

国家自然科学基金重点项目资助 (51234005)

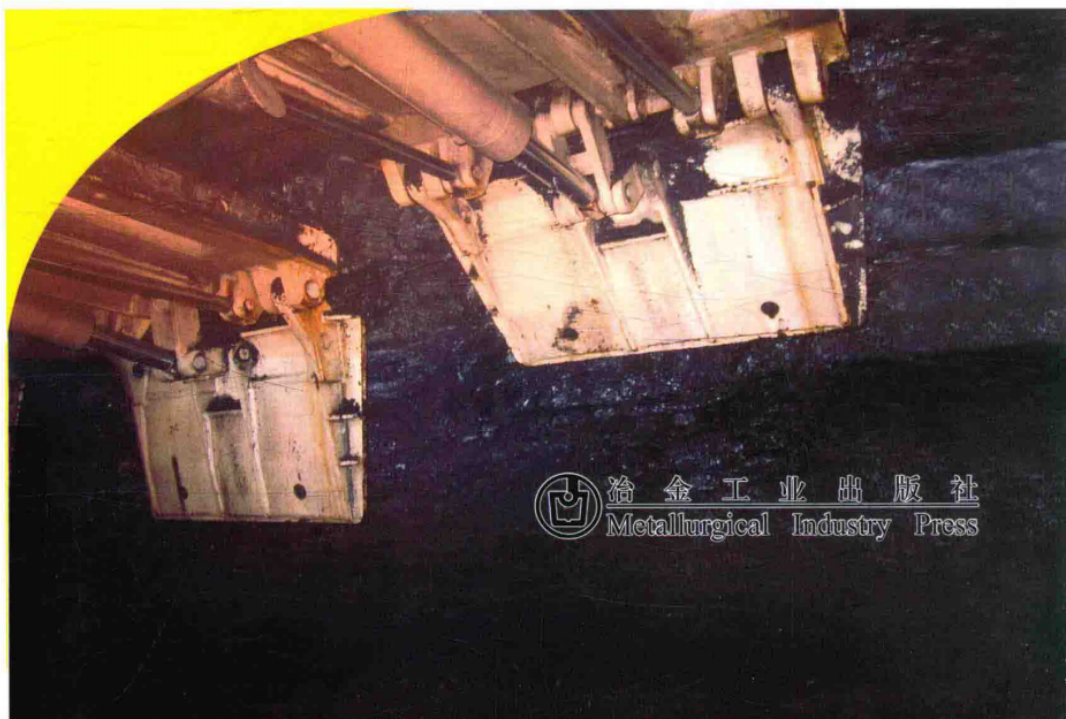
中央高校基本科研业务费资助 (3142015086)

中央高校基本科研业务费资助 (3142015003)

大采高综放工作面 煤壁片帮机理与控制

殷帅峰 何富连 著

DACAIGAO ZONGFANG GONGZUOMIAN
MEIBIPIANBANG JILI YU KONGZHI



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

国家自然科学基金重点项目资助(51234005)

中央高校基本科研业务费资助(3142015086)

中央高校基本科研业务费资助(3142015003)

大采高综放工作面 煤壁片帮机理与控制

殷帅峰 何富连 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书对大采高综放工作面煤壁片帮机理做了深入研究,提出了合理有效且具有针对性的煤壁片帮控制技术。书中对煤壁前方塑性区范围进行了系统研究,得出了不同硬度及夹矸煤壁失稳力学判据,提出了以降低支架故障率为核心的“固液同步型”故障检测煤壁片帮控制方法,运用C++语言开发出大采高综放面煤壁片帮安全评价系统,并通过现场应用检验。

本书适合从事采场矿压控制科研人员、支架维修设计技术人员、采掘一线工程技术人员、高校教师及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大采高综放工作面煤壁片帮机理与控制 / 殷帅峰,
何富连著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-5024-7149-1

I. ①大… II. ①殷… ②何… III. ①大采高—综采
工作面—煤壁—片帮—研究 IV. ①TD82 ②TD77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 011010 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7149-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版, 2016 年 2 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.75 印张; 269 千字; 178 页

50.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

统计结果显示,厚及特厚煤层储量占我国已探明煤炭储量的45%左右,尤其是西北部矿区,特厚煤层储量丰富。伴随大型煤炭基地开采强度、开采规模及开采能力的不断提高以及现代化、自动化、综合机械化开采技术的迅猛发展,厚及特厚煤层产量也已占全国煤炭总产量的40%左右。因此,厚及特厚煤层储量和产量优势明显。大采高综放开采是解决厚煤层,尤其是特厚煤层安全高效开采的主要方法,且具有产量大、回收率高、经济安全等优点。但是,采煤工作面,尤其是大采高综放工作面煤壁片帮事故,导致工作面阶段性停产并造成重大损失,甚至人员伤亡,严重制约着工作面单产的进一步提高,成为采场矿压控制亟待解决的技术难题。

本书综合现场调研、文献检索、理论计算、数值模拟、实验室试验和现场应用实测等方法,围绕大采高综放工作面煤壁片帮机理和控制技术两个关键问题,分别对综放面煤壁前方煤体塑性区范围变化规律、不同硬度煤体片帮迹线形状分类、坚硬煤层和软弱煤层煤壁片帮机理、含夹矸煤层煤壁片帮机理、大采高综放面煤壁片帮关键影响因素、综放支架系统可靠性与煤壁片帮控制互馈关系、综放支架固体构件无损探伤技术、综放支架液压系统故障检测技术、大采高综放开采煤壁片帮安全评价系统、典型矿井现场应用检验等问题开展了一系列研究和现场工程试验。

本书研究工作得到了华北科技学院蔡卫教授、邹光华教授、程根银教授、石建军副教授、田多副教授、高林生讲师,同煤集团郭金刚总经理,同煤国电同忻煤矿霍利杰总工程师,同大科技研究院刘锦荣副总工程师,中煤金海洋能源有限公司杨伯达总工程师,五家沟矿李

秀华矿长、毛建新总工程师，元宝湾矿李其敏副总工程师，神东公司调度室栗建平主任的大力支持和帮助，在此表示感谢。同时感谢中国矿业大学（北京）谢福星博士、赵勇强硕士、张亮杰硕士在理论计算和数值模拟过程中提供的帮助，感谢华北科技学院冯山、曹健、牛振磊、唐晶晶、周逸飞等人在现场调研过程中提供的帮助。另外，本书出版得到了国家自然科学基金重点项目“矿山顶板灾害预警”（编号：51234005）、中央高校基本科研业务费资助项目“综放关键设备实时在线智能化监控系统研究”（编号：3142015086）、中央高校基本科研业务费资助项目“综放沿空煤巷桁架锚索与单体锚索平行布置非对称技术研究”（编号：3142015003）的资助，在此表示感谢。

由于研究时间较短且现场工程应用较少，书中许多观点是初步研究成果，诸多理论和工程问题有待深入探讨。加之作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 煤壁前方煤体应力分布及塑性区范围研究现状	5
1.2.2 大采高工作面煤壁片帮机理研究现状	7
1.2.3 煤壁片帮控制技术研究现状	12
1.2.4 超声无损探伤技术发展现状	16
1.3 本书主要研究内容与研究方法	17
1.3.1 主要研究内容	17
1.3.2 研究方法及技术路线	19
1.4 本书预期研究成果	21
2 基于正交试验和有限变形理论煤壁前方塑性区范围研究	25
2.1 基于正交试验煤壁前方塑性区范围数值模拟研究	25
2.1.1 数值模拟软件对比及选择	26
2.1.2 煤壁片帮塑性变形系数及其正交试验设计	28
2.1.3 煤壁片帮塑性变形系数多元非线性回归分析	31
2.2 基于有限变形理论煤壁前方塑性区范围计算求解	33
2.2.1 顶梁弹塑性有限变形理论认识基础	33
2.2.2 基于顶板弹塑性有限变形的煤体应力求解	34
2.3 煤壁前方塑性区范围描绘	39
2.3.1 同忻矿煤体基本力学参数三轴试验结果	40
2.3.2 8107 大采高综放面煤壁前方塑性区范围描绘	44
2.3.3 煤壁前方塑性区范围两种计算方法对比分析	45
2.4 本章小结	46
3 不同硬度煤层大采高综放面煤壁片帮机理研究	48
3.1 不同硬度煤体片帮迹线分类	48

3.1.1	不同硬度煤体三轴压缩试验应力-应变特性对比	48
3.1.2	煤壁片帮迹线与煤体硬度关系探讨	51
3.2	基于尖点突变理论坚硬煤层大采高综放面煤壁片帮机理研究	53
3.2.1	煤壁片帮尖点突变模型的建立	53
3.2.2	坚硬煤层不同片帮迹线条件下片帮机理研究	56
3.3	软弱煤壁弧形滑动失稳机理研究	60
3.3.1	软弱煤壁弧形滑动片帮数值模拟研究	60
3.3.2	煤壁弧形滑动失稳起始破裂位置探讨	64
3.3.3	煤壁弧形滑动失稳力学建模及计算分析	65
3.4	含软弱夹矸煤层大采高综放面煤壁片帮机理研究	68
3.4.1	含软弱夹矸煤层煤壁片帮主要形式	68
3.4.2	含软弱夹矸煤层煤壁片帮力学建模与计算	69
3.4.3	基于控制平面分区的含软弱夹矸煤壁失稳条件分析	72
3.5	本章小结	73
4	8107 大采高综放面煤壁片帮关键影响因素综合确定	75
4.1	基于三角模糊算法煤壁片帮关键影响因素计算分析	75
4.1.1	片帮基本事件分类及其三角模糊概率计算	75
4.1.2	片帮基本事件三角模糊重要度计算	89
4.2	煤壁片帮关键影响因素合理值范围的数值模拟分析	94
4.2.1	关键影响因素数值模拟方案设计	94
4.2.2	煤壁片帮关键影响因素合理值范围确定	96
4.3	煤壁片帮关键影响因素回归分析	104
4.4	本章小结	106
5	基于综放支架系统可靠性煤壁片帮控制技术	107
5.1	支架系统可靠性与煤壁片帮控制互馈关系研究	107
5.2	基于共因失效计算模型综放支架系统可靠性研究	108
5.2.1	大采高综放支架故障概率共因失效计算模型的提出	109
5.2.2	ZF15000/27.5/42 型综放支架立柱系统可靠性计算示例	110
5.3	“固液同步型”支架故障检测技术及其检测机理	111
5.3.1	综放支架“固液同步型”故障检测技术的提出	111
5.3.2	综放支架“固液同步型”故障检测技术的内涵	114
5.4	本章小结	127

6 同忻矿 8107 大采高综放面煤壁片帮控制现场工程实践	129
6.1 基于“固液同步型”故障检修实践煤壁片帮控制效果探析	129
6.1.1 ZF15000/27.5/42 型综放支架“固液同步型”故障检测方案设计 ..	129
6.1.2 液压支架“固液同步型”故障检测结果统计分析	132
6.1.3 综放面不同故障率区段煤壁控制效果对比分析	138
6.1.4 支架“固液同步型”故障检修前后煤壁控制效果对比分析	139
6.2 大采高综放面煤壁片帮安全评价系统研发应用	151
6.2.1 安全评价系统开发构想及操作界面	151
6.2.2 安全评价系统的应用检验	152
6.3 本章小结	156
7 结论与展望	157
7.1 研究取得的主要成果	157
7.1.1 大采高综放面煤壁前方塑性区范围	157
7.1.2 不同硬度煤层大采高综放面煤壁片帮机理	157
7.1.3 大采高综放面煤壁片帮关键影响因素研究	158
7.1.4 大采高综放开采煤壁片帮控制技术	158
7.1.5 同忻矿 8107 大采高综放面煤壁片帮控制现场工业性试验	159
7.1.6 大采高综放开采煤壁片帮安全评价系统开发与现场应用检验 ..	159
7.2 创新点	160
7.3 展望	160
附录 C++ 编程代码	162
参考文献	172

本章首先简要论述大采高综放开采在我国厚或特厚煤层开采中存在的技术难题,结合大量现场调研对大采高综放面异常矿压显现进行统计分析和归类;基于同煤国电同忻煤矿有限公司 8107 大采高综放面煤壁严重片帮事故,初步提出大采高综放面煤壁控制的原理和关键技术;在此基础上,概述了煤壁前方煤体塑性区宽度相关研究成果、煤体片帮机理相关研究成果及煤壁片帮控制相关研究成果;最后,详细阐述了本书的研究内容、研究方法、研究技术路线,总结了本书工作重点。

1.1 问题的提出

中国煤炭工业协会会长王显政在 2012 年全国煤炭工作会议上对未来煤炭行业发展形势定性为“煤炭作为我国主体能源的地位很难改变”,同时指出受石油、天然气等传统能源储量和开采规模限制,以及我国长期以来大型煤炭基地建设的深入发展,煤炭在一次能源生产结构和消费结构中所占的比重将继续维持在 70% 左右^[1],如图 1-1 所示。受目前经济形势困扰,煤炭作为主体能源的地位不会动摇和改变,但在经济生活中应坚持“煤为基础,多元发展”的能源战略,以保障国家能源安全。

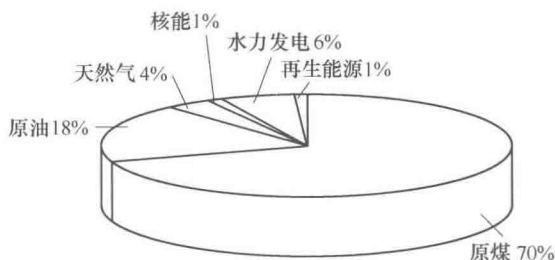


图 1-1 2012 年我国一次能源消费结构

厚煤层大采高综采是实现煤炭高效集约生产的传统开采方法,特厚煤层综放开采是提高工作面单产、实现工作面高产高效高安全开采的技术保障。结合大采高综采和综放开采两种采煤方法的优点,基于支护设备尤其是特种支护设备研发

成果，大采高综放开采已经成为厚或特厚煤层开采新的发展阶段^[2]。然而，大采高综放开采在现有文献中定义不明确，本书将大采高综放开采定义为：考虑顶煤稳定性控制及设备稳定性和可靠性要求^[3]，在厚煤层或特厚煤层开采过程中，采煤机割煤高度大于等于3.5m，且采放比小于1:3的综合机械化放顶煤一次采全高开采方法。根据上述定义，大采高综放开采目前在大同矿区、金海洋矿区、平朔矿区、潞安矿区等均有应用。典型大采高综放工作面相关参数统计见表1-1。

表 1-1 典型大采高综放工作面相关参数统计

参 数	大同同忻矿	大同塔山矿	五家沟矿	潞安屯留矿	潞安王庄矿
采高/m	3.9	3.5	3.5	3.5	3.6
放煤厚度/m	11.6	9.8	7.2	2.8	3.1
采放比	1:2.97	1:2.80	1:2.06	1:0.80	1:0.86
液压支架	ZF15000/27.5/42	ZF10000/25/38	ZF10000/23/37	ZF7000/19/38	ZF7000/20/40
最高月产量/万吨	117	112	92	45	75

大采高综放开采与传统综放开采相比：（1）有利于顶板矿山压力对顶煤的破碎作用，提高顶煤回收率；（2）有利于大功率高可靠性采煤、运输、破碎设备发挥设备优势，实现采掘均衡^[4]；（3）增加割煤高度，不仅优化了采放比，而且工作面通风断面增加，有利于工作面安全高效开采^[5]。但大采高综放开采也存在许多技术难题，如图1-2所示。

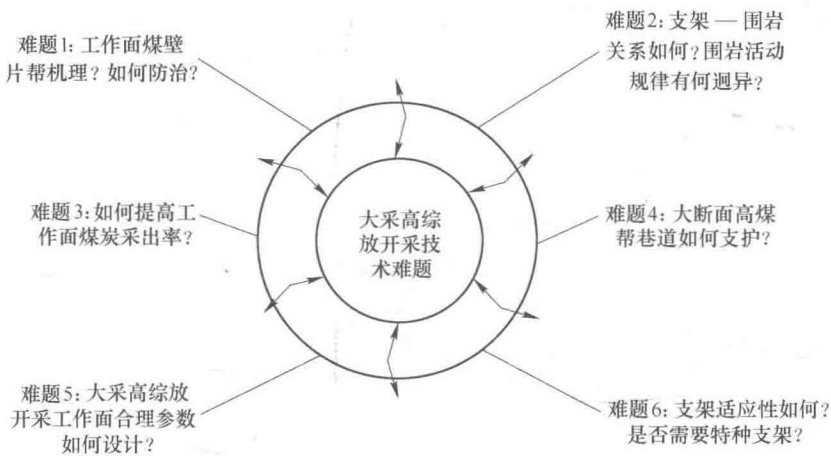


图 1-2 大采高综放开采技术难题

针对上述技术难题，笔者在同忻煤矿、塔山煤矿、五家沟煤矿、平朔2号井工矿调研发现，大采高综放开采存在煤壁严重片帮、顶板大面积冒漏、支架液压系统泄漏及支架固体构件损伤等诸多异常矿压显现，下面以同忻矿和中煤金海洋

五家沟矿、马营矿和南阳破矿为例进行说明。

图 1-3 为同忻矿 8107 大采高综放面严重片帮冒顶事故的现场照片。图中可见煤壁严重片帮进而诱发事故后期顶板大面积冒落。

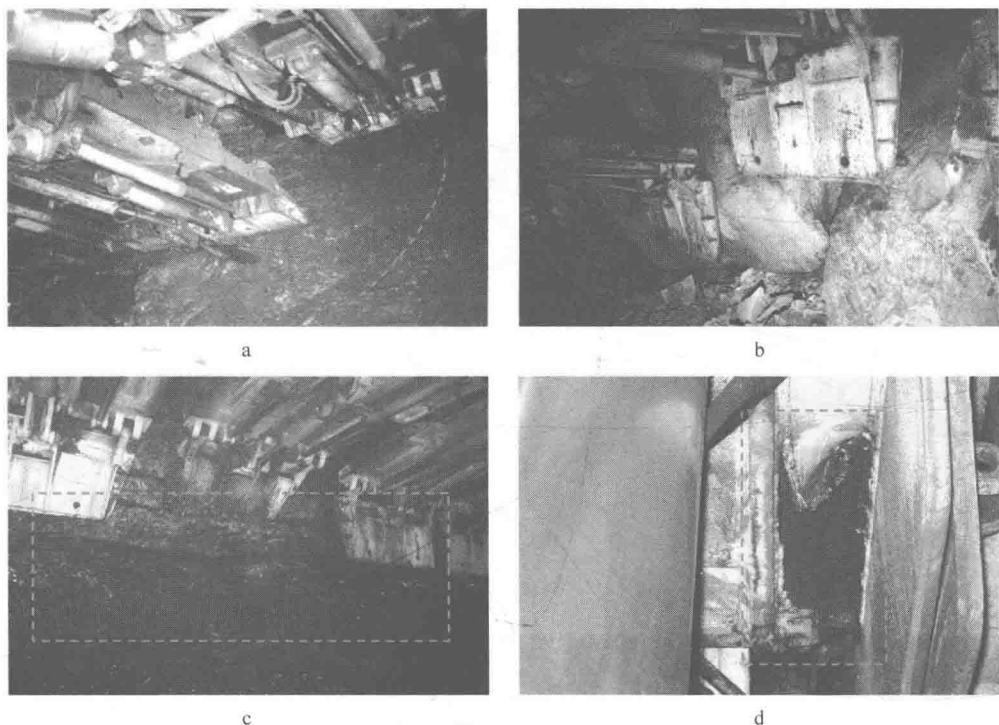


图 1-3 同忻矿大采高综放面异常矿压显现

- a—同忻矿 8107 综放面煤壁弧形滑动片帮；b—同忻矿 8107 综放面顶板大面积冒顶；
c—同忻矿 8105 综放面煤壁区域性片帮；d—同忻矿 8105 综放面护帮板撕裂

图 1-4 为金海洋下属三个矿井大采高综放面煤壁片帮概况及其他可能引起煤壁片帮的异常矿压显现情况。图中给出了支架液压系统可视泄漏情况及支架构件可视损坏情况。

现场调研可知，大采高综放开采异常矿压主要表现为：

(1) 煤壁片帮。主要有两种形式：煤壁上部的弧形滑动片帮和煤壁中部的台阶式片帮（受夹矸影响形成）。

(2) 煤壁片帮诱发的顶板冒落。割煤工序完成后，顶煤形成“拱式”结构，对煤壁上部片帮具有一定的积极作用。煤壁片帮后，顶煤具有了冒落所需的通道和流动空间，促使了顶煤的冒落。

(3) 支架液压系统泄漏。综放开采对支架支护性能提出了更高要求，受强烈周期来压的影响，支架液压元件发生损坏或失效。

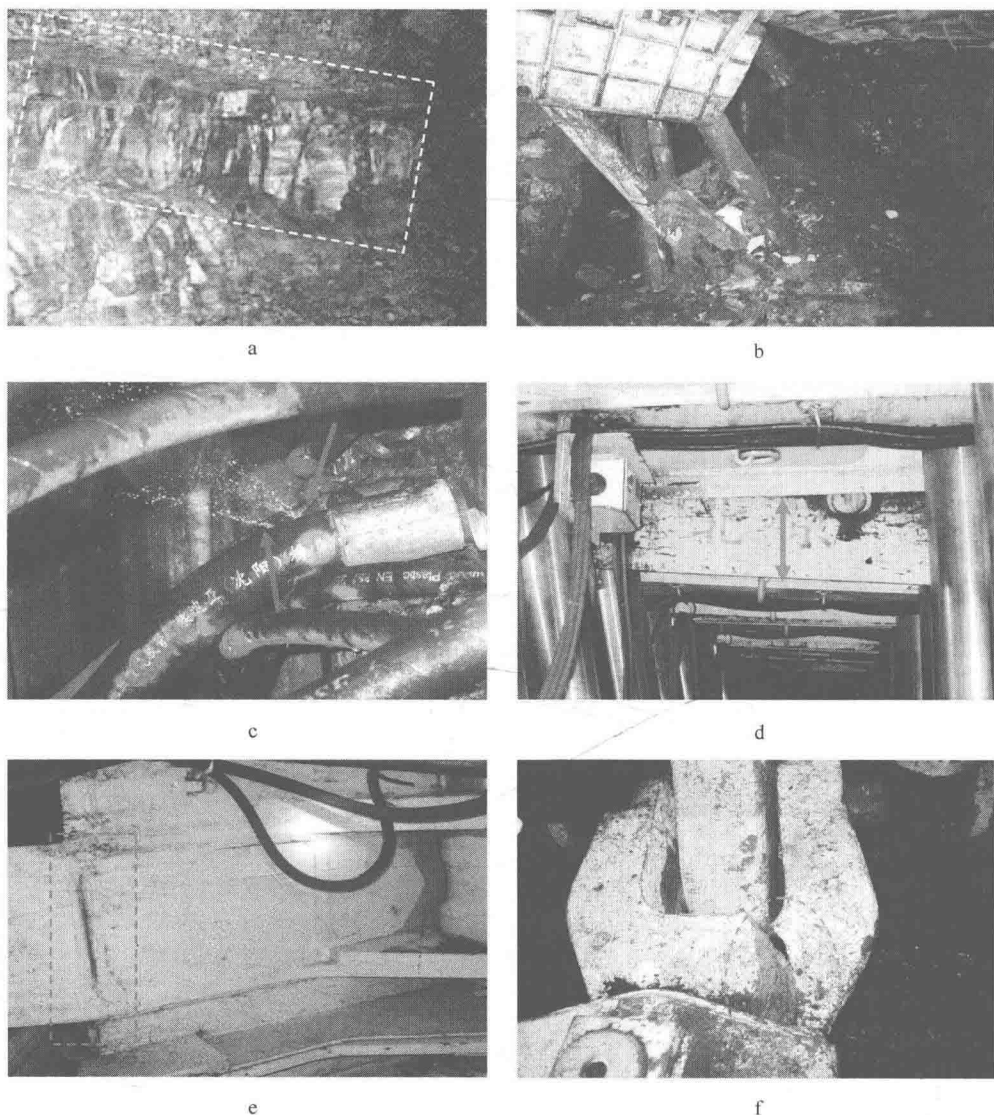


图 1-4 金海洋矿区大采高综放面异常矿压显现

- a—五家沟矿 5201 综放面煤壁区域性片帮；b—马营 9101 综放面顶板严重冒漏；
c—南阳破矿 4101 综放面可视液压泄漏；d—五家沟矿 5201 综放面支架台阶过大；
e—五家沟 5201 综放面支架掩护梁焊缝开裂；f—五家沟矿 5201 综放面支架耳座断裂

(4) 支架构件撕裂或焊缝开裂。支架掩护梁焊缝开裂或链接件撕裂影响了支架的支护性能，容易诱发煤壁片帮和顶煤冒漏。支架液压系统泄漏故障和固体构件损伤影响支架支撑性能，导致煤壁承受顶板高剪切应力作用，诱发煤壁片帮和顶板冒漏。

$$d_1 = \frac{M(1-3\alpha)}{2f(1+3\alpha)} \ln \frac{\lambda\gamma H + c \cot\varphi}{\frac{1+3\alpha}{1-3\alpha} p + \frac{2k}{1-3\alpha} + c \cot\varphi} \quad (1-1)$$

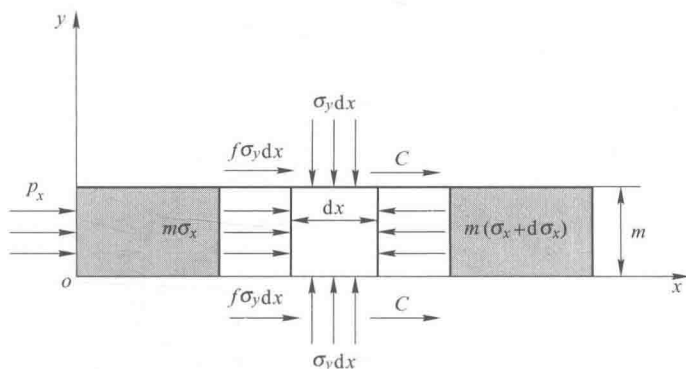


图 1-6 煤壁前方煤体单元应力分布

B D-P-Y 准则 + 极限平衡理论

该种求解利用 Mises 准则一种形式进行求解，即：

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2 + \mu^2 k^2} = k$$

结合极限平衡理论，求得煤壁前方煤体垂直应力 σ_z 及塑性区宽度 d_2 分别为：

$$\begin{aligned} \sigma_z = & -\frac{c_1 + Mc_2 + M \tan\varphi_2 \sigma_y}{\tan\varphi_1} + \left(\frac{1+3\alpha}{1-3\alpha} F_x + \frac{c_1 + Mc_2 + M \tan\varphi_2 \sigma_y}{\tan\varphi_1} + \right. \\ & \left. \frac{2k(u-1)}{1-3\alpha} \right) e^{\frac{2 \tan\varphi_1 (1+3\alpha)}{M(1-3\alpha)} x} \\ d_2 = & \frac{M(1-3\alpha)}{2 \tan\varphi_1 (1+3\alpha)} \ln \frac{\lambda_1 \gamma H + (c_1 + Mc_2 + M \tan\varphi_2 \sigma_y) \cot\varphi_1}{\frac{1+3\alpha}{1-3\alpha} F_x + \frac{2(u-1)k}{1-3\alpha} + (c_1 + Mc_2 + M \tan\varphi_2 \sigma_y) \cot\varphi_1} \end{aligned} \quad (1-2)$$

1.2.1.2 利用摩尔-库伦准则导出的煤体塑性区范围^[9]

$$d = \frac{M}{2\xi \tan\varphi_1} \ln \frac{\lambda\gamma H + c \cot\varphi_1}{\xi(F_x + c \cot\varphi_1)} \quad (1-3)$$

上述各公式中， $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ，为第一应力不变量； $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ ，为第二应力偏量不变量； $\alpha = \frac{3 \sin\varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin^2\varphi)}$ ，为

Mises 广义准则系数，材料参数； $k = \frac{\sqrt{3} c \cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}}$ ，为 Mises 广义准则系数； λ 、 M

分别为应力集中系数与煤层厚度； c_1 、 c_2 分别为煤层与顶底板和煤体自身黏结力； φ_1 、 φ_2 分别为煤层与顶底板和煤体自身摩擦角； F_x 为护帮板水平支护力； ζ 为三轴应力系数， $\zeta = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 。

式 (1-1) ~ 式 (1-3) 表明，煤壁前方煤体塑性区宽度与采高、煤体自身力学性质、煤体与顶底板摩擦系数及支架提供的护帮阻力有关。但是，上述诸塑性区表达式均为定值，即当煤体自身力学特性、支架护帮阻力等参数确定后，塑性区宽度为定值，并不随煤壁高度及离煤壁距离远近而改变，这与实际情况是不符合的，因为煤矿现场煤壁前方塑性区宽度并不是一成不变的。

1.2.2 大采高工作面煤壁片帮机理研究现状

现有文献对片帮机理的研究方法有以下几种：(1) 基于抗滑力 T 和滑动力 S 的安全余量法；(2) 基于压杆模型的最大挠度分析；(3) 软煤煤壁弧形滑动稳定系数法；(4) 基于“楔形”滑动体模型煤壁片帮稳定系数法。

1.2.2.1 基于抗滑力 T 和滑动力 S 的安全余量法

安全余量法分为以下几个步骤：

(1) 写出极限状态函数 $Z = g(T, S) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, X_n)$ 。 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{n-1}, X_n$ 为基本随机变量。

(2) 对围岩状态进行判别。在片帮机理研究中，一般取 $Z = T - S$ ，则有：

$$\text{判别准则} \begin{cases} Z > 0 & \text{工程处于安全状态} \\ Z = 0 & \text{工程处于极限状态} \\ Z < 0 & \text{工程处于破坏状态} \end{cases}$$

图 1-7 为安全余量法判别示意图。

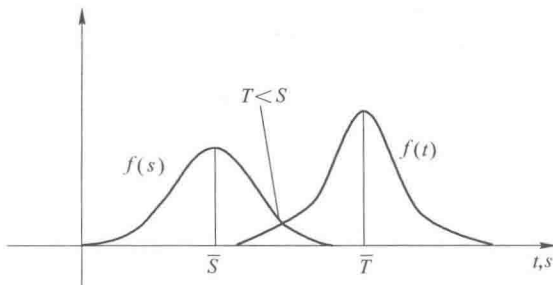


图 1-7 安全余量法判别示意图

(3) 具体应用。运用安全余量法研究煤壁片帮的典型案例是中国矿业大学(北京)王家臣教授，其建立的煤壁片帮模型及其简化模型如图 1-8 所示^[10]。

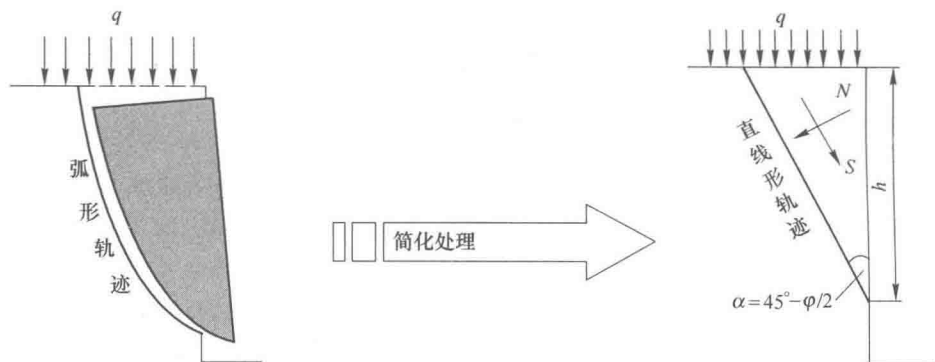


图 1-8 煤壁片帮模型及其简化

简化处理后, 根据安全余量法, 其计算推导煤壁剪切破坏准则为:

$$Z = T - S = Ch \sec \alpha + (qh + h_2 \gamma / 2)(\sin \alpha \tan \varphi - \cos \alpha) \tan \alpha \leq 0 \quad (1-4)$$

式中 C ——煤体黏聚力;

φ ——煤体内摩擦角;

S ——剪切面上剪力;

h ——剪切面破坏高度;

q ——顶板载荷集度;

α ——剪切面与煤壁的夹角。

此处需要说明的是, 除安全余量法外, 安全系数法及安全系数的对数法等研究方法也是煤壁片帮安全性研究常见方法。

安全系数法: $Z = g(T, S) = T/S$

安全系数的对数法: $Z = g(T, S) = \ln(T/S) = \ln T - \ln S$

1.2.2.2 基于压杆模型的最大挠度分析

压杆模型是根据煤壁前方煤体主应力分布图 (图 1-9) 提出的, 根据边界条件不同, 又可分为: (1) 一端刚性固支, 一端弹性支撑^[11~13]; (2) 两端固支。

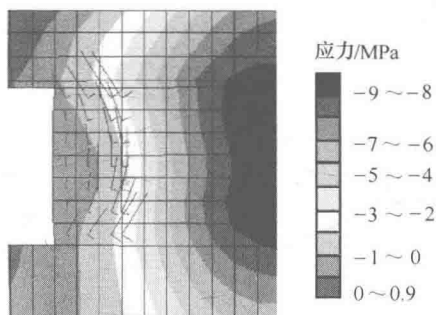


图 1-9 煤壁前方主应力分布图

A 一端刚性固支, 一端弹性支撑^[11~14]

一端固支、一端弹性支撑模型如图 1-10 所示。

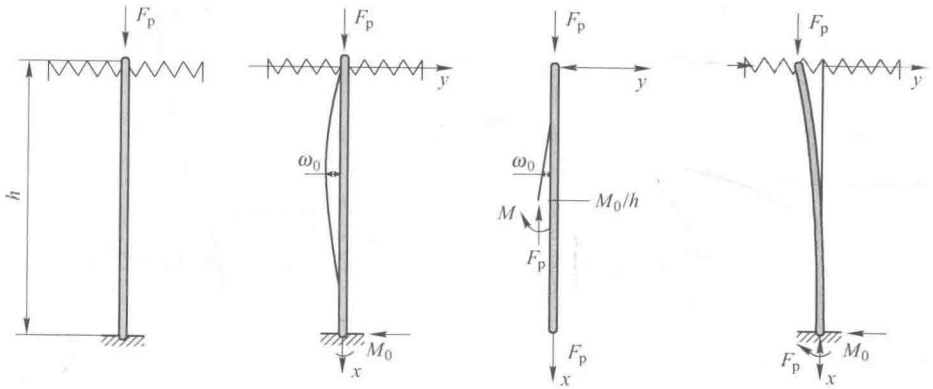


图 1-10 一端固支、一端弹性支撑模型

压杆挠度表达式为：

$$\omega = \frac{M_0}{F_p} \left[\frac{x}{h} + 1.02 \sin \left(4.49 \frac{x}{h} \right) \right] \quad (1-5)$$

式中 M_0 ——煤壁固支端力矩；

F_p ——顶板作用于压杆顶端的载荷；

h ——采高。

根据公式 (1-5)，当 $x = 0.35h$ 时，压杆挠度 ω 最大值为 $1.37M_0/F_p$ ，即煤壁最大挠度点位于 0.65 倍采高处。

B 两端固支型^[15]

两端固支模型如图 1-11 所示。

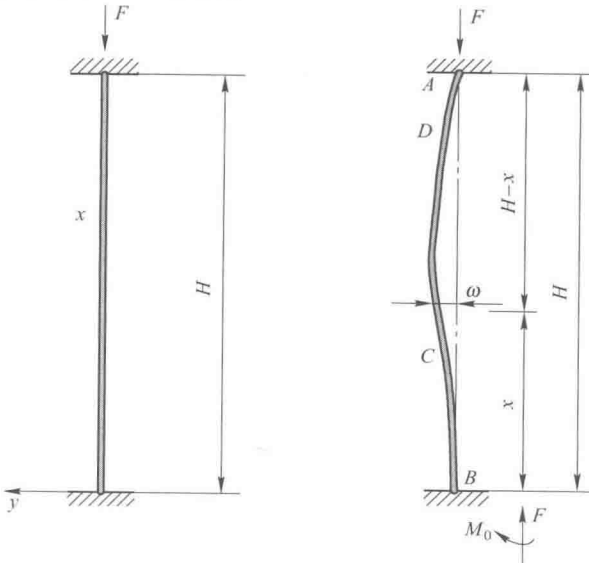


图 1-11 两端固支模型