

# 近距离巷道群覆岩活动的 扩大压力拱理论与岩柱荷载研究<sup>\*</sup>

秦乐尧<sup>1</sup> 刘长武<sup>2</sup> 方延强<sup>2</sup>

(1. 北京天地华泰采矿工程技术有限公司; 2. 四川大学水利学与山区河流开发保护国家重点实验室)

**摘 要** 随着各类采矿工程和其它岩土工程的不断发展,越来越多的地下工程都涉及到近距离巷道群的设计、施工与维护问题。近距离巷道群围岩的变形破坏规律和巷间岩柱荷载计算成为地下工程界十分关注的热点课题之一。在对单个巷道周围有极限平衡区应力分布规律研究的基础上,结合巷道覆岩活动的压力拱理论,系统研究了近距离巷道群周围的应力分布规律,提出了近距离巷道群覆岩活动的“扩大压力拱”理论,给出了计算近距离巷间岩柱荷载的计算公式,提出了防止近距离巷间岩柱连锁破坏的技术措施。

**关键词** 巷道群 扩大 压力拱 岩柱荷载 连锁破坏

## Research on Expansive Pressure Arch Theory and Rock Pillar Load about the Activity of the Covered Rock Mass in Close Laneways

Qin Leyao<sup>1</sup> Liu Changwu<sup>2</sup> Fang Yanqiang<sup>2</sup>

(1. Beijing Tiandihuatai mining engineering technique limited company;

2. State key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, SCU)

**Abstract** With the constant development of mining and other geotechnical engineering, more and more underground engineering will relate to the design, construction and maintenance of the close laneways. Deformation and failure law of the covered rock mass in the close laneways and the calculating of rock pillar load among laneways become one of the hot topics in the field of underground engineering. Based on study on the stress distribution of single laneway with limit equilibrium area, combining with the pressure arch theory about the activity of the covered rock mass in laneway, this paper systematically studies the stress distribution in close laneways, proposes the expansive pressure arch theory about the activity of the covered rock mass in close laneways, gives calculating formula of rock pillar loads among laneways, and points out technical measures to avoid the chain failure of the rock pillar in close laneways.

**Keywords** Laneways, Expansive, Pressure arch, Rock pillar load, Chain failure

随着各类地下采矿工程与其它岩土工程的不断发展,越来越多的地下工程都涉及到近距离巷道群或近距离峒室群的设计与稳定性研究问题。除传统意义上的地下金属矿山房柱采矿法要讨论矿房与矿柱的稳定与矿柱荷载问题外<sup>[1]</sup>,为保护地面建筑物和地表水体免遭地下采矿破坏的煤炭“三下”开采中应用的“条带”开采<sup>[2]</sup>、水电工程的尾水峒室<sup>[3]</sup>等都与近距离巷道(峒室)群的围岩稳定问题紧密相关。

与单一的巷道或峒室相比,由于近距离巷道群影响和涉及的范围更广,存在着巷道间的相互作用与相互影响,而且一旦整个巷道群失稳破坏所造成的工程危害更大,因此研究近距离巷道群的围岩变

形破坏规律和巷间岩(煤)柱荷载就成为地下工程界十分关注的热点课题。

与金属矿山的地下巷道和水电工程的尾水峒室等相比,煤炭“条带”开采中的近距离巷道群多布置在煤层之中,煤层及顶、底板围岩节理、裂隙发育,强度相对较低,巷道围岩的变形相对较大,此时的近距离巷道群覆岩活动范围更大,研究更具代表意义。因此这里以煤炭“条带”开采为研究对象,来讨论近距离巷道群的覆岩活动规律与岩(煤)柱荷载问题。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(编号:50879049,50574064),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2010CB226802)。

秦乐尧(1966—),男,北京天地华泰采矿工程技术有限公司,副总经理,高级工程师,硕士,100013北京市和平里东街煤炭大厦1607。

## 1 近距离巷道群周围的应力分布规律

地下巷道的开掘工作,破坏了地层原岩应力的平衡状态,导致巷道周边岩体内应力的重新分布和应力集中。如果巷道周边围岩的集中应力小于围岩强度,这时围岩的物理性质状态保持不变,围岩仍处于弹性状态。如果周边围岩局部区域的应力超过围岩强度,则这部分围岩的物理性质状态就要改变,巷道周围就会产生一定范围的极限平衡区,同时引起应力向围岩深部转移<sup>[4]</sup>。

### 1.1 单个巷道周围有极限平衡区时的应力分布

对于大多数地下采矿工程而言,由于巷道埋深较大,原岩应力较高,而围岩强度相对较低,因此巷道周围往往存在一定范围的极限平衡区。根据弹塑性力学理论<sup>[4-5]</sup>,可以求得双向等压应力状态下,圆形巷道周围极限平衡区内的径向和切向应力、以及极限平衡区半径的计算公式,如图1及式(1)至(3)所示。

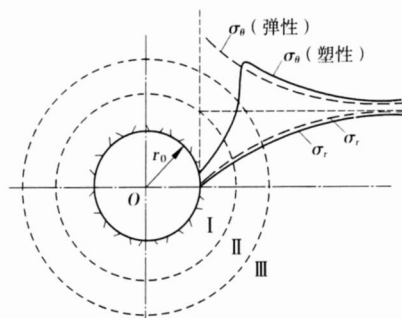


图1 巷道周围的弹塑性变形区及应力分布

$$r = c \cot \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right], \quad (1)$$

$$= c \cot \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right], \quad (2)$$

$$R = r_0 \left[ \frac{(10^{-3} H + c \cot \varphi) (1 - \sin \varphi)}{P_i + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}, \quad (3)$$

式中,  $\sigma_r$  分别为径向和切向应力, MPa;  $R$  为极限平衡区半径, m;  $H$  为原岩应力, 其中  $\gamma$  为上覆岩层的平均密度,  $\text{kN/m}^3$ ,  $H$  为巷道的埋深, m;  $r_0$  为巷道半径, m;  $r$  为离开巷道中心的距离, m;  $c$  为围岩的粘结力, MPa;  $\varphi$  为内摩擦角, ( $^\circ$ )。

从上面的分析结果可以看出:巷道开掘引起的应力场的重新分布不仅和巷道所处的地层原岩应力状态、煤岩体本身的物理力学性质等有关,而且和巷道本身的尺寸、支护强度等也直接相关。此外,从图1中还可以看出:当同一水平上同时存在有2个或2

个以上的巷道,当巷道之间的距离较小时,还存在着巷道间的相互作用与相互影响问题。

### 1.2 近距离巷道群周围的应力分布规律

如引言中所述,地下采矿工程中,有时要在地下的某些区域成组地开掘一系列巷道,即形成所谓的巷道群。显然,巷道群开掘所引起的应力变化同单个巷道开掘所引起的应力变化有着紧密的联系。可以在讨论单个巷道开掘引起的应力重新分布规律的基础上讨论巷道群周围的应力分布规律。

一般说来,相邻2条巷道或多条巷道周围的应力分布会受到每条巷道的形状、尺寸、总的巷道条数以及2条巷道之间的距离等因素的影响。显然,2条巷道之间的距离是决定巷道群应力重新分布的最重要因素之一。

由单个圆形巷道周围切向应力的分布规律可知<sup>[6]</sup>:巷道周围有一个剧烈影响的范围,一般以超过原岩应力的5%处为界。令此影响半径为 $R_i$ ,若相邻2巷道的间距大于 $2R_i$ ,则可以认为此2条巷道不会产生相互影响,巷道周边的应力分布也将和单条巷道的情况基本相同。此时,即使存在多条巷道,它们之间也不产生相互影响;反之,如果2巷道的间距小于 $2R_i$ ,则相互之间就会产生影响。图2所示为相邻2巷道间距小于 $2R_i$ 时产生相互影响的关系图。

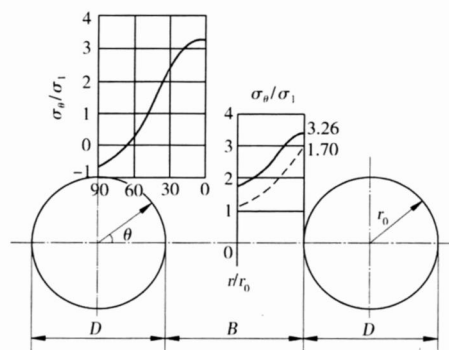


图2 等直径相邻2巷道当 $B=D$ 时的切向应力分布

图2所示的 $D=B$ ,所处的应力场侧压力系数的情况下,2巷道之间周边上的切向应力集中系数为 $3.26^{[6]}$ ;而单条巷道时切向应力集中系数为3(图中的虚线所示)。在 $r/r_0=2$ 处,即2条巷道间距的中点处, $\sigma_{\theta}/\sigma_1=1.71$ ,比原来的应力 $1.22$ ,增长了41.7%,充分说明了近距离巷道群周围的应力分布规律,从而可以得出一般情况下,考虑巷道相互影响时的应力分布如图3所示<sup>[7]</sup>。

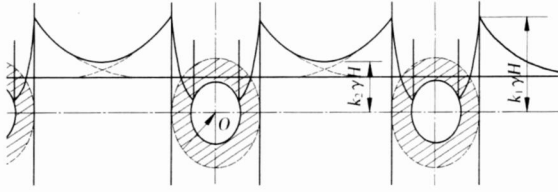


图 3 巷道群开掘诱应力场的演变

虚线—单个巷道时的应力分布线;实线—叠加后的应力分布线

## 2 近距离巷道群覆岩活动扩大压力拱理论

巷道周围极限平衡区的存在,使得巷道周边围岩产生向巷道自由空间移动、垮落的趋势,从而产生作用在巷道支护结构上的松动矿山压力。

### 2.1 单一巷道覆岩活动的压力拱理论

考虑巷道上覆岩自然平衡拱(压力拱)的存在,单一巷道松动矿山压力可按图 4 所示的“压力拱理论”进行计算。

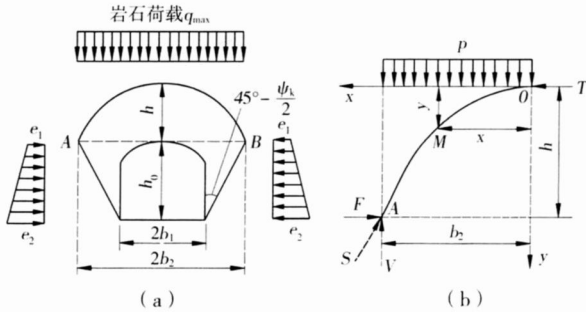


图 4 压力拱理论示意

根据巷道的跨度和高度,利用压力拱理论可以计算出压力拱的跨度和高度,从而可以直接确定出巷道上覆岩的最大荷载,即最大的矿山压力,如式(4)至式(7)和图 4 所示<sup>[5]</sup>。

压力拱的跨度  $B$  为

$$B = 2b_2 = 2b_1 + 2h_1 \tan \left( 45^\circ - \frac{k}{2} \right); \quad (4)$$

压力拱的高度为

$$h = b_2 / f_k, \quad (5)$$

$$f_k = \frac{c}{10}, \quad k = \arctan f_k, \quad (6)$$

$$q_{\max} = h; \quad (7)$$

式中,  $b_2$  为压力拱跨度  $B$  的一半, m;  $b_1$  为巷道宽度的一半, m;  $h_0$  为巷道的高度, m;  $f_k$  为岩石的坚固系数;  $c$  为整体性岩石的单轴极限抗压强度, MPa;  $q_{\max}$  为最大荷载集度。

根据压力拱理论的成拱条件,当岩石的  $f_k < 0.8$  时,巷道压力拱的高度  $h$  应大于或者等于  $5b_2$ 。由此可知普氏理论公式存在有一定的偏差,因此需要对其进行修正<sup>[8]</sup>,修正后的公式如式(8)所示:

$$h = kb_2 / f_k, \quad (8)$$

其中,

$$k = \begin{cases} 4.0 \sim 5.0 & \text{当 } f_k < 0.8, & \text{不稳定岩石;} \\ 3.0 \sim 4.0 & \text{当 } 0.8 < f_k < 4, & \text{中等岩石;} \\ 1.5 \sim 2.0 & \text{当 } 5 < f_k < 8, & \text{坚硬岩石;} \\ 1.0 & \text{当 } f_k > 1.0, & \text{极坚硬岩石。} \end{cases}$$

$k$  为压力拱修正系数;其它符号意义同前。

### 2.2 近距离巷道群覆岩活动的扩大压力拱理论

当同一水平的煤(岩)层中开掘有多条近距离的巷道或峒室时,不仅巷道群周边的应力分布产生如 1.2 所述的变化,同时巷道上覆岩的活动规律也有很大的差异。这一点在“三下”采煤的“条带”开采工艺中表现得尤为突出。

条带开采法是一种部分开采方法,就是将被开采的煤层划分成比较正规的条带形状,采 1 条、留 1 条,使留下的条带煤柱支撑上覆岩层,从而使地表只产生较小的沉降变形。由于“条带”开采能有效地控制上覆岩层的移动和地表沉陷,保护地面建筑物和生态环境,有利于安全生产,因此在我国许多矿区都有所应用<sup>[9]</sup>。

采用条带方式对某一区域的煤层完成部分开采后,形成图 5 所示的采出部分与遗留煤柱韵律相间的类似于近距离巷道群连续开掘的整体格局。如果设计的采留比合理,保证每一煤柱在其两侧采出后仍然有足够的承载能力和完整性,则能使整个上覆岩层的活动范围较小,实现保护地面建筑物以及地表水体的目的。

但由于煤岩体的裂隙性、非均质和不连续性,使得人们在进行采留比设计时,很难准确地获得煤岩物理学等相关的计算参数,从而存在着某些预留煤柱可能遭受破坏的问题。按最不利的情况考虑,当采留比设计不合理、或采出比例过大时,可能形成小煤柱的连锁破坏问题。如其中的一个小煤柱 3 尺寸过小,发生失稳破坏,则其上承担的荷载将被转移到与其相邻的小煤柱 2 和小煤柱 4 上,使得 2 和 4 小煤柱也发生破坏。当这种煤柱破坏连续发生时,最终形成一个覆岩活动范围很大的“扩大压力拱”,如图 5 所示。

此时该“扩大压力拱”的高度,就是校核整个巷间煤柱群最不利情况下的上覆岩层荷载的计算厚度  $H$ 。而要保证整个煤柱系统仍能起到保护地面建筑物的作用,最外侧的 2 个煤柱(扩大压力拱的拱

脚)则必须有能够承受整个“扩大压力拱”传递到拱脚处荷载的宽度。

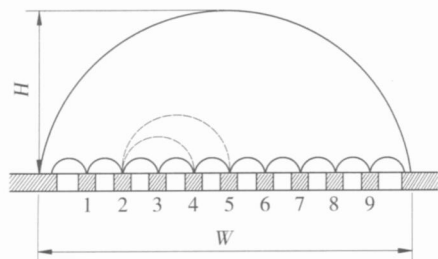


图5 近距离巷道群覆岩活动的“扩大压力拱”示意

结合单一煤柱荷载计算的有效面积理论<sup>[10]</sup>,可以得到最不利情况下巷间煤柱上的载荷为

$$P = \frac{(a+b)H}{a} = \frac{(a+b)}{a} \cdot \frac{Wk}{f_k} \quad (9)$$

式中,  $a$ ,  $b$ 分别为留设煤柱宽度和采出宽度, m;  $W$ 为覆岩平均容重,  $\text{MN/m}^3$ ;  $W$ 为整个“扩大压力拱”跨度, m; 其它符号意义同前。

### 3 工程应用实例

冀中能源集团有限责任公司邢东矿为大采深矿井,主采2<sup>#</sup>煤层平均厚度4.35 m,平均倾角10°;工业广场永久保护煤柱煤层埋深842~957 m。由于煤层埋深大,工业广场煤柱相对较大,煤柱东西平均宽680 m,南北平均长455 m,造成大量的永久性煤柱损失。

为减少工业广场的煤柱损失,并开掘出一定的地下空间用于堆放矸石,设计在煤柱中采用穿巷开采的方式进行部分开采,因此需要对合理的采留比进行分析。

煤柱中穿巷开采合理采留比关系的研究,实质上就是校核在煤层中开掘一系列近距离巷道后的巷间煤柱的稳定性问题。考虑到现场的实际施工条件和巷道支护方面的要求,设计穿采巷道的跨度为5 m,2条巷道间留设5 m的煤柱,采留比满足1:1的关系。显然,这样的问题按传统的单一巷道的压力拱理论来计算上覆岩层的荷载是不安全的,因此可以按上面的“扩大压力拱”理论来进行分析。

为保证整个工业广场煤柱实施穿巷开采后的整体稳定性,左右两边分别留设50 m的大煤柱,中间穿巷开采区的宽度为580 m。上覆岩层的加权平均抗压强度按40.4 MPa考虑,从而有:

$$f_k = \frac{c}{10} = \frac{40.4}{10} = 4.04,$$

$$k = \arctan f_k = 76^\circ$$

压力拱跨度:

$$W = \frac{1}{2} \times 580 + 3.5 \tan \left( 45^\circ - \frac{76^\circ}{2} \right) = 290.4 \text{ m}$$

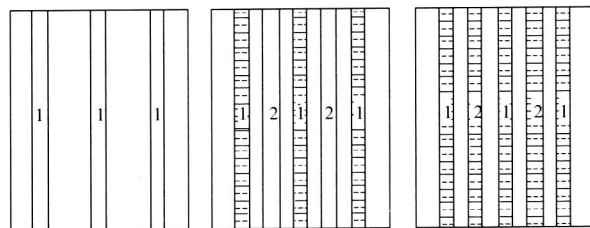
荷载计算高度 ( $k=3$ ):

$$H = \frac{Wk}{f_k} = 215.6 \text{ m (取整数 220 m 进行计算)}.$$

按掘采5 m、留设5 m的关系设计采留比,则巷间煤柱所受荷载:

$$P = \frac{(a+b)H}{a} = 11 \text{ MPa}.$$

由上面的计算可以看出:如果采用依次顺序开掘巷道的方式进行穿巷开采,在采留比1:1的情况下,巷间煤柱上的荷载是很大,可能存在着小煤柱的连锁破坏问题。因此要实现采5 m、留5 m的1:1采留比,就必须对穿采巷道及时进行矸石充填(利用充填矸石分担部分煤柱荷载),并按间隔跳采、及时充填的模式实现安全开采的目的,如图6所示。



(1)第一次掘巷 (2)第一次充填及第二次掘巷 (3)第二次充填完毕

图6 穿巷开采方案示意

1—第一次所掘巷道; 2—第二次所掘巷道

邢东矿按图6所示的安全生产模式实施穿巷开采,取得了良好的社会 and 经济效益,实践证明“扩大压力拱”理论符合近距离巷道群覆岩活动的客观规律。此外,通过上面的分析计算还可以看出:作用在煤柱上的荷载是随着煤柱尺寸的减小而增大的,煤柱越小,煤柱上荷载越大;与此同时,煤柱强度则是随着煤柱尺寸的减小而降低的,从而当设计的采留比过大时,可能造成整个煤柱体系破坏,最终无法实现保护地面建筑物的目的。

### 4 结论

(1)近距离巷道群周围的应力分布同每条巷道的形状、尺寸、总的巷道条数以及2条巷道之间的距离等因素直接相关,2条巷道之间的距离是决定巷道群应力重新分布规律的主要因素之一。当2巷之间的间距小于2倍的掘巷影响半径时,从巷道群围岩应力分布的角度上讲,二者之间必然存在相互作用关系。

(2)近距离巷道群中,巷道与巷道之间煤(岩)柱上荷载的大小,与巷道跨度与巷间煤岩柱宽度之

比有直接的关系,并且随着煤岩柱尺寸的减小而增大,煤岩柱越小,作用在煤岩柱上的荷载就越大。

(3)煤层中开掘的近距离巷道群,巷道跨度与留设的煤柱宽度之比过大时,煤柱群中的某个小煤柱破坏失稳后,该小煤柱上承担的荷载将被转移到与其相邻的其它 2 个小煤柱之上,使得这 2 个小煤柱也相继发生破坏,当这种破坏连续发生下去时,整个近距离巷道群(煤柱群)将产煤柱的连锁破坏问题。此时,覆岩活动规律可以用“扩大压力拱”理论来解释。该“扩大压力拱”的高度就是巷间煤柱最不利情况下的覆岩荷载的计算厚度。

### 参 考 文 献

[1] 童光煦. 高等硬岩采矿学 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1995.

- [2] 徐永圻. 采矿学 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003.
- [3] 武永新,等. 水工建筑物设计与加固 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2004.
- [4] 王龙甫. 弹性力学 [M]. 北京:科学出版社, 1984.
- [5] 徐志英. 岩石力学 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [6] 钱鸣高. 矿山压力及其控制 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.
- [7] 刘长武. 地层空间应力场的开采扰动与模拟 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2005.
- [8] 方延强. 广场永久煤柱穿巷开采矸石充填合理采留比研究 [D]. 成都:四川大学, 2009.
- [9] 张兴华,等. 条带开采研究现状及发展趋势 [J]. 煤炭开采, 2000(3): 5-7.
- [10] 克拉茨 H. 采动损害与防护 [M]. 马伟民,等,译. 北京:煤炭工业出版社, 1984.

(收稿日期 2009-10-10)

(上接第 4 页)

部分股份给当地老百姓,逐年分红,但不享有表决权等股东的其他权益。老百姓则负有保证矿山生产经营环境稳定的责任和义务。

(7)加强职业技术培训。从目前招聘的西藏当地员工情况看,普遍存在文化水平低、职业技术差的问题。企业要实现员工本土化需要很长的过程。因此,企业不得不高成本从内地聘用操作工。为了改变这个状况,一是必须建立完善的职业技术教育体系,提供必要经费,配备足够师资,改善教学条件,根据具体情况还可增设职业技术学校,加强员工职业技术教育。二是改进教学内容和教学方向。教学内容要根据社会需要市场需要适时改变,不能几十年不变。教学方向要侧重理论与实践紧密结合,注重实际与操作,培养学生的动手能力。三是共同培训,定向培训。藉此培养西藏自己的产业工人队伍。

(8)采取合理的用工制度。主要指员工本土化和内地员工轮换制度。员工本土化是一个较长的过程,要与职业技术培训和企业的“传、帮、带”相结合;内地员工要实行轮换制度,保护支持参与西藏建设的员工的身心健康。

### 4 结 语

我国西藏自治区是矿产业的处女地,矿产资源丰富,开发利用起步较晚,是我国未来经济发展提供矿产资源的新基地,前景十分广阔。只要加强地质勘探工作,搞好资源管理,突出环保监管,妥善处理利民惠民问题,积极引进和发展具有西藏矿产资源特色的高效绿色环保开发技术,突破制约西藏矿产

资源高效绿色环保开发的瓶颈问题,西藏矿产业必将出现崭新局面,支撑西藏经济良性快速发展。

### 参 考 文 献

- [1] 西藏自治区国土资源厅. 西藏自治区矿产资源概况 [EB/OL]. [2009-09-10]. <http://www.xzgtt.gov.cn/xzgtzygk.htm>.
- [2] 西藏自治区国土资源厅. 西藏自治区矿产资源对 2010 年国民经济建设保证程度论证 [R]. 拉萨:西藏自治区国土资源厅, 1994.
- [3] 李 月,拉巴次仁. 矿产业成为拉动西藏经济跨越式发展的强劲“引擎” [EB/OL]. [2009-09-10]. <http://tibet.cctv.com/20090910/112560.shtml>.
- [4] 西藏自治区人民政府. 西藏自治区政府工作报告 [N]. 西藏日报, 2007-02-09.
- [5] 程晓红,李 静. 向巴平措与国土资源部赴藏调研组座谈 [N]. 西藏日报, 2009-06-14.
- [6] 中国藏学研究中心. 西藏经济社会发展报告 [R]. 拉萨:西藏发展和改革委员会, 2009.
- [7] 西藏自治区交通厅. 交通概况 [EB/OL]. [2009-10-08]. <http://www.xzjtt.gov.cn/as/jtgk/001.asp>.
- [8] 文 华,蒋石林. 高原环境条件及其对输电设备的影响 [J]. 云南电力技术, 2001, 29: 5-7.
- [9] 刘奎芳,毛海荣. 高原环境条件及其对机电产品的影响 [J]. 环境技术, 1999, 17(5): 74-78.
- [10] 曹 寅. 工作在高海拔地区电子产品的绝缘性能变化分析 [J]. 安全与电磁兼容, 2002(2): 38-39, 50.
- [11] 郭小宏,刘唐志,尹 瑞,等. 西部高原地区沥青混凝土路面施工机群选型研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2005(7): 21-24.
- [12] 刘承国. 摸清矿产家底,西藏很急切 [N]. 地质勘查导报, 2005-08-11.

(收稿日期 2009-10-31)