



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

岩石钻进刀具热效应及其影响

杨晓峰 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

岩石钻进刀具热效应及其影响

杨晓峰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对岩石钻进过程刀具热效应及其对刀具失效的影响机理进行了深入系统研究。全书共7章, 主要内容包括利用红外热像仪对岩石钻进过程中红外热特征和刀具温度变化规律的实验观测; 岩石钻进刀具温度场及工作面温度的解析计算模型; 刀具岩石界面摩擦闪温计算方法; 岩石钻进过程的刀具热断裂和热磨损机理; 减小岩石钻进热效应提高刀具寿命与钻进效率的方法与研究展望。

本书体系完整, 针对性强, 可供从事矿业及油气资源勘探开发、土木工程的科研人员、高等院校相关专业研究生和本科生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩石钻进刀具热效应及其影响/杨晓峰著. —北京: 科学出版社, 2016
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-048857-2

I. ①岩… II. ①杨… III. ①岩石钻进-刀具(金属切削)-研究
IV. ①P634.4②TG71

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第134061号

责任编辑: 焦 健 黄 敏 韩 鹏/责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟/封面设计: 陈 静

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张: 8

字数: 160 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰	付小兵	郭坤宇	胡 滨
贾国柱	刘 伟	卢秉恒	毛大立
权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅
张文栋	赵 路	赵晓哲	钟登华
周宪梁			

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过30年的发展，截至2015年底，博士后科学基金资助总额约26.5亿元人民币，资助博士后研究人员5万3千余人，约占博士后招收人数的1/3。截至2014年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广泛范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从2013年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。

中国博士后科学基金会理事长

前 言

随着当前我国经济社会的快速发展,传统能源产业结构面临转型升级,特别是越来越迫切的安全、环保以及成本需求,使能源产业发展面临前所未有的挑战。如何依靠科技创新提高煤炭、石油天然气等产业的生产效率与安全水平是当前亟待解决的问题。

岩石钻进刀具的使用寿命直接影响到煤矿及油气田的生产效率和施工成本。深入研究岩石钻进过程中刀具失效机理为提高刀具寿命和岩石钻进效率提供重要的理论基础,对保障煤炭安全生产以及油气能源稳定供应等重大工程问题有着重要的学术意义和工程应用价值。然而目前国内外对岩石钻进过程刀具的失效机理的认识仍不很清楚,尚不能准确回答岩石钻进刀具温度变化的具体规律以及温度变化对刀具失效行为的具体影响机制。

本书针对当前国内外研究现状,采用实验和理论相结合的方法,对岩石钻进刀具热效应及对刀具失效的影响机理进行了深入系统的研究。利用红外热像仪对岩石钻进过程的热效应进行观测,突破了制约传统岩石钻进刀具温度采集技术的发展瓶颈,有效地掌握了岩石钻进过程中红外热特征和刀具温度变化规律;对岩石钻进过程进行了系统的热力学分析,建立了刀具工作温度的解析计算模型,弥补了测试手段的不足;分析了刀具与岩石摩擦界面闪温产生的原因,给出了基于均匀分布和概率分布模型的摩擦闪温计算方法;最后通过实验和理论分析揭示了岩石钻进过程的刀具热断裂和热磨损机理。

全书共7章:第1章绪论,介绍岩石钻进刀具热失效问题的背景和研究现状;第2章利用红外热像仪,开展了岩石钻进过程刀具温度红外热像测试实验研究;第3章通过对岩石钻进过程进行系统传热分析,建立了不同冷却条件下刀具平均工作温度的解析计算模型;第4章在阐述岩石钻进刀具摩擦闪温产生机理基础上,给出了基于均匀分布和概率分布模型的摩擦闪温解析计算模型;第5章在分析岩

石钻进刀具热应力基础上,研究了岩石钻进过程刀具的热断裂机理;第6章结合实验揭示了岩石钻进过程刀具的热磨损机理;第7章对在总结研究内容基础上对未来研究进行了展望。

本书总体上保持了作者博士论文的研究思路与分析框架,并在此基础上对博士、博士后阶段研究工作进行了深入分析和总结,研究过程得到了导师李晓红院士悉心指导和帮助,李老师严谨的治学精神、强烈的责任感与热情关怀,令我受益终生。师恩厚重,在此特向李晓红院士表示衷心感谢。

研究过程中卢义玉教授、巫世晶教授、龙新平教授、康勇教授给予了极大帮助,在此深表谢意。博士生陆朝晖、硕士生杨博凯、本科生刘全、郑海舟等也参与了研究工作,为研究的顺利开展提供了支持。

本书研究内容受到国家自然科学基金(51204122)、北京市青年拔尖人才项目(2015000026833ZK07)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012M511674)和面上项目(2013T60742)、中国博士后优秀学术专著出版基金的资助。

岩石钻进热效应相关问题研究目前还处于发展阶段,许多问题还有待于进一步探索与深入研究,因此本书的一些内容仍然有待于在进一步研究中得到充实和完善。同时,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2016年5月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石钻进刀具失效问题研究的重大工程需求	1
1.1.1 岩石钻进刀具的工程应用领域	1
1.1.2 岩石钻进刀具热失效机理的研究意义	3
1.2 岩石钻进刀具热失效机理问题研究现状	3
1.2.1 岩石钻进过程的刀具失效机理	3
1.2.2 岩石钻进过程的热效应	7
1.2.3 材料性能与温度之间的关系	10
1.2.4 研究现状总结	12
1.3 主要研究内容和方法	12
第 2 章 岩石钻进过程红外热像测试实验研究	14
2.1 引言	14
2.2 红外测温原理及红外热像仪简介	15
2.3 实验设备、材料及测试方法	16
2.3.1 实验设备与材料	16
2.3.2 测试方法	17
2.4 岩石钻进过程的红外热像测试实验	18
2.4.1 全幅钻进	18
2.4.2 半幅钻进	30
2.5 实验现象分析	35
2.5.1 钻进过程钻头的温度变化趋势	35
2.5.2 闪温现象	36
2.5.3 钻进口径对温度的影响	36
2.5.4 空冷降温的规律	36
2.6 本章小结	37
第 3 章 岩石钻进过程的刀具温度模型	38
3.1 引言	38
3.2 岩石钻进过程的传热分析	39

3.3	干切削条件下的刀具温度解析法求解	40
3.3.1	切削过程温度解析	40
3.3.2	压入过程的温度解析	44
3.3.3	钻进过程刀具平均温度	48
3.4	水流作用下换热量及刀片温度场	48
3.4.1	水流与刀片间的换热量	48
3.4.2	水流作用下刀片的温度场	50
3.4.3	不同泵压下刀片温度场	51
3.5	计算分析	52
3.5.1	计算参数	52
3.5.2	结果分析	52
3.6	本章小结	55
第4章	刀具与岩石摩擦过程闪温分析	57
4.1	引言	57
4.2	刀具闪温的计算方法	59
4.2.1	热传导分析	59
4.2.2	闪温的解析计算方法	61
4.3	计算参数的确定	63
4.3.1	接触系数	63
4.3.2	摩擦系数	67
4.4	实验与计算分析	68
4.4.1	红外温度测试实验	68
4.4.2	闪温的理论计算	69
4.4.3	实验与理论计算的比较	70
4.5	本章小结	70
第5章	岩石钻进过程刀具热断裂机理	71
5.1	引言	71
5.2	岩石钻进过程中刀具热应力分析	72
5.3	岩石钻进过程中刀具断裂分析	74
5.3.1	刀具变形破坏的能量分析	74
5.3.2	刀具断裂的力学分析	75
5.4	硬质合金钻头钻进岩石试验与分析	77
5.4.1	试验材料、设备及过程	77
5.4.2	试验结果	78
5.4.3	计算与分析	79

5.5 本章小结	84
第 6 章 岩石钻进过程刀具热磨损机理	86
6.1 引言	86
6.2 实验材料与过程	87
6.2.1 实验材料	87
6.2.2 实验过程	89
6.3 实验结果	90
6.4 磨损现象分析	92
6.4.1 磨损类型	92
6.4.2 磨损机理	94
6.4.3 建议	100
6.5 本章小结	101
第 7 章 总结与展望	103
7.1 主要研究结论	103
7.2 主要创新性成果	105
7.3 未来研究展望	106
参考文献	108
编后记	116

第 1 章 绪 论

随着我国经济社会的快速发展,煤矿瓦斯灾害防治、交通建设、石油天然气开采等重大工程对岩石钻进技术提出了更高要求。技术的进步总是以理论的发展创新为基础,因此岩石钻进技术的革新与岩石钻进理论研究的突破密不可分。本章归纳总结了国内外岩石钻进效率、刀具失效机理和钻进热效应的研究现状、发展趋势和不足,阐述了岩石钻进热效应对刀具失效和钻进效率产生的重要影响,指出了开展岩石钻进热效应及其影响研究的必要性。

1.1 岩石钻进刀具失效问题研究的重大工程需求

1.1.1 岩石钻进刀具的工程应用领域

1. 煤矿瓦斯灾害的防治

煤炭是我国能源结构中的主要能源。一直以来,我国煤炭消费在能源消费中处于支配地位,20 世纪 90 年代初煤炭在能源消费的比重高达 80%,进入 21 世纪以后,尽管随着水电、核电、风电的大力发展,煤炭所占比重有所下降,但是所占比重仍然很高,如 2015 年我国煤炭消费量高达 43 亿吨,能源总消费量的占比仍达到 64%^[1]。预计到 2050 年,煤炭在能源消费中的比重仍不会低于 50%,因此煤炭作为我国基础能源的地位在短时间内不会改变。煤炭的安全稳定生产对保障我国的能源安全十分重要。

由于我国煤层地质条件复杂,安全措施与管理水平落后,因此煤矿事故频发。而发生的各种煤矿灾害中,尤以瓦斯灾害最为突出。尤其近年来重大瓦斯事故频发,造成的人员财产损失极其惨重,带来的社会影响也十分恶劣,如 2016 年 3 月 6 日,吉林吉煤集团通化松树煤矿发生一起煤与瓦斯突出事故,造成 12 人遇难,事故发生在全国“两会”期间,引起社会广泛关注;2014 年 3 月 21 日,河南平煤集团长虹矿业公司在钻孔作业中出现喷孔、顶钻等突出预兆,但矿方未及时采取有效防突措施消除突出危险性,进而发生重大煤与瓦斯突出事故,造成 13 人死亡;2013 年 1 月 18 日,贵州金佳煤矿发生煤与瓦斯突出事故,导致 13 名被困矿工全部遇难;2012 年 11 月 24 日,贵州盘江集团响水煤矿因瓦斯抽采不到位发生煤与瓦斯突出事故,造成 23 名矿工遇难;2011 年 10 月 29 日,湖南衡阳市霞流冲煤矿发生煤与瓦斯爆炸,造成 29 人遇难,直接经济损失 2000 多万元;2010 年

10月16日,河南平煤集团平禹四矿发生特别重大煤与瓦斯突出事故,造成37人遇难;2010年3月31日,河南省伊川县白窑国民煤业有限公司发生煤与瓦斯突出事故,并在副井口遇到明火发生瓦斯爆炸,造成44人遇难;2009年11月21日,黑龙江省龙煤集团新兴煤矿发生煤(岩)与瓦斯突出,造成108人遇难,直接经济损失5614.65万元;2005年2月14日,辽宁省阜新矿业集团孙家湾煤矿发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成214人遇难,直接经济损失4968.9万元;2004年11月28日,陕西省铜川矿务局陈家山煤矿发生特大瓦斯爆炸事故,造成166名矿工遇难,直接经济损失4165.9万……

重特大瓦斯事故频发的原因是多方面的,主要内因是经济高速发展对能源的巨大需求和安全技术措施相对落后之间的矛盾。国外对有瓦斯灾害风险的矿井的策略是少采、不采,即使采也严格执行抽完再采,瓦斯抽放周期少则几年多则几十年。治理瓦斯的最根本方法是先抽后采,但是由于我国能源供应紧张和经济利益的驱动,实际情况往往是边抽边采,这就极大地增加了瓦斯灾害的风险。因此,在当前我国煤炭生产面临的实际情况下,提高瓦斯抽采效率成了煤矿安全关键。

在瓦斯抽放孔的钻进施工中,钻头的寿命直接影响到瓦斯抽采速度。统计资料显示:在穿越硬岩钻瓦斯抽放孔时,钻头的平均寿命只有5~10米,这意味着钻100米长的瓦斯抽放孔,平均更换钻头的次数为10~20次。钻头每更换一次,所有钻杆必须逐节退出来更换新钻头后再一节一节地送入钻孔。钻孔越深,更换速度就越慢,有时一个班次只能打钻进尺几米或零点几米。钻头的寿命极大地影响了瓦斯抽放的进度,更加大了瓦斯事故发生的风险。深入研究岩石钻进过程中钻头的失效机理对提高钻头寿命进而提高瓦斯抽采效率保证煤矿安全生产具有重要意义。

2. 交通建设的需求

硬岩掘进在隧道施工成本中刀具费用占较大比例,石质越硬,刀具费用比例越高,特别是硬岩地段掘进,刀具费用为掘进成本的三分之一。减少刀具消耗,是降低隧道掘进成本的主要手段,更是提高盾构机等大型施工机械利用率、加快施工进度的根本任务。例如,在使用隧道盾构机TBM的西康铁路秦岭隧道施工中,由于刀具原因造成的停机时间占施工总时间的16.3%,也就是说,每天18小时的掘进施工时间内,平均有近3小时的时间是因刀具的原因使机器停止了运转^[2]。

2010年10月1日,历经7年时间修建而成的宜万铁路通车,该路全长377千米,其中全线共有隧道159座338.771千米,双线隧道54座47.32千米,10千米以上隧道5座共61.161千米,隧道的修建占用了绝大部分施工时间^[3]。未来铁路网的新增线路将经常跨域这样的地质条件极为复杂的地区,隧道施工的效率将成为制约整个工程进度的根本性环节。

当前我国大规模高速铁路和高速公路建设正全面铺开,即将掀起新一轮交通

基础设施建设高潮。减少刀具消耗,是降低隧道掘进成本的主要手段,更是提高大型施工机械利用率、加快施工进度根本任务。所以深入研究破岩刀具的失效机理对国民经济建设也具有深远的工程意义。

3. 石油、天然气、页岩气的勘探开发

石油、天然气、页岩气等油气类化石能源在我国能源消费中所占比重越来越高。这类能源的开采与煤炭不同,主要是依靠钻井工程来完成建井,钻头在施工成本中占有很大比例^[4]。由于相对煤矿瓦斯钻孔,油气田的钻机更为庞大,钻井深度也更大,有的甚至超过1万米,这样更换钻头对施工进度的影响更为巨大,钻头寿命成为制约钻井进度、提高油气能源供应效率的主要瓶颈^[4-6]。

所以深入研究岩石钻进过程中钻头失效机理对提高油气田的生产效率有着深远意义。

1.1.2 岩石钻进刀具热失效机理的研究意义

材料的失效机理历来是工程领域的重大科学问题。岩石是自然界亿万年造化的天然产物,其结构与性能不像金属等均质材料有明确的规律可循,这就造成岩石钻进过程中刀具的失效影响因素更多,作用机理更加复杂。目前,学术界存在很大争议,至今仍处于探索发展阶段。

与金属加工一样,岩石钻进过程也会产生显著的热效应。但是由于岩石的导热系数比金属材料低1至2个数量级,钻进过程中将有更大比率的热量传入刀具,致使岩石钻进刀具的工作温度比金属钻削更高。硬质合金、人造金刚石等钻头材料的强度、耐磨性等性能与其工作温度密切相关^[7],而刀具材料的这些性能又直接影响到钻头的使用寿命。然而目前关于岩石钻进过程刀具发热问题的研究资料很少,特别是水射流参与条件下刀具温度的变化规律更属空白。

本书正是基于以上国民经济建设领域的重大工程问题的理论研究需求,特别是针对岩石钻进过程刀具温度变化规律及其热效应对刀具失效的影响机理进行了系统研究,为深入研究破岩刀具的失效机理等科研工作积累一些理论基础并为提高刀具寿命改进刀具提供参考数据。本研究不仅具有很强的学术意义,更对保障我国能源供应的安全稳定具有深远的工程应用前景和实用价值。

1.2 岩石钻进刀具热失效机理问题研究现状

1.2.1 岩石钻进过程的刀具失效机理

钻头主要由金属基座和镶嵌在基座上的刀片构成。刀片材料一般由坚硬的耐

磨材料制造,最常见的是硬质合金和人造聚晶金刚石(PCD)。硬质合金是由难熔金属的硬质化合物和粘结金属通过粉末冶金工艺制成的一种合金材料。硬质合金具有良好的硬度、强度、耐磨性和韧性等性能,是应用最广的一种耐磨材料。PCD是取向不一的细晶粒金刚石烧结体,尽管其硬度及耐磨性低于单晶金刚石,但硬度仍比硬质合金高出几倍甚至几十倍,导热系数也为硬质合金的1.5~9倍,是一种高档刀具材料。实际应用中硬质合金刀具比PCD材料更具韧性,并且制造工艺相对简单,有良好的综合性能,性价比高,是最为普遍的钻头制造材料。

钻头的失效主要是指刀片材料的失效,最常见的失效形式是断裂与磨损。断裂是指刀片在工作过程中突然的折断、崩刃、掉齿等现象,刀具发生断裂后会引引起整个刀具受力状态的突然改变,会引起连锁反应,导致其他部分也迅速破坏,使钻头彻底丧失工作能力。磨损是指刀片在与被加工材料接触过程中质量逐渐减少、形状逐渐变化直至不能正常工作的一种失效行为。

不同于切削和磨削等加工形式,钻削活动是多种运动的综合。一方面钻头需要压入被加工表面一定深度,另一方面还要进行旋转切削以实现去除压入部分周围的加工材料,压入和旋转两种运动同时周而复始地进行就实现了从材料表面到内部的钻孔。所以钻削比切削等加工的运动更为复杂,影响钻头失效的因素也就更多。由于岩石是典型的脆性材料,破裂时会比金属钻削带来更为强烈的振动和冲击。而且其工作情况受到岩石类型以及设备等多种因素的影响,从而使岩石钻进过程刀具的失效机理变得十分复杂。

1. 钻岩刀具的断裂行为

断裂是固体材料在力的作用下分成两部分或若干部分的现象,是最彻底也是最严重的失效形式^[8]。衡量和判断材料断裂破坏的经典理论主要有最大拉应力理论、最大切应力理论、最大 Mises 应力理论(最大形状改变比能理论)、莫尔理论等^[9],针对玻璃陶瓷等脆性材料理论断裂强度和实际断裂强度存在巨大差异的实际,1921年英国科学家 Griffith 采用能量分析方法得出了描述脆性材料实际断裂强度与结构参数关系的方程,并由此建立了衡量脆性材料断裂的 Griffith 理论。

一些学者对工程中钻头的断裂行为进行了研究。前苏联学者 Спивак 和 Попов^[10]总结了钻头刀具的几种常见损坏形式:根部断裂、中间截面断裂、齿顶部分剥落和齿的压皱。综合分析后认为刀具的损坏是由于钻进的周期性、轴载的不均匀性、钻头的特性以及所钻岩层的坚硬性造成的,但是他们没有能进一步说明这些因素具体是如何影响钻头失效的。日本的庆兹奥岛和哲多旁士^[11]把刀具的断裂形式分成三类:低速运动下的崩刃、没有先期裂纹的大尺寸崩刃及高速运动下的断裂。他们认为前两类断裂的共同特点是发生在刀具寿命的早期阶段,或者是发生在无法预测的时间里,第三类断裂是刀具疲劳损坏所致,发生的时间在刀

具和加工条件的某一平均值附近波动。

Kemsley^[12]认为水参与下的刀具的冲击性断裂行为的断裂面在硬度变化的界面上, 因为这样碳化物的软区起到阳极作用, 其他地方起阴极作用, 形成了原电池反应。在电化学作用下会产生腐蚀裂纹, 这些裂纹在冲击应力波的作用下扩展而形成断裂。而叶尔莫拉耶夫^[11]则认为电化学腐蚀作用在岩石钻进中作用速度较慢, 不是主要腐蚀作用; 主要的断裂机制是岩石加工过程中, 刀具中原有的微裂纹能够渗透进去水, 裂纹中的水受到压缩波的作用后可以形成高达数千大气压的压力, 高压水楔入裂纹尖端并会使之扩展, 另外水的存在还减弱了裂纹尖端分子间的凝聚力, 降低了表面能, 当应力波作用时裂纹就会容易扩展甚至引发材料的宏观断裂。

刀具材料所受到的低于其强度但反复加载的疲劳应力在积累到一定程度时, 也会发生断裂, 成为疲劳断裂。根据断裂力学, 裂纹长度和应力的循环次数用下式表示^[13]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.1)$$

式中, l 为裂纹长度; N 为应力循环次数; ΔK 为材料断裂强度因子在应力循环中的变化幅度; C 为材料常数; m 为与材料有关的指数, 一般为 2~3。

李琴等^[14]在研究地质勘探钻头失效时认为在接触表面下最大切应力处(约 0.5 倍接触圆半径)产生裂纹源, 裂纹扩展到表面形成疲劳凹坑, 若裂纹与端面垂直则造成较严重的大块深层剥落, 若平行于端面则造成浅层剥落, 形成片状剥落坑。Llanes^[15]等对硬质合金材料的疲劳裂纹扩展过程和裂纹敏感性进行了动力学演变过程的研究。

Sigl 和 Fischmeister 等^[16, 17]对硬质合金工具工作时韧性降低机制进行了深入研究, 发现在裂纹尖端后面大约 5 倍碳化钨(WC)颗粒直径处的钴(Co)连接带发生的断裂是造成韧性下降的直接原因, 据此认为提高 WC 晶粒间的平均自由距离可以增强硬质合金断裂韧性, 适当增加 Co 的含量被认为是提高硬质合金断裂韧性的有效手段。Fang^[18]却认为如果只单纯地使 Co 的含量增加必然导致硬质合金材料的硬度降低, 在实际的工程应用之中硬度几乎是耐磨性的代名词, 硬度的下降意味着耐磨性的下降, 岩石钻进中, 只有根据实际情况选择合适韧性和硬度的钻头材料才能最大程度上的发挥刀具的使用寿命。

Lammer^[19]和 Huang 等^[20]分别报道了 PDC 刀具在对压盘和水射流辅助破岩技术应用中的断裂韧性方面的一些表现, 但是由于制备分析样品的困难, 没有深入地分析刀具的断裂机制。Fang 和 Griffio 等对硬质合金刀具和 PDC 刀具在钻岩过程中的工作表现和失效形式进行了对比分析, 认为理想的刀具材料应该集合两者优点, 具备良好的韧性和强度^[21-24]。李晓红^[25]对 PDC 刀具切割大理石、石

灰岩、花岗岩后的破损情况进行了分析,发现刀具主要的破坏形式是脆性断裂和磨损,而对脆性断裂刀具进行显微分析后总结出三种脆性断裂形式:刀具局部撕裂,表面块状脆裂,PDC刀片与过渡层分离产生的表面剥离。

Stjernberg 和 Fisher 等^[26]通过研究发现硬质合金钻头在钻岩过程中受到压应力和热拉应力的共同作用,而且两种力也存在相互作用的关系,造成的表面裂纹的深度大约为 10~20 μm 。Braiden 等^[27]研究了硬质合金刀具的失效行为后认为单纯的机械应力不会使刀具断裂,而是机械应力和热应力的共同结果;两者还会造成刀具的压缩塑性应变;而裂纹的出现表明拉应力的存在,因而推测拉应力是由于刀具温度变化产生的热拉应力所致;他们认为热应力是刀具产生裂纹,进而发生断裂导致寿命急剧下降的主要原因。Yellowley^[28]通过实验证明断续切削时热应变的区域和热循环次数都会显著影响刀具的寿命。Bhatia^[29]也通过实验和理论研究认为热效应是导致硬质合金刀具失效的主要因素。

2. 钻岩刀具的磨损行为

磨损的一般工程定义为构件由于表面相对运动而在承载表面上不断出现材料损失的过程^[30]。磨损源于表面的力学作用或者化学作用,Bhushan^[31]把磨损划分为六种主要形式:黏着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、冲击磨损、腐蚀磨损、电弧感应磨损。磨损率是表征材料耐磨性的主要参量,一般用质量磨损率和体积磨损率来表示。刀具与岩石的磨损几乎囊括了以上各种磨损形式。一般来说,钻岩刀具的耐磨性主要与三方面因素有关:材料基本的机械物理性能,材料微观结构特征,工作环境^[32]。

Upadhyaya^[33]指出,刀具材料的硬度越高,表面层的耐塑性形变能力越强,抵抗磨粒磨损的性能就越高。Montgomery^[34]通过实验发现,钻头的磨损率最小处发生在特殊硬度处,而磨损率最大处发生在压应力最大处。Ersoy^[35]通过一系列岩石钻进实验发现岩石中的 Si 含量对 PCD 钻头的质量磨损率影响很大,钻头旋转速度的下降会导致磨损率的上升,磨粒磨损的体积损失率与钻头质量和扭矩成正比关系。Reyes 和 Neville^[36]研究了有水存在条件下硬质合金钻头钻进岩石的磨损过程,认为有水存在的条件下钻头材料的磨损主要是受电化学腐蚀和机械腐蚀影响。Beste^[37]认为刀具的磨损与摩擦系数存在一定关系,他还通过实验研究了硬质合金钻头与花岗岩、石英岩、麻粒岩、云母片岩、赤铁矿、砂岩等岩石间在不同温度下的摩擦系数:在干摩擦条件下,25 $^{\circ}\text{C}$ 时与云母片岩摩擦系数最高,麻粒岩最低,350 $^{\circ}\text{C}$ 时麻粒岩最高而赤铁矿最低;在有水参与条件下,与花岗岩间的摩擦系数最高而石英岩最低。Montgomery^[38]通过实验研究发现花岗岩钻进中硬质合金钻头的磨损率 R_w 与钻头硬度 H_c 之间存在如下关系:

$$R_w = Ce^{(-0.57H_c)} \quad (1.2)$$

式中, C 为常数, 与岩石的类型有关。

Beste 和 Jacobson^[39]指出刀具的磨损与岩石的性质特别是硬度紧密相关, 并通过大量实验对石英岩、砂岩、花岗岩、方解石等几种不同岩石的微观硬度分布特征进行了研究。Larsen-Basse^[40]对硬质合金刀片与岩石作用后破损形貌进行的研究发现刀片裂纹是冲击、表面冲击疲劳和热疲劳的结果。

Bailey 和 Perrot^[41]指出热疲劳失效是岩石钻进中钻头的重要磨损机制, 他们还进一步指出磨损和表面冲击疲劳会导致材料晶粒间出现裂纹并使之扩展。Beste、Hartzell 和 Engqvist 等^[42]指出除了逐渐的表面磨损之外, 蛇皮纹的形成和出现对钻头材料的影响也很致命。所谓蛇皮纹就是材料在表面疲劳的作用下由纵横交错的沟和粗糙平台构成的表面形貌, 像蛇皮一样, 如图 1.1 所示。

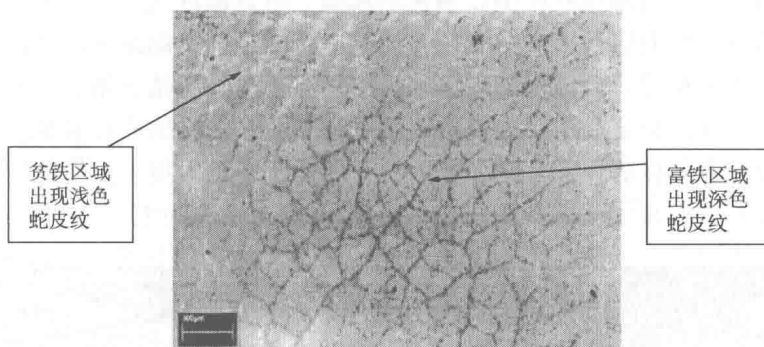


图 1.1 钻头上的“蛇皮纹”

蛇皮纹出现后一般会导致更大范围的破坏性裂纹出现, 进而导致刀具失效。Beste^[42]认为蛇皮纹的出现主要是热冲击和热疲劳的结果, 无论何种类型的岩石钻进都会产生发热现象, 特别是硬岩钻进中发热更为显著, 导致蛇皮纹的出现频率加大, 破坏效果更大。

1.2.2 岩石钻进过程的热效应

与金属钻削一样, 钻进岩石同样要产生热效应。钻头破碎硬岩石过程中, 绝大部分切削功将会转化为切削热, 致使钻头的温度迅速升高。无论是钻头的断裂还是磨损, 前面的文献都提到了这些失效现象与钻头的发热存在紧密关系。

一直以来人们对岩石钻进过程的发热温度并不十分了解, 一般估计钻头的平均温度为 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ ^[42]。但这仅仅是估计的平均温度, 不包括存在时间较短的闪点温度。

Larsen-Basse^[40]曾报道, 即使有水的冷却条件下, 钻头上部分区域的某些相点