

# 山区开采沉陷与采动损害

何万龙 著

中国科学技术出版社

·北京·

## 作者简介

何万龙,教授,政府特殊津贴有突出贡献的专家。1934年10月生于湖南省安仁县。早年就读于中国人民解放军测绘学院制图系和武汉测绘学院工测系,先后在阳泉矿务局、山西矿业学院和太原理工大学从事矿山测量和开采沉陷的实践、教学与研究。主持过省、部和国家自然科学基金等资助的多个科研项目,在国内外学术刊物上发表论文30余篇,出版专著2部。省教育系统优秀教师、优秀党员和学校科技标兵,获省、部级科技成果和科技进步奖多项,对山区煤矿开采沉陷和采动损害的观测和研究做出了开创性的贡献。

## 序

本书为笔者 1980 年以来在开采沉陷和采动损害研究过程中撰写和发表的论文选集。不包括科研报告、科技项目报告、科技鉴定报告、技术规程、研究成果综合性评述以及发表在外文刊物上的文章和译著。

从 20 世纪 50 年代开始,笔者在基层从事矿山测量和开采沉陷的观测和研究工作。1978 年进入山西矿业学院地质测量系担任测量学、控制测量和测量平差等课程的教学工作,同时继续从事开采沉陷和采动损害方面的研究。1980 年和 1990 年分别承担了阳泉矿区和西山矿区的地表移动观测资料综合分析任务,随后又陆续主持了省、部及国家自然科学基金资助的多个与山区开采沉陷和采动损害有关的研究项目以及企业委托的相关研究课题。作为山西省高级人民法院司法技术鉴定中心受聘专家和中国煤炭学会煤矿开采损害技术鉴定委员会委员,还主持过多项煤矿采动损害方面的技术鉴定工作,并应邀参与了 1996 年和 2000 年分别由煤炭工业部及国家煤炭局组织编写和颁布的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》的撰稿工作,首次将山区开采沉陷方面的研究成果(如山区煤柱留设,山区地表移动预计和采动坡体稳定性预测等)纳入规程推广应用。1995 年以后致力于煤矿土地复垦方面的研究,受山西大地复垦环保工程技术有限公司的委托,先后主持了太原、西山、煤气化·轩岗、潞安、晋城、汾西、霍州和大同等矿区的土地破坏(包括采煤塌陷和煤矸石压占)状况调查与复垦规划的技术设计及报告书的编写任务。与此同时,还受煤矿、交通、电力等行业的委托承担了有关采空区地面建筑区地基及土地复垦场地稳定性评价工作。

众所周知,开采沉陷是与采矿工程密切相关的一个热门学科,主要研究矿物地下开采引起覆岩和地表沉陷产生的移动变形以及由此带来的土地、水体和建(构)筑物等生态环境方面的损害及其防治技术。它起源于欧洲,随着第二次世界大战后采矿业的蓬勃兴起,法国、英国、波兰和前苏联等国的科学家在开采沉陷领域的研究方面也获得巨大进展,初步建立了开采沉陷学的理论框架。我国解放后在引进欧洲国家研究成果的基础上,逐步开展了自己规模宏大的观测和研究工作,取得了举世瞩目的研究成果,在保证矿区地面工业和民用建(构)筑物安全的同时,推动了建筑物、水体和铁路等保护煤柱的压煤开采,为我国煤炭行业的安全生产和煤炭资源的合理开采做出了巨大贡献。但是我们也清醒地看到,国内外在开采沉陷和采动损害方面的研究成果主要集中在平原地区,也就是把地表看作平面,而我国大约有三分之一的煤矿和半数以上的其他矿物产地位于山区。因而当 20 世纪 50~60 年代我国许多山区煤矿按以往平地的观测和研究成果留设保护煤柱时,出现了意想不到的问题:几乎所有位于山区的受护对象都遭到了不同程度的损坏,有些甚至是极为严重的损害,即所留设的保护煤柱没有起到应有的保护作用。在此期间,笔者在阳泉矿区从事开采沉陷引起的地表移动观测工作,至 20 世纪 60 年代初,已积累十几个观测站的成果。在 1962 年进行观测资料分析时,发现部分观测线的水平移动分布出现异常,当时还以为是观测误差或测点人为移动所致,没有意识到这是山区地形的影响。“文化大革命”期间,笔者在煤矿井上下劳动多年,直到 1979 年调入山西矿业学院才又旧事重提,对阳泉矿区历年所积累的 30 多个地表移动观测站的资料进行了系统的综合分析。从这次分析中笔者才意识到:山区采动地表水

平移动的“异常”并非偶然现象,山区采动地表的垂直下沉分布规律也与平地不同。进一步的研究表明,山区开采沉陷区地表任意点的移动向量不仅与地下开采影响有关,而且与该点所处的地形和微地貌因素有关。也就是山区采动地表任意点的移动向量是相当于平地的采动分量与地形和微地貌引起的滑移分量的叠加。这一结论在随后的太原西山矿区和贵州省水城矿区地表移动观测资料分析中得到证实。

上述发现在当时可以说具有突破性的意义。但对于山区开采沉陷和山区地表移动变形预计来说还远远不够,还必须进一步搞清采动滑移分量的相关影响因素及其量化问题,随之而来的还有山区开采沉陷非连续移动的采动滑坡和坡体稳定性预测问题,这些就是笔者随后多年来谋求解决的问题。现在看来,笔者虽然在这方面做了努力,提出并多次改进了山区地表移动变形预计模型,也初步建立了采动坡体稳定性预测模型,但自己认为还很不理想,更谈不上完善,只能说是开了一个头,许多问题还需进一步探索。长江后浪推前浪,一代新人换旧人,我衷心企盼后继者在山区开采沉陷和采动损害研究方面做出新的贡献。

本书共分五个部分:①山区地表移动与变形预计;②山区采动滑坡及采动坡体稳定性分析;③煤矿采动损害与防治;④矿区生态破坏与土地复垦;⑤测量误差与精度分析。每一部分的文章大体按发表时间顺序排列。

在本书编辑出版之际,笔者首先要感谢解放军测绘学院和武汉测绘学院对我的培育;感谢阳泉、西山、水城等矿务局的有关领导和地质测量工作者对我的支持和帮助;特别感谢煤炭科学基金、山西省和国家自然科学基金对我的支持;感谢中国测绘学会矿山测量专业委员会和山西省测绘学会对我的支持;感谢山西矿业学院和太原理工大学有关领导和同事对我的支持和帮助;感谢煤炭科学研究总院已故刘天泉院士以及仲惟林、焦传武教授;唐山煤炭科学研究分院周国铨、虞万波教授;中国矿业大学马伟民、王金庄教授;辽宁工程技术大学范学理教授;西安科技学院田家琦教授以及山西大地复垦环保工程有限公司董事长兼总经理袁元和高工等对我的帮助和支持,我的每一点成就都是与他们的支持和帮助分不开的。最后还要特别感谢与我多年共事的康建荣博士、任建华博士、马超博士、胡海峰硕士、胡晋山硕士以及留美学者赵志宏博士等对我的帮助和支持,他们都在不同时期参与了我所主持的研究工作,并为此付出了艰辛的劳动,其中尤以康建荣博士与我合作的时间最长,对我的帮助也最大。在本书出版之际,作者与康建荣、胡海峰合著的《山区采动地表变形及坡体稳定性分析》一书也已经出版。

由于山区开采沉陷和采动损害涉及的面很宽,作者的学识水平有限,书中的谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

何万龙

2002年12月10日

# 目 录

<b>第一部分 山区地表移动与变形预计</b> .....	( 1 )
开采影响下的山区地表移动 .....	( 1 )
开采引起的山区地表移动与变形预计 .....	( 11 )
山区地表移动规律及变形预计 .....	( 19 )
山区采动滑移的应力应变模型与滑移向量分析 .....	( 40 )
山区地表移动预计数学模型 .....	( 51 )
西山矿区地表移动观测资料综合分析 .....	( 57 )
山区地表移动与变形规律的研究 .....	( 69 )
山区地表移动预计数学模型的优化 .....	( 82 )
煤矿地表移动数据处理系统 SDY .....	( 86 )
基岩移动角随采深采厚变化规律的探讨 .....	( 97 )
<b>第二部分 山区采动滑坡及采动坡体稳定性分析</b> .....	( 108 )
山区煤矿采动滑坡研究现状 .....	( 108 )
山区地表采动滑移与采动滑坡 .....	( 109 )
采动滑坡分类 .....	( 112 )
采动滑坡实例分析 .....	( 113 )
影响采动坡体稳定性的主要因素 .....	( 131 )
采动坡体的附加应力应变与破坏类型分析 .....	( 137 )
采动坡体稳定性预测 .....	( 147 )
<b>第三部分 煤矿采动损害与防治</b> .....	( 167 )
英国煤矿开采沉陷损害及其防治 .....	( 167 )
英国煤炭的露天开采与环境治理 .....	( 182 )
英国煤矸石的利用与复地造田 .....	( 185 )
山区煤柱设计与压煤开采 .....	( 189 )
公路采空区(空洞)地表稳定性评价 .....	( 193 )
<b>第四部分 矿区生态破坏与土地复垦</b> .....	( 212 )
煤矿地表塌陷与土地复垦 .....	( 212 )
山西石炭二迭系煤田井工开采对水资源和植被的影响 .....	( 217 )
采煤塌陷区塌陷面积的预测方法与分析 .....	( 224 )
煤矿地表塌陷预测精度分析 .....	( 233 )
<b>第五部分 测量误差与精度分析</b> .....	( 240 )
平面控制网点位精度衡量 .....	( 240 )
万家寨引黄工程测量精度与投影方法探讨 .....	( 247 )

# 第一部分 山区地表移动与变形预计

## 开采影响下的山区地表移动\*

大量观测资料表明,开采影响下的山区地表移动与平地的地表移动规律有明显的不同,其中特别是水平移动。本文根据阳泉矿区地表移动观测资料,对山区近水平煤层开采条件下的地表移动问题作一探讨。

### 一、山区水平移动的特性

图 1 为山区 4 种沿走向的半盆地水平移动曲线,它们所对应的地质采矿条件基本相同,但由于地表的倾向和倾角不一样,曲线形状有很大的变化:

(1)地表坡度基本一致,倾向与下沉盆地相同时,半盆地的水平移动全为正值,但数值比一般平地大,且在盆地中心不趋近于零(图 1 中的 1-1)。

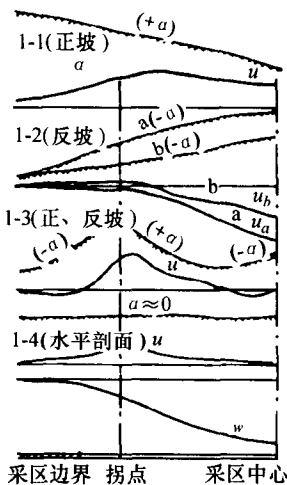


图 1 山区水平移动曲线

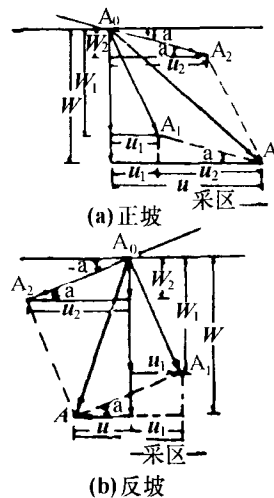


图 2 倾斜地表移动向量的叠加

(2) 地表坡度基本一致,倾向与下沉盆地相反时,可能出现两种情况。①地表倾角较大时,半盆地的水平移动全为负值,且愈向盆地中心负值愈大(图 1 中的 1-2a);②地表倾角较小时,拐点附近可能出现正值,其他位置仍为负值(图 1 中的 1-2b)。

(3) 地表坡度在大小和方向上都有变化时,水平移动也有相应的变化。地表倾向与下沉盆地相同时,水平移动正向递增;反之,则负向递增。其增减幅度正比于地表倾角(图

\* 本文为《阳泉矿区地表移动观测资料综合分析》研究报告中相关部分的缩写稿。由本书作者执笔,以阳泉矿务局和山西矿业学院的名义发表在《煤炭科学技术》1981. No. 7. p23 ~ 29. 该项目曾获山西省 1980 年科技成果二等奖。

1 中的 1-3)。

(4) 观测线与地面等高线方向一致时,水平移动规律与平地相似,但水平移动系数  $b$  比平地偏小(图 1-4)。

观测数据表明,当地表有表土覆盖,特别是表土层为坡积物时,上述特性甚为明显;当地表为裸露的风化基岩时,地表倾斜对水平移动的影响就明显减小。

## 二、倾斜地表移动关系式

通过对山区水平移动的分析得到以下初步结论:开采影响下的倾斜地表移动是采动地表在重力作用下向采空区中心和地表倾斜两个方向移动向量的叠加。如图 2 所示:设地表任意点  $A_0$  受采动影响后向采空区方向的移动向量为  $\overrightarrow{A_0A_1}$ ,向地表倾斜方向的移动向量为  $\overrightarrow{A_0A_2}$ 。则倾斜地表总的移动向量  $\overrightarrow{A_0A}$  为:

$$\overrightarrow{A_0A} = \overrightarrow{A_0A_1} + \overrightarrow{A_0A_2} \quad (1)$$

将各移动向量投影到移动盆地主剖面上分解为垂直分量  $w$  和水平分量  $u$ , 则

$$\left. \begin{aligned} w &= w_1 + w_2 \\ u &= u_1 + u_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

显然,式中  $w$  和  $u$  即为倾斜地表的下沉和水平移动,  $w_1, u_1$  和  $w_2, u_2$  分别为开采和地表倾斜两个移动向量所产生的下沉和水平移动。根据观测资料分析,  $w_1, u_1$  主要决定于地质采矿条件和上覆岩层性质,因而与平地的下沉和水平移动规律相似,可按一般地表移动预计方法计算,  $w_2$  和  $u_2$  与地表的倾角、倾向以及表土层性质和点的位置有关。通过倾斜地表移动观测资料和地表倾角、倾向的相关分析得到了下列关系式:

$$u_2 = u - u_1 = b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

式中:  $b_2$ ——坡度影响系数与点位及表土层性质有关;  $\alpha$ ——地表倾角,其前置符号视地表倾向而定(当地表倾向与下沉盆地倾向相同时取正号,称为正坡;反之取负号,称为反坡)。

由图 2 并考虑到(3)式的关系可得:

$$w_2 = u_2 \operatorname{tg} \alpha = b_2 w_1 \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (4)$$

以(3)、(4)代入(2)式得

$$\left. \begin{aligned} w &= w_1 + b_2 w_1 \operatorname{tg}^2 \alpha \\ u &= u_1 + b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于  $w_1, u_1$  可视为平地的下沉和水平移动,故上式可称为类似条件下的倾斜地表与水平地表移动关系式。

为了进一步探讨,设  $u_1$  与  $w_1$  的比值为  $b_1$ ,称为开采影响系数,则

$$u_1 = b_1 w_1 \quad (6)$$

以(6)式代入(5)式得

$$\left. \begin{aligned} w &= (1 + b_2 \operatorname{tg}^2 \alpha) w_1 \\ u &= (b_1 + b_2 \operatorname{tg} \alpha) w_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将上式中的二式相比消去  $w_1$  得

$$\frac{u}{w} = \frac{b_1 + b_2 \operatorname{tg} \alpha}{1 + b_2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (8)$$

$$w \cdot b_1 + (w \operatorname{tg} \alpha - u \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot b_2 - u = 0 \quad (9)$$

上式即为倾斜地表的下沉、水平移动与地表倾斜的关系式。

### 三、系数 $b_1$ 和 $b_2$ 的确定

为了按(5)式或(7)式计算  $w$  和  $u$ , 必须事先求得  $b_1$  和  $b_2$ 。  $b_1$ 、 $b_2$  是分别与地质采矿条件和地形有关的系数。由于地形和地质采矿条件的复杂性, 目前还很难直接确定它们之间的数量关系。下面介绍借助地表移动理论和数理统计方法按现场观测资料确定  $b_1$ 、 $b_2$  的两种方法。

#### 1. 计算法

由几何理论法可知, 在移动盆地主断面任意点上有

$$b_{1(x)} = \frac{u_{1(x)}}{w_{1(x)}} = \frac{b \cdot e^{-\pi(\frac{x}{r})^2}}{\frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r}\right) \right]} = F\left(\frac{x}{r}\right) \cdot b \quad (10)$$

式中:  $b$  —— 水平移动系数;

$r$  —— 主要影响半径。

$F\left(\frac{x}{r}\right)$  可按下式以  $\left(\frac{x}{r}\right)$  为引数算出如表 1。

表 1  $F\left(\frac{x}{r}\right)$

$\frac{x}{r}$	$F\left(\frac{x}{r}\right)$		$\frac{x}{r}$	$F\left(\frac{x}{r}\right)$	
	(-)	(+)		(-)	(+)
0.0	2.000	2.000	0.6	4.860	0.346
0.1	2.416	1.618	0.7	5.389	0.223
0.2	2.862	1.275	0.8	5.925	0.137
0.3	3.333	0.974	0.9	6.434	0.079
0.4	3.826	0.718	1.0	6.857	0.043
0.5	4.334	0.509	1.1	7.194	0.022

$$F\left(\frac{x}{r}\right) = \frac{2e^{-\pi(\frac{x}{r})^2}}{\left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r}\right) \right]} \quad (11)$$

如已知  $b$ , 即可按(10)式算出主断面上任意点的  $b_{1(x)}$ 。在拐点( $x/r=0$ )处,  $F\left(\frac{x}{r}\right)_0 = 2$ , 故

$$b_{1(0)} = \frac{u_{1(\max)}}{w_{1(\max)}} = F\left(\frac{x}{r}\right)_0 \cdot b = 2b \quad (12)$$

由(3)式可知, 对于移动盆地主断面任意点为

$$b_{2(x)} = \frac{u(x) - u_{1(x)}}{w_{1(x)} \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{u_{2(x)}}{w_{1(x)} \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (13)$$

式中  $\alpha$  和  $u_{(x)}$  可由倾斜地表观测求得。  $w_{1(x)}$ 、 $u_{1(x)}$ 、可按一般平地移动预计方法求得, 即

$$w_{1(x)} = \frac{w_{1(\max)}}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r}\right) \right] \quad (14)$$

$$u_{1(x)} = b \cdot w_{1(\max)} e^{-\pi(\frac{x}{r})^2} \quad (15)$$



当已知  $b$  和  $w_{1(\max)}$  时,即可算出主断面上任意点的  $b_{2(x)}$ 。

## 2. 解算法

为了避免  $w_1$ 、 $u_1$  的误差影响,  $b_1$ 、 $b_2$  可按(9)式直接解算。令

$$\left. \begin{aligned} A &= w \\ B &= wtg\alpha - utg^2\alpha \\ C &= -u \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

代入(9)式得

$$A \cdot b_1 + B \cdot b_2 + C = 0 \quad (17)$$

上式称为观测值方程。设对应于移动盆地某点有  $n$  组  $w$ 、 $u$  和  $\alpha$  观测值,即可组成  $n$  个观测值方程式,然后按最小二乘法组成法方程为

$$\left. \begin{aligned} [AA]b_1 + [AB]b_2 + [AC] &= 0 \\ [AB]b_1 + [BB]b_2 + [BC] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

解上列方程组即可求得该点的  $b_1$  和  $b_2$ 。

由于  $b_1$ 、 $b_2$  与盆地位置有关,因而上述两种方法均应在移动盆地主断面不同位置计算,然后分别取平均值和最或是值作为计算和解算结果。阳泉矿区按以上两种方法用 8 条走向主剖面观测线求得的  $b_1$ 、 $b_2$  的平均值如表 2 所示。其中  $b_1$  计算值对应于  $b = 0.22$ 。从表 2 看出:拐点内侧两种方法获得的结果十分接近;拐点外侧,特别是盆地边界部分差异较大。计算的差异主要来自两个方面:一是由于表土层性质不同,这种影响对  $b_2$  特别明显。如风化坡积物的  $b_2$  较一般黄土约大 20% ~ 30%,而风化基岩表面的  $b_2$  只相当于一般黄土地表的 10% 左右。表 2 所列的  $b_1$ 、 $b_2$  是一般黄土和坡积物地表的平均值。引起计算误差的另一原因是观测和计算本身的误差。由于盆地边界  $w$  和  $u$  的绝对值很小,因而这种误差表现得就更明显。为了消除这种误差影响,应对计算和解算结果作必要的调整。调整方法是将计算结果展绘在  $x/r$  坐标系中,然后通过各计算值的平均位置取点连线,该曲线对应的数值即为调整值,见图 3。

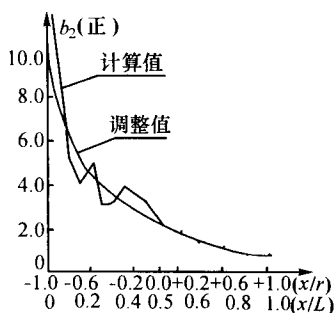


图 3  $b_2$  的计算值与调整值

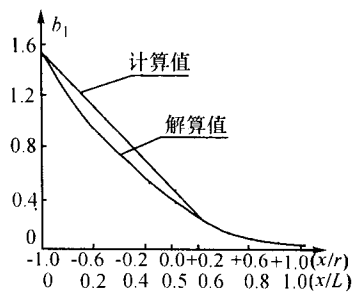


图 4 开采影响系数  $b_1$

## 四、下沉和水平移动曲线方程式

### 1. 系数 $b_1$ 、 $b_2$ 的特性

开采影响系数  $b_1$  是一个与移动盆地位置有关的系数,它由盆地边界向中心逐渐减小最后趋近于零(图 4)。按几何理论法导出的  $b_1$  表达式如(10)式;其解算值可近似地表为下列

函数式,即

$$b_{1(x)} = 0.8 \left( \frac{x}{r} + 1 \right)^2 - 1.54 \left( \frac{x}{r} + 1 \right) + 1.5 \quad (19)$$

表2 系数  $b_1, b_2$

点位 $\frac{x}{r}$	$b_1$			$b_2$				平均值	
	综合	解算		计算		解算		$b_1$	$b_2$
		正坡	反坡	正坡	反坡	正坡	反坡		
-1.0	1.51	1.70	1.30	17.50	24.00	15.50	30.00	1.50	21.73
-0.9	1.42	1.44	1.17	12.35	19.20	9.35	25.90	1.36	16.72
-0.8	1.30	1.22	1.05	8.20	13.50	6.50	21.25	1.22	12.33
-0.7	1.19	1.07	0.95	6.40	10.60	5.00	15.10	1.10	9.28
-0.6	1.07	0.92	0.86	4.95	7.90	4.12	10.70	0.98	6.92
-0.5	0.95	0.79	0.76	4.15	5.60	3.68	6.00	0.86	4.86
-0.4	0.84	0.69	0.68	3.50	4.30	3.40	3.40	0.76	3.65
-0.3	0.73	0.59	0.61	3.00	3.30	3.20	2.25	0.66	2.94
-0.2	0.63	0.52	0.54	2.60	2.50	2.90	1.85	0.58	2.40
-0.1	0.53	0.45	0.47	2.10	2.15	2.70	1.69	0.50	2.16
0.0	0.44	0.39	0.41	1.65	1.85	2.45	1.60	0.42	1.88
+0.1	0.36	0.32	0.36	1.35	1.60	2.15	1.50	0.35	1.65
+0.2	0.28	0.26	0.30	1.20	1.45	1.90	1.45	0.28	1.50
+0.3	0.21	0.20	0.24	1.15	1.30	1.70	1.30	0.22	1.36
+0.4	0.16	0.15	0.18	1.10	1.25	1.50	1.25	0.16	1.28
+0.5	0.11	0.11	0.13	1.08	1.20	1.35	1.20	0.12	1.21
+0.6	0.08	0.08	0.10	1.06	1.15	1.25	1.15	0.08	1.16
+0.7	0.05	0.05	0.07	1.04	1.10	1.15	1.10	0.06	1.10
+0.8	0.03	0.03	0.05	1.02	1.05	1.00	1.10	0.04	1.04
+0.9	0.02	0.02	0.03	1.00	1.05	0.95	1.10	0.02	1.03
+1.0	0.01	0.01	0.02	0.90	1.05	0.90	1.10	0.01	0.99

由图4可见(19)与(10)式的图像基本近似。

坡度影响系数  $b_2$  也是一个与移动盆地位置有关的系数,它由盆地边界至中心逐渐减小,但在盆地中心趋近于1(图5),其函数关系可近似地表示为

$$b_{2(x)} = \frac{1}{a \left( \frac{x}{r} \right) + t} \quad (20)$$

式中:  $a, t$ ——为待定系数。

阳泉矿区  $a = 0.50, t = 0.54$ 。以上各式的坐标系统与一般几何理论法相同,都是以拐点为原点的  $x/r$  坐标系。

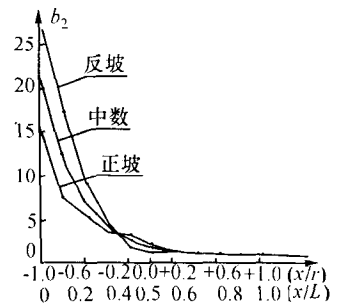


图5 坡度影响系数  $b_2$

## 2. 下沉和水平移动曲线方程式

将(7)式应用于山区移动盆地主剖面,式中的  $w_1$ 、 $b_1$  和  $b_2$  分别以(14)、(10)和(20)式代入,即可得到以  $x/r$  表示的山区移动盆地主剖面的下沉和水平移动曲线方程式为

$$w_{(x)} = \left\{ 1 + \left[ a \left( \frac{x}{r} \right) + t \right]^{-1} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \right\} \times \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \right\} w_{1(\max)} \quad (21)$$

$$u_{(x)} = \left\{ b e^{-x \left( \frac{x}{r} \right)^2} + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \left[ a \left( \frac{x}{r} \right) + t \right]^{-1} \times \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \right\} w_{1(\max)} \quad (22)$$

上式与(5)、(7)两式相同,均可直接用于山区的下沉和水平移动计算。

## 五、三个基本参量的确定

由以上讨论可知,山区地表移动计算的基本参量有3个,即开采影响(相当于平地)的最大下沉值  $w_{1(\max)}$ 、水平移动系数  $b$  和地表倾角  $\alpha$ 。

$w_{1(\max)}$  在数值上与类似地质采矿条件下的平地最大下沉值相等,因而可以用类比法或在本矿区的平地观测站求得,也可以直接由山区地表移动观测成果计算。由前面推导可知

$$w_1 = w - (u - u_1) \operatorname{tg} \alpha \quad (23)$$

将上式应用于最大下沉点并考虑到  $u_1$  为零得

$$w_{1(\max)} = w_{\max} - u' \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (24)$$

式中:  $w_{\max}$  —— 倾斜地表的<sub>最大</sub>下沉;

$u'$  —— 最大下沉点的水平移动;

$\alpha$  —— 该点的地表倾角。

用观测求得倾斜地表最大下沉点的  $w_{\max}$ 、 $u'$  和  $\alpha$ ,即可按上式算出  $w_{1(\max)}$ 。求得  $w_{1(\max)}$  后可按下式计算下沉系数  $q$ :

$$q = \frac{w_{1(\max)}}{M} = \frac{w_{\max} - u' \operatorname{tg} \alpha}{M} \quad (25)$$

式中:  $M$  —— 开采厚度。

$q$  值与地质采矿条件和覆岩性质有关。通过大量观测值的综合分析求得本矿区的  $q$  值后,  $w_{1(\max)}$  即可按下式预计

$$w_{1(\max)} = q \cdot M \quad (26)$$

阳泉矿区长壁大冒顶开采条件下的  $q$  值随开采深度  $H$  和宽度  $L$  的不同变化在 0.55 ~ 0.75 之间,表达式为

$$q = 0.82 \sqrt{\frac{L}{H}} - 0.25 \pm 0.1 \quad (27)$$

水平移动系数  $b$  也可以用类比法或在本矿区的平地设立观测站求得。山区最好直接利用倾斜地表的移动观测成果计算。由(10)式可知:

$$b = \frac{b_{1(x)}}{F \left( \frac{x}{r} \right)_x} \quad (28)$$

式中  $b_{1(x)}$  可用倾斜地表移动盆地主断面任意点的观测值  $w$ 、 $u$  和  $\alpha$  按(18)式与  $b_{2(x)}$  一并解出,  $F \left( \frac{x}{r} \right)_x$  可由(11)式计算如表1。故水平移动系数可按(28)式在倾斜地表不同位置求得。在拐点处有:

$$b = \frac{b_{1(0)}}{F\left(\frac{x}{r}\right)_0} = \frac{1}{2} b_{1(0)}$$

阳泉矿区按(28)式求得的水平移动系数平均值为:

$$b = 0.22 \pm 0.03$$

这一结果与本矿区平地观测站所获得的结果极为近似。

用于山区地表移动计算的地表倾角  $\alpha$  与地表实际倾角有所不同,它是地表倾角在计算方向上的投影,可按计算方向经过修匀后的地表剖面图量取。修匀的作用是为了减小变坡点附近的坡度差并削弱小坡段的局部影响,使计算坡角的取值由变坡点的一侧,逐渐地变化到另一侧,并使那些变化急剧的短坡段倾角的取值,与主要坡段的主要倾向和倾角相协调。如果直接按未经修匀的计算方向的实测剖面取值,则应注意以下各点:①倾斜基本一致的主要坡段可直接按图量取;②略有起伏但倾向基本相同的坡段应取平均值;③与主要坡段坡度差异很大的短坡段,如平台、陡坡和反坡,应取本坡和上、下三个坡角的平均值作为坡段的计算倾角;④对于山顶、沟底和其他变坡点,应取相邻坡段的平均值作为该点的计算倾角。

## 六、山区地表移动预计计算例

现以阳泉三矿 72607 观测站走向主剖面线为例,作山区的下沉和水平移动预计。

已知采深  $H = 210 \sim 245\text{m}$ ,采宽  $L = 180\text{m}$ ,采厚  $M = 2.4\text{m}$ ,采煤方法为长壁大冒顶。地表倾向为反坡,倾角  $\alpha = -2^\circ \sim -28^\circ$ ,平均  $-17^\circ$ 。表土层为  $2 \sim 5\text{m}$  风化坡积物和黄土。

按上述条件选择预计参数如下:主要影响角  $\beta = 65^\circ$ ,拐点平移距  $S_0 = 30\text{m}$ ,开采影响的最大下沉值  $w_{1(\max)} = 0.75M = 1.8\text{m}$ ,水平移动系数  $b = 0.22$ 。开采影响系数  $b_{1(x)}$ 取表 2 的计算值,坡度影响系数取表 2 的反坡  $b_{2(x)}$ 值。

计算按(7)式进行, $w_{1(x)}$ 按(14)式计算。计算结果及其与实际观测值的对比如表 3 所示。其中下沉值  $w_{(x)}$ 的最大预计偏差为  $132\text{mm}$ ,水平移动  $u_{(x)}$ 的最大预计偏差为  $170\text{mm}$ 。除移动边界个别点的相对误差较大外,一般相对误差均在  $20\%$  以内。

表 3 山区地表移动预计对比

$\frac{x}{r}$	$b_1$	$b_2$	$\alpha$ (°)	$W_1$ (mm)	$W(\text{mm})$		$\Delta W$ (mm)	$u(\text{mm})$		$\Delta u$ (mm)
					预计	实测		预计	实测	
-1.0	1.51	27.00	-17	11	40	40	0	-74	-80	+6
-0.9	1.42	22.60	-17	21	66	50	+16	-115	-100	-15
-0.8	1.30	17.38	-17	41	106	70	+36	-164	-140	-24
-0.7	1.19	12.85	-17	72	158	120	+38	-197	-240	+43
-0.6	1.07	9.30	-17	120	225	170	+55	-213	-300	+87
-0.5	0.95	5.80	-17	192	295	240	+55	-258	-260	+2
-0.4	0.84	3.85	-17	287	357	340	+17	-96	-140	+44
-0.3	0.73	2.78	-15	412	494	460	+34	-12	-40	+28
-0.2	0.63	2.06	-15	562	576	590	-14	+44	+45	-1
-0.1	0.53	1.92	-15	731	832	770	+62	+11	+20	-9

续表

$\frac{x}{r}$	$b_1$	$b_2$	$\alpha$ (°)	$W_1$ (mm)	$W$ (mm)		$\Delta W$ (mm)	$u$ (mm)		$\Delta u$ (mm)
					预计	实测		预计	实测	
0	0.44	1.72	-15	912	1024	960	+64	-19	-30	+11
+0.1	0.36	1.55	-15	1092	1213	1150	+63	-60	-60	0
+0.2	0.28	1.45	-15	1261	1392	1340	+52	-136	-120	-16
+0.3	0.21	1.30	-20	1409	1652	1520	+132	-370	-260	-110
+0.4	0.16	1.25	-20	1535	1788	1700	+88	-460	-360	-100
+0.5	0.11	1.20	-20	1632	1887	1900	-13	-522	-470	-52
+0.6	0.08	1.15	-26	1702	2167	2080	+87	-805	-680	-125
+0.7	0.05	1.10	-26	1750	2209	2260	-51	-852	-900	+48
+0.8	0.03	1.08	-28	1780	2325	2400	-75	-970	-1140	+170
+0.9	0.02	1.08	-28	1790	2345	2400	-55	-998	-1130	+132
+1.0	0.01	1.08	-28	1795	2360	2400	-40	-1022	-1080	+58

倾斜地表移动预计偏差,主要来自参数的选择和表土层性质的变化。

由于倾斜地表移动预计涉及的参数较多,而各参数本身都含有一定的误差,故倾斜地表移动预计的误差要比平坦地区的预计误差大。

此外,由于系数  $b_2$  与表土层强度成反比,因而表土层性质的局部变化也必然给移动预计带来误差。为了提高预计精度,必须进一步研究适用于各种表土层性质的  $b_2$  值,并在预计前对表土层性质进行认真调查。

## 七、地表倾角对下沉和水平移动的影响

已知倾斜地表的下沉值为

$$w = w_1 + b_2 w_1 \text{tg}^2 \alpha = w_1 + w_2$$

$w_2$  可视为倾斜地表的下沉增量。以(14)代入上式得移动盆地主断面任意点的

$$w_{2(x)} = b_{2(x)} \cdot w_{1(\max)} \times \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \text{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \right\} \text{tg}^2 \alpha \quad (29)$$

令

$$\left. \begin{aligned} b_{2(x)} \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \text{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \right\} &= K_{(x)} \\ w_{2(x)} / w_{1(\max)} &= Q_{(x)} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

为倾斜地表下沉增量系数,则

$$Q_{(x)} = K_{(x)} \cdot \text{tg}^2 \alpha \quad (31)$$

阳泉矿区的  $K_{(x)}$  和  $Q_{(x)}$  如表 4 所示。如已知  $Q_{(x)}$  即可按下式计算  $w_{2(x)}$  为

$$w_{2(x)} = Q_{(x)} \cdot w_{1(\max)} \quad (32)$$

由于  $b_{2(x)}$ 、 $K_{(x)}$  和  $Q_{(x)}$  恒为正、 $w_{2(x)}$  亦恒为正,即倾斜地表的下沉值总是大于类似条件下平地的下沉值。虽然  $w_2$  与地表倾角  $\alpha$  成正比,但因  $\alpha$  大于  $30^\circ$  的地表大多数是风化基岩,其  $b_2$  将减小到一般表土的 10% ~ 20%,故倾斜地表的下沉增值是有一定限度的。阳泉矿区观测到的  $w_2$  最大值为 0.6m,相当于  $0.3w_{1(\max)}$ ,它是发生在黄土坡积地表移动盆地最大下

沉点。

表 4 下沉增量系数  $K(x)$ 、 $Q(x)$

$\frac{x}{r}$	$K(x)$	$Q(x)$		
		$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
-1.0	0.135	0.004	0.018	0.045
-0.8	0.277	0.008	0.037	0.092
-0.6	0.459	0.014	0.060	0.153
-0.4	0.577	0.018	0.076	0.192
-0.2	0.739	0.023	0.098	0.246
0	0.940	0.029	0.124	0.313
+0.2	1.038	0.032	0.138	0.346
+0.4	1.078	0.034	0.142	0.359
+0.6	1.083	0.034	0.143	0.361
+0.8	1.017	0.032	0.135	0.339
+1.0	0.944	0.029	0.125	0.315

由(5)式可知,倾斜地表的水平移动为:

$$u = b_1 w_1 + b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha = u_1 + u_2$$

$u_2$  为倾斜地表水平移动增量。以(32)式代入(4)式得:

$$u_{2(x)} = w_{2(x)} \cot \alpha = Q(x) \cot \alpha \cdot w_{1(\max)} \quad (33)$$

显然在同一点上有  $u_{2(x)} > w_{2(x)}$ , 即地表倾斜引起的水平移动大于下沉。由于  $u_1$  恒为正, 而  $u_2$  的符号决定于  $\alpha$ 。因而:

当  $\alpha$  为正时,  $u_2$  为正, 故正坡上半盆地的水平移动恒为正值, 且总是比类似条件下的平地大。与  $w_2$  的情况相似,  $u_2$  虽然也随  $\alpha$  递增, 但同样受  $b_2$  的制约。阳泉矿区观测到的  $u_2$  最大值为 -1.1m, 约为  $0.46 w_{1(\max)}$ ;

当  $\alpha$  为负时, 倾斜地表水平移动的正负取决于角值

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{b_1}{b_2}; \quad (34)$$

当  $\alpha < \alpha_0$  时,  $b_1 w_1 > b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha$ ,  $u_1 > u_2$ ,  $u$  为正;

当  $\alpha = \alpha_0$  时,  $b_1 w_1 = b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha$ ,  $u_1 = u_2$ ,  $u$  为零;

当  $\alpha > \alpha_0$  时,  $b_1 w_1 < b_2 w_1 \operatorname{tg} \alpha$ ,  $u_1 < u_2$ ,  $u$  为负。

所以  $\alpha_0$  的大小决定反坡水平移动的正负, 只有当  $\alpha$  大于  $\alpha_0$  时, 反坡地表才会出现负的水平移动, 故  $\alpha_0$  称为反坡水平移动负值临界角。显然,  $\alpha_0$  与盆地位置及表土层性质有关。

阳泉矿区的反坡倾角  $\alpha$  大于  $15^\circ$  时(即  $\alpha_0 = 15^\circ$ ), 整个移动盆地的水平移动将全为负值, 此时地表的水平移动都将指向地表倾斜方向; 当地表倾角小于  $15^\circ$ , 拐点附近可能出现正的水平移动。

通过以上讨论, 对于山区开采影响下的地表移动可以得出如下初步结论:

(1) 山区开采影响下的地表移动, 除受地质采矿条件和覆岩性质影响外, 还与地表倾向、倾角以及表土层的强度有关。山区采动地表点的移动向量是该点在重力作用下沿采空区中

心和地表倾斜两个方向移动向量的叠加。

(2)山区的水平移动受地表倾斜影响最为明显,其次为下沉。当地面坡度基本一致时,山区地表的其它变形值受地表的影响较小,但坡度变化较大时,倾斜地表各种变形值都将较类似条件下的平地增大。

(3)由于地表倾斜的影响,山区移动范围一般都大于平地,其增大幅度与地形地质条件有关。这种情况往往是导致山区按常规方法留设建筑物保护煤柱不能达到预定效果的主要原因,所以山区的煤柱设计,必须考虑地形和地质条件影响。

(4)在考虑地形因素的情况下,地面建筑物保护煤柱尺寸势必会有较大幅度的增加。为了确保受护建筑物的安全和减少煤炭资源损失,应进一步开展山区地表移动和变形规律的研究,为“三下”采煤和防止开采引起的山区地表滑动提供依据。

## 开采引起的山区地表移动与变形预计\*

为了推动山区“三下”采煤试验,充分合理地开发煤炭资源,必须首先解决开采引起的山区地表移动与变形预计。以下就近水平煤层开采,地面倾角小于 $30^\circ$ 的山区地表移动与变形预计问题做一些探讨。

《开采影响下的山区地表移动》一文曾导出了山区地表移动盆地主剖面上的下沉 $w_{(x)}$ 和水平移动 $u_{(x)}$ 的预计公式如下:

$$w_{(x)} = w_{1(x)} + b_{2(x)} w_{1(x)} \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (1)$$

$$u_{(x)} = u_{1(x)} + b_{2(x)} w_{1(x)} \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

式中: $w_{1(x)}$ 、 $u_{1(x)}$ ——类似地质采矿条件下平地的下沉和水平移动,可按一般方法预计;

$b_{2(x)}$ ——坡度影响系数,其值与表土层性质和预计点在盆地中所处的位置有关;

$\alpha$ ——地面倾角,倾向与下沉盆地相同时取正号,反之取负号。

当已知 $w_{(x)}$ 和 $u_{(x)}$ 时,其他变形值可按下列公式计算

倾斜:

$$i_{(x)} = \frac{w_{(x+l)} - w_{(x)}}{l} = \frac{\Delta w_{(x)} l}{l} \quad (3)$$

曲率:

$$k_{(x)} = \frac{i_{(x+l)} - i_{(x)}}{l} = \frac{\Delta i_{(x)} l}{l} \quad (4)$$

水平变形:

$$\epsilon_{(x)} = \frac{u_{(x+l)} - u_{(x)}}{l} = \frac{\Delta u_{(x)} l}{l} \quad (5)$$

式中:  $l$ ——计算点间距;

$\Delta w_{(x)} l$ 、 $\Delta u_{(x)} l$ ——相邻点的下沉和水平移动差;

$\Delta i_{(x)} l$ ——计算点两侧边的倾斜变形差。

显然,按(3)~(5)式计算的变形值与计算点间距 $l$ 有关,选取不同的 $l$ 可能得出不同的结果。为了克服上述缺点,最好由 $w_{(x)}$ 和 $u_{(x)}$ 的函数式直接导出以 $x/r$ 为自变量的各变形值的函数表达式。

为此,把 $i_{(x)}$ 看作 $w_{(x)}$ 的一阶导数,把 $\epsilon_{(x)}$ 和 $K_{(x)}$ 分别看作 $u_{(x)}$ 的一阶导数和 $w_{(x)}$ 的二阶导数。对(1)、(2)两式分别求导可得

$$i_{(x)} = \frac{dw_{(x)}}{dx} = \frac{dw_{1(x)}}{dx} + \left[ b_{2(x)} \cdot \frac{dw_{1(x)}}{dx} + w_{1(x)} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} \right] \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (6)$$

$$k_{(x)} = \frac{d^2 w_{(x)}}{dx^2} = \frac{d^2 w_{1(x)}}{dx^2} + \left[ b_{2(x)} \cdot \frac{d^2 w_{1(x)}}{dx^2} + 2 \frac{dw_{1(x)}}{dx} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} + w_{1(x)} \cdot \frac{d^2 b_{2(x)}}{dx^2} \right] \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (7)$$

$$\epsilon_{(x)} = \frac{du_{(x)}}{dx} = \frac{du_{1(x)}}{dx} + \left[ b_{2(x)} \cdot \frac{dw_{1(x)}}{dx} + w_{1(x)} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} \right] \operatorname{tg} \alpha \quad (8)$$

$$\text{由于 } \frac{dw_{1(x)}}{dx} = i_{1(x)}; \quad \frac{d^2 w_{1(x)}}{dx^2} = K_{1(x)}; \quad \frac{du_{1(x)}}{dx} = \epsilon_{1(x)} \quad (9)$$

\* 本文曾发表于《煤炭科学技术》1983. No. 6, p46~52。



(6)~(8)式可改写成:

$$i_{(x)} = i_{1(x)} + \left[ b_{2(x)} i_{1(x)} + w_{1(x)} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} \right] \text{tg}^2 \alpha \quad (10)$$

$$k_{(x)} = k_{1(x)} + \left[ b_{2(x)} k_{1(x)} + 2i_{1(x)} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} + w_{1(x)} \cdot \frac{d^2 b_{2(x)}}{dx^2} \right] \text{tg}^2 \alpha \quad (11)$$

$$\varepsilon_{(x)} = \varepsilon_{1(x)} + \left[ b_{2(x)} i_{1(x)} + w_{1(x)} \cdot \frac{db_{2(x)}}{dx} \right] \text{tg} \alpha \quad (12)$$

$b_{2(x)}$ 为一由盆地边界至中心的减函数。阳泉矿区走向半无限开采主断面上的  $b_{2(x)}$ 可以近似地用下列反比函数表示

$$b_{2(x)} = [ a(x/r) + t ]^{-1} \quad (13)$$

式中:  $a$ 、 $t$ —— $b_{2(x)}$ 计算参量,  $a = 0.5$ ,  $t = 0.54$ 。

由(13)式对  $x$  求一、二阶导数可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{db_{2(x)}}{dx} &= -\frac{a}{r} \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-2} \\ \frac{d^2 b_{2(x)}}{dx^2} &= \frac{2a^2}{r^2} \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

采用概率积分法作平地的移动与变形预计时为

$$\left. \begin{aligned} w_{1(x)} &= \frac{w_{1\max}}{2} \left[ 1 + \text{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \\ u_{1(x)} &= b \cdot w_{1\max} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} = u_{1\max} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} \\ i_{1(x)} &= \frac{w_{1\max}}{r} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} \\ k_{1(x)} &= 2\pi \frac{w_{1\max}}{r^2} \left( -\frac{x}{r} \right) e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} \\ \varepsilon_{1(x)} &= 2\pi b \frac{w_{1\max}}{r} \left( -\frac{x}{r} \right) e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

以(13)、(14)和(15)式分别代入(1)、(2)、(10)、(11)、(12)即得山区地表移动盆地主剖面上,各移动与变形值的函数表达式为:

$$w_{(x)} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \text{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \cdot \left[ 1 + \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-1} \text{tg}^2 \alpha \right] w_{1\max} \quad (16)$$

$$u_{(x)} = \frac{1}{2} \left[ 2e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} + \frac{1}{b} \left( 1 + \text{erf} \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-1} \text{tg} \alpha \right] u_{1\max} \quad (17)$$

$$i_{(x)} = \left\{ e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} + \left[ \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-1} \cdot e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} - \frac{a}{2} \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-2} \left( 1 + \text{erf} \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \text{tg}^2 \alpha \right] \right\} i_{1\max} \quad (18)$$

$$k_{(x)} = \left\{ 2\pi \left( -\frac{x}{r} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} \right) + \left[ \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-1} 2\pi \left( -\frac{x}{r} \right) e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} - 2a \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-2} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} + a^2 \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-3} \times \left( 1 + \text{erf} \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \text{tg}^2 \alpha \right\} 0.66 k_{1\max} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{(x)} = \left\{ 2\pi \left( -\frac{x}{r} \right) e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} + \frac{1}{b} \left[ \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-1} e^{-\pi \left( \frac{x}{r} \right)^2} - \frac{a}{2} \left( a \frac{x}{r} + t \right)^{-2} \left( 1 + \text{erf} \sqrt{\pi} \frac{x}{r} \right) \right] \text{tg} \alpha \right\} 0.66 \varepsilon_{1\max} \quad (20)$$