱及其材料性能指标提出了更高的要求。钻柱的高抗冲击、高抗振动性能以及高抗疲劳寿命与材料变形、破坏有直接的关系,而钻柱材料的特性直接取决于钻柱金属材料的原子结构与微观结构^[32],因此要深入了解和掌握钻柱金属材料的变形与破坏特性,就不应该仅仅在给出金属材料表象的宏观尺度上进行分析,而应该采用宏观尺度分析和细观尺度分析相结合的方法,对钻柱材料开展多尺度分析,从而在较深的层次上找出钻柱失效的根源及变形与破坏机制。材料的尺度可以划分为^[32]:原子,0.1 ~ 5nm;微观尺度,20 ~ 1000nm;细观尺度,10 ~ 50 μm ;宏观尺度,大于 1 ~ 10mm。本书在钻柱动态疲劳破坏的研究工作中,采用扫描电镜(SEM)对某口井的钻柱疲劳断口和其材料进行观察和研究发现,在微观、细观尺度内发现疲劳失效的钻柱材料内存在着非金属夹杂物,如图 1.3 和图 1.4 所示,该夹杂物是引起钻柱早期疲劳破坏失效的主要根源。而对于特超深井钻柱承受着更为严重的各种交变载荷、摩擦力和冲击动载荷作用,钻柱材料的服役条件更为复杂,因此需要更为准确地对钻柱的服役寿命进行计算,而基于材料宏观力学性能的传统计算方法得到的计算结果存在着一定的不准确性。并且在材料的宏观尺度下,均质、各向同性的多晶体材料在观察域小到细观尺度或微观尺度时,就可能表现为显著的非均质和各向异性。通常认为在材料组成物的细观尺度上,材料各组成物的取向、物性、含量、几何形貌和界面性质等细观特征都会对材料的宏观性能产生一定的影响^[33],如普通工具钢材料,在宏观尺度下,材料的强度、硬度、弹性性能等性能指标是各向同性的,但在局部区域内的细观尺度下,其晶粒的平均尺度可以认为是微米量级的,由于晶粒与晶粒之间存在着取向排列和分布形态的差异,将会导致在同样受力条件下局部应力水平的不同。钻柱的动态疲劳破坏与应力水平有关,同时又涉及裂纹的动态扩展,钻柱裂纹扩展是一个典型的不连续问题,采用常规有限元方法难以实现裂纹动态扩展过程的仿真模拟研究,而扩展有限元法(XFEM)是近年来发展起来的分析和研究裂纹动态断裂问题的一种有效方法^[34],因此,本书将基于扩展有限元与细观力学相结合来开展钻柱的损伤机理研究。

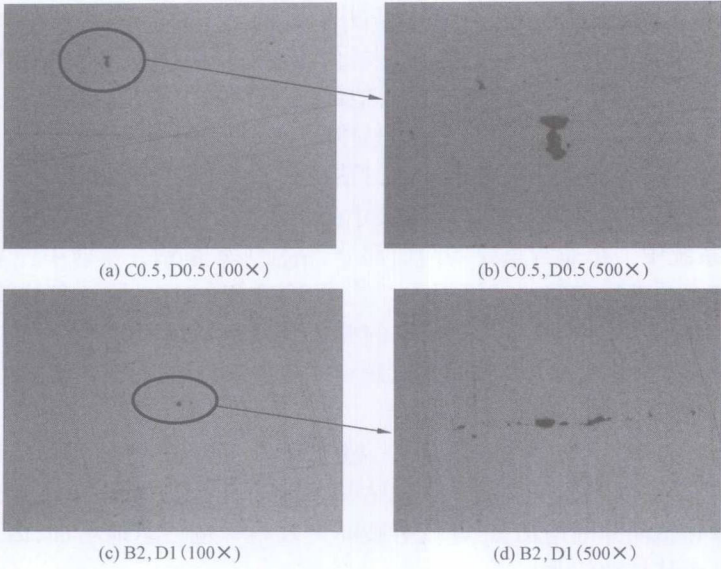


图 1.3 某钻柱材料非金属夹杂物图
B—氧化铝类;C—碳酸盐类;D—氧化物类

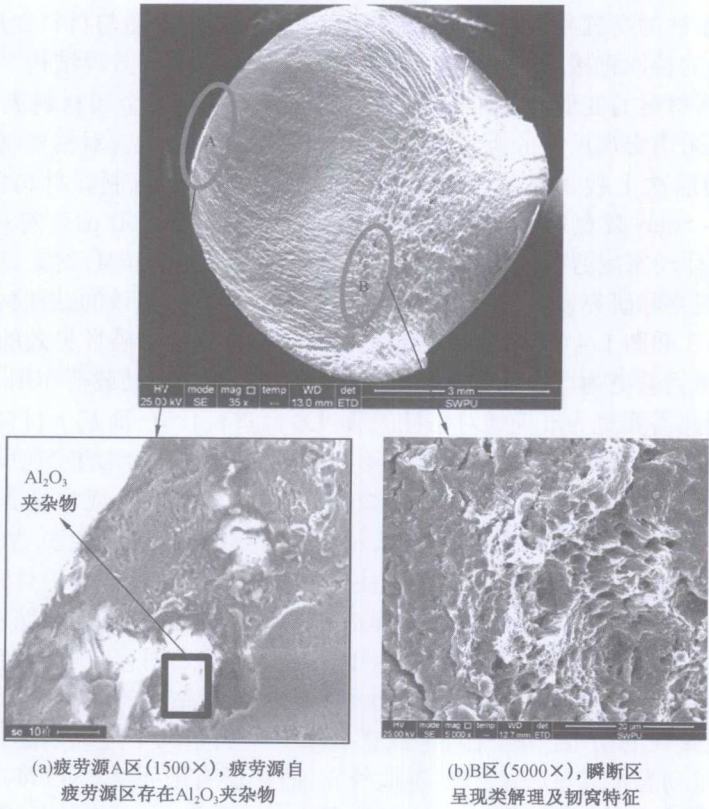


图 1.4 某钻柱试件断口 SEM 形貌
弯曲应力 600MPa,疲劳周次 3.71×10^5

本书以寻求宏观力学特性、细观结构力学特性以及特超深井钻柱动态疲劳破坏之间的内在联系为目的,涉及多尺度的细/宏观力学、含有夹杂物的材料力学特性等多学科交叉的问题,是一门正在发展的新学科,尤其是含有夹杂物的细/宏观力学机理研究,是特超深井钻柱动态疲劳问题急需解决的和难度很大的基础理论研究中的前沿学科,研究成果可以为改善特超深井钻柱的力学性能和其钻柱新材料结构提供科学理论。该研究对于深井、超深井以及特超深井钻井工具具有广阔的应用前景,对推动扩展有限元理论的发展以及含有夹杂物的细观力学等相关学科的发展具有重要的科学意义。

1.2 国内外研究现状

由于井下钻具所处的恶劣工作环境和复杂的交变应力状态,不但承受拉压、扭转、弯曲和冲击载荷的作用,还要承受钻柱与井壁或上层套管的摩擦、摩擦生热引起的热应力以及循环介质携岩的腐蚀冲蚀作用,井下钻具易发生过量的变形、脆性断裂、疲劳断裂、表面磨损和腐蚀冲蚀等失效形式^[35]。有关钻柱失效方面的研究,早在20世纪60年代就已开始,但兴盛时期却始于20世纪80年代^[36]。在这个时期无论是外部条件(如相关学科的发展、测量手段的完善等)还是内部条件(如钻井界本身的需要)都已基本成熟,为钻柱失效的研究提供了一个很好的环境。通过对相关资料的阅读和分析发现,国内外有关钻柱失效方面的研究主要集中在两个方面:理论分析和实验研究。理论分析即是运用统计学、数值分析、腐蚀化学以及力学等理论知识对钻柱建立相应的理论模型,辅以一定的边界条件对理论模型进行求解,得出相关的结论,最后从理论的角度,提出解决的措施并以实际进行检验,研究钻柱失效机理首先必须从钻柱动力学的研究开始。下面将详细论述国内外的研究现状。

1.2.1 国外研究现状

在20世纪50年代期间,石油钻井以直井为主,所用钻具组合主要是光钻铤钻具和单稳定器钟摆钻具。这段时期以A. Lubinski和H. B. Woods为代表,开展了钻柱静力学分析研究,建立了钻柱受力变形的精确微分方程^[37-42]。1968年,D. W. Dareing和B. H. Liversay等首次发表了讨论钻柱振动的文章,开创了钻柱动力学领域的研究^[43,44]。

在20世纪80年代以前,井下钻具组合的力学分析主要是采用静力学方法,求解方法有微分方程法、能量法、差分法和有限元素法,以及后来发展起来的纵横弯曲梁法和权余法。在80年代以后,井下钻具组合的动力学分析逐渐蓬勃发展起来,其主要分析在各种动载荷作用下钻柱的受力、变形和运动规律,从而对钻柱的工作状态进行预测,预防钻柱断裂事故的发生,延长钻柱的使用寿命。S. F. Wolf采用有线遥控系统测量了直井钻进过程中的井底压力、加速度等参数,观测到钻柱的共振频率比其固有频率要低,以及在井底存在着高弯矩但井口却测量不到的现象,从而在钻井实践中证明了钻柱涡动的真实存在。V. A. Dunayevsky对带牙轮钻头的井下钻柱进行了动力学分析,首次对BHA横向振动的原因从理论上给予了解释,并提出钻柱不仅绕其本身轴线转动,同时存在着涡动的反转理论^[45,46]。

1987年,Burgess T. M.等结合现场数据对钻柱振动进行了分析,得出了钻柱振动在直井中要比在斜井中更为严重的结论^[47]。J. D. Brakel和J. J. Azar给出了BHA的瞬态动力学有

限元法,并用地层与钻头之间作用力的平均值来预测 BHA 的走向^[48]。R. F. Mitchell 和 M. B. Allen 指出,对于井下钻具组合的纵振和扭振问题,可以采用解析法进行分析,但是对于复杂环境下的井下钻具组合应该采取有限元方法,才能获得满足一定精度的解。并在此基础上讨论了钻杆的疲劳破坏,指出了 1970 年 API 临界转速公式的局限性,认为钻柱的横向振动是造成 BHA 失效的主要原因^[49,50]。同年,E. S. Laugen 研究了钻头的准随机振动对钻柱轴向振动的影响,其在忽略重力和非线性阻尼的前提下,建立了假定钻柱顶部固定、钻柱底部位移已知的线性钻柱模型,文中随机性的考虑更接近实际^[51]。

1988 年,Y. Tsukano 等针对钻柱内加厚过渡带容易引发钻具疲劳失效的问题,提出了弯矩作用下管体内加厚过渡带表面的应力不能超过管体外表面的应力,并通过全尺寸疲劳试验验证常规有限元分析的结果,开展了钻井工具的疲劳试验与常规有限元(CFEM)数值模拟研究^[52]。

1989 年,Vandiver J. K. 等分析了旋转钻铤的弯曲振动,认为钻铤的旋转和钻压波动与弯曲振动的线性耦合是引起钻铤失效的主要原因,从而揭示了钻具磨损和疲劳破坏机理^[53]。

20 世纪 40 年代,在美国路易斯安那州第一次记录了由于摩擦生热造成钻具失效的现象。1992 年,Altermann 和 Smith 的试验研究,揭示了钻具与井壁摩擦生热产生高达 700 ~ 800℃ 的温度,在钻井液钻井中由于钻井液的冷却作用,使得钻杆、钻铤和转换接头表面产生大量的纵向微裂纹、冲蚀槽甚至导致钻具断裂失效;而在空气钻井中,由于摩擦生热,钻柱表面的温度将超过钻杆钢材材料的临界温度,引起材料性能的降低和金相组织的变化,但不会产生纵向微裂纹^[54]。随后 Eaton, Choi, Vermon 和 Jellison 等学者分别从实验室和钻井现场深入研究了摩擦生热引起钻具失效的机理,根据影响摩擦生热的因素,提出了从优化钻井参数、提高井眼轨迹质量、降低摩擦系数和转动时间等方面来缓解摩擦生热的方法^[55-58]。

1992 年,Mizajanzade 等在第 13 届世界石油大会上提出了钻柱的非线性振动问题,并给出了钻柱纵向振动的非线性数学模型,为进一步深入开展钻柱非线性动力学研究奠定了基础。

1996 年,美国 Tulsa 大学的 Dykstra Mark W. ^[59] 完成了“非线性钻柱动力学”研究引人注目。他借鉴其他行业中解决转子动力学问题的方法研究了钻柱动力学问题,根据 Hamilton 原理建立了钻柱系统动力学方程。他的研究思路和研究成果为深入研究全井段(弯曲井眼、直井眼)钻柱的动力学特性奠定了良好的基础。

1998 年,J. S. Mason 等研究了木比尔湾水平段下部钻具组合振动引起的钻具失效机理,研究结果认为该水平段钻具是由于钻柱涡动引起的钻具疲劳失效^[60]。

20 世纪 90 年代末以来,钻柱动力学研究理论得到了深入和拓宽,从独立研究钻柱横向、纵向和扭转振动到多种振动形式耦合的钻柱动力学系统研究,从单纯钻柱力学研究到考虑钻井液、钻柱流固耦合等现象的非线性问题,从下部钻具组合的局部研究到全井段钻柱的研究,从纯粹钻柱动力学研究到基于钻柱动力学结果的钻柱疲劳寿命研究。

2001 年,Andreas P. Christoforou 等开展了钻柱的轴向—横向—扭转耦合振动的研究,同时也分析了井下钻柱与井壁岩石、钻头与地层岩石的相互作用对钻柱振动的影响^[61]。Jackie E. 等基于减轻钻具载荷来降低钻具疲劳破坏的应力水平,研究了深井、超深井和定向井中不同尺寸钛合金钻杆性能,研究结果表明钛合金钻柱能够在深井、超深井和定向钻井中减少约 40% 的大钩载荷和扭矩,可以提高钻井工具的抗疲劳寿命^[62]。

2002年, T. Richard 等^[63]探讨了 PDC 钻头黏滑振动的起因。Chen^[64]等通过室内实验及油田现场试验, 考察了轴向振动、扭转振动、横向振动以及黏滑振动和涡动对牙轮钻头性能的影响。

2003年, J. Abdollahi 和 P. Skalle 建立了轴向和扭转耦合振动产生的载荷的计算模型, 通过计算表明由于钻柱处于纵振和扭振的耦合作用下, 常易引起钻柱的疲劳失效, 同时也对钻柱的疲劳寿命进行了预测^[65]。Hayat Melakhessou 等根据钻进过程中不同的下部钻具组合, 研究了钻柱和井壁间的局部接触引起的疲劳破坏失效机理^[66]。

2004年, John P. McCarthy 和 Kang Lee 等^[67]用修正的古德曼曲线(MGD)和弹塑性应变寿命模型(SLM), 对钻杆接头螺纹台肩的疲劳寿命进行了对比分析研究, MGD 仅限于材料的弹性变形, 没有考虑正常上扣时在螺纹根部的塑性变形, MGD 是基于平均应力和循环应力的解析模型, 对材料的整个横截面积用平均应力进行评价, 如果存在裂纹, 则考虑应力集中系数, 对于弹性小应变, 则 MGD 的精度较高, 但对于台肩螺纹根部存在塑性应变, 因此不能用 MGD 来预测其疲劳寿命。对此只能用有限元法来准确计算螺纹台肩根部的弹塑性应力—应变, 用 SLM 的有限元法的非线性模型来准确地进行螺纹接头的疲劳寿命分析。其研究表明, 螺纹的上扣扭矩并不是越大越好, 当上扣扭矩达到一定值时, 随着上扣扭矩的增加, 其螺纹的疲劳寿命将减小。

2006年, S. Menand 和 H. Sellami^[68]认为, 传统的钻柱与下井壁连续接触的钻柱柔性模型计算得到的钻柱沿井深的侧向力、扭矩、接触载荷、屈曲和摩擦力不够准确, 同时提出带接触算法的刚性钻柱模型(ABIS), 在计算钻柱的侧向力及扭矩阻力值时比常用的柔性钻柱模型的计算结果更准确, 因为 ABIS 考虑了钻柱的刚度、井壁与钻柱间隙、外力, 并可以在钻柱的不同位置引入不同的摩擦系数。S. Menand 等^[69]还在考虑钻柱的转动和实际井眼的弯曲度的情况下, 利用 ABIS 模型模拟旋转钻柱的螺旋屈曲, 初步认为钻柱的临界螺旋屈曲载荷小于非旋转钻柱临界屈曲载荷。S. Menand 和 H. Sellami^[70]认为, 较低的机械转速引起的高扭矩和阻力会阻碍弯曲井段和侧钻井段的钻进, 并推荐利用 BHA 和钻柱模型软件进行屈曲临界载荷、扭矩和阻力分析来解决问题。J. C Zhang 等^[71]建立了钻柱受到轴向和扭转振动作用下的数学模型, 用数值计算的方法研究了钻柱在拉扭作用下的疲劳寿命。

2007年, O. Vincké 等在准确评估疲劳寿命的射频片的基础上, 研发了一种监测钻具各个部分疲劳破坏失效的新模式^[72]。David R. Bert 等根据实际井况, 用累计疲劳分析(CFA)建模技术, 提出了预防钻具失效深井设计准则和钻井工具疲劳失效最小化的钻井思路^[73]。Michael 等指出摩擦力和摩擦生热共同作用导致钻杆内螺纹接头热裂, 即热裂实际上为摩擦裂纹, 并且热裂与钻杆的旋转速度、侧向接触力和材料横向韧性有关^[74]。

2008年, S. Menand 和 H. Sellami 等^[75]利用 ABIS 模型深入讨论了钻柱的转动对钻柱临界屈曲载荷的影响, 在大量研究后认为, 转动中的钻柱的临界螺旋屈曲载荷大约为非旋转钻柱屈曲载荷的 50%, 用传统模型得到的屈曲临界值只在理想井况情况下才是正确的。Sikal J. Boulet 和 S. Menand 等^[76]发现, 尽管钻杆生产工艺和材料性能得到了较大的改善, 但是现场由于疲劳发生的钻杆失效事故依然大量存在。Daison Paul A. 等^[28]对钻杆刺漏失效形式进行了分析研究, 其刺漏失效位置多在焊缝和加厚过渡带及其附近区域, 并为预防刺漏提供了预防措施。

2009年, David R. Bert 等^[29]对钻柱失效进行了详细的分析和研究, 其中某两口井的钻柱断裂失效的照片如图 1.5 所示。从图 1.5(c) 中可见, W2 井内壁加厚过渡带附近存在大量的腐蚀坑, 即存在腐蚀疲劳断裂。



图 1.5 钻柱断裂失效照片^[29]

2010年, Silvestre Ramirez 等系统地研究了下部钻具侧向振动和扭转振动引起的复合钻具疲劳失效机理, 为预防钻井工具的疲劳断裂失效破坏提供了理论依据^[77]。

2011年, Brock J. N. 等对于钻井工具接头的上扣扭矩和其卸扣扭矩进行了大量的实验研究, 为预防钻井工具接头疲劳断裂失效提供了大量实验数据^[78]。Grant Pettit 等对钻井工具接头结构进行了疲劳失效机理研究, 通过对钻井工具材料的金相分析发现, 钻井工具内部存在初始裂纹引起裂纹扩展, 断口存在非金属夹杂物^[79], 但其没有深入到含有非金属夹杂物的细观力学研究中。

2012年, A. E. Ismail 等^[80]研究了拉、扭、弯曲载荷作用下表面裂纹扩展的应力强度因子变化规律, 并发现由于圆柱表面裂纹的形变机理, 方程式计算出的应力强度因子比有限元计算结果偏高。

2013年, J. Predan 等^[81]运用有限元的方法计算了空心圆柱在扭矩载荷作用下表面裂纹的应力强度因子, 建立了裂纹扩展的三维有限元模型, 得到了圆筒表面裂纹扩展临界点的应力强度因子。

2014年, Ahmad Ghasemloonia 等^[82]建立了轴向和纵向上非线性耦合的钻柱动力学模型, 深入研究了钻柱的侧向不稳定性, 并基于 Galerkin 离散偏微分方程, 得到了考虑钻井液阻尼、驱动力矩、轴向载荷等的钻柱控制性方程, 其模型特征比高阶有限元模型为简洁, 收敛速度更快。

扩展有限元 (eXtended Finite Element Method, 简称 XFEM) 是 1999 年美国西北大学 Belytschko 教授为代表的研究组首先提出了思想, 随后迅速得到应用和发展^[83]。XFEM 对于结构内的几何或物理界面并不需要进行网格划分, 是迄今求解含有夹杂物等不连续力学问题最有效的数值方法, 它避免了常规有限元那种在裂纹尖端等高应力区或变形集中区需要进行高密度细化网格的做法, 以及在模拟裂纹扩展时需要满足不断网格重划分、裂纹面与单元边界一致性的要求。2001 年, Stolarska 将水平集法 (LSM) 引入扩展有限元分析方法中, 其中水平集用来表示裂纹和裂纹尖端的位置, XFEM 用来求取应力和位移, 从而计算裂纹扩展率^[84]。2002 年, Dolbow 和 Nadeau 将 XFEM 应用于细观结构材料断裂的有效特性分析中, 降低了细观

结构分析时对网格重构的要求^[85]。随后2003年, Moes等成功应用XFEM对材料进行了细观结构的多尺度分析^[86]。Sukumar等也成功应用XFEM对任意材料细观结构准静态裂纹扩展问题进行了模拟研究^[87,88]。

1.2.2 国内研究现状

国内也有不少学者对于钻柱动力学和钻井工具疲劳破坏方面进行了大量的研究工作。我国钻井界对钻柱动力学的研究是在20世纪80年代后期开始的,与国外比较,在数据的收集、实验的手段、设备方面和现场应用相差较远,但在理论研究上并不落后。

20世纪80年代,章扬烈率先建立了钻柱运动状态模拟装置并开展大量室内实验,通过对实验结果的统计分析,提出了井下钻柱在绕自身轴线旋转的同时,也存在着反转运动的旋转钻柱运动原理。并且认为,全井段钻柱振动实质上是多支点的自激晃振,同时给出了反转涡动的频率与自转频率之间的关系式,指出正是由于钻柱的反转运动产生的交变载荷导致钻柱的疲劳失效^[89,90]。

1990年,王珍应从理论上研究钻柱内有钻井液流动时钻柱的振动规律,给出钻柱横向振动的频率方程和钻柱失稳的临界方程,讨论了钻柱内流动的钻井液对钻柱的振动频率和稳定性的影响^[91]。

1994年,高德利、高宝奎通过分析研究将钻柱破坏分为环境介质作用下的疲劳、低应力疲劳破坏、塑性疲劳断裂和磨损失效等类型^[92]。并建立了钻柱涡动方程,对涡动的原因和涡动对井斜的影响进行了分析阐述。当钻柱向后涡动角速度为极值时,钻柱沿井壁纯滚动,钻柱受交变弯曲应力作用,易于疲劳破坏;当向前涡动角速度为极值时,其值等于钻柱本身自转角速度,钻柱相当于刚体绕井轴线转动,从而会造成钻柱严重偏磨,最终导致钻柱失效,此时钻柱界面上不存在交变弯曲应力,也就是不会疲劳破坏。实际情况下钻柱涡动是发生在两个极值之间,绝大多数可能是带滑动的涡动。由此其在动力学防斜理论分析中,提出了钻柱发生涡动时存在一个周期性附加瞬时轴向力,且其附加瞬时轴向力起到辅助破岩和纠斜的作用,当然其同时也会引起底部钻柱的纵向激振等危害^[93-96]。

1995年李子丰、马兴瑞、黄文虎建立了适用于钻柱几何非线性动力分析的钻柱动力学基本方程^[97],在此基础上建立了导向钻具三维小挠度静力分析的数学模型、导向钻具三维大挠度静力分析的数学模型、钻柱稳态拉力—扭矩模型。该方法也只是从静载荷考虑钻具的受力而忽略了动载荷的影响。

1996年,闫铁等采用线弹性力学理论对钻铤螺纹的受力进行了分析,指出钻铤螺纹连接处易产生应力集中,特别是根部螺纹第1和第2扣上受力过大是钻铤断裂的主要原因^[98]。

1998年,张学鸿等在利用改进的李兹向量法求取钻柱固有频率和固有振型的基础上,采用振型叠加法计算钻柱的纵向振动响应,并考虑钻柱与井壁的随机碰撞摩擦和钻井液的阻尼效应,给出了钻柱许用持久极限应力的计算表达式^[99]。但其并没有考虑钻柱横振和扭振的影响,存在一定的局限性。

1999年,李鹤林院士等对钻井工具振动疲劳、疲劳腐蚀、刺漏断裂以及钻井工具的失效预防做了大量基础研究工作,取得了许多建设性成果^[100]。

进入21世纪,国内钻柱动力学研究有了新的研究方法、研究思路和研究侧重点,忽略和简

化的边界条件越来越少,钻柱动力学研究越来越接近钻井实际情况。另外,随着钻井工艺的变化,钻柱动力学研究从钻井液钻井延伸到气体钻井。

2000年,殷朝阳和王光远采用结构动力学有限元和间隙元方法,对井下钻柱的运动状态进行了研究,并开展了室内全尺寸钻柱轴向振动试验,从而将数值计算结果与轴向振动实验所得数据进行了对比验证^[101]。

2001年,刘清友等在考虑钻柱与井壁岩石相互作用的前提下,建立了牙轮钻头与岩石相互作用的动力学模型和钻头、钻柱的纵振、横振与扭振数学模型,并采用龙格库塔数值计算方法进行求解,开发了钻头动力学仿真分析软件,为改进钻头和钻柱的使用与设计、延长其使用寿命提供了理论基础^[102-105]。况雨春、马德坤等通过对单齿压入与刮切岩石实验的分析,分别建立了钻头及钻柱的纵振、横振与扭振数学模型并求解,用来分析确定钻柱—钻头—岩石系统动态行为^[106,107]。楼一珊等对定向井中的钻柱进行了动力学分析,并对钻柱组合中的各单元部件进行了疲劳损伤积累计算,从而预测钻柱的使用寿命^[108]。

2002年,刘巨保等用动力间隙元来表征井下钻柱与井壁的随机碰撞接触,再结合梁单元的使用,开展了井下钻柱随机碰撞接触非线性瞬态动力学的研究^[109]。袁光杰等对冲旋钻井中的钻柱进行了适当的简化,采用弹性杆理论和单元法方法,建立了冲击器作用下的井下钻柱纵向振动的动力学模型并用差分法进行了求解^[110]。韩致信等提出了钻柱离散力学模型,其计算精度要高于常规连续等直杆模型^[111]。石晓兵等建立了不同井型情况下的井下钻具组合有限元力学模型,并通过求解得到井下钻具组合变形和弯曲应力分布情况,从而分析下部钻具组合的力学失效机理^[112]。

2003年,朱才朝等在考虑钻头的前提下,运用能量方法建立了钻柱横振、纵振和扭振耦合的系统非线性动力学模型^[113]。陈金国等采用小角度直探头超声探伤法来检测钻铤螺纹处可能存在的疲劳裂纹,从而达到预防井下钻具事故发生的目的^[114]。管志川建立了井下钻具组合BHA模拟试验装置,并对直井下部钻具组合的动力学特性进行了研究,发现随着转速的增加,钻柱的运动状态将由规则摆动向无规则摆动和规则反向涡动转变,而增加钻压会使运动状态发生转变的临界转速提高,阻碍底部钻柱无规则摆动和规则涡动的形成。其后来研究中发现下部钻柱向前涡动源于钻柱重量、质量偏心等因素,向后涡动源于钻柱与井壁之间的碰摩作用,并且下部钻柱与井壁之间是否发生碰摩,通常以下部钻柱的一阶临界转速为界^[115-117]。

2004年练章华等通过研究指出^[15],钻杆内不但存在自转转速,而且还存在反转转速,其弯曲频率为钻杆自转转速与其反转转速之和。在钻杆自转转速一定时,钻杆的反转转速与环隙比值 β 有关。根据油田现场井身结构尺寸、钻井参数,详细地分析了油田现场钻杆反转转速、弯曲频率和其环隙比与反转运动的关系。研究结果为深井和超深井合理钻井参数的选择提供了理论依据。张小柯、狄勤丰通过对钻柱涡动问题的研究,得出了钻柱发生规则涡动时的疲劳强度校核公式,并对稳定器附近以及接头附近钻井工具容易失效的现象做出了解释^[118]。李茂生等研究了考虑钻柱内外存在着钻井液流体和不考虑钻井液流体作用的情况下,井下钻具组合横向振动固有频率的差异^[119]。肖文生等建立并求解了内外钻井液引起的、施加在旋转钻柱上的动压力计算模型,分析钻井液作用下的钻柱涡动动力学机理,并给出钻柱涡动失稳的临界条件^[120]。李庆光等通过研究发现,钻具疲劳破坏主要是由于钻柱的横向弯曲振动在螺纹连接处产生了交变弯曲应力,并且横振与扭振的耦合作用,会加剧钻具的疲劳破坏^[121]。