

露天转地下开采 围岩稳定与安全防灾

Stability of Surrounding Rock Mass and Safety of
Disaster Prevention during Transition from Open-Pit to Underground Mining

南世卿 杨天鸿 唐春安 于庆磊 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

露天转地下开采 围岩稳定与安全防灾

南世卿 杨天鸿 唐春安 于庆磊 著

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

本书针对石人沟铁矿露天转地下过渡开采过程面临的现场实际安全问题,采用物理实验测试、工程类比分析、极限平衡解析、数值模拟、CMS 探测与实体建模、微震探测与预测预报等方法,建立了境界顶柱合理留设、防突涌突冒措施及断层破碎带下的采矿方案、采空区处理与矿柱回收方案和基于微震监测技术的灾害防治与预测预报系统。

本书研究、分析、总结出的成套露天转地下开采围岩稳定与安全防灾技术,为我国地下开采矿山提供了科学思路,形成的稳定性分析及研究理论有利于补充岩体力学理论,对于该技术研究领域具有借鉴意义。

本书可供采矿工程、地质工程、地下工程的技术和管理人员以及从事矿山安全生产工作的人员参考,也可作为相关专业的科研和教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

露天转地下开采围岩稳定与安全防灾/南世卿等著. —
北京:冶金工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5024-6400-4

I. ①露… II. ①南… III. ①矿山—地下开采—围岩
稳定性 ②矿山—地下开采—防灾 IV. ①TD325 ②TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 245769 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6400-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷
2013 年 11 月第 1 版, 2013 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12 印张; 232 千字; 182 页

36.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

矿山采用露天或者地下开采后，其相应的采矿方法、采矿工艺、生产及运输程序，以及由采矿活动引起的边坡、采场覆岩、围岩与地表的采动破坏特征、顶板与采场围岩矿压活动规律是截然不同的。经过几十年持续高强度的开采，20 世纪 70 年代以来，我国许多露天矿山随着浅部资源逐渐枯竭，已经进入深凹露天开采阶段，部分矿山正在或者已经转入露天和地下联合开采或者全部地下开采阶段。因此对露天转为地下开采的研究，显得尤为迫切与突出。

本书以河北钢铁集团矿业有限公司石人沟铁矿露天转地下开采的实例为背景，研究和总结出成套露天转地下开采围岩稳定与安全防突技术，这为我国地下开采矿山提供了科学思路，形成的稳定性分析及研究理论有利于补充岩体力学理论，对于该技术研究领域具有借鉴意义。书中提出的岩石破裂过程分析系统及分析方法，能够得到露天转地下开采围岩失稳机理的渐进动态破坏过程，为露天转地下围岩失稳机理研究提供了新的动态、可视化的分析手段。

本书内容得到国家“十一五”支撑计划项目（2006BA02A02）、国家自然科学基金（51174045，51034001）、东北大学创新团队项目（N090101001）、中央高校基本科研业务项目（N120601002）资助。

本书是作者对露天转地下开采技术多年研究和实践的总结。本书在编写过程中，得到了邢军、宋卫东、宋爱东、张永彬、马天辉、李连崇、郭献章、李成合、王亚东、苏明、王一、李胜、荣晓洋等的帮助，在此向他们表示感谢。

书中如有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者
2013 年 6 月

目 录

1 露天转地下开采研究评述	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的、意义和研究过程概述	3
1.2.1 研究目的、意义	3
1.2.2 研究过程概述	3
1.3 同类技术研究现状及对比	4
1.4 研究方案、技术路线和研究目标	5
1.4.1 研究方案	5
1.4.2 技术路线	6
1.4.3 研究目标	6
2 岩体结构特征、渗透特性及力学性质测试	8
2.1 石人沟铁矿岩体结构特征描述	8
2.2 石人沟铁矿岩体渗透特性	9
2.3 矿岩物理力学性质试验	9
2.4 岩体力学参数确定	10
2.5 岩体长期强度的确定	11
2.6 小结	12
3 境界矿柱可能的破坏模式和稳定性解析评价	13
3.1 石人沟铁矿采空区围岩压力分布特点和可能的破坏模式	13
3.2 顶柱稳定性的工程类比法	13
3.3 摩尔-库仑极限平衡解析	16
4 二维稳定性及破坏机制模拟分析	19
4.1 FLAC2D 变形破坏分析	19
4.1.1 计算模型及方案	19
4.1.2 各个剖面计算结果	19
4.1.3 境界顶柱少留 6m 的情况	26
4.1.4 小结	27
4.2 RFPA2D 破坏机制分析	32

· II · 目 录

4.2.1	计算模型及方案	33
4.2.2	各个剖面计算结果	33
4.3	考虑水弱化作用和长期强度时稳定性分析	41
5	不同采矿方案情况下三维稳定性分析	46
5.1	MSC. Patran 和 MSC. Nastran 简介	46
5.1.1	MSC. Patran 简介	46
5.1.2	MSC. Nastran 简介	47
5.2	不同采矿方案情况下的计算模型及方案	47
5.3	不同采矿方案情况下的计算结果及分析	48
5.3.1	采矿方案一	49
5.3.2	采矿方案二	50
5.3.3	采矿方案三	53
5.3.4	采矿方案四	57
5.3.5	采矿方案五	60
5.3.6	采矿方案六	62
5.3.7	采矿方案七	65
5.3.8	采矿方案八	68
5.3.9	采矿方案九	70
5.4	小结和建议	73
6	围岩稳定性分区研究与变厚度方案设计	75
6.1	稳定性分区研究	75
6.2	稳定性分区后的监测检验和变厚度采矿设计	75
6.3	小结	79
7	断层破碎带影响下矿体安全采矿技术研究	80
7.1	F18、F19 断层区域地质条件概述	80
7.2	南区 -60m 中段 F18 ~ F19 破碎及断层区域目前开采现状	83
7.3	存在的问题	83
7.4	二维稳定性及破坏机制模拟分析	87
7.4.1	计算模型及方案	87
7.4.2	计算结果	87
7.4.3	考虑水弱化作用和长期强度时稳定性分析	98
7.5	三维背景应力场计算分析	102

7.5.1 计算模型及方案	102
7.5.2 计算结果及分析	104
7.6 矿石储量及可采出矿石量	110
7.7 建议采矿方案及支护方案	110
7.8 小结	111
8 采空区探测及稳定性分析	112
8.1 -60m 水平中段采空区调查及 CMS 探测	112
8.1.1 全区矿房现状详述	112
8.1.2 采空区井下 CMS 探测	113
8.1.3 已探测采空区三维模型的构建	118
8.1.4 石人沟铁矿外围非法采空区的勘探	125
8.1.5 CMS 探测技术与地球物理探测的比较	136
8.2 采空区稳定性分析	136
8.2.1 岩体物理力学强度取值	137
8.2.2 石人沟铁矿矿块构成要素	137
8.2.3 采场结构参数理论计算	138
8.2.4 采空区顶板稳定性计算分析	139
8.2.5 矿柱的稳定性理论计算分析	141
8.3 小结	144
9 围岩稳定性的实时监测分析及预警	145
9.1 微震监测系统的选择	145
9.2 微震监测系统设计与安装	146
9.2.1 准备工作	147
9.2.2 传感器安装	148
9.2.3 线缆安装	149
9.3 微震活动实时监测与数据处理	150
9.3.1 系统软件	150
9.3.2 微震信号处理	152
9.3.3 波形初步分析	156
9.3.4 信号滤波处理	157
9.3.5 波形数据库建立	159
9.4 数据分析与微震活动规律研究	162
9.5 微震监测系统的防盗采功能	165

9.6 小结	165
10 基于虚拟现实技术的矿山岩体动力灾害预测、预警	166
10.1 虚拟现实系统概念	166
10.2 虚拟现实环境的产生原理	168
10.3 虚拟现实系统在矿山中的应用	170
10.3.1 采矿设计	170
10.3.2 风险评估	170
10.3.3 事故原因调查	170
10.3.4 技术培训、安全教育	171
10.3.5 采矿过程虚拟研究	171
10.4 基于虚拟现实技术的围岩稳定与矿山动力灾害预测、 预警系统初步研发	171
10.4.1 虚拟矿山系统总体设计	171
10.4.2 石人沟铁矿虚拟现实模型的建立	172
10.4.3 应力场云图和微震数据显示	173
10.4.4 控件制作	173
10.4.5 小结	174
11 结论与展望	177
11.1 研究结论、创新点与关键技术	177
11.2 应用效果分析	179
11.2.1 经济效益	179
11.2.2 社会效益显著	180
11.3 建议与技术展望	180
11.3.1 建议	180
11.3.2 技术展望	180
参考文献	181

1 露天转地下开采研究评述

1.1 研究背景

我国露天开采矿山随着开采深度的增加,原有的矿山生产要求发生了变化。尤其是从20世纪70年代开始,大量的金属矿山开始由露天向地下开采转化,如通钢板石铁矿、首钢密云铁矿、首钢大石河铁矿、承钢黑山铁矿等。进入21世纪后,随着社会对资源需求的急剧增加,开采速度加快,越来越多的露天矿山面临着转入地下开采生产的问题。露天转地下开采主要涉及以下几个问题^[1~6]: (1) 露天转地下境界矿柱的稳定性分析; (2) 露天采场边界内地下矿房的位置及参数确定; (3) 对矿房内的采空区围岩进行有效观测; (4) 防止露天坑底水突然涌入地下矿房等。从中可以看出,境界矿柱的稳定性是关系到露天转地下过渡中矿山安全生产的重要问题。通过留设境界矿柱可以使露天与地下开采同时进行,保证在露天转地下开采过程中,开采矿量保持稳定和通风系统正常运行,但是境界下矿柱的留设也会给地下开采的安全带来隐患。如果境界矿柱留的过薄,易造成境界矿柱突然间崩落,会对地下采空区产生强动力冲击。当境界矿柱塌落时,对采空区内空气进行压缩,被压缩的空气从与采空区连通的巷道泄出时,具有很高的速度(高达100m/s以上),形成破坏性很大的气浪,对井下设施及人员造成很大危害,甚至可使矿井报废。境界矿柱如果留的过厚会造成矿产资源的浪费,因为矿柱回采率低(只有40%左右,甚至更少),贫化率大,回采境界矿柱的掘进工程量和投资较大。因此,境界顶柱稳定性及防突涌突冒研究对于矿山露天转地下开采工程是一项重要而又复杂的科研课题。

石人沟铁矿是河北钢铁集团的主要矿石原料基地,1975年建成投产,采用露天开采方式,将整个矿山划分为三个采区(现已形成南北两个采区),经过近40年的生产,现露天开采已经进入开采末期,南区露天开采已经结束,并作为内部排土场,北区露天开采可延续到2004年。矿山目前正在由露天转入地下开采,并将南区作为转入地下开采的首采区。河北钢铁集团矿业有限公司石人沟铁矿露天转地下开采遇到了许多技术问题,如露天与地下生产的衔接与生产平稳过渡的问题,露天采坑内排岩堆形成的重力对地下开采的影响,露天采坑积水对地下开采的影响,矿区内大断层、破碎带的影响,露天边坡稳定性问题,矿柱回收与空区处理问题等。其中有些问题其他露天转地下矿山也

同样会遇到。石人沟铁矿露天转地下存在的问题多且难度大,问题复杂,具有典型性及代表性,随着地下开采的进行,可能出现以下两个影响地下开采安全生产的问题:

(1) 地下开采引起的采空区和境界矿柱突冒危险性。原初步设计井下开采采用留矿法,上面留 20~60m(不包括顶柱 6m)厚的境界矿柱,沿矿体走向每 50m 留一 8m 宽间柱。随着采空区的形成(高 48m),境界矿柱、顶柱、间柱承受自重、上盘岩体和露天坑回填物的压力,需要对其稳定性进行研究。如果采矿期间矿柱被破坏,可能会形成大规模崩落,不但造成矿石损失贫化,而且可能发生人员伤亡等重大事故,给矿山安全和正常生产造成危害,这是急需解决的重要问题。倘若顶部矿柱厚度过大,会使矿柱回采困难,引起资源损失,还会提高采矿成本。因此,合理地确定矿柱厚度是确保矿山正常安全生产的技术关键问题。

(2) 露天坑积水下渗引起的井下突涌可能性。初步设计对露天矿坑积水及其矿井排水采取了相应的安全措施:露天坑周边设防洪沟,坑内积水通过泵站排除,井下涌水设泵房、水仓和防水闸门等技术措施,但是没有对露天坑积水突涌问题进行深入分析。该区存在多条规模较大的断层带,其中 F8 断层为导水的正断层,断层附近的岩体节理发育,井下开采诱发裂隙进一步开裂,岩体渗透性逐步提高,一旦和露天坑内积水形成良好的水力联系,势必引起井下突涌,给矿山安全生产造成重大灾害。无疑,顶部矿柱崩落也是引起突涌的重要原因。必须对露天坑内积水引发突涌问题进行深入研究,提出可行的防止危害的安全措施。

为尽量减少或防止这些问题的发生,在实际开采过程中,我们进行了相关的研究,具体如下:

(1) 断层破碎带影响下矿体安全开采技术问题。矿山在南区 F18-F19 断层破碎带之间,为确保安保将整个断层破碎区域留设作保安矿柱,这将影响矿山采矿回收率,浪费大量的矿石资源,进而影响矿山经济效益。研究制定该区域赋存矿体的安全采矿方案,对矿山具有实际意义。

(2) 采空区处理与矿柱回收技术问题。露天转地下开采矿山的地下首采层经过采矿生产后形成大量的采空区,如果不及时进行处理,一旦围岩失稳会产生大塌方大冒落灾害事故。为确保顶板稳定而留设的矿柱同样是矿石资源,应研究制定回收矿柱的技术方案。

(3) 地下开采围岩稳定与实时监测及防灾技术。地下开采的安全防灾应从灾害发生前进行预测,做到防患于未然,从而确保矿山地下开采安全。研究建立预防围岩突然发生失稳破坏的预测预报系统,实现实时的检测和预测预报,是保证矿山采矿安全的重要手段。

1.2 研究目的、意义和研究过程概述

1.2.1 研究目的、意义

本书研究的目的是对采空区大规模突冒问题和露天坑积水引起的井下突涌的危险性做出科学的评价,确定安全、合理的采矿方法和安全防灾技术方案,采取防止境界矿柱突冒、露天坑底存水突涌的控制技术措施,为该矿山露天转地下开采顺利进行提供科学依据。本书深入研究了露天转地下过程中灾害防治、地下开采诱发围岩破裂损伤评价体系,该书成果对于丰富、完善我国铁矿山露天转地下开采技术和理论,促进我国矿山露天转地下安全可持续发展,具有重要的实际应用和推广价值。

1.2.2 研究过程概述

露天转地下开采围岩稳定与安全防灾研究自2002年8月开始立项研究,至2010年6月已经完成了本书各课题的研究,并从2005年起将各课题研究完成的成果用于指导矿山实际应用,进一步验证研究结果,并在实践中再提高和完善,到2010年上半年,已经总结出一整套露天转地下开采矿山的围岩稳定与安全防灾技术集成。具体研究过程如下:

(1) 2002年8月~2003年7月,开展现场勘查和详细的地质、采矿资料分析,进行现场取样岩石力学参数测试,建立了矿体力学模型,应用极限平衡解析法和数值模拟方法(主要应用RFP、FLAC和Patran软件进行计算),进行采空区围岩变形、破坏及境界矿柱稳定性评价和安全矿柱设计影响因素敏感性分析,初步确定境界矿柱及矿房采矿参数。

(2) 2003年7月~2005年1月,防止突冒、突涌灾害研究成果总结与指导矿山应用。

(3) 2006年10月~2007年7月,断层破碎带影响下矿体安全采矿技术研究。开展了现场勘查和详细的地质、采矿数据分析,进行了现场取样岩石力学参数测试,建立了矿体力学模型,应用数值模拟方法(主要应用RFP、Patran和Nastran软件进行计算),进行了采空区围岩变形、破坏、断层影响及境界矿柱稳定性评价和安全矿柱设计影响因素敏感性分析,确定了该区段内的采矿方法以及巷道支护方案。

(4) 2007年7月~2007年10月,含水破碎及断层影响带采矿技术研究总结,制定采矿技术方案,并指导矿山采矿应用。

(5) 2008年3月~2010年6月,采空区探测、处理技术与矿柱回收技术研究。应用物探、钻孔和CMS设备进行空区实测,根据实测数据建立空区三维结

构模型,以此制定相应的空区处理方案;同时根据矿柱的形态、稳定状况,对矿柱的稳定性进行安全分级,并有针对性地制定矿柱回收方案,指导矿山的施工。

(6) 2008年3月~2010年6月,微震监测技术的研究与应用。从加拿大ESG公司购置矿山微震监测系统(24通道),建立露天转地下开采的衔接层及地下开采地压活动的微震监测系统,利用并行计算技术分析开挖扰动形成的应力场,实现微震监测系统和三维应力分析系统之间的数据交换,建立基于背景应力场的矿山岩体失稳预警、预报系统,为矿山安全生产提供了技术支撑和决策支持。另外,该系统可以快速有效地定位被盗采部位,有效地打击非法盗采,保护合法开采人的权益,保证矿产资源的安全高效采出,防治不明采空区的形成,从而减少空区突水和塌方造成的严重灾害。

(7) 2008年4月~2010年6月,露天转地下开采防灾、减灾实时预测预报技术研究。通过极限平衡、数值模拟等研究手段,寻找地下巷道、边坡周围压力的变化特性,分析复杂采动条件下工程岩体的应力场分布规律、破坏模式,提出复杂采动条件下工程岩体稳定性分析方法,并针对研究的结果采取必要的安全措施和监测方案,确保露天开采时边坡的稳定,制定露天转地下开采过渡时期的边坡管理办法,纳入矿山生产管理之中。利用微震监测系统,对采场围岩和露天高陡边坡进行长期实时监测,将监测到的数据通过网络无线传输到微震活动分析中心,利用并行计算技术分析开挖形成的应力场,实现微震监测系统和三维应力分析系统之间的数据交换,建立了基于背景应力场的矿山岩体失稳预警、预报系统,为矿山安全生产提供了技术支撑和决策支持。

(8) 2008年6月~2010年6月,基于虚拟现实技术的围岩稳定与矿山动力灾害预测、预警系统的研发。结合石人沟铁矿实际生产与安全监测情况,利用虚拟现实技术开发出包括矿体、巷道、防水帷幕以及铲装运输作业等三维场景,带有虚拟漫游、应力场显示、微震数据显示及信息查询功能的虚拟矿山系统。

石人沟铁矿的微震监测数据利用无线传输技术实时地传送到东北大学虚拟现实系统仿真中心,同时建立矿山的力学模型进行应力场分析,根据开采生产计划更新模型,在摸清矿山应力分布的情况下,结合微震监测数据评价石人沟铁矿采场围岩稳定性,及时调整开采工艺参数,对潜在大型岩体破坏灾害进行预测、预警,为矿山生产提供决策支持,自运行以来,矿山安全生产得到了确保。

1.3 同类技术研究现状及对比

近年来,国内外学者注重于工程实践,从实际工程出发,对露天转地下开采的相关科学问题及相应的技术做了大量的研究工作。例如,徐长佑^[1~7]对露天转地下开采的技术、方法进行了较为全面的阐述;李文秀^[7]针对急倾斜厚大矿体地下与露天联合开采岩体移动分析问题,利用模糊数学理论,建立了开采岩体移

动分析和边坡稳定性分析的模糊数学模型,对分析过程中的工程参数确定给出了模糊数学方法,利用所建立的数学模型。对我国某地下与露天联合开采矿山急倾斜厚大矿体地下开采导致的岩体移动变形及上部边坡稳定性进行了具体的计算分析,所获结果可供工程设计参考应用;甘德清、张云鹏等对建龙铁矿露天转地下过渡期的联合开采方案进行了系统研究,提出了相关的指导建议^[8];王进学、王家臣等^[9]通过系统研究,提出了眼前山铁矿深部矿体的合理开采方式,并对露天转地下开采过程中生产能力的衔接,开采方式的平稳过渡,地下开采首采区的选择,矿山生产规模的确定,采矿方法的选择以及边坡下压帮矿量的回采进行了论证,得到了眼前山铁矿深部矿体开采的系统优化方案;范平之^[10]根据新桥硫铁矿的现状,探讨了新桥硫铁矿东翼矿体露天采场露天底从-180m水平抬至-144m水平的必要性和可能性,并对其方案的经济、社会效益进行了分析,提出了露天底底柱的回采方法;F. B. 夏温斯基、A. F. 克鲁格利科夫、B. A. 谢尔卡诺夫等^[11,12],对露天-地下联合开采法的现状和发展前景进行了系统的研究。大量的科学理论研究工作很好地指导了工程实践,为国内外露天转地下工程的设计、施工提供了科学的依据^[13~29]。

国内外学者虽然在露天转地下开采及围岩稳定技术方面开展了大量的研究并取得了可喜的进展,但是对于本项研究对象矿山的复杂难采技术条件,如境界顶柱留设厚度及稳定性技术研究、防突涌突冒技术研究、露天转地下开采首采层采空区处理技术、矿柱安全高效回收技术、断层破碎带影响下安全采矿技术、采空区精确探测技术、微震实时监测与防灾预测预报技术等综合安全防灾的成套系统技术研究,目前还未见类似报道。本项研究,针对实例矿山露天转地下开采的关键安全技术问题,开展系统安全防灾技术研究,开发成套露天转地下开采安全防灾与高效采矿技术集成,对于我国类似矿山具有典型的代表意义及示范意义,为国内外同类学术研究提供技术借鉴。

1.4 研究方案、技术路线和研究目标

1.4.1 研究方案

露天转地下开采围岩稳定与安全防灾研究针对石人沟铁矿露天转地下开采围岩稳定与安全防灾技术问题,通过实际岩体物理力学性能测试分析、现场监测分析、地下开采境界顶柱破坏机理分析以及数值模拟计算相结合的方法,确定矿山露天转地下开采境界顶柱稳定性及防止突涌突冒的技术方案;通过围岩稳定下分析与数值模拟计算,研究制定断层影响下矿体开采采矿方案;通过CMS探测技术和3DMINE建模技术,研究制定采空区处理与矿柱回收方案;通过微震监测系统的建立与稳定运行,对地下开采进行防灾实时监测;通过虚拟现实技术的围岩

稳定与矿山动力灾害预测、预警系统的研发,建立矿山灾害预防、预测、预报系统。系统分析、总结研究,制定出成套露天转地下开采围岩稳定与安全防灾技术集成,为我国铁矿山露天转地下开采解决实际及关键问题提供示范研究理论与技术。

1.4.2 技术路线

在制定了详细的研究方案后,为研究形成露天转地下开采围岩稳定与安全防灾一系列实用技术和成套技术集成,制定的技术路线如图 1-1 所示。

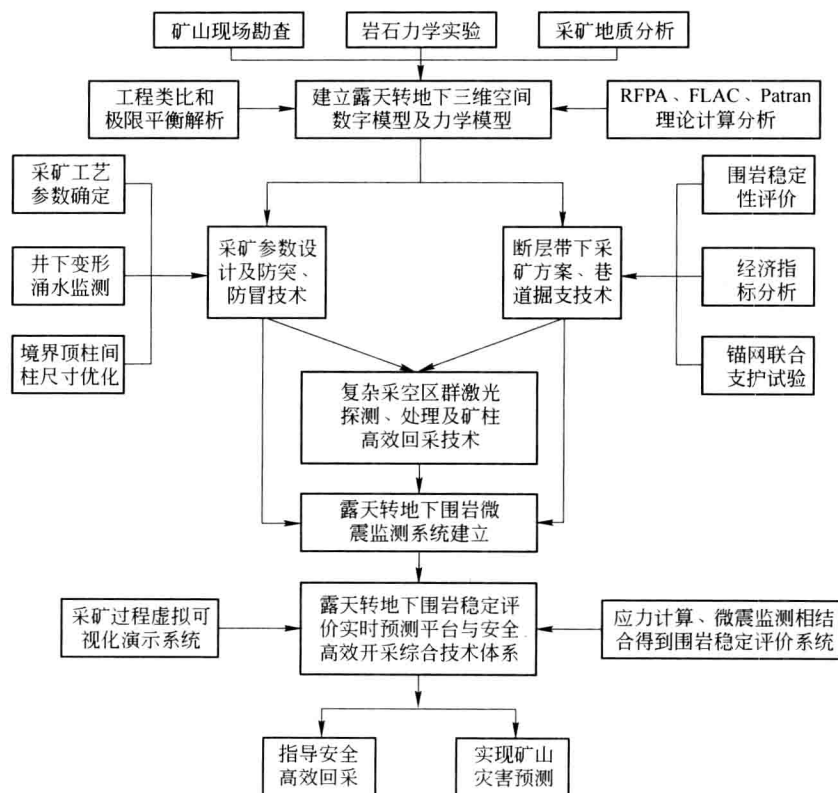


图 1-1 露天转地下开采围岩稳定与安全防灾技术路线

1.4.3 研究目标

本项研究紧密结合河北钢铁集团矿业有限公司石人沟铁矿露天转地下开采工程实际,采用岩体物理力学性质测试、工程类比、解析分析以及数值计算等方法,研究确定石人沟铁矿露天转地下开采境界顶柱厚度、防突涌突冒技术方案以

及大断层、破碎带影响下复杂难采矿体采矿方案，为确保复杂难采矿体条件下露天转地下开采的安全生产和产量衔接提供技术支撑，具体研究目标如下：

(1) 建立解决露天转地下关键技术的一套科学分析与计算方法和研究思路，研究制定成套露天转地下开采围岩稳定与安全防灾技术集成，并为急需露天转地下开采矿山提供了技术支持，对同类矿山具有示范作用，为该研究领域的技术发展提供研究基础。

(2) 通过研究得到的关键技术，总结、整理和申报几项自主知识产权。

(3) 把考虑岩体渐进破坏过程的分析方法应用到石人沟铁矿露天转地下开采境界顶柱稳定性的实例研究中，为露天转地下围岩失稳机理提供新的动态可视化分析手段。

(4) 通过对不同境界顶柱的稳定性分析，提出结合不同地质区域的矿岩特性和应力场分布，采用不同境界顶柱厚度方案，即矿山在保证采场顶、底板应力集中不超过矿岩的极限强度值，从而确保安全生产，多回收资源。

(5) 针对大断层破碎带影响下的复杂难采矿体的采矿技术问题，通过对断层区域稳定性分析、二维破坏机制模型分析及三维应力场计算分析，研究确定可行的采矿技术方案与支护方案。

(6) 对大断层影响区域内复杂难采矿体研究制定小分段矿房采矿法，使该区域矿体安全高效的采出，创造可观的经济效益。

(7) 对采区内采空区进行即时探测和实体建模，掌握采空区结构参数，研究制定采空区处理方案和矿柱回收方案，指导采矿安全高效进行。

(8) 对采场围岩稳定性进行长期实时监测，指导现场采取安全措施，确保采矿安全。

2 岩体结构特征、渗透特性及力学性质测试

工程岩体是由岩石块体和非连续节理（裂隙）组成的地质结构体，在地质环境和工程扰动作用下岩体中相邻节理扩展和相互贯通是其破坏的主要方式，同时引起岩体渗透性的显著变化，这导致节理化岩体的强度比岩块的强度低很多。本章根据石人沟铁矿现场岩体结构勘查、取样试验结果，同时参考原冶金部勘察设计研究所提交的石人沟铁矿边坡稳定性研究报告^[23]，提出了适合该矿稳定性分析的岩体强度指标。

2.1 石人沟铁矿岩体结构特征描述

研究岩体的结构特征，是为了确定岩体边界条件和性质，探讨岩体的各向异性及其力学类型，从而为岩体稳定性评价提供依据。

矿区内断裂构造发育，对矿体影响也较大，其中在南区范围内较大的断层有 F5、F8、F18、F9、F0、Fc 等。同时在断层带内充有各类岩脉，有的切穿矿体。各断层常伴随有节理产生，且它们在产状上有一定的相似性，分布规模受断层影响。

南区所发育的结构面按其成因和规模分为大规模的原生结构面、大规模的构造结构面、小规模层理节理面三类，大规模的结构面构成岩体不稳定的滑面和切割面，小的结构面切割岩体，使岩体破碎，降低岩体力学强度。

(1) 原生结构面包括岩性分界面、岩脉和围岩的分界面，其中地下采空区顶柱和围岩的分界面构成顶柱潜在失稳的危险滑动面；岩脉和围岩呈破碎接触，这类原生结构面随着地下开采，结构面张开，极易沿接触面滑动，是采空区围岩稳定性的主要控制边界。

(2) 大规模的构造结构面主要为断层，其中 F8、F18 两条规模较大的东西走向的断层和采空区相交，对顶柱安全影响较大。

(3) 小规模层理节理面把岩体切割成层状和块状结构，经现场勘查，参考原冶金部勘察设计研究所提交的石人沟铁矿边坡稳定性研究报告中岩体结构评价结果^[23]，得出如下结论：南区岩体节理密度为 6~9 条/m，节理面的起伏度（JRC）为 10~12，粗糙度为 2~3，平均节理长度为 3~10m。

上述岩体结构特征描述为岩体强度评价提供了依据。

2.2 石人沟铁矿岩体渗透特性

岩体的渗透性是分析地下水分布的重要参数,尤其是地下开采将引起围岩渗透性的变化,所以研究石人沟铁矿岩体渗透特性对于正确分析“突冒、突涌”可能性十分重要。

根据矿区水文地质条件并参考相关资料,得到该区片麻岩的渗透系数为 $5.17 \times 10^{-7} \text{ m/s}$,花岗岩的渗透系数为 $2.18 \times 10^{-7} \text{ m/s}$,石英岩的渗透系数为 $11.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。分析石人沟铁矿岩体渗透特性,可知片麻岩和花岗岩的渗透系数较低,可近似看作隔水层,石英岩的渗透系数略好于片麻岩和花岗岩,但也不会发生大量涌水。南区勘探中,发现基岩中存在承压水,水位高于侵蚀基准面,表明承压水通过断层受潜水补给,但基岩排泄条件不畅,只要采空区不和围岩破坏区或断层连通,就不会发生“突涌”灾害。

2.3 矿岩物理力学性质试验

东北大学岩石力学实验室对河北钢铁集团矿业有限公司石人沟铁矿现场取样,共取了四组试样,每组取了五块试样。四组试样的名称分别为 M1、M2、M4 和黑云母角闪斜长片麻岩,分别对四组试样进行了物理力学性质测定,其结果如下:

(1) 岩样加工。按试验项目要求,实验室分别对岩样进行了加工。试件加工严格遵守试验规程,数量、精度符合规范要求。

(2) 试验项目。块体密度试验、抗拉强度试验、单轴抗压强度试验、变形性质试验、三轴试验。

(3) 试验方法。试验执行中华人民共和国国家标准《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—1999)。参照中华人民共和国行业标准《水利水电工程试验工程》(SL 264—2001)。

(4) 试验成果。试验结果见表 2-1。

表 2-1 岩石物理力学性质试验总表

采样地点: 石人沟铁矿				试验日期: 2002. 9. 15 ~ 2002. 10. 20			
岩石名称	块体密度 /g · cm ⁻³	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	抗剪参数		变形参数	
				内聚力 C/MPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 /MPa	泊松比
M1 矿体	3. 58	99. 44	11. 95	21. 83	48. 36	$8. 03 \times 10^4$	0. 21
M2 矿体	3. 46	130. 77	10. 52	23. 67	53. 33	$7. 59 \times 10^4$	0. 20