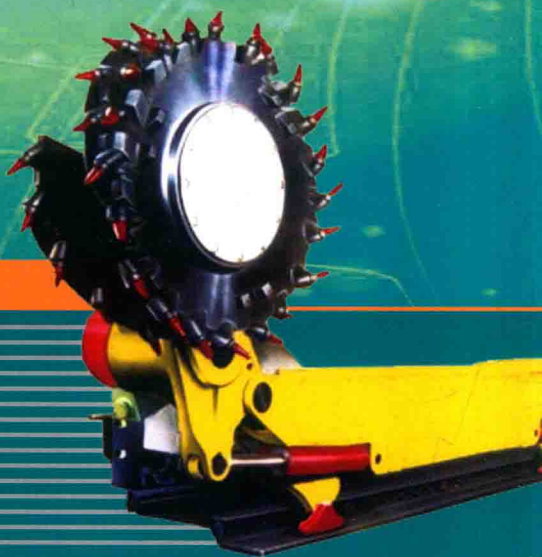


“十二五”国家重点图书出版规划项目

截齿截割煤岩的力学 模型与性能评价

JIECHI JIEGE MEIYAN DE LIXUE MOXING
YU XINGNENG PINGJIA

刘春生 李德根 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

截齿截割煤岩的力学 模型与性能评价

刘春生 李德根 著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

截齿截割煤岩的力学模型与性能评价是提高采煤机性能的应用基础理论研究,是研发高可靠性采煤机的技术保障,同时也是实现井下无人工作面的基础。本书采用理论、数值模拟和实验的研究方法,系统研究了截齿截割煤岩的力学特性。以截齿实验载荷谱为研究对象,围绕截齿的实验理论力学模型、截割能耗、载荷谱辨识与重构和煤岩块度等方面,运用正则化、分形、混沌和熵等理论揭示截齿与煤岩的作用关系,本书分9章进行阐述。

本书内容丰富,反映作者在采煤机煤岩破碎领域的代表性成果。本书可作为采矿工程、煤岩破碎基础理论研究、采掘机械开发等相关领域与专业的高年级本科生、研究生、教师和有关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

截齿截割煤岩的力学模型与性能评价/刘春生,李德根著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.6

ISBN 978-7-5603-6336-3

I. ①截… II. ①刘… ②李… III. ①煤岩-力学模型-性能-评价 IV. ①TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 307959 号

策划编辑 张 荣

责任编辑 李长波

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 360 千字

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6336-3

定 价 48.00 元



(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

滚筒式采煤机是集约化矿井中最为关键的大型设备之一,是安全、高效机械化采煤的核心设备。随着科技进步和能源节约的要求,实现井下工作面集约化、信息化、智能化开采是必然趋势,也是减少工作面人员数量,最终实现工作面自动化、无人化的前提。因此,高可靠性、高性能的机械装备是实现目标的重要基础保证。滚筒是采煤机的关键部件,决定采煤机的生产能力、块煤率与粉尘量等,“十二五”期间研制开发高可靠、高性能、高寿命、高端采煤机械装备是煤炭工业领域重点之一。

本书主要介绍作者关于滚筒采煤机镐形截齿截割煤岩的力学特性及性能评价的理论、实验及模拟的研究成果。为了能够实现模拟煤矿井下采煤机真实的旋转截割煤岩工况,以截割煤岩机理为依据,自主研发了多截齿截割参数可调的煤岩截割实验台,突破了以往搭建的平面截割实验台,真正实现了在实验室模拟井下采煤机实际截割煤岩的状态。以往的平面截割实验台所测试得到的截割三向载荷不能真实地反映采煤机在井下截割煤岩的状态,截割厚度恒定不变,而真实的截齿截割煤岩状态为截割厚度在随时间的变化而变化。为探求截齿截割煤岩载荷谱的真实状态,以实验测试的截割载荷谱为研究依据,采用正则化方法,对截割载荷谱及其特征进行了重构,实现载荷谱重构及其特征的定量辨识。利用参数可调式多齿旋转截割实验台截割煤岩时发现,镐形截齿截割煤岩时存在碾挤压的现象;通过理论分析建立了截齿截割煤岩的三向载荷的模型,以及截齿三向载荷与滚筒三向载荷的转换关系,同时对镐形截齿的不同工况及工作状态进行了有限元分析;应用 FFT、分形、混沌和熵等理论,研究单截齿载荷谱与多截齿载荷谱在时域、频域内的拓扑关系。在此基础上,建立截割煤岩时的混沌动力学模型,探明截齿与滚筒的各项参数对煤岩破碎状态的影响规律,给出从截割载荷、截割能耗、煤岩块度与粉尘量和可靠性四个角度评价截割性能的方法。该研究作为高效截割设计的准则,可为生态化(绿色节能)设计与评价高效截割的采煤机滚筒提供理论与技术支持。

本书的研究工作获得了国家自然科学基金项目“采煤机滚筒高效截割的动力学性能与评价的研究”(51274091)和黑龙江省科技厅国际科技合作重点项目“硬煤截割工作机构的研制”(WB01104)的资助,在此表示感谢。

由于作者学识和研究水平有限,书中难免有疏漏及不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

第1章 概述

1.1 滚筒式采煤机概况	1
1.2 机械破碎煤岩方法	3
1.3 截割煤岩刀形截齿的力学模型	5
1.4 煤岩的强度准则	9
1.5 刀具的磨损	11

第2章 镐形截齿截割煤岩的力学模型

2.1 截齿截割煤岩的状态与空间角度	12
2.2 截齿截割阻力数学模型	17
2.3 截齿自旋力学模型	30
2.4 截齿三向载荷数学模型	39

第3章 镐形截齿截割煤岩的数值模拟

3.1 煤岩的本构模型	47
3.2 截齿平面截割的数值模拟	52
3.3 截齿旋转截割煤岩的数值模拟	58
3.4 多截齿顺序截割煤岩的数值模拟	66
3.5 双联截齿截割煤岩的数值模拟	68
3.6 热应力的数值模拟	73

第4章 镐形截齿截割煤岩的实验

4.1 煤岩的力学特性	79
4.2 平面截割实验	82
4.3 旋转截割实验	85

第5章 截割载荷谱的统计与频谱特征

5.1 三向载荷谱的统计特征	96
5.2 三向载荷谱的频谱特征	108
5.3 侧向载荷的时频谱特征	116
5.4 块煤率的统计特征	118

第6章 镐形截齿截割载荷谱识别与重构	
6.1 载荷谱的重构模型	120
6.2 小波-正则化的解算方法	126
6.3 载荷谱重构正则参数的选取与优化	129
6.4 滚筒载荷谱的时域与频域重构算法	134
第7章 滚筒与镐形截齿关联力学模型	
7.1 滚筒载荷的传统算法	143
7.2 截齿三向载荷峰值的拟合模型	149
7.3 截齿三向载荷理论模型的求解	153
7.4 截齿坐标三向载荷与滚筒坐标三向载荷的转换模型	156
7.5 滚筒实验-理论截割阻力模型	159
第8章 分形、混沌与熵的截割性能评价	
8.1 非闭合曲线的分形维数	165
8.2 截割阻力谱的分形特征	167
8.3 截割阻力谱分形当量能耗	169
8.4 不同安装角与切削厚度的分形特征	171
8.5 截割粉煤量与块度的分形特征	172
8.6 截割阻力谱的混沌特征	175
8.7 截割煤岩的混沌模型	178
8.8 截割载荷谱的熵模型	183
8.9 理论截割比能耗模型	190
8.10 实验截割比能耗模型	192
第9章 滚筒式采煤机整机力学模型与解算方法	
9.1 正常工况下采煤机的整机力学模型	198
9.2 基于伪满秩解算整机力学模型的方法	203
9.3 基于最小二乘和广义逆矩阵解算整机力学模型的方法	211
9.4 基于改进双逐次投影法解算整机力学模型的方法	216
9.5 基于预条件拟极小剩余算法解算整机力学模型的方法	218
9.6 特殊工况下的整机受力模型	223
参考文献	230

螺旋滚筒式采煤机是煤炭开采中使用最为广泛的采煤设备,镐形截齿是工作机构重要的组成部分,其截割力学特性影响采煤机的整机性能。镐形截齿破碎煤岩是机械破碎煤岩的一种方式,本书中综述机械破碎煤岩的方法和截割力学模型可为研究镐形截齿的力学特性提供借鉴。

1.1 滚筒式采煤机概况

采煤机是煤炭开采的主要设备之一,其性能参数随着科技的发展不断提升,总装机功率从 100 kW 左右发展到目前的 3 000 kW,牵引力超过 1 500 kN,采高范围高达 7 m。目前,学者与大型煤炭企业均在研究采煤机一次采全高为 8.5 m 的可行性和装备及其开采工艺。采煤机整体由煤壁侧的两组支承组件和操作侧的两只导向滑靴分别支承在工作面输送机上,行走箱中的行走轮与输送机齿轨箱啮合,当行走轮转动时,采煤机便在工作面输送机上牵引行走,同时截割电机通过截割机械传动带动滚筒旋转,完成落煤及装煤作业,其结构如图1.1所示。

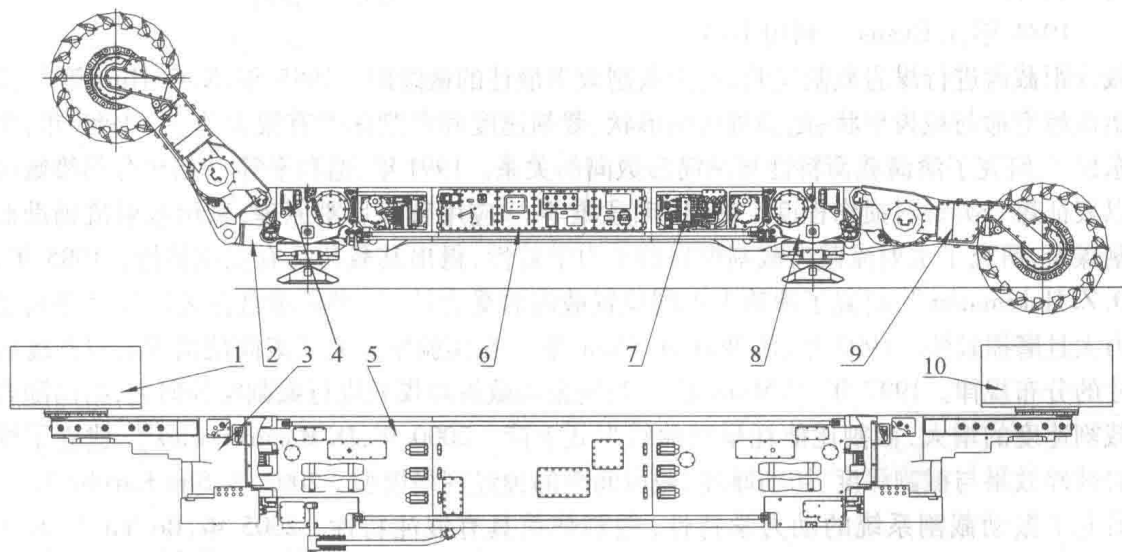


图 1.1 采煤机结构

- 1—左旋滚筒;2—调高油缸;3—左截割部;4—左行走箱;5—左牵引部;
6—电控部;7—右牵引部;8—右行走箱;9—右截割部;10—右旋滚筒

1932年,苏联成功研发出世界首台采煤机。20世纪40年代初,英国和苏联先后研制出链式采煤机,其通过截链上的截齿截割煤岩,但是其采煤效率不高。20世纪50年代初,以螺旋滚筒为工作机构的采煤机在英国和德国陆续出现,这种可以将破煤和装煤融为一体的采煤机为煤炭的机械化开采奠定了重要基础。1975年,我国成功制造出MLS₃-170型双滚筒采煤机。1986年,最具代表性的MG系列无链牵引采煤机由我国自主研制成功。1992年,我国设计出首台MG344-PWD型交流电气调速采煤机,标志着我国采煤机电气时代的开始。21世纪以来,随着技术水平的快速提升,研发的机型基本可以满足我国的生产需求。总体来看,我国采煤机经过近50年的发展,到目前已取得了很大进步,拥有了众多具有自主知识产权的换代产品,总装机功率、截割功率和牵引力也越来越大,从薄煤层到厚煤层已经形成了完整的采煤机系列。

滚筒是采煤机的重要组成部分,在破煤、落煤和输煤的过程中起着重要的作用,滚筒的受力、工作寿命和可靠性是滚筒式采煤机正常工作的重要指标,如图1.2所示。镐形截齿是滚筒采煤机和掘进机使用最多的破煤刀具,采煤机的大部分功率消耗在截齿破煤上,截齿参数及其布置和空间姿态应保证低比能耗、高的强度和耐磨性等。

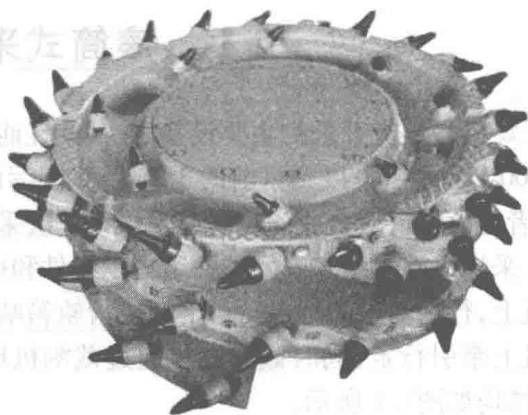


图1.2 滚筒

1984年,I. Evans^[1]利用不同截线距截齿进行煤岩截割实验,得出截割效果最佳的截线距。1985年,K. G. Hurt等^[2]指出截齿寿命与截齿形状、截割机构的形状、截割速度和截割深度有很大关系。1988年,牛东民^[3]研究了滚筒载荷特性与滚筒参数间的关系。1991年,谢和平等^[4]指出分形维数可以表征煤岩类材料损伤程度。1993年,段雄等^[5]应用直线切割原理,采用水射流辅助截割煤岩,研究了水射流截齿截割煤岩的动力学特性,得出其载荷具有混沌特性。1995年,O. Z. Hekimoglu^[6]研究了滚筒上不同位置截齿的受力情况,指出端盘截齿较叶片截齿受力大且磨损较快。1997年,H. Warren Shen等^[7]在实验室研究了滚筒截割煤岩时粒度尺寸的分布规律。1997年,T. Muro等^[8]利用振动截齿对煤岩进行截割实验研究,指出随着截割速度的增大,截割比能耗呈双曲线形式下降。2000年,D. Mazurkiewicz^[9]建立了煤岩破碎效果与截割深度、切削厚度、截齿间距的神经网络模型。2002年,Shu Karube等^[10]研究了振动截割系统的动力学特性,截割载荷具有混沌特性。2005年,Bo Yu^[11]利用LS-DYNA仿真截齿破碎煤过程,指出截齿几何形状、齿尖尺寸、截割速度对滚筒的冲击力、截割力均有影响。2005年,John P. Loui等^[12]就截齿截割煤岩时其温度的变化进行了有限元分析,指出截齿与煤岩接触界面的温度随截齿截割速度的增大呈线性提高。2006年,B. Tiryaki等^[13]获得截割比能耗与煤岩的抗压强度呈线性关系。2007年,N. Bilgin等^[14]利用镐形截齿对不同特性的煤岩进行了截割实验,指出煤岩的轴向抗压强度对截割

机构的性能影响最大。2009年,赵丽娟等^[15]通过薄煤层采煤机工作机构对含硫化铁结核煤层的截割工况进行分析,建立了采煤机滚筒的受力模型。2010年,Bernardino Chiaia^[16]研究了截齿截割脆性材料的力学特性,指出增大截齿尺寸可提高截割效率。2010年,Brijes Mishra^[17]利用有限元法研究了截齿的不同参数对截割效果的影响,建立了截齿截割煤岩时产生的热量与截割参数间的关系。2011年,Okan Su^[18]利用离散元法对镐型截齿的截煤过程进行了仿真模拟,获得截齿的载荷特性。2013~2014年,江红祥等^[19-22]对滚筒截割不同性质的煤岩扭矩载荷进行测试,得出滚筒截割载荷具有混沌特性。2015年,刘春生等应用分形理论分析旋转截割实验台所测得的截割阻力谱,探究截割阻力谱的分形特征与安装角及切削厚度的关系。

1.2 机械破碎煤岩方法

机械破碎煤岩的方法仍是煤岩破碎的主要手段,目前常用的机械破碎方法有:刀具静力压入破岩、切削破碎煤岩、滚碾压破碎煤岩、冲击破碎煤岩和水射流辅助机械刀具破碎煤岩等^[23]。国内外研究各种高效破碎煤岩和硬岩的原理与方法,就机械破碎而言冲击复合式机械破碎和高压水射流辅助机械破碎方法值得关注和深入研究。

1.2.1 刀具静力压入破岩

刀具在静力作用下侵入煤岩中,对刀具周围的煤岩产生力使煤岩体崩落,其破碎过程是机械破碎煤岩的一个基本过程,其破岩原理如图1.3所示。

1.2.2 切削破碎煤岩

在煤层开采、半煤岩和软岩的掘进中,切削破碎占有重要的地位,切削破碎时截齿或刨刀切削煤岩,靠刃角从岩体的外层上分离下煤岩的一种机械破碎方法,其原理如图1.4所示,切削破碎煤岩的常用刀具具有镐形齿、刀形齿和多齿铣刀。

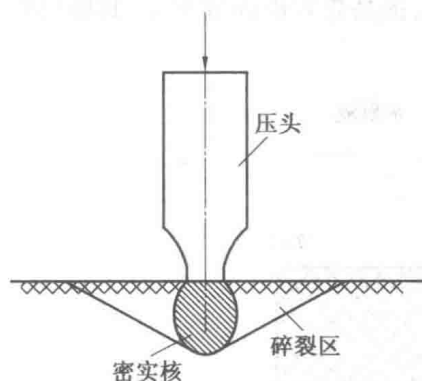


图 1.3 刀具静力压入破岩

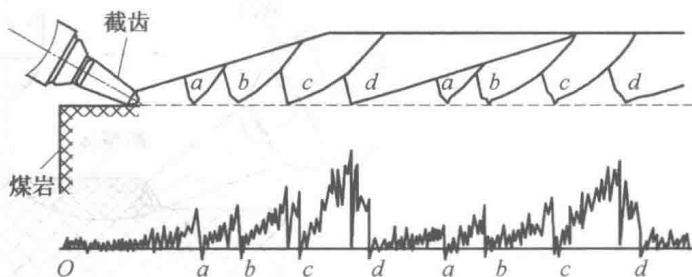


图 1.4 镐形截齿破碎煤岩

1.2.3 滚碾压破碎煤岩

滚碾压破碎煤岩是利用刀具滚动产生挤压碎和剪切碾碎的作用进行破碎煤岩。滚碾压破碎煤岩是既有挤压破碎,又有剪切碾碎作用的复合运动,其破碎原理如图1.5所示,滚碾压破碎煤岩的常用刀具有牙轮和盘刀,其他形式可看成这两种刀具的组合和发展。

1.2.4 冲击破碎煤岩

冲击是煤岩破碎的重要方法,煤岩体的冲击破碎过程是煤体变形破坏的过程,是其内部损伤萌生、扩展和汇合过程,是其内部大量裂纹的成核、扩展延伸至最终贯穿而导致煤岩破坏的过程。冲击破碎煤岩是利用不同形状的刃齿以不同的冲击功凿入煤岩,其原理如图1.6所示。

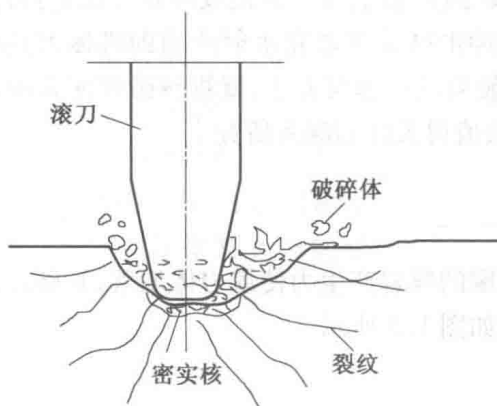


图 1.5 滚碾压破碎煤岩

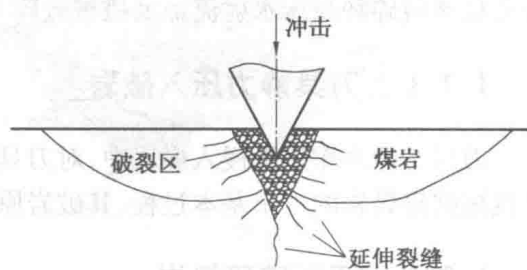


图 1.6 冲击破碎煤岩

1.2.5 水射流辅助机械刀具破碎煤岩

在机械刀具破碎煤岩过程中利用高压水的冲击、动压或水楔作用等来辅助机械刀具破碎煤岩,以提高机械刀具破岩能力,延长刀具使用寿命,提高煤岩破碎效率等,其破碎原理如图1.7所示。

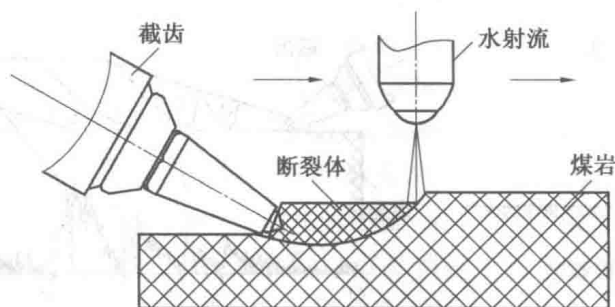


图 1.7 水射流辅助机械刀具破碎煤岩

1.3 截割煤岩刀形截齿的力学模型

镐形截齿是滚筒式采煤机的关键零部件,其力学模型可以揭示刀具与煤岩的作用关系,其力学模型的研究为合理地选择刀具形状和截割参数,以及提高截割效率和降低比能耗等均具有重要的意义。

1.3.1 A. И. Велон 的力学模型

A. И. Велон 等^[24] 提出“密实核”学说,建立了切入截割状态下刀形截齿的力学模型,即

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= Z_n + \mu Y_1 + (X_{n1} + X_{n2})\mu / \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \\ Y_0 &= Y_1 \pm Y_2 + (X_{n1} + X_{n2})\mu / \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \\ X_0 &= X_{n1} \pm X_{n2} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式中 Z_0 ——煤岩给截齿的截割阻力, N;
 Y_0 ——煤岩给截齿的推进阻力, N;
 X_0 ——煤岩给截齿的侧向阻力, N;
 φ ——截齿尖角, ($^\circ$)。

式(1.1)第三式中钝齿截割时为“+”,锐齿截割时为“-”。如图 1.8 所示,作用于截齿前刃面上的法向力 N , 抗摩擦力 μN ; 合力 R_n 可分解为截割阻力 Z_n 和推进阻力 Y_2 ; Y_1 为竖直方向截齿的推进阻力, μY_1 为竖直方向的抗摩擦阻力; X_n 为侧向力, N_x 为截齿侧面的法向力。

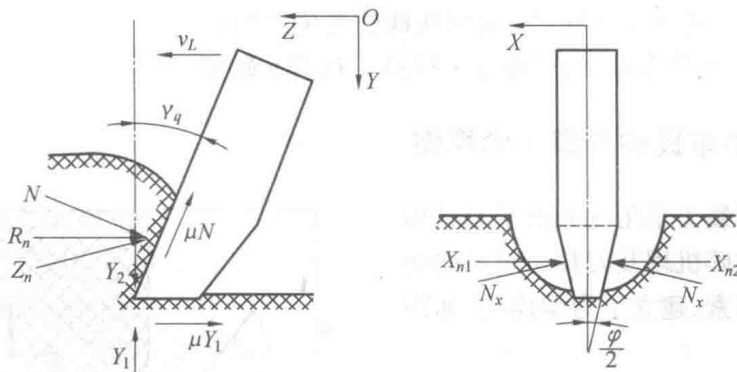


图 1.8 A. И. Велон 的力学模型

1.3.2 I. Evans 的力学模型

I. Evans^[25] 根据最大拉应力理论,建立了镐形截齿直线切削煤岩的模型,如图 1.9 所

示, T 为破裂线上拉应力的合力; R 为截齿对煤岩的压力; Q 为破裂点的支反力。

$$F_z = \frac{16\pi}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_y} \right) \sigma_t h^2 \quad (1.2)$$

式中 F_z ——刀具的切削阻力, N;
 σ_t ——煤岩的抗拉强度, MPa;
 σ_y ——煤岩的抗压强度, MPa;
 h ——切削厚度, mm;
 α ——截齿齿尖半锥角, ($^\circ$)。

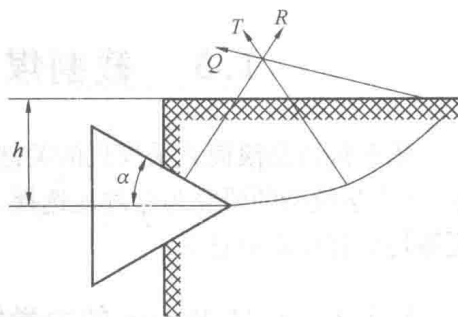


图 1.9 I. Evans 的力学模型

1.3.3 Nishimatsu 切削力模型

Nishimatsu^[26] 根据库仑 - 莫尔准则建立了截割力学模型, 如图 1.10 所示。其中, τ_s 为 AB 线上单位长度所受合力的切向力分量, MPa; σ_n 为 AB 线上单位长度所受应力的法向力分量, MPa; p 为 τ_s 与 σ_n 的合力, MPa。

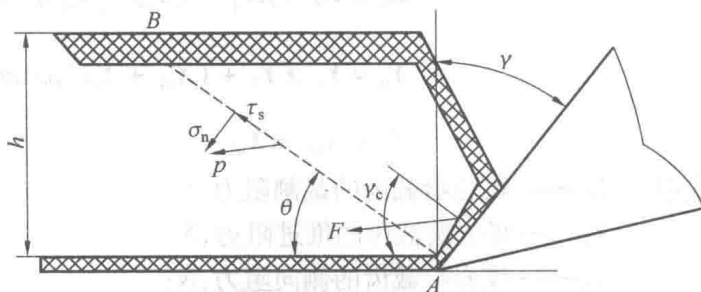


图 1.10 Nishimatsu 的切削力模型

$$F_z = \frac{2}{n+1} \cdot \frac{\tau_k h \cos \varphi_T}{1 - \sin(\varphi_T - \gamma_c + \varphi)} \quad (1.3)$$

式中 τ_k ——煤岩的抗剪强度, MPa;
 φ_T ——煤岩的内摩擦角, ($^\circ$);
 γ ——刀头前角, ($^\circ$);
 γ_c ——切削力方向与刀头前面法线的夹角, ($^\circ$);
 n ——应力分布系数, 可按 $n = 11.3 - 0.18\gamma$ 确定。

1.3.4 牛东民的断裂力学模型

牛东民从断裂力学角度分析了刀具切削作用下煤的破碎机理及刀具切削力的变化规律和影响因素, 建立了力学模型, 如图 1.11 所示。

$$F_c = \frac{2 \cos \gamma_d}{1 + \sin \gamma_d} A \cdot h^{\frac{1}{2}} b \quad (1.4)$$

式中 F_c ——截齿平均切削阻力, N;
 A ——煤体的截割阻抗, N/mm;
 γ_d ——刀头前角, ($^\circ$);

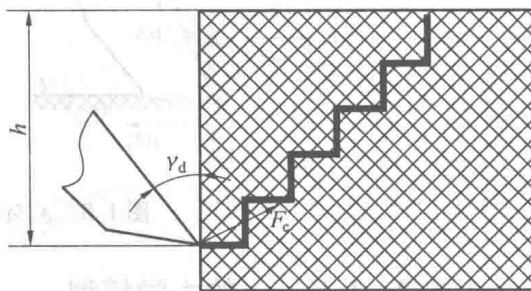


图 1.11 牛东民的断裂力学模型

b ——煤岩宽度, mm。

1.3.5 雷玉勇的力学模型

雷玉勇^[27]根据刀形截齿破煤的宏观现象,采用煤岩受拉破坏理论建立了刀形截齿沿直线截割的力学模型,如图 1.12 所示,外边界由以 B' 为圆心、 a 为半径的圆弧 BO 和直线 OA 构成;应力 R 遵守破坏准则,引起破碎,应力 R 的延长线过圆心 B' 点;破碎煤岩拉力的合力 T 过圆心 O' 点,平分圆弧角; b 为截齿宽度,在自由截割状态下,将模型考虑为平面问题处理。基于最小能量原理和平面力系力矩平衡,建立刀型截齿直线截割的截割阻力,即

$$F_w = K_1 \frac{q_y \lambda h \sin(\delta + \varphi_f)}{\cos \varphi_f \sin \delta} \quad (1.5)$$

式中 F_w ——单位刃宽的截割阻力, N;

δ ——截角, ($^\circ$);

λ ——密实核曲率半径 a 与截齿宽度 b 的比值;

K_1 ——与截齿宽度 b 和截割状态有关的实验系数;

φ_f ——煤岩对刀具的摩擦角, ($^\circ$);

q_y ——密实核施加给煤岩的流体静压力,大小等于煤岩的单轴抗压强度, MPa。

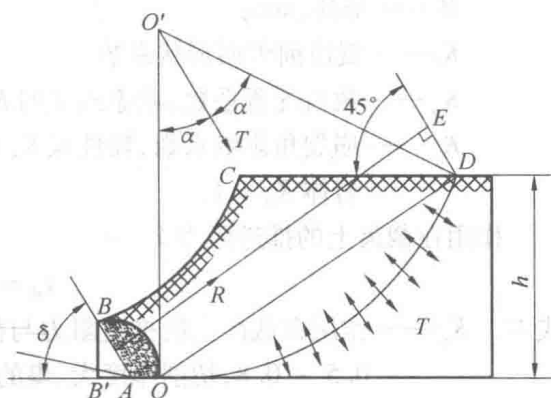


图 1.12 雷玉勇的力学模型

1.3.6 镐形截齿的截割阻力模型

根据“密实核”理论,考虑截齿的矿山压力、几何形状、煤的物理机械性质等影响因素,建立了经典截割阻力的计算公式,作用在截齿上的截割阻力为

$$Z_0 = K_y A \cdot \frac{0.3 + 0.35b_j}{(b_j + h \tan \varphi_b) K_\varphi} \cdot h \chi K_m K_\alpha K_f K_p \cdot \frac{1}{\cos \beta_m}$$

$$K_y = K_{y0} + \frac{J - 0.1H}{J + H}$$

式中 K_y ——煤的压张系数;

φ_b ——截割崩落角, ($^\circ$);

K_{y0} ——煤壁表层压张系数, $K_{y0} = 0.2 \sim 0.5$, 脆性煤取最小值, 韧性煤取最大值;

K_m ——煤体裸露系数, 当 $h \leq 10$ mm 时, $K_m = 0.32 + \left(\frac{0.2}{0.1h}\right)$, 当 $h > 10$ mm 时,

$$K_m = 0.25 + \left(\frac{0.66}{0.1h + 1.3}\right);$$

K_α ——截角影响系数;

b_j ——截齿计算宽度, mm;

β_m ——名义安装角, ($^{\circ}$);

χ ——截线距, mm;

J ——滚筒截深, mm;

H ——采高, mm;

K_f ——截齿前刃面形状系数;

K_p ——截齿配置系数, 顺序式排列 $K_p = 1$, 棋盘式排列 $K_p = 1.25$;

K_{φ} ——崩裂角影响系数, 韧性煤 $K_{\varphi} = 0.85$, 脆性煤 $K_{\varphi} = 1.15$, 介于两者之间的煤岩体 $K_{\varphi} = 1$ 。

作用在截齿上的推进阻力 Y_0 为

$$Y_0 = K_q Z_0$$

式中 K_q ——作用在截齿上的推进阻力与截割阻力的比值, 对于采煤机来说, 一般 $K_q = 0.5 \sim 0.8$, 切削厚度大、煤的脆性程度高时 K_q 值取较小值。

当截齿顺序式排列时侧向力 X_0 为

$$X_0 = Z_0 \cdot \left(\frac{1}{0.1h + 0.3} + 0.15 \right) \cdot \frac{h}{\chi}$$

当截齿以棋盘式排列时侧向力 X_0 为

$$X_0 = Z_0 \cdot \left(\frac{1}{0.1h + 2.2} + 0.1 \right) \cdot \frac{h}{\chi}$$

当截齿磨钝时, 截割阻力和推进阻力分别为

$$Z = Z_0 + 100f'K'_y\sigma_y S_d$$

$$Y = Y_0 + 100K'_y\sigma_y S_d$$

式中 f' ——截齿截割阻力运动的阻力系数, $f' = 0.38 \sim 0.42$ (切削厚度较大时取较大值);

S_d ——截齿磨损面积, 按截齿磨损面积在截割平面的投影面积计算, 镐形截齿取 $S_d = 15 \sim 20 \text{ mm}^2$;

K'_y ——平均接触应力对单轴抗压强度的比值, $K'_y = 0.8 \sim 1.5$ 。

1.3.7 截齿阻力谱统计模型

截齿与被破碎的煤相互作用过程中, 截齿上作用的载荷是空间位移的随机函数, 而这种随机性首先取决于煤质在空间的变化和切削过程的结构特点。B. B. 顿指出截齿上的载荷是切削路径的平稳随机函数。

截齿上的切削力和进刀力等瞬时值服从 Γ 分布, 分布密度为

$$f(F) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} F^{\eta-1} \exp[-\lambda F]$$

式中 λ, η ——分别为比例参数和分布形式参数 ($\lambda = \bar{F}/\sigma^2, \eta = \lambda \bar{F}$);

σ ——标准差;

$\bar{F}$ ——载荷的数学期望;

$\Gamma(\eta)$ —— Γ 函数。

侧向载荷差瞬时值的分布服从于正态分布规律。

切削力和进刀力等标准差 σ 是载荷数学期望 $\bar{P}$ 的线性函数,即

$$\sigma^2 = (u + v\bar{P})^2$$

式中 $u、v$ ——与破碎煤脆性程度有关的实验系数。

载荷的相关函数可以用指数分项与指数 - 余弦分项之和表示,即

$$K(\tau) = D_1 e^{-\alpha_1 \tau_c} + D_2 e^{-\alpha_2 \tau_c} \cos f\tau_c$$

式中 $D_1、D_2$ ——相应的标准差;

$\alpha_1、\alpha_2$ ——衰减参数;

τ_c ——载荷变量;

f ——多数频率。

1.4 煤岩的强度准则

煤岩的强度准则称为破坏判据,是指煤岩体发生破坏的瞬间,各方向应力以及代表煤岩体特性的参数之间的关系。强度准则的研究始于 18 世纪,学者们提出了各种各样适合于不同材料的强度准则^[28]。尽管各准则的表达式、理论基础及适用条件不同,但是其共同点均是用来描述岩体的极限应力状态。强度准则的分类如图 1.13 所示。

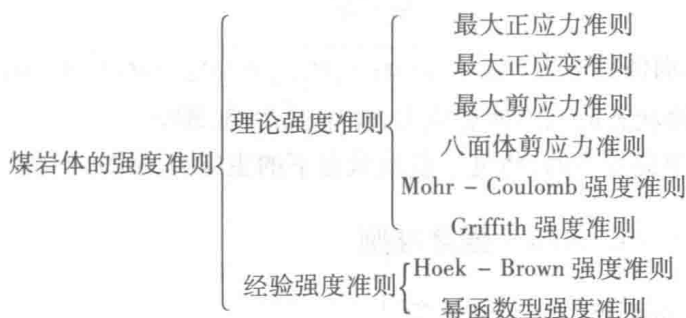


图 1.13 强度准则的分类

1.4.1 最大正应力准则

该理论假设材料的破坏只取决于最大的正应力,当煤岩材料的三个主应力中,只要其中一个达到单轴抗拉强度或单轴抗压强度时,煤岩就会发生破坏,根据这个理论,材料的破坏准则为

$$\sigma_1 \geq R_c, \quad \sigma_3 \leq R_t$$

式中 $R_c、R_t$ ——材料的单轴抗压强度和单轴抗拉强度,MPa。

1.4.2 最大正应变准则

该理论假设最大正应变决定材料是否破坏,当煤岩中任意一个方向受拉伸或压缩时,其应变值达到最大值时,材料就会发生破坏,因此,该理论的破坏准则为

$$\varepsilon_{\max} \geq \varepsilon_u$$

式中 $\varepsilon_{\max}$ —— 最大应变值;

ε_u —— 单向压缩或拉伸时的应变值。

1.4.3 最大剪应力准则

该理论假设材料的最大剪应力决定它的变形破坏,因此,当材料在受到拉伸或压缩时,所受的最大剪应力达到危险值时,材料就会达到一种临近破坏状态,该理论的破坏准则为

$$\tau_{\max} \geq \tau_u$$

式中 $\tau_{\max}$ —— 材料的最大剪应力,MPa;

τ_u —— 单向拉伸或压缩时,最大剪应力的危险值,MPa。

1.4.4 八面体剪应力准则

该理论假设岩体类是否处在危险的状态取决于八面体剪应力,因此,该破坏准则为

$$\tau_{\text{oct}} \geq \tau_3$$

式中 τ_{oct} —— 八面体剪应力, $\tau_{\text{oct}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 3$, MPa;

τ_3 —— 危险状态的八面体剪应力, $\tau_3 = \sqrt{2} R_z / 3$, MPa;

R_z —— 在单向受力时,将处于危险状态下的主应力,MPa。

1.4.5 Mohr - Coulomb 强度准则

Mohr - Coulomb 强度准则可表示为

$$\tau = \sigma \tan \varphi_T + c$$

在处于极限应力状态时,剪切面上的正应力 σ 和剪应力 τ 可以用最大、最小主应力 σ_1, σ_3 表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\kappa \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\kappa \end{aligned} \right\}$$

式中 κ —— 裂隙方位角, $\kappa = 45^\circ + \varphi_T / 2$, ($^\circ$)。

1.4.6 Griffith 强度准则

煤岩的内部存在大量的微裂纹,根据 Griffith 的概念,假设这些类似椭圆的细微裂纹

都是张开的条条裂缝,局部的拉伸强度小于拉应力,就开始发生破裂。

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ 时,

$$\left. \begin{aligned} &(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8R_1(\sigma_1 + \sigma_3) > 0 \\ &\kappa = \frac{1}{2} \arccos \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \end{aligned} \right\}$$

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ 时,

$$\left. \begin{aligned} &\sigma_3 = -R_1 \\ &\kappa = 0 \end{aligned} \right\}$$

1.4.7 Hoek – Brown 强度准则

Hoek – Brown 强度准则是由 E. Hoek 和 E. T. Brown 于 1980 年提出的,其可反映煤岩破坏时极限主应力间的非线性经验关系,其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m_i + \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1}$$

式中 σ_c ——煤岩单轴抗压强度,MPa;
 m_i ——煤岩量纲的经验参数,反映煤岩的软硬程度,取值范围为 0.001 ~ 25.000。

1.5 刀具的磨损

刀具的磨损是指刀具和煤岩之间发生机械作用时,刀具表层产生的破坏过程,磨损机理主要有滑动、滚动、振动、冲击和侵蚀磨损,如图 1.14 所示。众多磨损形式中,可能单独发生,也可能是几种磨损同时起作用^[29]。



图 1.14 刀具与煤岩不同相对运动的磨损形式

采用机械方法破碎煤岩,刀具与煤岩的磨损和消耗是机械破碎煤岩的关键问题。当采用机械方法破碎煤岩时,刀具受到煤岩的反作用而磨蚀。刀具的磨蚀,增加了其损耗,降低了破碎煤岩的效率,其成为进一步发展机械破碎煤岩技术的主要障碍之一。刀具在破碎煤岩时其工作表面被磨损是一个复杂的过程,如有磨粒磨损、温度的影响、金属相变及化学侵蚀等。