

深部软弱煤岩巷道 稳定性判别及合理支护选择

SHENBU RUANRUO MEIYAN HANGDAO
WENDINGXING PANBIE JI HELI ZHIHU XUANZE

吴德义 著



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

深部软弱煤岩巷道 稳定性判别及合理支护选择

吴德义 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2018

内 容 提 要

本书在分析巷道表面变形随时间变化以及深部软弱煤岩位移梯度分布特征的基础上,提出以巷道表面变形速度衰减系数以及煤岩位移梯度作为判据对煤岩稳定性进行判别,确定了临界容许值。在分析深部软弱煤岩巷道复合顶板结构面分离机理以及层间离层分布规律的基础上,提出根据层间离层对结构面分离的稳定性进行判别并确定层临界值的方法。通过分析不同巷道支护形式能提供的极限承载力、深部软弱煤岩变形保持稳定所需支护反力以及复合顶板结构面分离保持稳定所需支护反力,确定了深部软弱煤岩巷道的合理支护形式及参数,将其应用于工程实际,取得了预期效果。

本书可供从事采矿工程、矿井建设工程、岩土工程、地下工程等专业的设计及施工人员阅读,也可供高校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部软弱煤岩巷道稳定性判别及合理支护选择/吴德义著.

—北京:冶金工业出版社,2018.11

ISBN 978-7-5024-7924-4

I. ①深… II. ①吴… III. ①软煤层—巷道—稳定性—研究 ②软煤层—巷道支护—研究 IV. ①TD322 ②TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 237625 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 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹 蕊

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7924-4

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

2018 年 11 月第 1 版,2018 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm;12.25 印张;238 千字;185 页

59.00 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

深部软弱煤岩巷道帮部为软弱煤岩，顶板为复合顶板，由于帮部煤岩呈现显著变形及强流变性，顶板产生显著结构面分离，所以选择合理支护保持深部软弱煤岩稳定对于深部煤炭安全高效持续开采至关重要。但目前该类巷道支护还不令人满意，近年来支护成本虽数倍增长，但巷道返修率仍高居不下，冒顶及片帮事故频繁发生。对深部巷道煤岩松动破碎及其机理、复合顶板离层及其机理进行研究，选择合理煤岩稳定性标准及判据、复合顶板结构面离层稳定性及判据，在此基础上选择合理巷道支护形式及支护参数具有重要的工程实用价值。为此，作者与安徽淮北矿业股份有限公司、国投新集能源股份有限公司等大型国有企业合作开展了相关研究，申报了安徽省科技攻关项目“深部矿压综合治理技术研究”并获批，申报了国家自然科学基金项目“深井复合顶板离层分离及稳定性研究”（编号 50974001）、“深部煤岩稳定性量化判别研究”（编号 51374009）以及“深部煤巷帮部预应力锚索压缩拱合理承载机制及计算理论研究”（编号 51674005）并获批，开展了深部软弱煤岩稳定性判别、深部软弱煤岩巷道复合顶板离层稳定性判别研究，以此为基础，确定了深部软弱煤岩巷道合理支护形式及参数选择的一般方法，将其应用于安徽淮南及淮北等矿区工程实际，保证了深部煤炭安全高效开采。本书对深部软弱煤岩变形及巷道复合顶板结构面离层机理进行了研究，其稳定性判据及临界容许值的确定具有学术研究价值。

本书主要由安徽建筑大学吴德义教授根据课题组多年研究成果撰写而成。其中，苏少卿副教授参与了第1章、第2章的撰写，王爱兰讲师参与了第3章~第5章的撰写，周利利讲师参与了第6章、第7章的

撰写。

在此，感谢国投新集能源股份有限公司、淮北矿业股份有限公司以及合肥市轨道交通公司提供的现场试验场地，感谢安徽建筑大学建筑健康监测与灾害预防国家地方联合工程实验室提供的实验室实验场地，感谢国家自然科学基金项目（50974001、51374009、51674005）、安徽省自然科学基金项目（1608085ME105）等对研究课题提供的资金资助！

感谢安徽建筑大学专业综合改革试点项目“城市地下空间工程专业综合改革试点”以及校企合作实践教育基地项目“安徽建筑大学与合肥市轨道交通公司实践教育基地”提供的质量工程项目资金资助。

安徽建筑大学有关部门及领导给予作者很多关心和帮助，在此表示感谢！

在本书撰写过程中，参考了有关文献，在此向文献作者表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2018年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状	1
1.2.1 深部软弱煤岩巷道帮部煤岩松动破碎变形分析	1
1.2.2 深部软弱煤岩巷道帮部表面变形随时间演化 不同阶段相关性分析与松动破碎关联性分析	4
1.2.3 煤岩稳定性标准与预分类及工程判据研究	4
1.2.4 深部软弱煤岩巷道复合顶板离层规律研究	5
1.2.5 深部软弱煤岩巷道合理支护形式及支护参数选择	7
1.3 研究内容	9
1.3.1 深部软弱煤岩稳定性判别	9
1.3.2 深部软弱煤岩巷道复合顶板离层稳定性判别	9
1.3.3 深部软弱煤岩巷道合理支护形式及参数研究	9
1.4 研究成果工程应用实例	10
2 深部软弱煤岩变形稳定性判据	12
2.1 基于深部软弱煤岩巷道表面变形随时间变化的稳定性判据	12
2.1.1 深部软弱煤岩变形随时间变化规律分析	12
2.1.2 深部软弱煤岩巷道表面变形随时间变化的典型形式	16
2.1.3 体积不可压缩巷道表面变形和围岩塑性圈形成、 发展关系分析	17
2.1.4 基于二次蠕变的巷道围岩稳定性判别	22
2.1.5 深部巷道软弱煤岩稳定性判别	24
2.1.6 深部软弱煤岩稳定性早期判别	25
2.1.7 深部软弱煤岩二次支护合理时段确定	26
2.1.8 基于深部软弱煤岩二次蠕变速度衰减系数的工程判别	26
2.2 基于位移梯度的深部软弱煤岩稳定性判别	28
2.2.1 基于位移梯度的深部软弱煤岩巷道松动圈厚度估算	28

2.2.2	基于位移梯度的巷道煤岩碎胀程度估算	35
2.2.3	基于位移梯度的松动圈厚度及碎胀程度的工程实测	41
3	深部软弱煤岩复合顶板层间离层稳定性判别	46
3.1	复合顶板离层	46
3.1.1	顶板离层	46
3.1.2	测量方法	46
3.1.3	复合顶板层间离层分离方法	47
3.2	复合顶板层间离层数值计算模型	55
3.2.1	计算模型	55
3.2.2	复合顶板材料力学参数	56
3.2.3	网格划分	56
3.2.4	层间结构面模拟方法	57
3.3	深部软弱煤岩巷道复合顶板层间离层数值模拟正交试验	61
3.3.1	正交试验简介	61
3.3.2	正交试验方案	61
3.3.3	数值计算结果及分析	63
3.3.4	深部开采复合顶板结构面分离力学机理	69
3.3.5	深部巷道复合顶板层间离层分布现场实测	70
3.4	深部开采复合顶板结构面分离稳定性标准	71
3.4.1	计算结果及分析	71
3.4.2	深部巷道复合顶板结构面分离范围临界值确定	73
3.5	深部软弱煤岩巷道结构面层间离层及离层临界值确定	75
3.6	深部软弱煤岩巷道复合顶板离层稳定性影响因素分析	77
3.6.1	深部软弱煤岩巷道结构面分离范围及临界值影响分析	77
3.6.2	深部软弱煤岩巷道复合顶板层间离层及临界值影响 因素分析	80
3.6.3	深部巷道复合顶板离层稳定性合理判据选择及稳定 性工程判别	82
3.6.4	深部巷道复合顶板结构面离层稳定性工程判别	82
4	深部软弱煤岩巷道合理支护形式及参数选择	83
4.1	煤岩-支架相互作用分析	83
4.1.1	深部软弱煤岩巷道表面变形理论计算	83
4.1.2	深部软弱煤岩巷道表面变形影响因素	84

4.1.3 支架受载现场实测	91
4.1.4 煤岩-支架相互作用分析	94
4.1.5 现场实测结果分析	96
4.1.6 煤岩-支架相互作用分析	97
4.2 深部软弱煤岩巷道不同支护形式极限承载力和合理支护参数确定	97
4.2.1 梯形棚支护容许承载力和合理支护参数确定	97
4.2.2 U形棚支架容许承载力和合理支护参数确定	100
4.2.3 锚杆支护参数确定	101
4.2.4 锚杆与金属支架组合支护合理支护参数确定	102
4.3 深部软弱煤岩巷道合理支护形式及参数选择	103
4.4 深部软弱煤岩巷道预应力锚杆(索)组合支护合理支护参数选择	104
5 新集三矿-550m 水平运输巷合理支护形式及参数确定	112
5.1 工程概况	112
5.2 原巷道支护不稳定性分析	113
5.3 合理支护形式和参数确定	114
5.4 不同支护形式极限承载力	114
5.4.1 梯形棚支架极限承载力	114
5.4.2 U形棚支架极限承载力	115
5.4.3 锚杆支护极限承载力	115
5.5 深部软弱煤岩巷道合理支护形式选择	115
5.5.1 修复巷梯形棚支护巷道煤岩表面变形实测	115
5.5.2 合理支护形式的“动态”选择	119
5.6 不同支护形式合理支护参数确定及现场验证	120
5.6.1 U形棚合理支护参数确定及现场验证	120
5.6.2 修复巷部分地段梯形棚支护合理参数确定及现场验证	121
5.6.3 锚喷支护现场使用	122
5.6.4 水泥背帮设计	124
5.7 “适时”及“适地”帮部锚杆二次支护	125
5.8 新集三矿-550m 运输巷合理支护形式选择及参数确定操作流程	126
5.9 支护效果对比	128
6 新集一矿厚煤层全煤巷道合理支护形式及参数选择	129
6.1 工程概况	129
6.2 全煤巷道围岩变形特点	129

6.3 梯形棚支架受荷及稳定性分析	131
6.3.1 梯形棚腿最大容许承载力估算	131
6.3.2 梯形棚梁最大容许承载力估算	132
6.4 全煤巷道梯形棚支护存在问题分析	133
6.4.1 梯形棚梁弯曲、扭转分析	133
6.4.2 梯形棚腿弯曲、扭转分析	133
6.5 围岩变形保持稳定支护反力确定	134
6.6 新集一矿全煤巷道合理支护形式选择	134
6.7 新集一矿全煤巷道合理支护参数确定	135
6.7.1 梯形棚支护参数	135
6.7.2 锚杆支护参数确定	135
6.7.3 锚索支护参数	135
6.8 211302 风巷合理支护形式及参数确定	136
6.8.1 工程概况	136
6.8.2 合理支护形式选择	136
6.8.3 合理支护参数确定	136
6.9 新集一矿 261302 风巷合理支护形式选择及参数确定	142
6.9.1 工程概况	142
6.9.2 原巷道支护效果	143
6.9.3 合理支护形式确定	143
6.9.4 合理支护参数	143
7 口孜东矿 11 煤顶板离层临界值确定及合理支护选择	146
7.1 工程概况	146
7.2 巷道支护	147
7.3 顶板地质条件	147
7.4 顶板离层监测	147
7.5 现场实测测点布置	148
7.6 复合顶板层间离层数值模拟分析	148
7.6.1 数值计算模型	148
7.6.2 数值计算结果及分析	149
7.7 顶板离层现场观测及结果分析	153
7.7.1 巷道顶板离层现场观测	153
7.7.2 顶板离层仪观测	154
7.7.3 钻孔摄像头观测	155

7.7.4 十字拉线法观测	156
7.8 现场实测结果	156
7.8.1 KJ327-F 型矿压监测分站现场实测结果	156
7.8.2 HBY-300C 型顶板离层仪的现场实测结果	158
7.8.3 YTJ20 型岩层探测记录仪实测结果	161
7.8.4 十字拉线法巷道帮部及顶底位移观测	166
7.9 数据处理	169
7.9.1 复合顶板离层随时间变化	169
7.9.2 复合顶板层间离层分离	171
7.10 工程实测结果分析	172
7.10.1 多点位移计实测结果分析	172
7.10.2 顶板离层仪实测数据分析	172
7.10.3 十字拉线法实测数据分析	173
7.11 层间离层分离	173
7.12 钻孔摄像法对分析结果验证	177
7.13 口孜东矿 11-2 煤巷道顶板层间离层临界值确定	178
7.14 口孜东矿 11-2 煤巷道顶板塑性变形临界值确定	178
7.15 口孜东矿 11-2 煤巷道顶板离层临界值确定	179
7.16 口孜东矿 11-2 煤巷道顶板离层稳定性判别	179
7.17 巷道顶板合理支护形式及参数分析	179
7.17.1 巷道顶板离层特征分析	179
7.17.2 深部软弱煤岩巷道复合顶板合理支护形式及参数选择	180
参考文献	182

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

我国煤炭目前已探明的储量中约 53% 埋深超过 1000m, 随着开采规模增大, 全国大部分矿区如淮南、淮北、兖州、新汶、开滦、淄博等开采深度均超过 800m, 部分矿井采深已达到 1000 ~ 1300m, 而深部巷道一般都布置在软弱煤岩中, 巷道两帮为软弱煤层, 顶板为复合顶板。由于巷道埋置深、两帮煤岩软弱松散破碎以及构造应力存在且常受采动影响, 帮部煤岩呈现大变形及强流变性, 顶板产生显著结构面分离。巷道帮部大范围松动破碎及显著顶板层间离层引起深部巷道煤岩变形具有明显的分层性, 一般情况下首先是两帮煤体被迅速挤出, 紧接是强烈地鼓, 然后是顶板下沉。因此, 选择合理支护保持深部煤岩稳定, 对于深部煤炭安全高效持续开采至关重要。

迄今为止, 深部开采煤巷煤岩支护效果还不十分令人满意, 有资料表明: 近年来支护成本虽数倍增长, 但巷道返修率仍高达 200%, 冒顶及片帮事故频繁发生, 安全事故率约占矿山主要七类事故的 30% 以上。因此, 对深部巷道煤岩松动破碎及其机理进行研究、复合顶板离层及其机理研究, 选择合理煤岩稳定性标准及判据、复合顶板结构面离层稳定性及判据, 在此基础上选择合理巷道支护形式及支护参数具有重要的工程实用价值。

1.2 研究现状

1.2.1 深部软弱煤岩巷道帮部煤岩松动破碎变形分析

近年来广大学者和工程技术人员对此进行了广泛研究, 逐步认识到:

(1) 深部开采软弱煤岩有较大自承载力, 煤岩中松动破碎普遍存在, 应容许煤岩产生一定范围及程度破碎;

(2) 煤岩表面变形主要是由松动圈内破碎煤岩碎胀引起的, 支护主要控制煤岩“过度”碎胀, 只要煤岩碎胀在容许临界范围内, 变形就能保持稳定;

(3) 煤岩显著变形破碎不是在巷道开挖后立即产生, 而是随时间的增加不断积累, 呈现显著流变特点, 变形是否稳定、碎胀是否达到容许临界值在开挖巷道初期并不能立即判断, 一般需 2 ~ 3 月, 有些甚至 1 ~ 2 年。

如图 1-1 所示, 以圆形巷道为例, 深部开采煤层巷道周煤形成松动破碎区、

塑性软化区、塑性硬化区、弹性区。塑性软化区强度随时间衰减,当衰减至残余强度时,该范围内塑性软化区转化为松动破碎区,松动圈发展主要由塑性软化区转化为松动圈的演化确定。煤压不仅能使应变软化阶段岩石衰减后的残余强度提高^[1~8],而且能阻止塑性软化区向松动区转化,要保持煤岩变形稳定,必须提供足够的煤压保证塑性软化区转化为松动破碎区的范围随时间演化趋于稳定,该煤压大小和松动圈内破碎岩石碎胀显著相关,必须合理确定松动圈内破碎岩石碎胀临界容许值。深部开采支护反力可以显著地控制破碎岩石碎胀,合理的支护反力应控制破碎岩石碎胀在容许碎胀附近。深部开采煤层巷道帮部煤岩表面变形主要由煤岩松动圈内煤岩破碎碎胀引起,煤岩表面容许变形是破碎岩石碎胀达到容许碎胀时的大小,超过临界容许碎胀,煤岩表面变形将处于加速阶段。碎胀主要由松动圈厚度和破碎程度确定^[5],但由于对松动圈厚度和破碎程度缺乏较为“量化”的认识,采用什么指标来定量表达煤岩容许碎胀,深部开采煤岩容许碎胀到底有多大,这些煤岩稳定性“量化”标准的科学问题没有解决,也就不能较为“量化”地选择合理支护形式及参数。这使得目前支护形式及参数选择只能从经验出发,造成安全事故频繁发生。

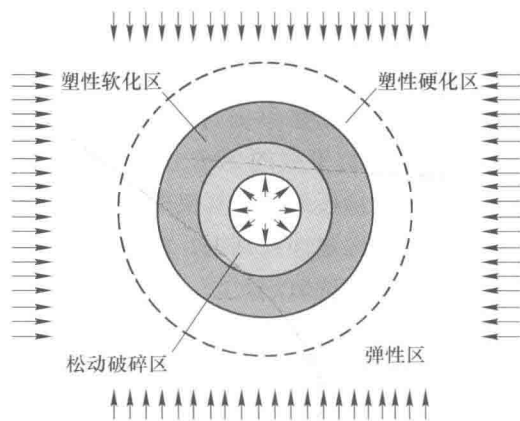


图 1-1 深部巷道煤岩分区示意图

由于煤岩表面变形工程易测,根据煤岩表面变形对煤岩稳定性进行判别有工程实用价值。深部巷道软弱煤岩显著流变,煤岩表面变形是否达到临界容许值必须经过较长时间才能判别,但由于目前对煤岩表面变形与松动破碎关联性以及煤岩变形不同阶段随时间演化相关性认识不够,无法找到和稳定性显著相关的煤岩初期变形特征量作为工程判据对稳定性发展趋势进行早期推断,只能待巷道掘进较长一段距离后,才对煤岩稳定性进行判别,有时不得不进行较大范围返修。

关于煤岩松动破碎变形及随时间演化分析,目前主要采用理论分析、数值模拟及现场实验方法。

分析圆形巷道破碎区及塑性区半径确定方法已有报道,但主要采用静态分析方法;有关文献理论分析得出了圆形巷道煤岩表面变形随时间的演化,但是以煤岩处于塑性体积不可压缩为前提;陈建功、贺虎、张永兴考虑巷道开挖的动力作用,由巷道周边的拉应变确定破碎区及煤岩表面变形随时间的演化,然后根据弹塑性静力分析,确定塑性区半径,但认为煤岩松动圈是由洞壁煤岩的瞬时卸载引起弹性波对煤岩动力作用形成的。目前理论分析得出的解析解是在特殊条件下并作了一定假设得出的,针对目前深部开采煤层巷道复杂条件,很难得出具体解析解,作了简化的结果和工程实际有很大差距,但根据理论分析对煤岩松动破碎变形大小及随时间演化作定性分析具有一定的参考价值。

采用数值模拟方法分析煤岩蠕变及损伤破碎随时间演化已得到广泛应用,常用的 ANSYS 和 FLAC 软件都建立了较为通用的计算模型,但一般多建立在黏弹、黏塑性基础上,对分析深部开采煤岩蠕变及损伤破碎随时间的演化具有一定局限性,应对模型进行修改。深部开采煤岩容许产生非线性大变形,反映煤岩加速蠕变过程,考虑岩石变形损伤、裂纹发生与发展的非线性损伤蠕变数值计算模型可以更充分反映深部开采煤岩蠕变不同阶段变化特点及煤岩裂隙的形成与发展。为此,很多学者如 G. N. Boukharov、M. W. Chanda、余成学、范庆忠、高延法、李连崇、徐涛卜、唐春安等都进行了该方面研究,计算和工程实测结果吻合较好,取得了令人满意的效果。蠕变参数可以通过实验室实验或工程反演获得,损伤对煤岩蠕变及裂隙形成发展的影响可用损伤因子反映,损伤因子可用不同方法表示。煤岩表面蠕变变形在实验室及现场容易得到。实验室采用扫描电镜法、声发射法以及现场采用钻孔摄像技术可以观测煤岩中裂隙形成、演化过程,可以通过多点位移计测量煤岩中不同位置位移从而判断煤岩松动破碎程度。现场及实验室结果可以对数值计算模型的合理性进行验证。已有研究成果表明:随着建立的数值计算模型与工程实际相符度明显提高,计算精度已能较好符合工程要求。在理论分析基础上,建立合理数值计算模型,选择合理参数,采用数值模拟结合实验室、现场实验及工程实测可以较好分析煤岩松动破碎。本书通过选择合理 FLAC3D 数值计算模型,采用数值模拟方法计算不同条件深部巷道软弱煤岩松动圈厚度及分布,现场实测表明能较好符合工程实际。工程实测由于直接和工程实际结合,测试精度较高。目前,松动圈厚度及破碎程度测试通常有声波法、多点位移计法、地质雷达法等。随着钻孔摄像技术应用,通过获得不同时刻煤岩破碎、裂隙发展范围及程度的数字化岩芯彩色照片,可以对松动圈扩展及煤岩破碎程度随时间的演化进行定量分析,且和传统的声波法比较,测试精度也未降低,现已用于深部煤巷煤岩破碎观测,效果较好。由于深部开采煤岩特别是煤巷煤岩不均匀性,原始裂隙较多,为避免误判,可以采用煤岩裂缝圆形度指标对煤岩松动圈厚度进行判别,采用和煤岩破碎体积碎胀系数显著相关的破碎块度指标对煤

岩破碎程度进行分析。采用多点位移计测得煤岩内部不同位置变形,结合拉线法测量巷道表面变形,可以分析距巷道表面不同距离各测点及巷道表面变形随时间的演化,依据经验确定煤岩松动圈厚度及破碎程度随时间的演化。已有研究成果及大量工程实践表明:煤岩失稳破坏是从局部关键部位开始的,为此,必须首先找出巷道断面最易发生失稳的关键部位,分析该部位煤岩松动破碎变形随时间的演化,确定该部位松动圈内破碎岩石碎胀临界容许值。

1.2.2 深部软弱煤岩巷道帮部表面变形随时间演化不同阶段相关性分析与松动破碎关联性分析

如图 1-2 所示,深部软弱煤岩表面变形随时间变化可分为减速阶段、等速阶段和加速阶段。

深部软弱煤岩表面变形主要是由于松动圈内破碎岩石碎胀引起的,煤岩表面变形随时间演化的不同阶段和松动圈厚度、破碎程度随时间的演化显著相关,煤岩表面变形是否出现加速阶段与煤岩碎胀是否达到临界容许碎胀直接相关,但较为定量地分析两者的相关性还未有报道。

已有研究表明:煤岩变形不同阶段显著相关;是否进入加速阶段,与等速阶段变形速度大小即与煤岩二次蠕变速度衰减快慢有较为显著关系,且该阶段和减速阶段变形特征密切相关。可以通过煤岩二次蠕变速度衰减的快慢来判别煤岩稳定性,但目前还未有相关报道。

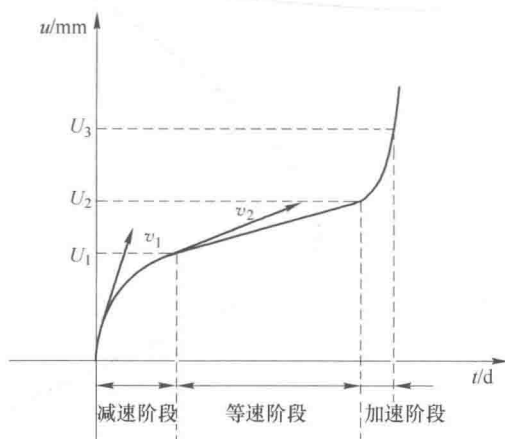


图 1-2 深部软弱煤岩表面变形随时间变化的不同阶段

1.2.3 煤岩稳定性标准与预分类及工程判据研究

煤岩松动圈是多种因素共同作用出现于巷道周围的圈层松动体,深部软弱煤

岩松动圈普遍存在。董方庭教授等在大量现场和实验研究基础上,认为支护对象是松动圈发展过程中的碎胀变形(碎胀力),提出可以采用工程实测的松动圈厚度对煤岩稳定性进行分类,并依此选择合理支护形式的著名松动圈理论。由于理论直观,操作性强在工程中得到广泛应用,取得了显著效果。但由于煤岩碎胀是松动圈内破碎岩石碎胀累积,应由煤岩松动圈厚度和煤岩破碎程度共同确定,该理论仅以工程实测的松动圈厚度对煤岩稳定性进行分类,并未定量确定煤岩碎胀,支护选择只能是经验与理论参半。当煤岩松动圈厚度和碎胀显著相关时,该理论有较好的适用性;但当巷道埋深超过一定值,随煤矿开采深度进一步增加,松动圈厚度增长十分缓慢,测量误差都可能显著影响测量结果的可靠性,而工程实践表明煤岩碎胀却显著增加,此时用松动圈厚度对煤岩稳定性进行判别已明显不合适。这一点早在1996年靖洪文、董方庭等教授对开滦矿务局赵各庄矿开采深度为343.0~1159.0m不同水平中细粉砂岩巷道煤岩松动圈的实测结果得到证明,对实测数据进行拟合分析,可以看出当原岩应力与岩石抗压强度比值超过一定范围,松动圈厚度几乎不再变化。刘刚、宋宏伟所做数值模拟结果也说明了这一点,其课题组不同埋深煤巷松动圈厚度的工程实测结果与此也基本一致;此时,地应力增加主要使松动圈内岩石破碎程度显著增加,从而使煤岩碎胀显著增加。对于深部软弱煤岩,应选用综合反映松动圈厚度与破碎程度指标来量化松动圈内煤岩碎胀并确定容许值,从查阅资料看,该方面研究还未有报道。基于多点位移计实测巷道煤岩位移,由于操作简单方便在工程中已广泛应用,根据实测结果经验分析煤岩松动圈厚度在工程上已有应用,但量化判别煤岩松动圈厚度还未有报道。深部巷道软弱煤岩松动破碎区内位移分布与塑性区、弹性区范围明显不同,根据深部巷道软弱煤岩位移场分布特征,选择合理指标估算深部巷道软弱煤岩松动圈厚度有工程实用价值。可以采用工程中常用的多点位移计工程实测深部煤层巷道软弱煤岩不同测点位置位移,得出测点位移随距巷道表面距离衰减量化表达式,进而获得测点位移梯度随距巷道表面距离衰减量化表达式。根据不同条件下处于松动破碎临界状态深部巷道软弱煤岩位移梯度值基本相同的特征及其临界容许值,结合位移梯度随距巷道表面距离衰减回归方程,估算深部巷道软弱煤岩位移梯度取临界容许值时松动圈的厚度。通过现场直接实时获得松动圈厚度进而及时判别深部巷道软弱煤岩稳定性及其支护合理性。通过分析深部煤巷帮部煤岩位移场分布,得出位移梯度的分布规律,在分析位移梯度与碎胀关联性基础上,得出深部煤巷帮部煤岩松动破碎程度及其碎胀分布特征。

1.2.4 深部软弱煤岩巷道复合顶板离层规律研究

深部软弱煤岩巷道顶板普遍为复合顶板,由于巷道埋置深,两帮为软弱煤

层,复合顶板结构面层间离层不稳定而产生冒顶事故时有发生,必须采用合理判别标准和依据对复合顶板层间离层稳定性进行判别。目前,工程中主要以结构面层间离层值作为稳定性判据,通过多点位移计工程实测结构面中部层间离层大小并和临界值比较来判断层间离层稳定性,临界值确定从工程经验出发,往往整个矿区复合顶板层间离层临界值取相同值,缺乏理论依据,和工程实际不尽相符,造成安全隐患。必须分析深部软弱煤岩巷道复合顶板产生不稳定层间离层的力学机理,合理确定层间离层稳定性判别标准,弄清结构面层间离层和结构面分离之间相关性,合理确定层间离层临界值。影响层间离层的主要因素有原岩应力、复合顶板岩性、巷道断面宽度及复合顶板结构面特性等。本书通过数值模拟不同条件下的结构面受力及复合顶板层间离层特点,分析影响结构面层间离层的因素、层间离层的力学机制以及稳定性标准,确定以层间离层值作为稳定性的判据。深部软弱煤岩巷道复合顶板总离层中含有塑性变形,工程中多点位移计测得的离层值为总离层,包括层间离层和塑性变形两部分,为对复合顶板层间离层稳定性进行判别,必须将层间离层从总离层中分离,本书通过对层间离层和塑性变形的不同特点进行分析,确定了将层间离层从总离层中分离的方法。顶板离层是地应力、煤岩力学性质、煤岩体结构、锚杆参数、巷道断面等诸多因素综合作用的结果。顶板离层临界值是顶板由稳定向不稳定转化的一个判定指标。找出巷道顶板离层的变化规律,确定顶板离层临界值就显得尤为重要,具有十分重要的工程实用价值。工程实践中一般通过多点位移计测量锚固区内外复合顶板离层并与临界值比较对稳定性进行判别,但多点位移计工程实测值为锚固区内外复合顶板总离层,包含层间离层和塑性离层两部分,深部软弱煤岩巷道复合顶板塑性变形一般较为显著,塑性变形临界值也较大,如安徽淮南新集矿区复合顶板塑性离层临界值可达200mm。而目前工程判别中,离层临界值一般采用层间离层临界值,取值一般较小,工程中将实测的深部软弱煤岩巷道复合顶板总离层和层间离层临界值比较对离层稳定性进行判别不尽符合实际,必须将总离层分为层间离层和塑性变形。

层间离层、塑性变形临界值和地质条件密切相关,塑性变形临界值随复合顶板岩性不同而不同,层间离层临界值和复合顶板岩性、构成以及结构面力学特性紧密相关。但工程中临界值确定往往从经验出发,整个矿区复合顶板层间离层临界值取相同值,缺乏理论依据,和工程实际不尽相符,造成安全隐患。为此,必须分析深部巷道复合顶板产生不稳定层间离层的力学机理,弄清结构面层间离层和结构面分离之间的相关性,合理量化确定层间离层临界值。层间离层临界值量化确定不仅具有工程实用价值,同时,由于涉及层间离层与塑性离层特征分析(为区分层间离层和塑性离层),结构面分离及离层力学机制研究等机理性研究,具有重要的学术研究价值。

1.2.5 深部软弱煤岩巷道合理支护形式及支护参数选择

目前,深部软弱煤岩巷道支护形式及参数的选择仅从经验出发,缺乏“量”的标准,往往造成待巷道变形失稳后才知道该支护形式不合理。如何较为定量地选择合理的支护形式及参数已经成为广大工程技术人员最关心的问题。考虑煤岩-支架的相互作用,充分利用煤岩本身自承载力,容许煤岩产生一定变形,采用合理支护形式对煤岩进行支护已成为“共识”,现场工程技术人员进行巷道支护设计时,在支架和巷道保留一定的预留层厚度或将巷道设计断面扩大就是运用了该原理,但对容许煤岩变形到何种程度还缺乏较为准确的“量”的认识,往往根据经验确定煤岩表面的容许变形,造成有时煤岩变形较小,煤岩自承载力不能充分发挥,巨大的塑性能得不到充分释放而造成支架受荷过大,有时煤岩变形较大,煤岩塑性能虽能得以充分释放,但煤岩强度已经基本丧失,转加到煤岩的是失去自承能力的煤岩巨大载荷,使支架受荷过大。如果能确定煤岩变形保持稳定时煤岩表面的容许变形,同时确定深部软弱煤岩巷道表面变形与支护反力之间的量化关系,就能确定巷道变形保持稳定时所需的临界支护反力,再依据不同支护形式能提供的极限承载力,进而就能选择合理支护形式及支护参数。研究煤岩表面变形随时间的变化规律,可以在早期对煤岩稳定性进行判断,从而能够及时确定合理支护形式和参数。帮部煤岩常用支护形式有:以锚杆及锚索支护为主的锚杆(索)支护系列,以工字钢梯形棚支护及可缩性U型钢支护为主的架棚支护,锚杆(索)、架棚以及与煤岩注浆相结合的联合支护,针对不同地质条件采用合理支护形式是保证软岩巷道煤岩变形稳定的关键。巷道埋深、地质条件、断面大小及形状等因素对煤岩表面变形产生显著影响,同时也影响煤岩表面允许变形,应根据具体工程实际选用不同巷道支护形式及参数。深部软弱煤岩巷道支护在采用合理支护形式的同时,还需合理选择二次支护。自20世纪60年代奥地利专家提出新奥法以来,适时适地的二次支护已经成为软岩巷道支护的关键。支护过早,巨大塑性能得不到充分释放,二次支护强度难以抗拒煤岩巨大的塑性变形而产生破坏,不能充分发挥煤岩自身强度;二次支护过晚,煤岩塑性能虽能得以充分释放,但煤岩强度已经基本丧失,转加到支架上的是失去自承能力的煤岩巨大载荷。巷道开挖周围煤依次逐步形成松动破碎区、塑性区(塑性软化区、塑性硬化区)、弹性区已被大量的巷道模型试验及现场试验所证实。其中弹性区及塑性硬化区为主承载体;松动破碎区及塑性软化区强度较低,自承载能力较小,为次承载体,必须选择合理支护阻止次承载体扩展和主承载体外移,针对深部煤层巷道帮部软弱煤岩,常规支护难以有效阻止软弱煤岩变形。为此,科研技术人员对此进行广泛深入研究,在工程实践中总结形成了锚固区内外压缩拱形成叠加拱以提高次承载体承载能力的支护方法。其核心内容为:巷道软弱煤岩次承载体中