

大型镍矿深部高应力矿体充填法开采关键技术与对策

杨志强^{1,2}, 高 谦¹, 陈得信², 郭慧高²

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 金川集团股份有限公司, 甘肃金昌 737100)

[摘要] 金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿,以地应力高、矿体厚大和矿岩不稳固著称国内外采矿界。该矿体开采难度之大、充填成本之高备受国内外采矿界关注。近年来,随着矿床开采深度逐年增加已接近千米,采场面积超过 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$,高温、高压和高渗压的“三高”采矿环境日趋显著,不仅提高了采矿成本,而且还给矿山安全高效生产带来巨大压力。本文首先概述金川深部矿床采矿技术条件,然后明确采矿生产面临巷道和采场稳定性控制技术难题,分析采场围岩变形和岩层移动所潜在的灾变失稳风险。最后提出了金川深部矿体安全高效开采亟待攻克的技术难题,为金川深部资源开发能力和综合利用指明了方向。

[关键词] 金川镍矿;深部开采;高应力;关键技术;研究方向

[中图分类号] TD853.34 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0038-07

1 前言

矿岩破碎、围岩稳定性差、地应力高和厚大矿体,是金川难采矿床的主要特征。为此,金川矿山已经开展了广泛而深入的科研工作和技术攻关。刘同有、吴爱祥、高谦等针对金川矿床采矿技术条件,阐述了矿床开采潜在问题^[1-6]。杨志强等人开展了矿区工程地质和岩石力学研究,揭示了高应力碎裂围岩力学特性和变形机理^[7]。王永前、杨金维等研究揭示了厚大矿床连续开采场地压规律以及控制技术^[8,9]。结合金川采矿生产,在围岩变形监测、变形结论和支护技术等方面也开展了大量研究^[10-29]。针对金川矿区充填法开采的岩移问题,高谦、马凤山等开展了岩移监测和工程稳定性研究,首次揭示了大型镍矿充填法开采岩移规律与影响因素。杨志强等还对岩移造成主风井垮塌以后的通风问题开展了研究,成功解决了风井垮塌后采场

通风问题^[30]。通过大量理论研究和工程实践,对金川矿区复杂的地质条件和矿区构造应力做出客观表征,探索出与采矿条件相适应的下向分层胶结充填采矿方法,揭示了充填法采矿地压显现与岩移规律,并成功地实施了采场地压控制和围岩稳定性维护技术。金川矿山科研成果,不仅成功地实现了1 150 m中段以上无间柱大面积连续开采,而且还为深埋厚大不稳固矿体开采积累了经验;同时,也可为国内外类似矿床开采提供了参考。

随着矿床开采向下延深,金川镍矿采矿深度已接近1 000 m,已经进入深部开采矿山行列。深井采矿所特有的高温、高压和高渗压“三高”采矿技术条件,使矿山安全、高效和经济开采面临严峻挑战,给矿山生产带来潜在重大安全隐患。尤其深部连续开采面临着超大采场的整体稳定性、高应力碎裂蠕变巷道围岩变形控制、深部围岩承压水防治、大面积连续开采的岩移规律以及矿山工程稳定性控制

[收稿日期] 2013-11-13

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB731500)

[作者简介] 杨志强,1957年出生,男,山西万荣县人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事充填法采矿安全与管理及废弃物资源化利用等方面的研究;E-mail: yzq@jnmc.com

等问题,已经成为世界性技术难题。因此,借鉴国内外矿山开采的先进理论与开采技术,全面总结金川矿区上部开采所获得的成功经验和教训,深入分析深部矿床开采技术条件,揭示深部采场地压规律,科学指导金川深部开拓系统的布局以及开采方案优化,不仅对于金川镍矿深部高效开采极其重要,而且还是超大采场风险预测和灾变控制的重要基础。

2 金川镍矿深部开采技术难题

2.1 深部采场巷道稳定性问题

对于金川高地应力赋存环境和破碎围岩条件的厚大矿体开采,巷道支护与变形控制是矿山安全生产和产能提升的关键技术。图1~图4显示了金川矿区典型巷道变形破坏特征。由此可见,对以变形地压为主的深部巷道破坏主要表现为侧墙内挤(见

图1)、巷道底鼓(见图2和图3)和巷道收敛(见图4)三种变形模式。图5显示了2001—2009年金川矿区采场巷道返修工程量和返修费用的统计结果。由此表明,仅金川二矿区巷道返修量已达到103.27 km,返修费用高达8.076亿元。

金川镍矿开采深度接近1 000 m已经进入深井开采。采矿工程揭露的深部矿岩节理裂隙更发育、围岩稳定性更差,裂隙水较上部丰富。由此显示,深部采矿技术条件较上部更加不利。同时,金川镍矿采用无间柱大面积连续开采,采场最大水平面积将达到 $2.5 \times 10^5 \sim 3.27 \times 10^5 \text{ m}^2$,采切下降速度将达到5~8 m/a,采场面积和采掘强度在国内外罕见。可以预见,金川矿区深部采场地压显现将更加剧烈,采场巷道变形控制更加难以控制,必将给金川深部开采带来更大困难,是金川矿区深部矿体安全高效开采亟待解决的重大技术难题。



图1 三矿区深部巷道侧墙内挤破坏情况

Fig. 1 The extruding deformation of side wall of roadway in No.3 area



图3 龙首矿有轨运输巷道底鼓变形情况

Fig. 3 Heave deformation in floor of roadway in Longshou mine

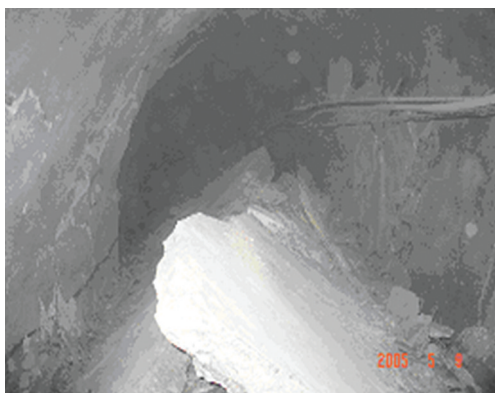


图2 二矿区1 178 m分段道巷道底鼓变形情况

Fig. 2 Heave deformation in floor of roadway in No.2 area in 1 178 m level

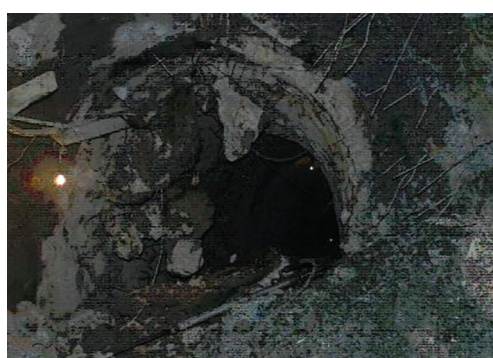


图4 二矿区1 178 m分段巷道整体收敛变形情况

Fig. 4 Convergence deformation of roadway in No.2 area in 1 178 m level

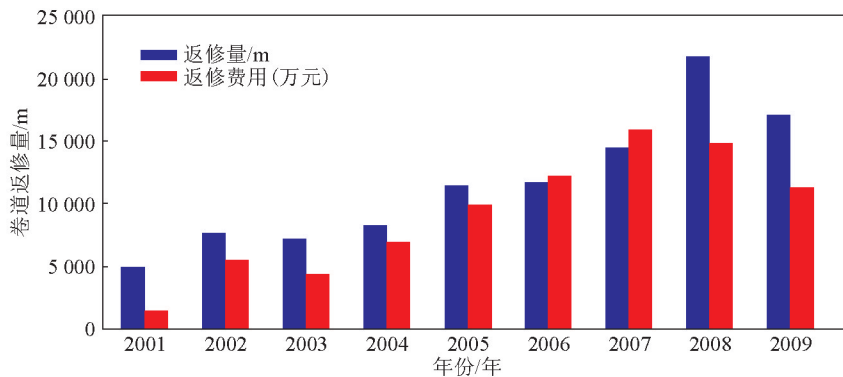


图5 二矿区2001—2009年巷道返修量与费用柱状图

Fig. 5 Histogram of repair amounts and cost in 2001—2009 for No.2 area

2.1.1 深部巷道变形破坏特征

金川深部巷道围岩变形破坏主要受工程地质条件、构造应力和采场地压以及巷道工程形式与布置方式影响。因此巷道变形具有如下特点。

1) 变形量大。根据现场调查及监测结果,金川矿山深部巷道收敛变形一般为数厘米至数十厘米,最大可达2 m以上,其变形破坏特征主要以两帮收缩、拱顶上升或下降和底臃为主。

2) 变形速度快。由于原岩应力高且以变形压力为主,开挖卸荷迅猛,来压快,故高应力软岩巷道初期变形速率很大。

3) 变形持续时间长。由于围岩节理裂隙发育,围岩变形受控于节理的碎裂剪胀扩容,加上高应力围岩塑性屈服变形,不仅围岩变形量大,而且持续时间长。

2.1.2 巷道失稳破坏模式

现场变形结果监测显示,金川深部巷道主要受应力控制而发生变形破坏。对于深埋巷道或处于采场高应力集中区围岩。受高应力作用,使岩体结构效应降低,以围岩屈服变形和剪切滑移为主,显现碎胀和塑性变形,从而导致巷道底臃、断面收缩,最终发生巷道挤死、片帮或垮冒。变形地压的显著特点是四周受压,且在初期变形地压与阻止围岩的变形量成正比,即支护结构刚度越大,变形地压越大。随着围岩变形增加,其地压也随之减小。同时围岩变形能量释放过程也是围岩本身强度降低的过程。当围岩变形发展到一定量时,围岩强度发生急剧恶化而不能自稳,巷道将以垮冒、底鼓或者两帮挤进等形式发生破坏,是金川镍矿深部采场高应力巷道围岩的主要破坏模式。

2.2 无间柱连续开采超大采场整体稳定性问题

金川镍矿深部采用多中段、无间柱大面积连续开采,由此带来以下两种潜在的失稳模式。

1) 充填体整体滑移失稳。采用无间柱连续开采,充填体与围岩之间的剪切力是维持充填体稳定的重要因素之一。由于充填体与围岩接触面是弱面,当该接触面上的抗滑阻力小于充填体重力的下滑分力时,充填体就沿着该接触面发生滑移失稳。随着开采水平的延伸,这种潜在失稳危险也随之增大。

2) 多段开采中段间水平矿柱失稳。金川1#矿体采取1 000 m、1 150 m和850 m三个中段同时开采。在高水平地应力作用下,水平矿柱将受到压杆式承载模式。随着1 150 m中段向下延深,中段间的水平矿柱(板)逐渐变薄,所承受的应力逐渐增大。当水平矿柱的作用荷载(水平地应力)达到极限承载力后,水平矿柱就发生压杆式灾变失稳。因此1 150 m和1 000 m两中段间的水平矿柱开采,必将面临采场地压逐渐增大和采场整体灾变失稳逐渐提高的风险。

2.3 采矿诱发岩移对矿山工程稳定性影响

1) 充填采矿岩移规律以及对工程稳定性影响。由于金川矿体厚大和围岩不稳固,尽管采用充填法开采仍然导致围岩变形和岩层移动。1998年3月首次在地表发生沉降张裂缝,由此表明,地下开采导致岩层移动已经发展到地表。地表GPS变形监测结果表明:随着地下开采,地表沉降张裂缝不仅逐渐扩展(见图6),而且变形速率日趋增大。地表变形较显著范围在10~22行之间,并以14~18行为中心形成一个地表沉降盆地。采场围岩变形和

岩层移动对矿山35座竖井工程稳定性影响,一直成为关注的焦点。揭示厚大矿体充填法开采岩移规律,采取回采工艺和工程措施,确保重要工程的安全与稳定,对深部矿床的开采至关重要。

2) 返修后二矿区14行风井稳定性问题。位于金川矿体下盘的二矿区14行主力回风井,井深715.5 m,承担1#矿体两个主运输水平、14个生产盘

区的回风任务(见图7)。在风井2002年投入使用后,由于受采动岩层移动影响,在2005年3月突然发生跨塌,给采矿生产带来严重影响。经过一年多返修,于2007年5月重新投入使用。但是日趋加剧的岩层移动必将对修复后的14行造成影响。因此,监测岩移对14行风井稳定性影响以及尽早实施稳定性控制措施,是金川深部开采的重要课题之一。

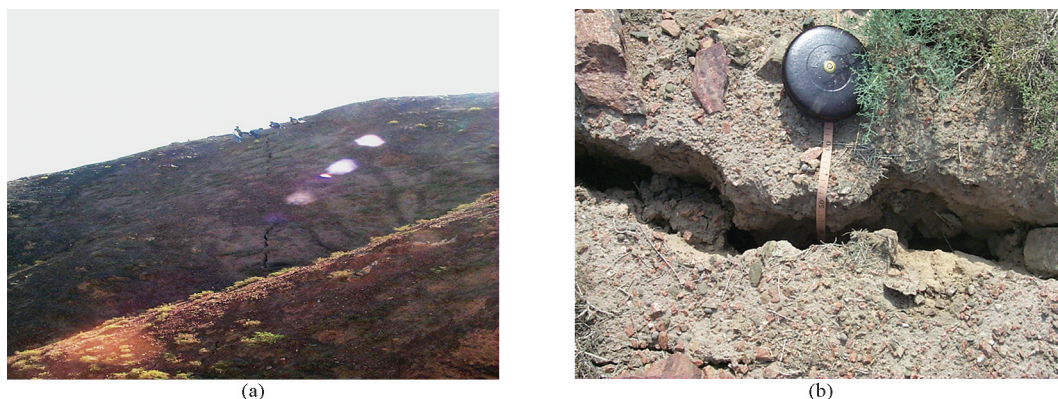


图6 二矿区开采诱发岩移在地表出现裂缝情况

Fig. 6 Appearing fissures by minging in the earth's surface for area No.2

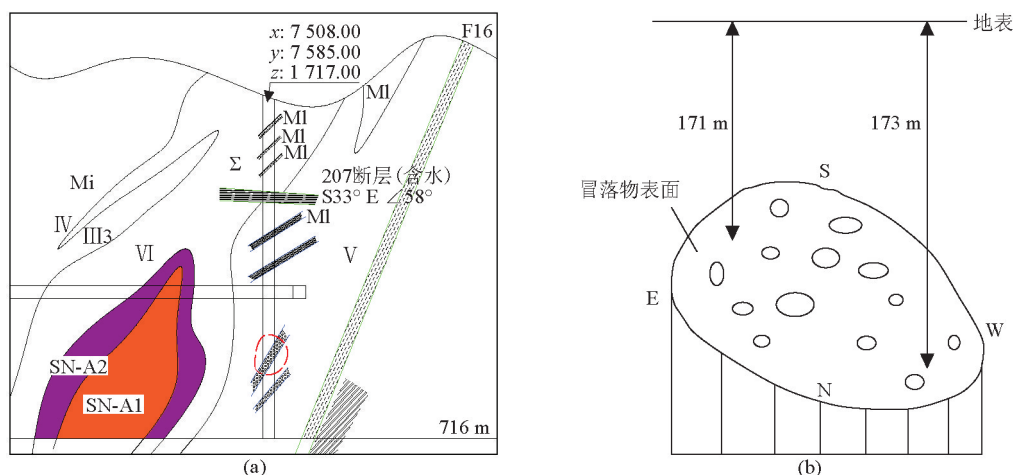


图7 二矿区14行风井工程地质剖面 and 冒落示意图

Fig. 7 Sketch map of the engineering geological profile and caving of air shaft in 14th line in area No.2

2.4 充填采矿工艺

金川矿山采用机械化盘区下向分层水平进路和下向六角形高进路胶结充填采矿法。伴随着矿山进入深部开采,矿山生产还存在以下两个关键问题。

1) 采场生产效率低。分层进路胶结充填法开采主要进路式采矿的崩矿量有限,平均每崩矿步距的崩矿量为100~150 t。采场铲运机出矿运距长,造

成设备满负荷甚至超负荷低效率的运转。如二矿区机械化盘区铲运机平均单程运距约260 m,根据现场测试,某盘区铲运机平均每次出矿时间为8~10 min。

2) 充填采矿成本居高不下。金川充填成本占采矿成本的1/3以上,而充填成本中充填材料成本费用占85%以上。随着开采深度加大,充填成本也随之升高,由此将显著影响金川矿山的采矿经济效

益。开发低成本和高强度的新型充填胶凝材料,是降低深部充填采矿成本和提高采矿效益的必由之路。

3 金川深部开采关键技术与对策

3.1 深部巷道围岩支护成套技术研究

针对金川矿山深部巷道存在的稳定性控制问题,需要根据金川矿山深部巷道围岩的岩石力学特性和围岩应力环境,借鉴国内外支护技术和经验,采用高强度和高刚度预应力锚杆支护系统,从而有效控制围岩变形破坏,减少二次支护和巷道返修工程量。高强度和高刚度预应力锚杆成套支护技术,将是金川矿山深部巷道支护技术今后亟待研究和发展的方向。同时,探索出适用于金川深部巷道支护的施工机械,是落实支护技术和确保支护质量的重要保证。

3.2 深部开采方案决策与开采工艺优化

开采方案与回采直接影响采场地压显现规律,从而影响巷道工程的稳定性。因此,进一步优化深部回采工艺、回采顺序以及充填体强度,从而调整和优化深部采场地压环境。尤其针对深部采场地压显现规律,研究和确定适应于深部采场地压的充填体强度,不仅有利于深部采场的稳定性维护,而且更重要的是确保采场整体稳定性,实现深部采矿安全生产。

3.3 井巷工程稳定性控制技术

采场开采模式和回采顺序影响采场地压显现规律,而采场地压显现规律又影响着岩层移动范围和速度。研究揭示充填法开采的岩层移动规律,是开拓工程优化设计、选择开采方案和回采工艺的重要依据。

1)岩层移动规律与影响范围。对于当前开采水平,地表已经出现明显的岩层移动。由于在850~1 000 m之间的1#矿体形态处于最大扩展范围。从而在850 m中段开采过程中,采场覆岩岩层移动以及采场整体稳定性处于最不利状态。因此,亟待开展该阶段无间柱连续开采的变形监测和稳定性预测,以便提早采取安全防控措施,确保深部矿体安全回采。

2)岩移对井巷工程影响预测。岩层移动达到或超过一定范围将引起井巷围岩变形,导致井巷变形超过允许值而失稳,影响正常使用;同时,岩层移

动还改变采场地压显现规律,间接影响巷道围岩的变形破坏。因此,揭示不同采矿方案和回采工艺的岩层移动规律,并预测岩移对竖井工程稳定性的影响,是深部矿体安全开采的重要保证。

3.4 开拓工程长期稳定性预测

金川工程围岩处于高应力环境,上部矿体开采活动产生次生应力场交替变化,对开拓工程的长期稳定性产生不利作用。深部开采再次改变采场应力状态和赋存环境,从而加剧对开拓工程稳定性的影响。鉴于开拓工程服务于深部开采长达几十年,因此,开拓工程的长期稳定性研究是深部矿体安全采矿的重要研究课题之一。

1)高应力工程围岩变形机理。针对深部工程岩体的地质结构和高应力环境,开展工程围岩变形破坏机理研究,建立与之相适应的力学模型,进行采场围岩、变形和整体稳定性分析,对于安全控制措施的制定和实施极为重要。

2)深部开拓工程稳定性控制技术。深部开拓工程变形破坏机理是地压控制和长期稳定性维护的重要依据。在此基础上,开展支护型式和支护参数、支护成本和长期稳定性预测等研究,也是深部矿床开采的另一关键技术。由于各方面的问题既相互影响又相互对立,因此综合考虑它们之间的相互关系,从而寻求经济、可靠和方便施工的优化方案,是降低采场巷道维护成本和提高采矿经济效益的另一关键技术。

4 结语

金川矿山已经进入千米深井开采行列,因此正面临着深部开采所具有的一系列采矿技术难题。实现金川矿山深部矿床的安全、高效和低成本开采,必须坚持走科技创新之路,吸收和消化国内外先进采矿技术和工程经验,进一步优化决策深部开采方案,调整充填法开采方法与回采工艺,重视深部巷道围岩支护成套技术开发与应用,统筹规划深部开拓巷道和开采顺序,关注深部开采岩层移动规律以及对井巷工程稳定性的影响,继续开展深部开拓工程的稳定性控制技术与灾变失稳风险预测,不仅是金川矿山深部高应力条件下实施强采、强掘和强充的“三强”的重要保证,而且对采场整体稳定性以及控制岩层移动和安全采矿具有重要的意义。

参考文献

- [1] 刘同有,金铭良.中国镍钴矿山现代化开采技术[M].北京:冶金工业出版社,1995.
- [2] 刘同有,宋国仁.应用岩体力学技术加快金川铜镍矿床的建设速度[J].中国矿业,1997(5):39-46.
- [3] 吴爱祥,李宏业,王永前,等.金川二矿区深部开采面临的问题及对策[J].矿业研究与开发,2002,22(6):13-15.
- [4] 高谦,刘同有,方祖烈.金川二矿区深部开采潜在问题与优化控制技术[J].有色金属,2004,56(4):2-5.
- [5] 李爱民.金川矿山采矿方法及深井开采工艺的改进[J].中国矿山工程,2005,34(6):5-10.
- [6] 高谦,吴永博,王思敬.金川矿区深部高应力矿床开采关键技术研究[J].工程地质学报,2007,15(1):38-49.
- [7] 杨志强,高谦,王玉山,等.特大型镍矿工程地质与岩石力学[M].北京:科学出版社,2013.
- [8] 王永前,把多恒,高谦,等.特大型镍矿连续开采地压控制技术[M].北京:科学出版社,2013.
- [9] 杨金维,余伟健,高谦.金川二矿机械化盘区充填采矿方法优化及应用[J].矿业工程研究,2010,25(3):11-15.
- [10] 周青,杨新安,高艳灵.金川不良岩体分类及其巷道支护研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002,21(2):140-142.
- [11] 王永才,杨长祥,陈仲杰.金川镍矿井巷支护技术评价与展望工程.采矿工程学新论[M].北京:煤炭工业出版社,2008,233-240.
- [12] 高谦,高建科,武控军,等.高应力破裂围岩巷道变形控制技术[M].北京:科学出版社,2013.
- [13] 高谦,汪萍,杨慧娟.影响采场和巷道应力应变因素分析[J].山西建筑,2006,32(20):89-90.
- [14] 余伟健,高谦.高应力巷道围岩综合控制技术及应用研究[J].煤炭科学技术,2010,38(2):1-5.
- [15] 高谦,宋建国,余伟健,等.金川深部高应力巷道锚喷支护设计与数值模拟技术[J].岩土工程学报,2007,29(2):279-284.
- [16] 李莉,高谦,王正辉.金川二矿区深度1178m中段采场巷道支护设计与稳定性分析[J].有色金属,2005,57(1):19-22.
- [17] 张周平,余伟健,高谦,等.金川深部工程围岩支护时机与参数设计研究[J].金属矿山,2008(2):40-44.
- [18] 刘增辉,高谦,华心祝,等.深部动压回采巷道的矿压时空分布规律研究[J].矿业研究与开发,2010,30(2):37-39.
- [19] 余伟健,高谦,韩阳,等.全耦合分析法在巷道安全评价中的应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007,22(1):1-4.
- [20] 余伟健,高谦,韩阳,等.不稳定围岩开挖与让压支护的优化设计及数值分析[J].煤炭学报,2008,33(1):11-16.
- [21] 余伟健,高谦,宋建国.复合性软岩巷道联合支护优化设计[J].采矿与安全工程学报,2007,24(2):235-238.
- [22] 杨志强,高谦.神经网络在矿山巷道安全预测中的应用[J].矿业研究与开发,2007,27(3):75-76.
- [23] 张梅花,高谦,翟淑花,等.金川二矿贫矿开采充填设计优化及数值分析[J].金属矿山,2009(11):28-31.
- [24] 张梅花,高谦,闫振华,等.金川矿区副井工程让压支护数值分析与参数优化[J].矿冶工程,2010,10(1):13-16.
- [25] 张周平,余伟健,高谦,等.锚固设计的关键机理路径分析法及实例分析[J].矿业研究与开发,2008,28(3):64-67.
- [26] 余伟健,高谦,韩阳,等.基于RES的地下巷道工程稳定性全耦合分析方法[J].岩土力学,2008,29(6):1489-1493.
- [27] 余伟健,高谦,朱川曲.深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2134-2142.
- [28] 杨志强,高谦,王正辉.预应力锚索支护参数优化研究及在金川二矿区的应用[J].岩土力学,2008,29(5):1361-1366.
- [29] 余伟健,高谦,韩阳,等.非线性耦合围岩分类技术及其在金川矿区的应用[J].岩土工程学报,2008,30(5):663-669.
- [30] 杨志强,高谦,刘剑,等.主回风井垮塌通风技术问题的探讨[J].矿业快报,2007(2):49-50.

Problems and countermeasures for safe and effective filling mining in Jinchuan Nickel mine in the deep and high stress

Yang Zhiqiang^{1,2}, Gao Qian¹, Chen Dexin², Guo Huigao²

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine Ministry of Education USTB, Beijing 100083, China; 2. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China)

[Abstract] Jinchuan nickel mine is well known for its high crustal stress, thick and large ore body and unstable ore rock in the mining industry. It is well noted by domestic and overseas mining industry for the the huge orebody mining difficulty and high filling cost. In recent years, with the depth of mining approaching 1 000 m and stope area exceeding $1 \times 10^5 \text{ m}^2$, "three high" mining environment, which is characterized by high temperature, high pressure and high osmotic pressure, is more and more significant. As a consequence, the safty of deep ore body and

the mining efficiency are seriously challenged. In this thesis the problems and challenges faced by deep mining is overviewed firstly. Then the control problems of roadway and stope face stability faced by mining production are stated. Catastrophe risk of instability caused by stope wall rock deformation and rock strata movement is analyzed. At last, proposing technical difficulties that the jinchuan deep mining safely and efficiently should be overcome, providing clear research direction for improving development ability and the comprehensive utilization of resources.

[Key words] Jinchuan Nickel mine; deep mining; high stress; key technology; study direction