

SHENBU TIAODAI MEIZHU CHANGQI WENDINGXING

深部条带煤柱长期稳定性 基础实验研究

JICHU SHIYAN YANJIU

陈绍杰 郭惟嘉 王亚博 李法柱 著

煤炭工业出版社

：术著作出版基金资助
新团队发展计划（IRT0843）资助
学基金（50874070）资助
教育部博士点专项基金（200804240004、20103718110001）资助
山东省优秀中青年科学家科研奖励基金（BS2010NJ013）资助
山东省自然科学基金（Y2008F01）资助

深部条带煤柱长期稳定性 基础实验研究

陈绍杰 郭惟嘉 王亚博 李法柱 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

深部条带煤柱长期稳定性基础实验研究 / 陈绍杰等
著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2010

ISBN 978-7-5020-3765-9

I. ①深… II. ①陈… III. ①煤矿开采-矿柱强度-
稳定性-研究 IV. ①TD822

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 223186 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $880\text{mm} \times 1230\text{mm}^{1/32}$ 印张 $8^{3/4}$

字数 229 千字 印数 1—1 000

2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 6575 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

随着时间的推移，开始处于稳定状态的条带煤柱在将来可能会失稳坍塌，这些煤柱成为老矿区发展其他工业时潜在的灾害源；同时，部分矿井为了延长矿井寿命，不得不考虑开采以前“三下”开采时留设的煤柱。深部煤柱的时效性更为明显，研究深部条带煤柱的长期稳定性对保障煤矿安全生产、保护矿区环境、合理留设煤柱、回收古旧煤柱等矿区可持续发展具有重要意义。

国外所进行的煤柱研究对象主要是房柱式开采中的正方形或长方形等规则形状煤柱；同时，国外的煤柱稳定性分析大多是基于大量煤柱的状态进行的统计研究，大多数煤柱稳定性分析是经验或半经验的，室内实验和现场相结合进行的研究还不多。国内对煤柱的研究大都也没有考虑深部地质力学环境和煤岩蠕变特性对煤柱支承效应和破坏失稳的影响，在设计煤柱尺度时，只是采用经验公式和经验参数进行粗放设计和预计，笼统地给出一个安全系数。

全书共分8章。第1章介绍了深部条带煤柱长期稳定性方面的国内外研究现状，提出了研究内容及方法。第2章分析了地质条件、采矿条件、条带煤柱自身条件、时间、水等因素对煤柱长期稳定性能的影响，基于矿山压力理论提出了小采宽和大采宽的条带开采采场空间结构模型；提出了考虑尺寸效应、横向约束效应和时间效应的煤柱理论长期强度确定方法。第3章对多种岩性的岩石进行了Ⅰ类和Ⅱ类曲线单轴压缩试验，分析了岩石Ⅱ类曲线的形成机制、获取方法和产生条件，分析了深井煤柱独特变形特征的产生机制；进行了煤岩单轴压缩强度尺寸效应的实验研究，得到了室内单轴压缩强度与现场煤体强度的关系。第4章进

行了岱庄煤矿和唐口煤矿煤系地层的基本岩石力学试验,确定了其力学参数。第5章进行了系列煤岩蠕变特性试验研究,分析了其蠕变破坏特征、蠕变力学参数和蠕变本构模型;明确了煤岩蠕变过程中微破坏和脆性突变变形的存在,分析了浸水对煤岩蠕变特性的影响,研究了时间对煤岩长期强度的影响,提出了岩石长期强度的计算公式,确定了试验煤岩的理论长期强度。第6章针对岱庄煤矿具体条件,结合室内实验成果,采用LS-DYNA和FLAC-3D进行了煤柱长期稳定性能的数值试验,分析了岱庄煤矿条带煤柱的长期稳定性能。第7章对岱庄煤矿和唐口煤矿条带煤柱长期稳定性能进行了监测并分析了其演化规律,分析了观测煤柱各分区的范围及煤柱不同部位的强度,并结合现场观测和室内实验成果,分析了条带煤柱的长期强度及其长期稳定性能。第8章进行了相似材料模型及压力传感器性能实验研究,介绍了新型三维相似材料模拟实验台,分析了深部条带煤柱长期稳定状态的三维相似材料模拟实验方案。

在本书的编写过程中,参阅了大量国内外有关煤柱稳定性方面的文献,谨向文献的作者表示感谢;在岱庄煤矿和唐口煤矿进行煤柱长期状态现场监测研究时,得到了相关工程技术人员的支持和协助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中如有谬误之处,敬请读者批评指正。

著 者

2010年10月于青岛

目 次

1	绪论	1
1.1	研究意义	1
1.2	条带煤柱稳定性研究概况	4
1.3	深部条带煤柱长期稳定性研究存在的问题	29
1.4	研究内容及研究方法	30
2	条带煤柱长期稳定性的基本理论和模型	32
2.1	条带煤柱稳定性的影响因素	33
2.2	条带煤柱长期稳定性的基本理论	36
2.3	条带煤柱长期稳定性的工程力学模型	47
3	岩石Ⅱ类曲线与煤岩强度尺寸效应	54
3.1	岩石Ⅱ类曲线试验及其形成机制	54
3.2	煤岩强度尺寸、形状效应	64
4	煤系地层基本力学试验	70
4.1	岱庄煤矿3煤及其顶板基本力学试验	71
4.2	唐口煤矿3煤及其顶板基本力学试验	80
5	煤岩蠕变特性试验研究	94
5.1	煤岩蠕变模型与破坏特征初探	94
5.2	岱庄煤矿煤岩短时蠕变试验及分析	100
5.3	岱庄煤矿煤岩长时蠕变试验及分析	139
5.4	唐口煤矿煤岩蠕变试验及分析	146
5.5	煤岩蠕变特性影响因素分析	175
6	深部条带煤柱长期稳定性的数值试验	177
6.1	深部条带煤柱长期稳定性的 LS-DYNA 模拟	177
6.2	深部条带煤柱长期稳定性的 FLAC-3D	

模拟	186
7 深部条带煤柱长期稳定状态监测与演化规律	194
7.1 条带煤柱长期稳定性能监测方法	195
7.2 岱庄煤矿条带煤柱长期稳定性能监测与 演化规律	203
7.3 唐口煤矿条带煤柱长期稳定性能监测与 演化规律	218
8 深部条带煤柱长期稳定状态的三维相似材料模拟 实验方法	237
8.1 相似材料模拟实验	237
8.2 相似材料模型及压力传感器性能实验研究	238
8.3 新型三维相似材料模拟实验台	245
8.4 深部条带煤柱长期稳定状态的三维相似 材料模拟实验方案	250
参考文献	259

1 绪 论

1.1 研究意义

我国是世界第一产煤大国，煤炭产量占世界的 37% 左右。煤炭是我国的主要能源，分别占一次能源生产和消费总量的 76% 和 69%，随着煤炭工业经济增长方式的转变、煤炭用途的扩展，煤炭的战略地位仍然十分重要。在未来相当长的时期内，煤炭仍将是我国的主要能源。在我国，已探明的煤炭资源量占世界总量的 11.1%，其中约占总量 53% 的资源埋深在 1000 m 以下。随着开采规模的扩大和机械化水平的不断提高，浅、中部范围的煤炭资源越来越少，矿井向深部发展的步伐越来越快，因此，煤炭深部开采的诸多问题已摆在我们面前。

煤柱可以定义为地下开采中两面或多面采空的煤体，它作为保护矿井巷道、控制岩层移动和隔离矿井的常规方法一直沿用至今。现在虽然已普遍采用无煤柱开采方法，但在各种采煤方法中，均需留设大量煤柱用于各种不同目的，如控制地表下沉、支撑顶板、保护巷道、隔离水沙及其他可能的灾害。为了减少资源浪费，提高回收率，充分利用煤柱的支承能力是十分必要的。随着采深的增加，留设的煤柱也会越来越大，煤柱的受力状态、空间系统结构、力学性质均发生了极大的甚至本质的变化。与浅部相比，深部煤柱处于“浅塑性”状态，表现出了岩体动力响应的突变性、原岩应力场的复杂性、岩体变形机理的脆-延转化特性、岩体的大变形和强流变性等诸多明显特征。合理进行深井煤柱设计，确保深井煤柱的长期稳定性，对于多回收煤炭资源、安全开采和保护地表形貌形态至关重要。

由于留设目的不同，不同煤柱要求的稳定时间也不同，但各

种煤柱都有一定的稳定性要求，即使临时煤柱也需要其在服务年限内保持稳定。煤柱稳定性是指在一定的时间内、一定的地质力和工程力的作用下，因开采后煤柱内应力重新分布而产生弹性变形或裂隙，但并不产生破坏的垮落和滑动。煤柱应当看成顶板—煤柱—底板整体中的一部分，更进一步讲，煤柱应放在整个开采系统中，这一系统包括煤柱、巷道、围岩和煤层与围岩之间的接触面。煤柱的失稳是由顶底板的失稳逐渐发展引起的，开采引起岩体中的载荷变化，当载荷增加时，煤柱边缘开始垮落，而煤柱中心部分承受了附加载荷。煤柱边侧的屈服或垮落，都将导致其发生缓慢或突变性的失稳。煤柱的失稳是一个由煤柱边缘向其内部逐渐发展的弱化过程。部分煤柱虽然在开采期间能够保持稳定支撑上覆岩层，但随着时间的推移，煤柱内部的核区剩余太小而不能再承载上覆岩层的重量时，煤柱将会失稳、坍塌、破坏。煤矿部分开采方法中，一处煤柱的失稳就可能会导致相邻煤柱的连续过载失稳，从而引起煤柱失稳的“多米诺”效应，这将引起采空区大面积的垮塌而导致巨大灾难。一个典型的例子是1960年1月南非科尔布鲁克（Coalbrook）煤矿900多个煤柱连续失稳导致437人死亡。同时，随着社会的发展，许多老矿区必将进行再次发展。但在老矿区内发展其他工业时，将来有可能坍塌的煤柱就成为潜在的灾害源。

较为典型的煤柱是条带开采留设的煤柱。条带开采法是部分开采法的一种，与长壁式全部陷落法开采不同，由于条带开采仅部分地采出煤层的煤炭，保留的部分煤炭以条带煤柱形式支撑上覆岩层，从而减少覆岩下沉，控制地表沉陷和变形，达到保护地表建（构）筑物、地形、地貌及地下结构的目的。尽管条带开采法有资源采出率低的缺点，但实践表明条带开采法是解决村庄及重要建筑物下压煤开采的切实可行的途径之一。据不完全统计，全国的“三下”压煤约有 140×10^8 t，其中建筑物下压煤为 87.6×10^8 t，占整个压煤量的63%，严重制约着矿井的生产和发展。随着城市和农村的飞速扩张，压覆煤炭越来越多，目前建筑

物下压煤量远远大于这一统计数字。老矿区如果不开采建筑物下压煤，将很难保证矿区计划产量，有的老矿区甚至会面临无煤可采、矿井关闭的局面。新矿区应从矿区可持续发展的战略高度进行规划，协调村庄下压煤开采问题，以保证矿区的可持续发展。

无论永久丢弃还是留待后期回收，保持煤柱长期稳定都是十分必要的。若不计煤柱的黏弹塑性特征，顶板应力调整及向采空区的弹塑性收敛变形，应在采空区形成的瞬间全部完成，当顶板的载荷不超过其强度值，则顶板长期稳定，其变形也不会进一步发展。然而事实并非如此，格雷（Grey R. E）和普鲁思（Pluthe R. W）通过研究指出，开采引起的地表下沉可能在多年后才发生。美国早期的房柱式开采，在开采后几十年、上百年后，由于煤柱失稳曾引起地面突然沉降，从而导致巨大危害；苏格兰一个报废矿 118 年后才发生了地表下沉破坏；波兰维利奇卡（Wieliczka）盐矿开采 140 年后地表突然塌陷，造成地面建筑物全部被毁；经调查，南非煤柱的失稳大多也是多年之后发生的。大量采矿工程的事实说明，煤柱及顶板的变形在开采之初快速增加，之后随时间推移而呈稳定状态，经过较长时间的损伤积累，变形再次急速增加，最后出现煤柱失稳或顶板断裂破坏。可见煤柱及顶板的变形与失稳是与时间因素密切相关的。所有岩体特别是中软弱岩体，在载荷的长期作用下，都具有岩体变形随时间延长而增大、岩体强度随时间延长而降低的流变性质。而对于深井煤柱，由于所受应力更大，其流变性质更加明显；同时深井煤柱与临近采场空间结构的运动稳定过程也需要更长的时间。然而，现有的条带煤柱尤其是深部条带煤柱稳定性的研究中大多未考虑时间因素。

从留设煤柱的作用来看，了解煤柱能保持多长时间的稳定是非常重要的。一般认为，随着时间的推移，煤柱强度将降低，开始处于稳定状态的煤柱在将来可能会失稳坍塌。研究煤柱的长期稳定性对减轻煤柱失稳造成的灾害具有积极的作用。同时，部分矿井煤炭资源即将开采完毕，为了延长矿井寿命，不得不考虑开

采以前“三下”开采时留设的煤柱。国外已经开始了房柱开采废弃煤柱回采的研究，国内也有了类似尝试，如淄博矿业集团岱庄煤矿正在开展膏体充填置换煤柱复采。因此，研究煤柱留设长时间后的稳定状态，可为煤柱资源的回收提供科学基础。

实际上，煤柱与其顶底板形成一个系统，煤柱的失稳不仅仅取决于煤柱的强度，如果顶底板为松软岩层且强度小于煤柱强度，煤柱会钻入顶底板而导致煤柱-顶底板系统的失稳。本书重点考虑时间因素对煤柱长期稳定性的影响，采用室内蠕变试验、数值计算、现场观测煤柱变形和受力状态等方法，研究深部条带煤柱的长期稳定性能。

1.2 条带煤柱稳定性研究概况

目前的条带开采中的煤柱稳定性分析，主要包括煤柱载荷计算、煤柱承载能力分析、煤柱宽度设计。在“三下”压煤条带开采中，煤柱载荷计算主要有有效区域理论、压力拱理论和 A. H. Wilson 两区约束理论。这些理论虽然作了一些近似和假设，但基本能满足工程需要，因此在国内外得到了广泛的应用。煤柱强度反映了煤柱支撑上覆岩层的承载能力，它是煤柱稳定性分析的基础。煤柱的强度取决于承载方向、煤柱尺寸、煤柱形状和岩体强度。岩体强度除了与岩石性质有关外，还与岩体内部裂隙属性有关，例如裂隙的方向、分布范围等。影响岩体强度的因素很多，有些因素很难测量且表现出明显的离散性，所以煤柱强度也表现出明显的离散性。煤柱设计是保证国家煤炭资源安全、经济开采的最重要因素之一。早期主要是根据实验和煤柱失稳经验来设计煤柱尺寸和巷道宽度，而那些煤柱的失稳直接导致了矿工死亡、设备损坏、资源丢失等灾难性后果。所有方法都未考虑煤层倾角、煤柱剥落、煤柱蠕变、煤柱内瓦斯抽放、水和湿度、采区（工作面）几何形状对煤柱的影响，解决的方法是通过加大煤柱设计宽度以保证更高的安全系数。人们留设更大尺寸的煤柱，因为这样虽然不能量化增加的“稳定”能在多长时间内保持有效，

起码可以使“稳定”煤柱变得“更稳定”，但煤柱的安全系数与其寿命没有量化的关系。大体来说，在相同条件下，高安全系数的煤柱比低安全系数的煤柱能维持更长时间的稳定，但除此之外煤柱安全系数与其寿命没有更明确的关系。此外，由于很难定量估计各种影响因素，致使煤柱设计难度较大。近年来，非线性科学理论在矿业工程领域得到了越来越广泛的应用，如神经网络理论已用于岩体力学参数的预测、地表沉陷及其建筑物损害程度的预测等方面，突变理论是用来研究不连续现象的一门新兴非线性科学，在采矿工程中也得到了广泛的应用。

1.2.1 煤柱稳定性研究的主要内容

煤柱稳定性的研究主要包括煤柱的载荷和强度（包括瞬时强度和长期强度）理论、煤柱的尺寸设计、煤柱稳定性分析等方面。

1. 煤柱载荷研究

按照极限强度理论，当煤柱所承受的载荷超过煤柱的强度时，煤柱就要破坏，此时的煤柱是不稳定的。煤柱工作载荷指煤柱承受的最大载荷，主要取决于地层层数、地层厚度等地质因素以及每层的弹性模量、围岩硬度和煤柱硬度等物理力学参数。如果煤柱所承受的载荷小于煤柱的强度，煤柱就是稳定的。因此，正确估算煤柱所承受的载荷是煤柱设计的关键步骤之一，计算煤柱所承受的载荷主要有有效区域理论、压力拱理论和 A. H. Wilson 两区约束理论等。

1) 有效区域理论

在广泛的开采布局中，条带煤柱的尺寸一般比较规则。有效区域理论假定各煤柱支撑着它上部及与其相邻煤柱平分的采空区上部覆岩的重量。煤柱的工作载荷是煤柱影响区域内的固定载荷。大多数条带开采中回采宽度较小，采空区内除直接顶垮落外，基本顶一般不垮落。垮落矸石不接顶，所以采空区不承载。因此，可以认为采出宽度上覆岩层的重量全部转移到所留煤柱宽度上，条带煤柱上的载荷 P 可由下式计算：

$$P = \frac{(a+b)\gamma H}{a} \quad (1-1)$$

式中 P ——煤柱平均载荷, MPa;
 a 、 b ——留设煤柱宽度和采出宽度, m;
 H ——平均开采深度, m;
 γ ——上覆岩层重力密度。

由于煤柱边缘的破裂和松动而引起煤柱有效承载面积减少, 因而应考虑一定的安全储备, 煤柱应力系数应增加为 1.1。相应的条带煤柱载荷计算公式为

$$P = \frac{1.1(a+b)\gamma H}{a} \quad (1-2)$$

应力系数是条带煤柱在规定最小围岩压力状态下的应力与围岩实际工作压力状态下的应力之比, 是个无量纲参数。

当煤体一侧未采、另一侧无限开采时, 采空区内距煤壁 0.3H 处矸石承载的载荷为 γH , 且该处与煤壁的应力按线性分布, 对有限采动情况进行叠加, 可以得到采空区内矸石承载情况下条带煤柱载荷 P 的计算公式为

$$P = \frac{(a+b)\gamma H}{a} - \frac{\gamma b^2}{1.2a} \quad (1-3)$$

2) 压力拱理论

压力拱理论认为, 由于采空区上方形成压力拱, 上覆岩层的载荷只有一少部分作用在直接顶上, 其他部分的上覆岩层载荷会向两侧的煤柱转移。最大压力拱的形状被认为是椭圆形, 其高度在采面上、下方分别约为采面宽度的 2 倍。压力拱的内宽 L_1 主要受上覆岩层的厚度及采深的影响, 压力拱的外宽 L_2 主要受覆岩内部组合结构的影响。如果采宽大于压力拱的内宽 L_1 时, 则载荷会变得较为复杂, 此时压力拱不稳定, 有可能崩溃并伴随大量的覆岩沉陷。即使采宽小于压力拱的内宽 L_1 , 其稳定性也随时间的变化而变化。

3) A. H. Wilson 两区约束理论

煤柱两区约束理论（或称渐进破坏理论）如图 1-1 所示，通过对煤柱的加载实验，发现在加载过程中煤柱的应力是变化的，从煤柱应力峰值到煤柱边界这一区段，煤体应力已超过了屈服点，并向采空区有一定量的流动，这个区域称为屈服区（或称塑性区），其宽度用 r 表示。屈服区向里的煤体变形较小，应力没有超过屈服点，大体符合弹性法则，这个区域被屈服区所包围，并受屈服区的约束，处于三轴应力状态，称为煤柱核区（或称弹性核区）。采空区承担的载荷与采空区内各点顶底板闭合量有关，采空区内各点的垂直应力与距煤壁的距离成正比，当该距离达到 $0.3H$ 时采空区内各点的垂直应力恢复至原始载荷 γH 。我国学者在研究了 A. H. Wilson 煤柱设计公式后认为该经验公式存在因简化而带来的问题：即将煤体的内摩擦角取固定值 36° ，简化了煤体极限强度的计算公式，而煤体内摩擦角对极限强度的影响很大，不应该用一个定值简化计算。

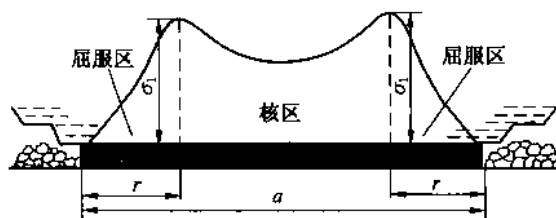


图 1-1 煤柱屈服区及其核区

上述理论虽然作了一定的近似和假设，但一般情况下仍能满足工程的要求，因而得到了广泛应用。应该指出，当煤柱尺寸不规则时，大宽高比的煤柱将承担更多载荷，这种煤柱的载荷目前尚无较好的计算方法。工作面较窄且顶板岩层相对较硬时，工作面顶板岩层能承担载荷，部分载荷转移到煤柱上；而当工作面宽度增加、顶板岩层强度降低直到不能形成支撑拱形顶板时，全部载荷不得不由煤柱承担。但由于坚硬程度很难定量确定且变化很

大，并且围岩特性、煤层与煤柱的相对位置关系、煤柱与煤柱的相对位置关系、煤柱强度等诸多因素都影响着煤柱载荷的大小，所以煤柱设计应基于全部载荷设计，同时尽可能考虑各主要因素的影响。

2. 煤柱强度研究

煤柱强度是指每单位煤柱面积上能承受的最大载荷，它是煤柱稳定性分析的基础。

1) 煤柱强度理论

目前国内使用较多的瞬时强度主要有 3 种：①核区强度不等理论，格罗布拉尔把煤柱核区强度与实际应力联系在一起，从而确定核区内不同位置的强度，提出了用于长条煤柱破坏包络面计算的通用公式。格罗布拉尔法在某种程度上与 A. H. Wilson 的两区约束理论极为相似，但由于建立的常数复杂，降低了其实用性。②大板裂隙理论，白矛将采空区沿走向剖面视为边界作用均布载荷的无限大板中一个很扁的椭圆孔口，利用弹性断裂理论推导出孔口端部煤柱距煤壁任一距离点的应力计算公式。③极限平衡理论，侯朝炯和马念杰研究了承载矿柱与顶底板的接触面上有整体内聚力条件下的任意三边尺比值的矿柱应力状态，并得到规则矿柱的顶面和侧面所受垂直应力的分布状态。

条带煤柱是一种在长期载荷作用下的受力结构体，由蠕变造成的应变能否趋于稳定，取决于上覆岩层作用于煤柱上载荷的大小以及煤柱能使这种蠕变量保持稳定的临界载荷值的大小。如果条带煤柱承受的恒定载荷小于这个临界值，那么煤柱即使产生蠕变，也只能是稳定蠕变而不会造成条带煤柱的破坏失稳，反之将出现不稳定蠕变。这样，在长期载荷的作用下蠕变量可能超过允许值，最终导致条带煤柱的破坏失稳。由于流变作用的影响，条带煤柱的强度随上覆岩层作用的时间延长而降低，其最低值就是时间趋于无限长时的强度。该值是煤柱蠕变破坏的最低应力值，即条带煤柱的长期强度。煤柱的长期强度是一个很重要的流变力学指标，在指标范围内煤柱可以长期受载，其蠕变变形将趋于某

一定值。在煤柱设计时，若仅参照煤柱的瞬时强度而不考虑煤柱的长期强度，就不能确保条带煤柱的长期稳定性。因此，在进行煤柱强度计算时，应以煤柱长期强度作为强度的计算指标。刘沐宇等人认为岩石长期强度为瞬时强度的 70% ~ 75%；也有学者对煤岩进行了蠕变试验，得出煤岩长期强度为瞬时强度的 37.9% ~ 46.3%。

2) 煤柱强度影响因素

岩石的强度与其尺寸、形状、边界条件和加载方式有关。煤柱强度不仅与煤块的强度有关，且取决于煤柱尺寸、煤柱内部地质构造、煤柱的自由表面、煤柱与顶底板的界面摩擦和黏结力、围岩岩性、煤柱侧向力、开采方式及载荷的时间演化等诸多因素。

(1) 煤柱尺寸。裂隙岩石的强度依赖于其尺寸变化，如方形岩石的强度随宽高比的增加而增大。对于煤样也是如此，随着载荷的增加，煤样趋于膨胀，而煤柱的侧向力、煤样与顶底板的界面摩擦和黏结力则对其进行限制。随着煤柱宽高比的增加，这种效应更加明显，也说明了煤柱强度随着煤柱宽高比的增加而增加的原因。

(2) 煤柱内部地质构造。实际上煤体是各向异性体，内部的节理、层理、弱面、夹层等因素都弱化煤柱的强度，针对不同的地质条件应具体分析，国内外学者普遍认为现场实测是必要的。实测结果也已证实，煤柱强度对于不同煤层、不同区域变化较大。煤柱内部的地质构造可以对此做出合理的解释。

(3) 煤柱的自由表面。煤柱的自由表面形状是凹凸不平的，且并非垂直于顶底板，煤柱自由表面的应力分布、应力集中的研究将有助于加深认识煤柱的力学行为。

(4) 煤柱与顶底板的界面摩擦和黏结力。研究认为，坚硬顶底板通过摩擦效应限制煤柱的水平变形，即增加了煤柱屈服区内核区的水平应力，相应地增加了围压；软弱顶底板不能限制煤柱的水平变形，而实际上是使煤样内产生水平拉力，削弱了煤柱

强度，最终将导致煤柱拉断破坏。

(5) 围压。一般来说，随围压的增加，岩石的抗压强度显著增加。这表明了煤柱的支护如固帮、加网、堆砌和锚固是非常有利的。

(6) 采场动态因素。采场动态因素是指水平应力与垂直应力比、采空区垮落状态、顶底板破坏状态、煤柱的自身破坏、开采方式和工作面推进等，这些因素都会影响煤柱的强度。

煤柱载荷与煤柱强度是煤柱宽度计算与稳定性分析的基础，两者有待依靠实验和理论的结合进一步更真实地确定。

3. 煤柱宽度计算和稳定性分析

关于煤柱稳定性分析及其屈服区宽度计算，一直是国内外采矿领域极为关注的重要研究课题，并先后提出了一系列煤柱屈服区宽度的理论计算公式，如威尔逊理论、大板裂隙理论、极限平衡理论等。这些理论都是以“煤柱可以分为屈服区和核区，核区受屈服区约束”的论断为理论基础，所提出的公式各有特点和应用条件。

一般来说，煤柱宽度计算应按以下步骤进行：①收集地质资料（包括关于地表、地层和煤层），了解工程要求，确定开采方法，尽量现场测定一些计算参数（如煤体抗压强度、剪切强度等）；②实验室测定煤岩参数；③以地表不产生波浪形下沉盆地为原则或按面积回采率来初步确定采出宽度；④计算煤柱载荷；⑤确定安全因子 F ，由 $\sigma_s = FP$ 计算煤柱强度；⑥强度公式校核；⑦考虑现场各影响因素，进行修改评价。

煤柱宽度设计过程中，除了按上述步骤进行设计和检验外，还应该检验煤柱的核区率。核区率必须满足以下公式：

$$\rho = \frac{a - 2r_p}{a} \quad (\rho_{\text{软}} \geq 0.65, \rho_{\text{中硬}} \geq 0.85, \rho_{\text{硬}} \geq 0.90) \quad (1-4)$$

式中 r_p ——煤柱塑性区宽度。

国内外学者对极限平衡理论进行了大量补充，逐步完善了极限平衡理论，其基本假设为：①煤柱由屈服区和核区组成，已破