



采煤机滚筒设计理论 及性能研究

◎ 刘送永 杜长龙 高魁东 著



科学出版社

采煤机滚筒设计理论 及性能研究

刘送永 杜长龙 高魁东 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

采煤机滚筒是煤炭开采主要的关键部件,其截割性能和装载性能的优劣直接影响了煤炭开采效率和采煤机的可靠性。全书共分6章,系统地介绍了滚筒破煤理论、滚筒参数设计、滚筒截割性能研究、滚筒装煤性能研究、异形滚筒性能研究和滚筒动力学特性研究。书中内容力求浅显易懂,包含了大量的仿真和试验结果分析,深入浅出,易于理解。

本书体系完整、层次清楚、内容丰富,适合从事矿山工程研究的科技人员、高等院校相关专业的研究生和本科生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

采煤机滚筒设计理论及性能研究/刘送永,杜长龙,高魁东著. —北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-060207-7

I. ①采… II. ①刘… ②杜… ③高… III. ①滚筒式-采煤机-研究
IV. ①TD421.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第292271号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳/责任校对:杨聪敏

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:350 000

定价:139.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

作为煤炭生产与消费大国，我国的能源消费和能源安全中煤炭占有重要的地位。根据国家能源战略行动计划和相关研究，到 2020 年、2030 年、2050 年，煤炭在我国一次性能源结构中的比重将保持在 62%、55% 和 50% 左右，煤炭消费总量将达到 45 亿~48 亿 t，煤炭作为主体能源的地位不会改变。然而，随着煤炭的逐年开采，开采工作面日益复杂，为了延长矿井服务年限以及提高资源回收率，对难开采煤层（薄、极薄煤层，夹矸煤层，小断层煤层）的开采日显重要。滚筒采煤机是目前煤炭开采的主要设备，其性能直接影响煤矿的生产效率和开采成本，如何提高滚筒采煤机在复杂煤层环境下的适应性和机械化程度已成为亟待解决的关键技术问题。

滚筒是采煤机的关键部件，承担着截煤、输煤及喷雾灭尘等任务，消耗的功率占整个采煤机装机功率的 80%~90%，并且采煤机的生产能力、比能耗、工作时的负载状况、截齿的受力情况、块煤率、粉尘量、工作平稳性、可靠性、装煤效果等各项性能指标都与滚筒有着密切的关系。因此，滚筒截割性能的优劣直接影响着整台采煤机的生产效率和可靠性。目前对于采煤机滚筒，仍然有以下几个方面需要进一步研究，以提高复杂煤层环境下的适应性和机械化程度：

(1) 采煤机截割工况复杂，不同截割工况、不同型号采煤机滚筒最佳匹配参数往往不同，每次参数改变均需重新建模、优化，导致产品设计周期长、经济性差，对滚筒进行参数化设计以适应不同工作对象有待研究。

(2) 对含有螺旋叶片形式滚筒及异形滚筒的研究不够具体和深入，且对含有不同煤岩界面煤层时滚筒截割载荷的变化有待进行系统性分析，以掌握不同形式滚筒在不同工作面特性下的截割性能。

(3) 对于滚筒装煤性能的研究，研究手段主要以理论推导和软件仿真为主，理论推导的方法需要较强的理论基础且推导出的结果往往与实际情况相差较大，软件仿真忽略了一些因素的影响，不能完全模拟滚筒的装煤工况，因此需要结合试验研究方法，对滚筒装煤性能及机理进行研究。

(4) 滚筒截割复杂煤岩时的突变特征及其载荷变化存在典型的非线性动力学特性，具有分形、混沌特征，研究滚筒截割系统载荷不确定性内在本质规律，揭示滚筒截割煤岩系统的动力学特性有待深入探讨。

针对上述问题，作者在国家 863 计划课题“薄煤层开采关键技术与装备”（项目编号：2012AA062100）和国家自然科学基金青年科学基金项目“具有非连续冲击

和摩擦行为的多体截割系统动力学特性研究” (项目编号: 51005232) 等项目的资助下, 开展了采煤机滚筒设计理论及性能研究, 旨在提高不同煤层特性下滚筒的开采效率, 为井下机械化、无人化开采提供技术指导。

本书以《采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究》博士学位论文为基础, 扩展了采煤机滚筒装煤理论、异形滚筒性能的研究内容。全书共分 6 章, 重点介绍了滚筒破煤理论、滚筒参数设计、滚筒截割性能研究、滚筒装煤性能研究、异形滚筒性能研究和滚筒动力学特性研究。本书可供从事机械工程和采矿工程等领域的研究学者和工程技术人员参考。

本书的撰写参考了大量有关采掘机械方面的文献, 在书稿的准备过程中, 研究生姬会福、刘晓辉、纪云等承担了部分书稿的整理录入和校对工作, 在此一并表示感谢。

限于作者水平, 书中难免有疏漏和不妥之处, 敬请读者批评指正。

刘送永

2018 年 9 月 25 日

目 录

前言

第 1 章 滚筒破煤理论	1
1.1 煤岩特性	1
1.1.1 煤的结构特性	1
1.1.2 煤的物理机械性质	2
1.2 截齿破煤机理	5
1.2.1 截齿切削破煤过程	6
1.2.2 截齿截煤截割力模型的建立	7
1.3 滚筒截煤机理	14
1.3.1 滚筒截煤力学分析	14
1.3.2 滚筒运动学分析	17
1.4 滚筒装煤理论	20
1.4.1 滚筒装煤机理	20
1.4.2 滚筒装煤性能影响因素	29
1.4.3 滚筒装煤性能影响因素的限制条件	34
参考文献	42
第 2 章 滚筒参数设计	45
2.1 滚筒及截齿相关参数	45
2.1.1 滚筒直径	45
2.1.2 滚筒截深	47
2.1.3 截线距	48
2.1.4 截齿排列方式	50
2.1.5 截齿位置	57
2.1.6 螺旋叶片参数	60
2.1.7 截齿安装角和倾斜角	61
2.2 高块煤率滚筒参数优化设计	63
2.2.1 优化模型建立	63
2.2.2 优化模型求解方法	69
2.2.3 优化求解	70
2.3 高块煤率滚筒参数优化软件集成	77
2.3.1 软件集成方法	78

2.3.2	集成软件包组成	78
2.3.3	参数优化模拟	81
2.4	优化模型验证	82
	参考文献	85
第 3 章	滚筒截割性能研究	87
3.1	煤岩截割试验台设计	87
3.1.1	主传动	88
3.1.2	辅助传动	89
3.1.3	模拟截割材料的配制	90
3.1.4	试验滚筒的研制	96
3.1.5	煤岩截割试验台	99
3.2	煤层特性对滚筒截割性能的影响	99
3.2.1	纯煤截割	100
3.2.2	顶底板	104
3.2.3	夹矸煤层	105
3.2.4	小断层煤层	107
3.3	截齿结构参数对滚筒截割性能的影响	109
3.3.1	合金头直径	109
3.3.2	齿尖夹角	112
3.3.3	齿身锥角	115
3.4	截齿安装参数对滚筒截割性能的影响	119
3.5	滚筒结构参数对截割性能的影响	122
3.5.1	截深	123
3.5.2	截齿排列	125
3.5.3	截线距	128
3.5.4	螺旋升角	133
3.6	滚筒运动参数	135
	参考文献	138
第 4 章	滚筒装煤性能研究	139
4.1	滚筒装煤性能研究方案	139
4.1.1	滚筒装煤试验方案设计	139
4.1.2	滚筒装煤仿真模型	143
4.2	滚筒装煤性能的三因素正交试验研究	145
4.2.1	筒毂直径、牵引速度、滚筒转速	145
4.2.2	滚筒截深、牵引速度、滚筒转速	148
4.2.3	叶片螺旋升角、牵引速度、滚筒转速	150

4.3 煤岩性质对滚筒装煤效果的仿真研究	152
4.3.1 仿真准确性的验证	153
4.3.2 颗粒直径	154
4.3.3 颗粒刚度和墙体刚度	155
4.3.4 颗粒摩擦系数和墙体摩擦系数	159
4.4 工作面角度对滚筒装煤效果的仿真研究	161
4.4.1 走向倾角	161
4.4.2 工作倾角	171
参考文献	181
第 5 章 异形滚筒性能研究	182
5.1 异形滚筒结构设计	182
5.1.1 阶梯形滚筒结构设计	182
5.1.2 鼓形滚筒结构设计	184
5.1.3 旋挖式滚筒结构设计	189
5.2 异形滚筒性能仿真分析	190
5.2.1 阶梯形滚筒截煤性能仿真分析	191
5.2.2 鼓形滚筒装煤性能仿真分析	199
5.2.3 旋挖式滚筒性能仿真分析	205
5.3 异形滚筒性能试验分析	211
5.3.1 试验滚筒加工	211
5.3.2 阶梯形滚筒截煤性能试验研究	212
5.3.3 鼓形滚筒装煤性能试验研究	218
参考文献	220
第 6 章 滚筒动力学特性研究	222
6.1 动力学系统理论	223
6.2 采煤机滚筒分形特征	225
6.2.1 截割载荷的分形特征	225
6.2.2 截割块度的分形特征	231
6.3 截割载荷的混沌特征	237
6.3.1 混沌动力学理论	237
6.3.2 截割载荷的混沌特征分析	241
6.3.3 滚筒截割煤岩界面本构力学模型	249
6.3.4 截割载荷的混沌模型	267
参考文献	271
索引	273

第1章 滚筒破煤理论

煤岩是采煤机的截割破碎对象,对采煤机滚筒受力、截割比能耗、截割块煤率、生产效率、机器寿命、截割功率等均有直接影响。为此,需要了解煤的结构特性、物理机械特性以提高采煤机的截割效率。同时,滚筒是采煤机的关键部件,承担着截煤、输煤及喷雾灭尘等任务,消耗的功率占整个采煤机装机功率的80%~90%。为研究煤的截割破碎机理,探索采煤机滚筒截煤过程的合理结构参数、运动参数,以提高采煤机的可靠性、稳定性,使其更为有效地工作,需要对截齿的破煤机理、滚筒截煤机理及滚筒装煤理论进行研究。

1.1 煤岩特性

煤是采煤机的截割对象,其结构特点和物理机械性质对采煤机滚筒的截割载荷、比能耗、截割效率、块煤率、运行平稳性、可靠性以及使用寿命均有直接影响,并且对采煤机的整机选型和使用条件也具有较大影响^[1]。为此,开展采煤机滚筒破煤理论的研究,首先需了解煤的结构特性以及煤的物理机械性质。

1.1.1 煤的结构特性

煤是远古地质时代的沉积物,是在与空气隔绝、高温、高压条件下,经过漫长的碳化变质过程形成的。原始沉积物的不同,碳化变质程度的差异,使煤的物理机械性质和煤的结构在不同地域有很大差异。煤在沉积过程中形成的分层面称为层理,地质力使煤破碎形成的断裂面称为节理,使煤各处的性质不同,即煤是一种各向异性非均质性的脆性材料^[2-4]。煤的结构特性主要有以下两个方面。

1) 原生性构造特性

原生性构造特性由煤生成时的条件所致,如生成煤的材料、当时的自然条件和环境条件等。通常以层理、节理和非均质性等概念描述煤的原生性构造特性。其中,层理、节理属于潜伏性的,是指在煤层整体中固有的结构面,是一种非连续性弱结合面,通常不易被肉眼观察到,仅能在煤层破碎过程中显现出来,此时呈现出光滑而规则的离层面。

2) 次生性构造特性

次生性构造特性是由地质作用形成的煤特征,通常用断裂和裂隙两个概念进行描述。断裂是指在煤层内明显的分离面;裂隙则是煤层内张开着的明显的大裂

缝。煤层中存在着弱结合面，使煤层强度大为降低。在煤的开采过程中，为降低能耗和延长采煤机械寿命，应充分利用弱结合面处煤层强度降低这一特点。煤层的裂缝主要有以下几种形态特性。

(1) 多缝性：几条长短不一的裂缝同时存在；

(2) 不规则性：裂缝走向呈不规则的曲线或折线状；

(3) 易窜性：一般情况下，煤层厚度较小，裂缝不可能总是在煤层中延伸，极易窜至顶板、底板或更远处；

(4) 复杂性：水平缝、垂直缝、斜交缝通常同时存在。

有时在煤层小分层之间有整层的比煤炭强度高的其他矿物成分，即岩石夹层，称为夹矸。岩石夹层有黏土质、炭质、泥板岩或粉砂岩，很少有砂岩或石灰岩。坚硬的矿物成分有碳酸盐类、硫化物类和硅化物类。为评价工作面煤层中含有岩石夹层的含量及其性质，须测量出整层厚度、纯煤层厚度和矸石小分层的厚度，以确定岩石夹层的岩石学类别及其抗切削强度。

1.1.2 煤的物理机械性质

煤的物理性质是由其组成成分、赋存环境、构造等因素决定的，主要包括容重、湿度、孔隙度、导电性和传热性等，其中与煤开采密切相关的是容重和湿度。

煤的机械性质是指煤体受到机械施加的外力时所表现出来的性质和抵抗外力的能力，主要有强度、截割阻抗、坚固性系数、破碎特性指数、脆性程度指数、摩擦磨蚀性。在破煤时可借助煤的机械性质选择截齿对煤体力的作用形式以及截齿的形状和种类等。因此，了解煤的机械性质对机械化采煤非常重要^[5,6]。

对采煤机截割破煤过程、滚筒设计、截齿选型有重要影响的煤的物理机械性质主要有以下几项。

1) 煤的容重

煤的容重是指单位体积煤在干燥状态下的质量。根据煤的种类不同，其容重在 $1300 \sim 1450 \text{ kg/m}^3$ 变化。通常情况下，煤的容重越小，所在煤层的节理、层理越发达，其强度越小，越容易截割。对于容重较小的煤层，可通过提高采煤机的牵引速度来提高截割效率和块煤率。

2) 煤的湿度

煤的湿度即含水量，指煤的缝隙中存留水的质量与煤固体的质量之比。含水量高的煤体，结构被弱化，其强度明显降低。开采湿度较大的煤层时，功率消耗较低，产尘量小，可通过设定采煤机牵引速度，使其大于常规煤层的开采速度，以提高截割效率和块煤率。

3) 煤的强度

煤的强度是指煤在外力作用方向抵抗破坏的能力，通常用抗压强度 (σ_y)、抗拉

强度 (σ_t) 和抗剪强度 (τ) 来衡量。试验研究表明, 在单轴试验条件下, 煤的抗压强度 σ_y 最大, 抗剪强度 τ 次之, 抗拉强度 σ_t 最小, 其比值关系大致为

$$\sigma_y : \tau : \sigma_t = 1 : (0.1 \sim 0.4) : (0.03 \sim 0.1) \quad (1-1)$$

煤作为非均质各向异性的脆性材料, 其单轴抗压强度为 4.9 ~ 49MPa, 抗拉强度为 2.0 ~ 16.2MPa, 抗剪强度为 1.1 ~ 4.9MPa。因此, 在选择采煤机采煤方式、设计滚筒或布置截齿时, 应充分利用不同煤强度的特点, 尽量利用拉伸和剪切破煤, 以降低截齿负载和整机能耗。同时, 由于煤的各向异性, 不仅不同地区、不同矿层的煤岩强度不同, 即使同一煤体不同方向的强度也不尽相同。对于煤的单轴抗压强度, 苏联学者和英国学者通过试验研究表明, 垂直于层理方向加载与平行于层理方向加载相比较, 前者的抗压强度比后者大 30%~50%, 甚至可能大 3 倍以上。

4) 煤的截割阻抗

对于一种煤炭而言, 用结构参数固定的截齿进行截割时, 单位截割深度的截割阻力大致为常数; 而对于不同矿区甚至不同煤层的工作面, 用同一截齿进行截割时, 测定的单位截割深度的截割阻力则差别较大。因此, 苏联学者用标准截齿 (截割宽度为 20mm, 截角为 40°, 后角为 10°) 对煤岩体进行截割试验, 测得单位切削厚度煤体作用于截齿上的截割阻力值, 定义该截割阻力值为截割阻抗 A_z , 如式 (1-2) 所示:

$$A_z = F_j / h \quad (1-2)$$

式中, F_j 为截齿所受截割阻力, N; h 为切削厚度, mm。

煤的截割阻抗可用于计算截割机构受力和采煤机械选型, 能全面反映矿井条件的影响, 是表征煤的截割性能的一个常用指标, 同时也是对截齿及截割机构进行工程计算、优化设计的基础。

煤的截割阻抗为 30 ~ 420N/mm, 从有效使用采煤机的角度, 可根据截割阻抗将煤层分为三大类:

(1) $A_z = 30 \sim 180\text{N/mm}$ 的煤称为软煤, 在设计采煤机滚筒时可以选择较小截割功率, 并且截线距可以相对较大;

(2) $A_z = 180 \sim 240\text{N/mm}$ 的煤称为中硬煤, 需根据煤层是韧性煤还是脆性煤合理设计采煤机滚筒及其截齿布置, 选择合适的截割功率;

(3) $A_z = 240 \sim 420\text{N/mm}$ 的煤称为硬煤, 截割此种煤层时, 必须采用较大截割功率的采煤机, 并且截齿间距适当减小, 以提高滚筒的破岩能力。

5) 煤的坚固性系数

煤的坚固性系数 f 又称煤的坚硬度, 由苏联学者普罗托季亚科诺夫于 1926 年提出, 又称普氏系数, 是衡量煤破碎难易程度的指标。它综合反映了煤的强度、硬

度和弹塑性等因素。我国通常根据煤的坚固性系数 f 来划分各种采煤机械的适用煤层, 并依据该系数对煤炭进行分类, 规定 $f < 1.5$ 的煤为软煤, $f = 1.5 \sim 3$ 的煤为中硬煤, $f = 3 \sim 4$ 的煤为硬煤。

从理论上分析, 坚固性系数、抗压强度和截割阻抗是不能换算的, 但根据大量实际应用证明, 可以用坚固性系数 f 来确定煤岩的单向抗压强度 σ_y 和截割阻抗 A_z , 其近似关系为

$$\sigma_y = 10f, \quad A_z \approx 120f \quad (1-3)$$

6) 煤的破碎特性指数

采煤机所采煤的块度与采煤机的结构类型和结构参数有关, 也取决于被截割煤的破碎特性。苏联学者通过试验研究证明, 在碎煤总量中块度分布服从的统计分布规律如式 (1-4) 所示:

$$W = 1 - \exp(-\lambda_p d_s^{m_p}) \quad (1-4)$$

式中, W 为透过筛孔 $d_s(\text{mm})$ 的碎煤量在截落煤岩总量中的比重, %; λ_p 为破碎程度参数, 其值越小, 破碎越严重; m_p 为破碎特性指数, 对于具体煤层为一常数, 一般为 $0.4 \sim 1.3$, 与截割工况无关, 其值越大, 煤破碎越严重, 块度越小。

破碎特性指数是确定煤炭脆性程度指数的基础, 也是对煤尘生成能力分级的基础, 可根据此指数预测开采块煤率的大小。破碎特性指数 m_p 的计算公式可通过对式 (1-4) 两边取对数获得

$$m_p = \frac{\ln \ln \left(\frac{1}{1-W} \right) - \ln \lambda_p}{\ln d_s} \quad (1-5)$$

7) 煤的脆性程度指数

脆性对煤炭破碎过程的影响很大, 苏联学者通过试验确定了脆性程度指数 B_w 与截槽崩裂角 φ_j 和切削厚度 h 之间的关系:

$$\tan \varphi_j = B_w h^{-0.5} \quad (1-6)$$

因此, 截齿截割时的截槽横断面面积为

$$\bar{S}_j = h(b_p + h \tan \varphi_j) = h(b_p + B_w h^{0.5}) \quad (1-7)$$

式中, \bar{S}_j 为截槽的横断面面积, mm^2 ; b_p 为截齿的计算宽度, mm 。

根据截割比能耗 $H_W = K_z A_z / \bar{S}_j$ 可得其计算公式为

$$H_W = \frac{K_z A_z}{b_p + B_w h^{0.5}} \quad (1-8)$$

式中, H_w 为截割比能耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{mm}^3$; K_z 为综合考虑煤的压张效应、脆塑性、截齿几何参数、截割条件、截齿布置等参数得到的系数。

在参数 b_p 、 h 、 A_z 一定的条件下, 截割比能耗与煤的脆性程度指数 B_w 有关, B_w 值越大煤质越脆, 截割比能耗越小。因此, 在一定程度上, 脆性程度指数 B_w 可用于描述煤炭的截割比能耗。

基于脆性程度指数和煤的破碎特性指数 m_p 的相互关系, 可获得煤炭脆性程度指数的工程计算公式:

$$B_w = \frac{\exp(2.3m_p)}{m_p^2} - 8.4 \quad (1-9)$$

一般情况下, 煤的脆性程度指数 B_w 为 $1.3 \sim 8$, $B_w < 2.1$ 为韧性煤; $B_w = 2.1 \sim 3.5$ 为脆性煤; $B_w > 3.5$ 为极脆性煤。

8) 煤的摩擦磨蚀性

煤体对金属的摩擦作用大小用摩擦系数 μ_f 表示, μ_f 值大小因相互摩擦的材料种类而异, 也因做相对运动的二者之间压力大小和相对速度大小而不同。表 1-1 给出了煤与钢、煤与煤的摩擦系数。

表 1-1 煤与钢、煤与煤的摩擦系数

材 料	无烟煤		褐煤		末煤		焦油煤		一般煤
	静	动	静	动	静	动	静	动	
钢	0.84	0.29	1.00	0.58	0.84	0.32	0.84	0.32	—
煤	—	—	—	—	—	—	—	—	~0.39

苏联学者对煤与钢的摩擦系数的研究表明, 当煤与钢的相对滑动速度增加时, μ_f 值下降; 当法向压力增加时, μ_f 值减小。

煤炭对金属、硬质合金和其他固体的磨蚀能力称为煤的磨蚀性 (或研磨性)。煤炭对截齿的磨蚀性主要是由截齿与煤岩的摩擦引起的。苏联学者研究表明, 煤炭的磨蚀性与其石英含量、石英核直径和抗拉强度有关。表征煤岩磨蚀性的方法很多, 可以用标准金属试件在一定压力下与被测煤岩材料接触, 并做相对移动。设压力为 P_m (N), 摩擦路程为 L_m (m), 金属试件磨损体积为 V_m (cm^3), 则磨蚀性系数 f_m 为

$$f_m = V_m / (P_m L_m) \quad (1-10)$$

1.2 截齿破煤机理

截齿作为采煤机主要的截割工具, 直接作用于煤层, 工作条件恶劣, 为易损零部件, 并且采煤机大部分功率消耗在截齿截割上。截齿的截割性能直接影响着采煤机工作机构的运行质量, 提高截齿破岩性能是降低比能耗、降低生产成本、提高截

割效率、延长使用寿命、提高可靠性和经济效益的根本途径^[7-10]。为此,对滚筒采煤机破煤机理的研究,需对截齿的截割机理进行分析。采煤机上使用的截齿主要有楔形截齿和镐形截齿,两者的破煤机理类似,但由于楔形截齿截割硬煤能力较弱,逐渐被淘汰,为此,本书所研究的截齿均针对镐形截齿。

1.2.1 截齿切削破煤过程

截齿破煤力学分析是研究破煤机理及建立截齿截割力学模型的基础,为此,需对其进行分析,截齿破煤过程和截齿截割载荷变化分别如图 1-1、图 1-2 所示^[2]。

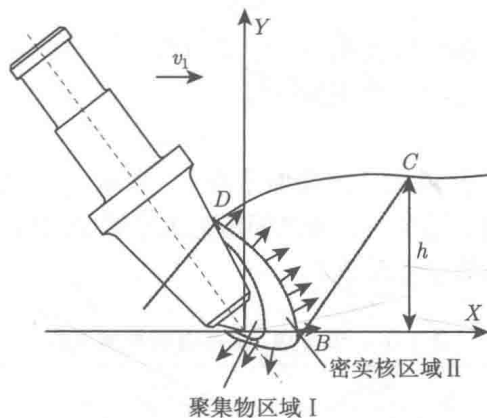


图 1-1 截齿破煤过程图

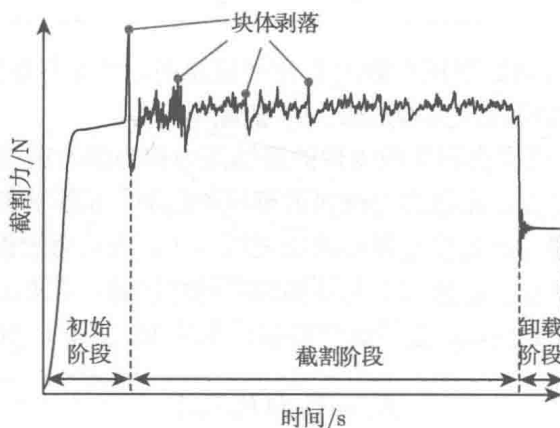


图 1-2 截齿截割载荷变化图

截齿以截割速度 v_1 截割煤体时,在接触处产生很高的压应力,并集中在很小的范围内。由于煤是脆性物质,当接触应力达到极限值时,煤体开始被局部压碎,形成很细的粉末,并形成煤粉密实核。在截齿截入的过程中,煤粉密实核部分将以很高的速度沿齿身锥面排出,从而压碎范围不断扩大,密实核也不断扩大,核内的

煤粉因受到挤压而积聚能量,并向密实核四周的煤体施压,截齿的截割阻力也逐渐扩大。当密实核扩大到煤与截齿前面接触点 D 时,该处煤即发生小块脱落,密实核区域 II 的煤粉因受到强烈压缩而高速喷出,使积聚的能量突然释放,截割阻力也突然减小。煤粉在高速喷出时,与截齿齿身锥面发生强烈摩擦,致使在截齿齿尖部分形成聚集物区域 I,它黏附在截齿齿尖上并与截齿一起运动,同时对煤体产生楔入作用。截齿继续前进,密实核体积进一步扩大,截割阻力也继续扩大,直到再次发生小块剥落及煤粉喷出时,截割阻力下降。最后截齿运动到 B 点时,密实核内产生足够大的压力,使煤体内产生剪切裂纹,该裂纹随截齿前进并扩大到煤体表面,此时截割阻力达到最大值。进而煤块 BCD 沿裂纹 BC 剥落,密实核随之消失,截割阻力降到最小值。可见,截齿截煤过程是截入、密实核形成、跃进破碎的过程。

从断裂力学的角度分析,受压的煤体内部会产生裂隙,裂隙的进一步扩展是导致煤体破碎的直接原因。一般裂隙有三种扩展方式:张开型扩展、滑开型扩展和撕开型扩展,如图 1-3 所示。在截齿破煤的过程中,张力引起的张开型扩展起主要作用,使得煤体以 V 形崩落。

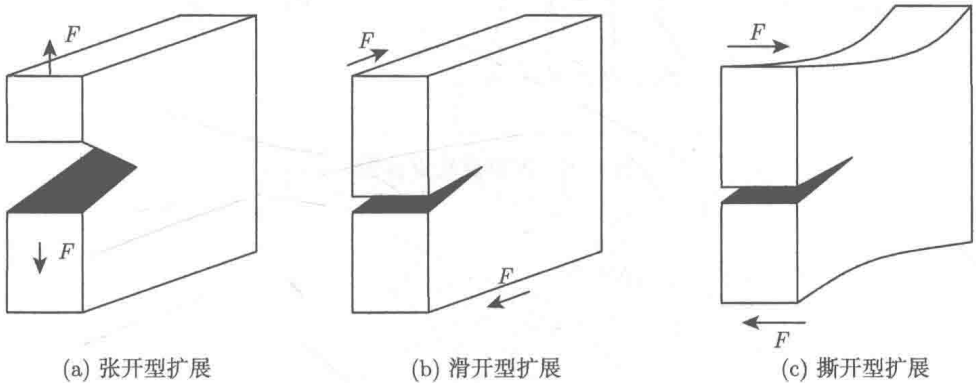


图 1-3 裂隙扩展类型

1.2.2 截齿截煤截割力模型的建立

在对截齿截割力的研究中,主要的破岩理论包括苏联学者别隆^[11]的刀具切削理论、英国学者 Evans^[12,13]的最大拉应力理论、日本学者西松的库仑-莫尔理论^[14]以及我国学者牛东民提出的断裂力学理论^[15,16],这些理论是设计采掘机械截齿和工作机构(滚筒、截割头)的理论依据。虽然在文献 [17] 中给出了采煤机滚筒任意位置截齿的三向力计算公式,对计算采煤机滚筒叶片截齿的截割力提供了理论依据,但对于采煤机滚筒端盘截齿截割力的计算存在一定的误差,没有考虑端盘截齿倾斜角、歪斜角对截割力的影响;同时,采煤机滚筒在截割时,端盘截齿比叶片截齿受力状况更加复杂、恶劣,端盘截齿受力分析的准确度对设计采煤机滚筒有极大

影响。

采煤机滚筒上截齿的安装角度分为：冲击角、倾斜角和歪斜角。冲击角为在滚筒的横截面内截齿轴线与滚筒径向线的夹角 (α_{cj})，如图 1-4 所示。滚筒横截面是指通过截齿齿尖垂直于滚筒轴线的平面，滚筒径向线是指齿尖所在的滚筒横截面内齿尖与中心点的连线。倾斜角为截齿轴线以图 1-4 中截齿齿尖处滚筒切向线为旋转轴，旋转一定的角度后与滚筒横截面所成的二面角 (α_{qx})，其中截齿轴线面

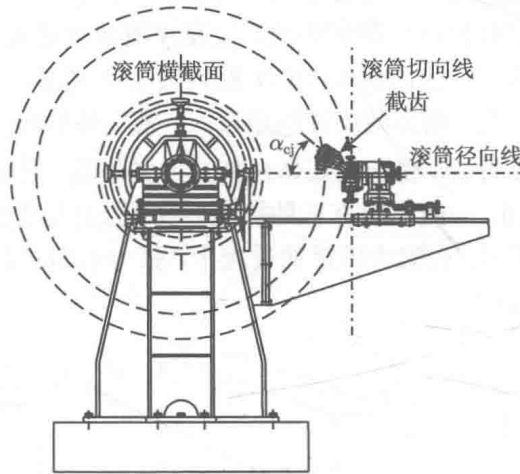


图 1-4 滚筒截齿安装图

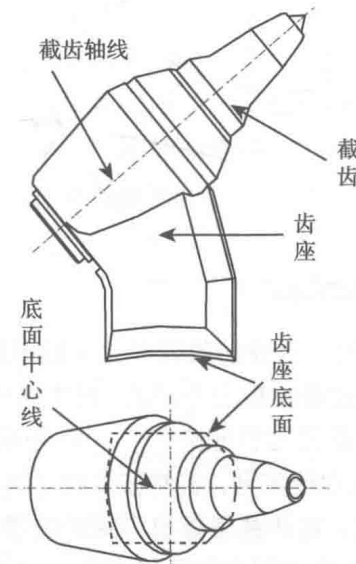


图 1-5 截齿组装图

是指通过截齿轴线和齿座底面中心线的平面,如图 1-5 所示。歪斜角为截齿轴线面以图 1-4 中截齿齿尖处滚筒径向线为旋转轴,旋转一定的角度后与滚筒横截面所成的二面角(α_{wx}),它是截齿轴线面绕滚筒横截面中过齿尖的径向线旋转而得到的。在滚筒制造过程中,截齿的定位均是以齿尖为基准。对于螺旋叶片上截齿的 3 个安装角,只有冲击角非零,其余两个角度值均为零,并且此时截齿轴线面与滚筒径向面重合。而端盘上截齿的 3 个安装角度随截齿在端盘周向位置的不同而不同。但是,滚筒上所有截齿的冲击角均相等。并且,端盘截齿总数占滚筒截齿总数的一半以上,由此可见,分析滚筒受力,如果忽略端盘截齿倾斜角和歪斜角的影响势必造成很大误差^[18]。

基于上述分析,为得到采煤机滚筒上截齿受力的通用计算公式,对其进行了理论推导,其过程如下。

滚筒截齿以转速 n 绕滚筒轴线旋转,并以牵引速度 v_q 进给截割煤岩。在滚筒旋转一周的过程中,每个截齿只有一半时间在截割煤岩。随着滚筒的前进,截齿切削厚度从零变化到最大值,继而从最大值降为零,其过程如图 1-6 所示,图中黑色区域为单个截齿旋转一周所截割的煤岩,呈月牙形; H 为滚筒旋转一周的进给量,其值为 $H = 1000v_q/n$, mm; 与截齿切削厚度最大值 h_{max} 之间的关系为: $h_{max} = H/m$, m 为每条截线上的截齿数。

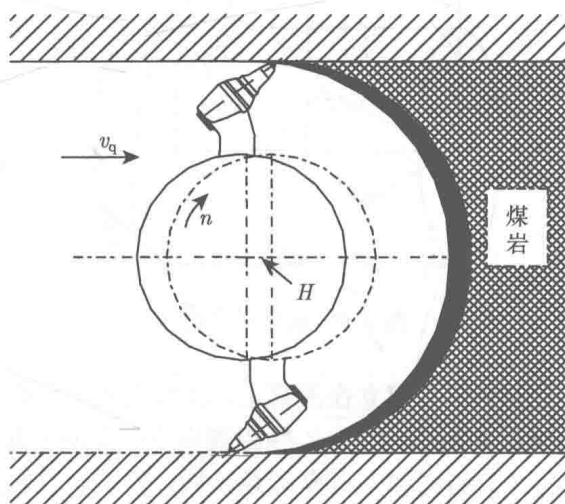


图 1-6 单齿截割过程图

本书所建立的滚筒上任意角度截齿模型如图 1-7、图 1-8 所示,并做如下假设:

- (1) 截齿、齿座和滚筒之间的连接视为刚性连接,看作一体;
- (2) 截齿受力简化为集中力,并作用于齿尖处。