

Theory and Method of Risk Evaluation of
Underground Damage

城市地下工程损害风险 评价理论及方法

吕祥锋/著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(编号: 51774048)

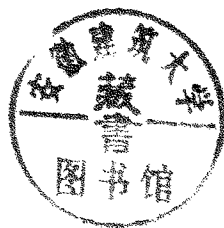
国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 51504029)

北京市优秀人才培养资助青年拔尖个人项目(编号: 2017000021223ZK04)

城市地下工程损害风险评价 理论及方法

Theory and Method of Risk Evaluation of
Underground Damage

吕祥锋 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结作者近年来在地下工程损害原位预测理论、方法和创新技术方面的研究成果,并结合国内外相关研究成果,对地下岩土工程预测预报理论、试验及测试技术装备等进行较系统和全面的论述。书中详细介绍地下岩土工程灾害预测技术的发展水平,分析国内外目前预测理论方法存在的主要问题,提出原位触探预测新理论方法,研发地下岩土体原位预测系统装备,并在模型试验、现场测试区段等重要工程应用测试中取得成功。研究成果为地下岩土工程灾害原位预测提供了重要的科学依据和新技术方法。

本书可供从事土木建筑工程、岩土工程、地下工程与隧道等专业的科研人员、设计和施工人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下工程损害风险评价理论及方法 = Theory and Method of Risk Evaluation of Underground Damage / 吕祥锋著. —北京: 科学出版社, 2018.5
ISBN 978-7-03-058759-6

I. ①城… II. ①吕… III. ①城市-地下工程-风险评价-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第206527号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018年5月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 200 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,我国城市地下工程建设迅速,尤其地铁建设规模和数量呈现激增趋势,地铁上覆层隐伏病患诱发沉降、塌陷事故频繁发生,造成严重的经济损失和社会影响。截至2016年年底,全国地铁运营总里程已超过3000km,预计至2020年,全国将有超过40个以上的城市拥有地铁或轻轨,总规划里程达7000km。城市地下轨道施工及运营期上覆地层疏松、松动、脱空甚至出现空洞,在外部复杂环境作用下诱发沉降、塌陷,不仅给国家经济带来了重大损失,更给民众的生命安全带来了严重威胁,已引起了岩土工程相关科研人员和技术人员的广泛关注。笔者自2009年攻读博士学位开始,就一直从事地下岩土工程孕灾机理与动态控制技术相关工作。依托国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年科学基金项目、北京市优秀人才培养资助青年拔尖个人项目,系统研究城市地下工程孕灾机理和险源快速探测理论,提出地下工程隐伏病患精细识别和预测方法,研制地下岩土体隐患探测、识别和预测成套系统装备,实现城市地下工程灾害原位行为精准判识。

本书的出版得到了辽宁大学潘一山教授,辽宁工程技术大学梁冰教授、王来贵教授、肖晓春教授,中国科学院武汉岩土力学研究所刘建军教授、薛强研究员,中交基础设施养护集团有限公司崔玉萍教授级高工,北京市勘察设计研究院有限公司周宏磊教授级高工,建设综合勘察研究设计院有限公司傅志斌教授级高工,中国科学院力学研究所冯春高工的指导,部分研究内容得到课题组和实验室各位同事的大力支持帮助。在研究过程中,得到了北京市市政工程研究院王新灵助理工程师、周宏源硕士研究生、张硕硕士研究生的帮助;在现场预测技术研究方面,得到了中电建路桥集团有限公司冯志高工、欧阳韦高工、刘勇教授级高工、梁喜明工程师的支持。在此,对他们表示诚挚的感谢。

限于水平,书中不当之处,请读者批评指正。

吕祥锋

2018年1月

目 录

前言

第 1 章 地下工程灾害预测研究现状	1
1.1 地下工程物探预测研究现状	1
1.2 地下工程钻探预报研究现状	2
1.3 地下工程旋转触探预测技术研究现状	4
第 2 章 旋转触探强度理论模型	6
2.1 旋压破土力学理论	6
2.1.1 尖齿剪切体受力分析	6
2.1.2 尖齿钻头破土力学分析	9
2.2 旋转触探数学模型	11
2.2.1 微损触探破岩假设	11
2.2.2 微损触探关键参数	11
2.2.3 岩土体静强度与微损触探动态参数相关关系	12
2.3 旋转钻测数值方法	17
2.3.1 计算方法概述	17
2.3.2 岩土体塑性区分布与钻头静压力关系数值解	27
2.4 旋转触探数值计算	29
2.4.1 计算模型及参数	29
2.4.2 黏聚力与旋压触探动态参数关系	31
2.4.3 内摩擦角与旋压触探动态参数关系	36
第 3 章 模型岩土体细观力学实验研究	40
3.1 模型岩土体细观力学测试	40
3.1.1 细观力学试验仪器	40
3.1.2 不同初始条件黏土细观力学测试结果	40
3.1.3 不同初始条件砂土细观力学测试结果	47
3.2 模型岩土体强度规律分析	54
第 4 章 模型岩土体原位力学微探规律研究	56
4.1 模型岩土原位微探试验	56
4.1.1 原位微探方法及装置	56
4.1.2 不同初始条件黏土原位微探结果	59

4.1.3	不同初始条件砂土原位微探结果	78
4.2	模型岩土原位微探规律	101
第5章	原状岩土体原位力学旋转触探分析	103
5.1	原状岩土强度参数实验	103
5.1.1	实验准备	103
5.1.2	实验方案与仪器	103
5.1.3	实验结果	105
5.1.4	原位岩土体参数统计	109
5.2	原状岩土原位微探测试	110
5.2.1	原状岩土体微探结果	110
5.2.2	原状岩土体微探参数统计	113
5.3	原状岩土微探定量标定	114
5.3.1	原状岩土体微探单一响应量与力学参量相关关系	114
5.3.2	原状岩土体微探四响应量与力学参量相关关系	119
第6章	地下工程险源原位预测研究	121
6.1	岩土体强度原位分析方法	121
6.1.1	地下工程雷达普查	121
6.1.2	岩土体细观强度旋压定量探查	125
6.1.3	岩土体微观形貌全景成像详查	130
6.2	岩土体强度损伤评价标准	132
6.2.1	地下工程损害原位定量评价	132
6.2.2	岩土体强度损伤判据	133
6.3	地下工程险源原位预测流程	134
第7章	典型城市地下工程险源原位预测评价	135
7.1	工程概况	135
7.2	预测评价目的及依据	135
7.3	无损雷达排险	135
7.3.1	原理及方法	135
7.3.2	雷达选型及测线布置	136
7.3.3	雷达排查结果评判依据	139
7.3.4	雷达排险结果	139
7.4	微损触探测试	142
7.4.1	微损触探测试方法	142
7.4.2	L12-1 原位微损触探结果	142
7.4.3	L22-1 原位微损触探结果	143

7.5 全景数字图像.....	145
7.5.1 L12-1 全景成像结果.....	145
7.5.2 L22-1 全景成像结果.....	148
7.6 原位预测评价.....	150
7.6.1 L12-1 原位评价结果.....	150
7.6.2 L22-1 原位评价结果.....	151
第 8 章 主要研究结论及展望.....	152
8.1 主要研究结论.....	152
8.2 展望.....	153
参考文献	154

第1章 地下工程灾害预测研究现状

1.1 地下工程物探预测研究现状

目前岩土工程超前预报多采用雷达方法、多道面波法、高密度电阻率法、基于 Ohm Mapper 的电阻率成像法和现有原位强度探测方法相结合的技术手段^[1~10]。探地雷达通过向地下发射宽频短脉冲高频电磁波,利用不同地下介质的电性特性及其分界面对电磁波的反射原理,通过分析来自地下介质的反射电磁波的振幅、相位和频谱等运动学和动力学特征来分析、推断地下介质结构和物性特征^[11];多道面波法是一种新的浅层地震勘探方法,利用其频散特性和传播速度与岩土物理力学性质的相关性可以解决诸多工程地质问题^[12]。常规的面波勘探只是一次采集一点的资料,而多道面波勘探技术则是通过连续的排列移动,同时收集面波资料和反射资料;高密度电阻率法是一种阵列勘探方法,它以岩、土导电性的差异为基础,研究人工施加稳定电流场的作用下地中传导电流分布规律^[13]。测量时需将全部电极置于观测剖面的各测点上,然后利用程控电极转换装置和计算机工程电测仪便可实现数据的快速和自动采集,当将测量结果送入计算机后,还可对数据进行处理并给出关于地电断面分布的各种图示结果^[14]。杨锦舟使用递推矩阵方法计算径向介质的格林函数,通过对随钻电磁波电阻率测量仪器进行数值模拟,来分析钻挺影响规律、井眼影响及校正方法和仪器的探测深度^[15]。总结了随钻自然伽马、电阻率在地质导向钻井中应用的3种测量方式特征,即近钻头测量、基于随钻估计和预测方法的随钻测量、随钻方位自然伽马和电阻率测量;描述了随钻自然伽马、电阻率的实时解释方法,根据不同区域的地质特点、岩性测井特征和储集层的物性特征,将随钻测井数据与事先设定的储层地质特征进行实时对比和评价,完成地层对比、流体性质判别和储层参数解释;说明了随钻自然伽马、电阻率的刻度方法,通过仪器的标准化刻度及量值传递,为定量解释地层提供准确的测井资料;结合实践介绍了利用随钻自然伽马、电阻率实时测井曲线,根据不同岩性和不同层位自然伽马、电阻率的差异特性,结合邻井资料和无孔隙度测井资料条件下的孔隙度解释模型。张树东分析了储层多套层系的地质和测井响应特征,提出了构造追踪、储层追踪和地层追踪等有针对性的技术思路;在此基础上,对常见的4种复杂储层类型的测井系列进行优化,提出了不同地层和储层条件下适用的5种测井组合^[16]。根据对美国北部二叠系泥岩孔隙度与深度关系的研究,Wang 和 Signorelli 采用了时域有限差分法模拟了存在铁氧体情况下的随钻电阻率

测井仪器的响应特性^[17]。程建华和作杰用时域有限差分法模拟了在直井中三层地层模型下的随钻测井响应,分析了有钻挺和无钻挺时线圈型随钻测井在均匀介质中的瞬态辐射特性、侵入对随钻测井响应的影响、三层有侵地层模型响应,以及多频率信号响应的幅度和相位^[18]。Hwa Ok Lee 等应用了三维圆柱时域有限差分法模拟了随钻测井仪器在水平和倾斜下的各向异性地层中的响应情况^[19]。

前文介绍了物探超前预报的许多成功案例与新的应用方向,对岩土工程应用的推广起了鼓舞作用,但物探方法有诸多限制,且探测结果与工程量化判释的关系往往没有那么直接。大部分物探方法皆须经由反演求得待测物理参数或影像剖面,反演方式主要采取误差成本函数的优化方法^[20,21]。但这个过程经常不具有唯一性,工程师因为缺乏对这方面的了解,导致缺乏对于物探反演结果可能存在限制的认知。反演的非唯一性的原因可以归纳为三类:①物理现象本身的非唯一性;②量测信息在空间与频率内涵上的局限性;③反演的过度收敛与局部优化问题^[22,23]。物探方法反演受到含误差的有限量测资料及收敛上的限制等问题困扰,结果并非唯一,这是基于物探方法预测岩土工程灾害的最大弊端。因此,对于反演结果的诠释必须持谨慎态度,以避免过度解读施测成果。

1.2 地下工程钻探预报研究现状

用仪器记录随钻测量始于 20 世纪 30 年代,在油气井勘探和开发中用来测量钻井液物理化学成分。现在油气田和矿石开采工业大量使用随钻测井(logging while drilling, LWD)或随钻测量(measurement while drilling, MWD)^[24-32]。这些随钻测量的主要目的是研究钻井液体化学成分和物理性质,监测钻具的正常工作、钻进地质导向和最优化钻探过程^[33,34]。MWD 和 LWD 的一个最主要的特征是数据是按照钻井深度进行采集的,采集数据都是按钻深间隔排列的深度序列。在 1970 年后,法国、加拿大、意大利、美国和日本等国岩体工程研究人员希望通过仪器随钻记录的钻进参数,来解决岩土工程钻探中一些地层划分难题。Gui 等在岩土地勘中开始用仪器进行钻进参数测量和地层质量划分^[35,36]。这些钻探工作用于挖泥工地土石界面识别、场地土地基加固、工程场地勘察、硬岩中的软弱煤层、土体灌注泥浆加固检查、岩体工程评级,以及发电厂探查溶洞^[37-39]。

目前,用钻具向地下岩土体钻孔或钻井是各种与地质岩土体有关的科学和工程中最常见和重要的工作任务和手段。国内外专家学者一直关注岩石可钻性的研究,并且已经做了大量的工作,但是,一直没有研究出精确反映岩石可钻性的测量方法^[40]。从近几十年的文献来看,国内外对岩石可钻性研究的进展不大,突破极少。从 1970~2013 年,共有 68 篇 SCI 论文是与岩石可钻性(rock drillability)

相关的^[41]。田昊等提出了隧道地质数字钻进精细化识别方法,以探寻钻进参数与地层信息之间的相关性指标为主线,以可钻性指标、钻进能量和钻进参数数据为核心,以仿生 k-medoids 算法和量子遗传 RBF 神经网络为方法,以参数采集系统的设计和数据的转换为基础,实现对地层的界面识别、不良地质体识别和围岩分级^[42]。邱道宏、高伟等从钻进能量的角度分析钻机工作参数变化特征,利用钻进参数绘制出了钻进能量变化曲线及钻进比能变化曲线,进而对凝灰岩地层进行了界面识别和围岩分级研究^[43,44]。谭卓英等根据监测数据,采用相关的理论分析,得出了钻进过程中,钻进能量、钻进比功等与岩石地层特性的关系^[45]。谭卓英等针对钻进参数样本数据,采用最短距离聚类准则,分别建立类及分类数已知与类及分类数未知条件下的地层判别分类及有效性检验方法,该聚类分析方法在普通风化花岗岩地层中分类性能良好、精度高、误判率低^[46]。宋颐等给出了针对不同钻进方式选择合适的预测模型,并开发井眼预测与控制系统,利用模型及系统对实钻数据进行计算^[47]。Karasawa 等在室内钻机上用 3 种不同磨损程度、直径为 98.43mm 的铣齿钻头和直径为 101.6mm 的镶刃钻头,分别对抗压强度为 4~118MPa 的 4 种岩样进行了钻切试验,并测得了钻压、扭矩、转速和钻头的位移及时间^[48]。Signorelli 用源比能概念的钻进速率判定岩土和风化岩体的等级^[49]。Yue 等详细介绍了原位钻进全过程数字监测技术和数据采集处理的方法,并将原位钻进全过程数字监测技术应用于中国香港实际工程;通过分析采集的数据,得出在同一各向同性、均质的连续介质中,采用同一种钻机钻孔,钻速为常数^[50]。谭卓英等(2006)提出了以单位能量下的穿孔速率作为可钻性指标的新概念,基于钻进过程中有效轴压、转速、穿孔速率和可钻性指标间的耦合关系,建立了可钻性指标的计算公式,对新的可钻性指标在地层识别中的敏感性进行了分析,阐述了可钻性指标在地层识别中的物理意义^[51]。尽管国外一些研究者曾致力于随钻测量(MWD)对场地岩土体质量评价研究和工作,但是,随钻测量在岩土工程和岩石工程中一直还没有开展起来,它还不是现行岩土施工或勘察的常规或规范方法。Gui 等^[35]研究表明,随钻测量数据存在一个难以解决的问题:随钻数字记录数据存在大量因钻机振动或钻机输出功率变化造成的随机变化,最为主要的是,钻进速度存在极大的随机变化。他们不能从随钻数据中分离出钻机振动的影响,从而不能得到稳定钻速,难以建立随钻参数同岩土体力学参数之间的确定性关系。甚至,Gui 等^[35]要求在钻进过程中保持钻机输出液压力不变(恒定钻井功率),以减少钻机随机振动的巨大影响。我国内地在随钻测量方面的研究和应用进展也不多。目前,我国内地尚未研发拥有自主发明权的随钻测量或钻孔监测仪器。在 2007 年以后,我国内地通过中国香港卓泓兴业公司引进了日本矿研工业株式会社研发的多功能快速钻机施工技术,在多个隧道工程超前地质预报中得到应用。这些钻机装有系统随钻测量,通过测定、分析钻机钻孔时采集到的数据(钻孔深度、

钻孔速度、转速、扭矩、旋转压力、打击能、打击数、打击压力、推进力、送水量、排水量、送水压力、排水压力)掌握掌子面前方的地质状况。但是,这种做法的结果还是不能令人满意。这个随机振动的问题困扰了很多国外岩土研究人员,导致他们失去了对随钻测量进行深入研究兴趣,相关研究成果和论文相对稀少。

1.3 地下工程旋转触探预测技术研究现状

旋转触探的探头入岩方式为探头的切刀旋压切削破岩。直接获得的数据有:探头的钻进速度、转速、扭矩和探头所受的轴向负荷。在钻进速度、轴向负荷、转速及扭矩这4个参数之中,钻进速度和转速为探头的运行参数,而轴向负荷和扭矩为钻头上的荷载参数。对上述4个参数,可进行两种相互间的关系研究:①运行参数和荷载参数间关系的研究,即钻头的运行参数(钻进速度和转速)变化对钻头上的荷载(轴向负荷和扭矩)的影响,或者反过来,钻头上的荷载参数(轴向负荷和扭矩)变化对钻头的运行参数(钻进速度和转速)的影响;②荷载与运行参数交叉影响的研究,即一个运行参数和一个荷载参数对另一个运行参数及另一个荷载参数的影响研究。

陈铁林等介绍了一种动力强劲、钻速快、操作简单、钻孔方位范围大、可靠性高、可适应各种工况,尤其适用于长大隧道施工的“矿研”RPD多功能钻机^[52]。宋玲、李宁等研究了旋压触探机理,为实现软岩原位旋转触探,以砌块、特级石膏和模具石膏试样来模拟单轴抗压强度不超过15MPa的软岩,开展了大量实验研究工作,研究了轴向压力、扭矩与软岩抗压强度、抗剪强度之间的关系,得到了不同钻具钻测参数与试样强度变化关系^[53,54]。高延霞在天津南港铁路某特大桥勘察中采用的新型旋转触探技术,孔深达到了80m,克服了常规的静力触探孔不能穿透厚层硬层、测试深度较浅的缺点^[55]。陈新军提出旋转触探特征量-旋转触探比功的概念,将旋转触探测得的锥头阻力、锥头扭矩、转速、贯入速度有机地结合起来,利用旋转触探试验确定灌注桩极限承载力的估算方法,并根据收集到的钻孔灌注桩桩身内力测试成果,对公式中修正系数依土类分别进行了拟合^[56]。李鹏提出旋转触探特征量-旋转触探比功与各应力条件下土体压缩模量之间均具有良好的线性相关性,通过大量现场对比试验分析,建立基于旋转触探技术的不同应力条件下土体压缩模量确定经验公式,揭示旋转触探比功和应力效应对土体压缩模量的影响规律^[57]。李骞、李宁、宋玲基于回转钻探和静力触探试验的综合优势,开发并进行系统地旋进式触探试验,在室内试验和理论推导的基础上进一步验证。从旋进式触探机制入手,根据切削、静压及钻压作用过程建立旋进式触探试验参数钻压、扭矩与每转进给量之间的关系曲线,结合室内试验成果进而以

曲线斜率和钻削理论为依托推导出岩石的抗压强度、弹性模量、内摩擦角及黏聚力的计算公式^[58]。李田军等通过对旋转触探用双螺旋探头的受力分析,建立了螺旋探头的贯入阻力和扭矩与贯入速度和转速,以及岩土的性能参数间的数学模型^[59]。

综上所述,与岩土体旋转触探相关的研究集中在各岩土体材料旋转触探参数测试上^[60~62],但对于旋压触探的机理认识不清,对于旋压触探钻进参量间的关系也认识不清,同时,由于岩土体本身的复杂性,旋压触探测试数据的波动问题尚未解决,使得旋压触探仍作为一种勘察手段,而非一种测试手段,因此开展土体旋压触探研究势在必行,具有重要的理论价值和应用价值。

第2章 旋转触探强度理论模型

本章主要介绍了微损触探强度理论,通过开展尖齿剪切体和尖齿钻头切削破土力学分析,揭示了旋压破土宏观机理;基于布辛内斯科弹性理论,分析了旋压破土过程中岩土体破碎区分布特征,引入 D-P 塑性准则,得到了旋压过程中钻进动态参数与岩土体静态强度参数概化关系;采用离散元软件进行旋压触探数值模拟细观分析,得到岩土体塑性区分布与钻头静压力关系数值解,获取了岩土体内摩擦角、黏聚力对旋压触探动态参数的影响规律,确定了旋压钻进动态参数与岩土体静态强度参数概化关系中关键参数的取值。综合上述结果,形成微损旋压触探理论体系。

2.1 旋压破土力学理论

2.1.1 尖齿剪切体受力分析

根据钻头刀具切削破土过程,可建立切削破碎模型,如图 2.1 所示^[63~66]。剪切体受到钻头尖齿的作用力,为了分析剪切面上的应力分布,可以把尖齿前岩土看成楔顶角为 2α 的楔形体,把均匀荷载简化成作用于楔顶的一集中力 P 和一等效力偶 $M[M = Ph \cos \varphi / (2 \cos \gamma)]$ 的作用。

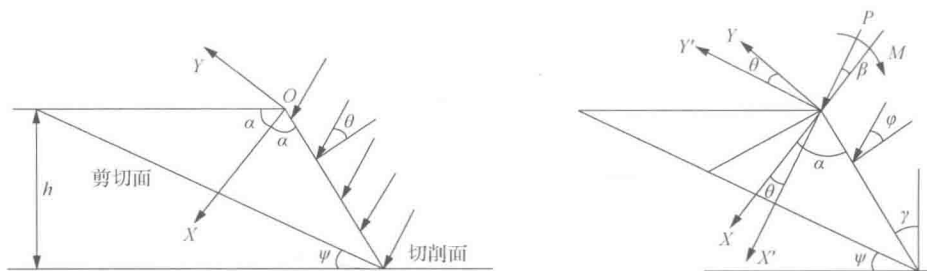


图 2.1 钻头尖齿剪切应力分析

对剪切体模型进行分析, 可求解出尖齿楔形体部分及剪切面上的应力分布。取楔顶为原点, 楔体对称轴为直角坐标系的 X 轴, 或极坐标系的极轴, 逆时针方向 θ 为正, 倾角为 γ , 切削厚度为 h , 剪切面与切削面的夹角为 ψ , 集中力与楔形体对称轴的夹角为 β , 集中力 P 与斜面法线的夹角为 φ , 其值由尖齿面与岩土面之间的摩擦系数 μ 确定, $\tan \varphi = \mu$, $\beta = \pi/2 - \alpha - \varphi$ 。楔体受集中 P 和力偶 M

作用下, 楔体应力分布公式为

$$\begin{aligned}(\sigma_r)_P &= -\frac{2P}{r} \left(\frac{\cos \beta \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\sin \beta \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) \\(\sigma_\theta)_P &= 0\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$(\tau_{r\theta})_P = 0$$

$$\begin{aligned}(\sigma_r)_M &= \frac{2M \sin 2\theta}{(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)r^2} \\(\sigma_\theta)_M &= 0\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$(\tau_{r\theta})_M = -\frac{M(\cos 2\theta - \cos 2\alpha)}{(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)r^2}$$

将两种应力叠加得

$$\begin{aligned}\sigma_r &= (\sigma_r)_P + (\sigma_r)_M = -\frac{2P}{r} \left(\frac{\cos \beta \cos \theta}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\sin \beta \sin \theta}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right) + \frac{2M \sin 2\theta}{(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)r^2} \\ \sigma_\theta &= (\sigma_\theta)_P + (\sigma_\theta)_M = 0 \\ \tau_{r\theta} &= (\tau_{r\theta})_P + (\tau_{r\theta})_M = -\frac{M(\cos 2\theta - \cos 2\alpha)}{(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)r^2}\end{aligned}\quad (2.3)$$

将原坐标系 XOY 顺时针旋转 η 角, 使新坐标系 $X'O'Y'$ 的 X' 轴与剪切面垂直, Y' 轴与剪切面平行。则式 (2.4) 的各应力分量转换为 $X'O'Y'$ 坐标系的应力分量。记 $\eta = \pi/2 - \alpha - \psi$, $\xi = \theta + \eta$, 将极坐标系下的应力各分量转换为 $X'O'Y'$ 直角坐标系下的应力分量表达式。

$$\begin{aligned}\sigma_{x'} &= \frac{4M(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)(Y' \cos \eta - X' \sin \eta)}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha} \cdot \frac{X'^2}{(X'^2 + Y'^2)^3} \\ &\quad - 2P \left[\frac{\cos \beta(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\sin \beta(Y' \cos \eta - X' \sin \eta)}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right] \frac{X'^2}{(X'^2 + Y'^2)^2} \\ &\quad + \frac{2M \left[2 \frac{(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)}{X'^2 + Y'^2} \right]}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha} \cdot \frac{X'Y'}{(X'^2 + Y'^2)^2}\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{4M(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)(Y' \cos \eta - X' \sin \eta)}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha} \cdot \frac{Y'^2}{(X'^2 + Y'^2)^3} - 2P \left[\frac{\cos \beta(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)}{2\alpha + \sin 2\alpha} + \frac{\sin \beta(Y' \cos \eta - X' \sin \eta)}{2\alpha - \sin 2\alpha} \right] \frac{X'^2}{(X'^2 + Y'^2)^2} \quad (2.5)$$

$$- \frac{2M \left[2 \frac{(X' \cos \eta + Y' \sin \eta)}{X'^2 + Y'^2} - 1 - \cos 2\alpha \right]}{\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha} \cdot \frac{X'Y'}{(X'^2 + Y'^2)^2}$$

在剪切面 $X' = h \cos(\gamma + \psi) / \cos \gamma$ 上的各应力分量分布可由上述公式求得, Y' 的区间范围 $-h \sin(\gamma + \psi) / \cos \gamma < Y' < h \cos(\gamma + \psi) \tan(2\alpha - \psi - \gamma) / \cos \gamma$ 。

当剪切面上某点应力满足莫尔-库仑准则, 即 $\tau_{XY'} = c + \sigma_{X'} \tan \phi$, 此时岩土体开始破裂或屈服。

钻头尖齿工作面对岩土作用, 接触面上分布着正压力和摩擦力, 设内摩擦角为 ϕ , 接触面上正应力呈均匀分布, 令合力为 P_1 ; 剪切面与切削面成 ψ 角, 面上分布着岩体反作用力 P_2 和剪切反作用力 T_2 , 如图 2.2 所示。

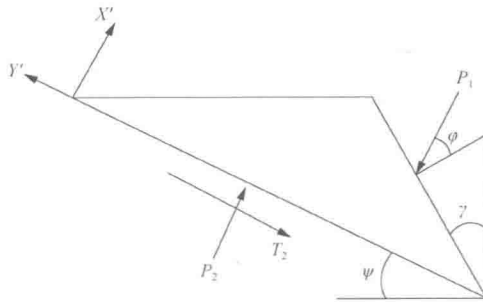


图 2.2 剪切体受力分析

$$P_2 = \int_{S_1} \sigma ds \quad (2.6)$$

$$T_2 = \int_{S_1} \tau ds \quad (2.7)$$

极限平衡状态下, 剪切面上力的平衡方程为

$$\begin{aligned} \sum X = 0 & \quad P_1 \sin(\pi/2 - \gamma - \psi - \phi) - T_2 = 0 \\ \sum Y = 0 & \quad P_2 - P_1 \cos(\pi/2 - \gamma - \psi - \phi) = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

将 $T_2 = cs_1 + P_2 \tan \phi$ 代入式 (2.8) 可得

$$P_1 = \frac{cs_1 \cos \phi}{\cos(\gamma + \phi + \psi)} \quad (2.9)$$

由于 $s_1 = bh / \cos \psi$ ，所以

$$P_1 = \frac{cbh \cos \phi}{\cos(\gamma + \phi + \psi) \cos \psi} \quad (2.10)$$

式中， h 为切割深度； b 为切削刀刃宽； c 为内聚力； ϕ 为内摩擦角。

将式(2.10)代入式(2.8)中可得

$$T_2 = \frac{cbh \cos \phi \cos(\gamma + \phi + \psi)}{\cos(\gamma + \phi + \psi) \cos \psi} \quad (2.11)$$

式(2.11)为尖齿钻头破碎岩土体切屑力的计算公式，式中 b 、 γ 是与钻头形状有关的参数， c 、 ψ 、 ϕ 是与岩石性质有关的参数。

2.1.2 尖齿钻头破土力学分析

切削刀具除受到来自钻杆提供的推进力 F_n' 与切屑力 F_m 外，还受到岩土体对它的抗切削阻力 $F_1^{[67]}$ ，抗切削阻力 F_1 与剪切体所受刀具对岩石的作用力 P_1 相对应，在刀下磨损面上也分布有抗切入阻力 F_2 和摩擦阻力 F_3 ，见图 2.3。

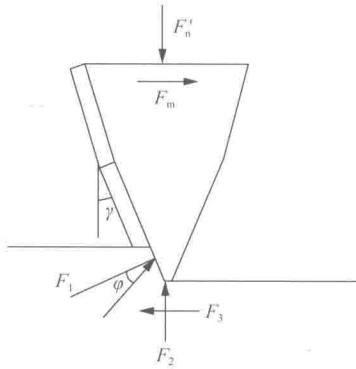


图 2.3 钻头尖齿受力分析

则

$$F_1 = P_1 = \frac{cbh \cos \phi}{\cos(\gamma + \phi + \psi) \cos \psi} \quad (2.12)$$

F_2 为刀刃对煤岩正压力，其大小与摩擦面上的应力分布状态有关

$$F_2 = b\sigma_m \left[\frac{0.6}{\cos \gamma} + \frac{1}{3} \left(l_f - \frac{0.6}{\cos \gamma} \right) \right] \quad (2.13)$$

式中， σ_m 为应力最大值， $\sigma_m = k\sigma_s$ ； k 为取决于钻头尖齿的几何形状和界面的摩擦力； σ_s 为煤岩抗压强度； l_f 为切削刃上的摩擦长度。

刀刃与岩土体的摩擦系数为 μ_1 ，则 $F_3 = \mu_1 F_2$ 。则钻头受力平衡方程为

$$\begin{aligned} F'_n &= F_1 \sin(\gamma + \varphi) + F_2 \\ F'_m &= F_1 \cos(\gamma + \varphi) + \mu_1 F_2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

钻头旋转破土时^[68~70]，钻头受孔壁土体的围岩压力作用，在钻头侧表面分布正压力 p_0 和摩擦力矩 M_1 ，可近似将压力看成均布荷载 p_0 ，孔壁岩土体与钻头表面的摩擦系数为 μ_2 ，如图 2.4 所示，则有

$$M_1 = \mu_2 \int_s p_0 R ds = \mu_2 p_0 R s \quad (2.15)$$

式中， R 为钻头半径； s 为钻头一个尖齿侧面与孔壁接触面积。

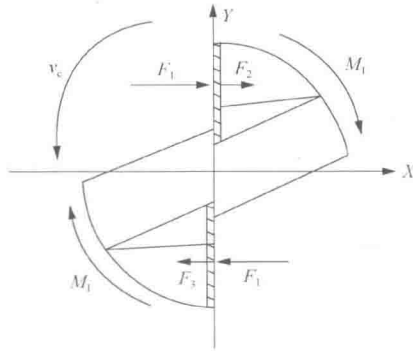


图 2.4 钻头受力分析

钻杆作用于钻头上的力可以分解为推进力 F_n 与施加于钻头上的扭矩 F_m ，如图 2.4 所示，由于钻头共有三个切屑尖齿片，故钻头受力平衡方程为

$$\begin{aligned} F_n &= 3F_1 \sin(\gamma + \varphi) + 3F_2 \\ F_m &= 3F_1 \cos(\gamma + \varphi)R' + 3\mu_1 F_2 R' + 3M_1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

式中， R' 为钻头刀具等效半径，即钻头所受等效集中力至钻头中轴线距离。

将式 (2.11)、式 (2.12)、式 (2.13) 代入式 (2.15) 中得

$$\begin{aligned} F_n &= 2 \frac{cbh \cos \varphi}{\cos(\gamma + \varphi + \phi + \psi) \cos \psi} \sin(\gamma + \varphi) + 2B\sigma_m \left[\frac{0.6}{\cos \gamma} + \frac{1}{3} \left(l_f - \frac{0.6}{\cos \gamma} \right) \right] \\ M_n &= 2 \frac{cbh \cos \varphi}{\cos(\gamma + \varphi + \phi + \psi) \cos \psi} \cos(\gamma + \varphi)R' \\ &\quad + 2\mu_1 b\sigma_m \left[\frac{0.6}{\cos \gamma} + \frac{1}{3} \left(l_f - \frac{0.6}{\cos \gamma} \right) \right] R' + 2\mu_2 p_0 R s \end{aligned} \quad (2.17)$$