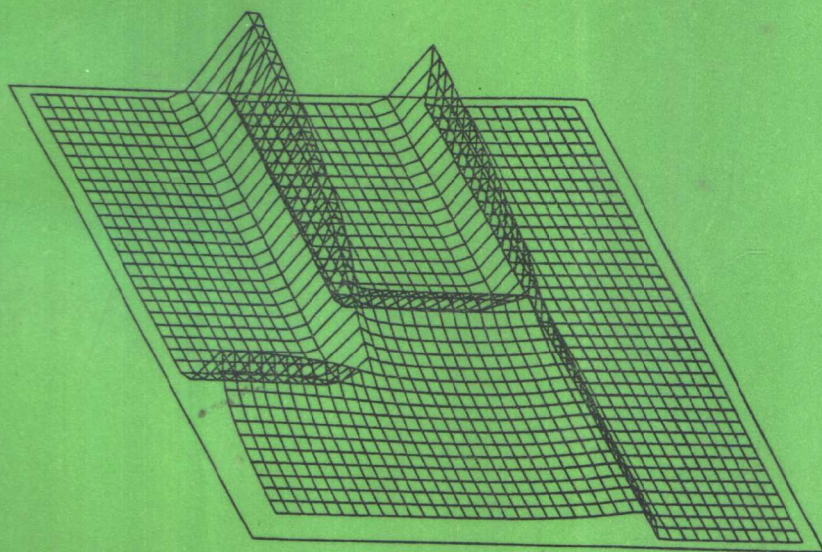


矿井多煤层开采 围岩应力分析与设计优化

史元伟 等著



煤炭工业出版社

1995. 6

(京)新登字 042 号

内 容 提 要

本书总结了多年来关于开采区围岩应力解析法和数值法计算的研究成果,特别是有限元数值计算、大范围围岩应力简化三维计算程序的研究成果以及工作面前方支承压力解析计算,用离散元法阐述工作面逐步开挖时岩层运动垮落特征,放顶煤开采的岩块运动特征及应力分布特征,并阐明了采场围岩应力分布和运动的基本规律,为改善岩层控制设计,优化选择巷道布置提供了科学依据。

本书可供矿山企业和科研、设计单位的工程技术人员及大专院校师生参考。

矿井多煤层开采围岩应力分析与设计优化

史元伟 郭藩强 康立军 齐庆新 著

责任编辑:邓荷香

*

煤炭工业出版社 出版发行
(北京安定门外和平里北街 21 号)
北京东城欣亚速印部印刷

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm} 1/32$ 印张 9.3125
字数 250 千字 印数 1-800
1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月第 1 次印刷
书号 4030 定价 25 元

前 言

煤炭科学技术现代化的重要标志之一是岩层控制理论和技术
的现代化和科学化，而围岩应力分布的研究和计算是改善岩层控制
的科学基础。传统的解析法和数值方法，如有限元、边界元法等，
难以可靠而经济地对多煤层开采围岩应力分布进行计算。本书着重
介绍了以作者史元伟等为主，用数值方法和解析法分析开采围岩应
力分布的研究成果。特别是在德国开发的简化数值模型基础上，进
一步发展的适应我国近距煤层开采条件的简化三维应力计算模型，
即 GMEAP 程序及其初步研究成果。它可快速而可靠地计算各种开
采边界条件，岩石力学条件下采场及巷道围岩应力分布，从而可用
于进行不同开采方案的比较及巷道合理位置的选择。其花费的机时
很少，计算费用很低，因而对设计和现场工程技术人员均可以接受。
本书二、三、四章以 GMEAP 程序为主，辅以解析计算方法，阐明
了以下几种典型条件下围岩应力分布计算结果：

1. 单一煤层开采围岩应力分布；
2. 多阶段开采围岩应力分布；
3. 近距煤层开采及厚煤层分层开采应力的相互影响；
4. 开采层及煤柱下方的底板岩层应力分布及巷道布置优化；
5. 几种开采系统，如：跨越上山开采，上部宽巷开采，分层垮落法开采，条带开采等的围岩应力分布；
6. 工作面前方支承压力分布及其主要因素的解析计算法。

上述计算实例将为广大工程技术人员提供清晰的围岩应力分布图形，是矿压显现规律的深化，同时为设计人员提供了进行开采方案比较时的应力计算依据和参数优化时定量计算的依据。

大倾角煤层开采，包括伪斜开采，其围岩应力和变形与缓倾斜煤层开采有很大差别。本书第五章介绍了大倾角近距煤层联合开采及伪斜开采的围岩应力与变形特征，为改善相应条件下的岩

层控制提供依据。该计算是用平面有限元和三维有限元数值法相结合完成的。

鉴于有限元法只能研究（在采动后）岩体平衡状态时的应力与变形规律，不能提供岩层运动的动态特征，近年来我们与有关单位合作，在有限元与离散元相耦合的方面取得了重要成果。本书第六章介绍了用有限元与离散元法耦合程序研究长壁工作面，包括放顶煤工作面开采中，分步开挖和放煤不同工艺时岩层及顶煤运动规律及应力分布规律，这是目前国内的最新研究成果，为改善矿压控制提供了新的手段和依据。

本书由史元伟、郭藩强、康立军、齐庆新合作编著。第一、三、四章由史元伟编写，第二章由郭藩强编写；第五章由史元伟、康立军编写；第六章由康立军、齐庆新合写。由于时间仓促和知识面所限，不当之处，恳请批评指正。此外，干松水参加了GMEAP程序的编制，陈社杰等参加了第五章有关的应力分析工作，廖灿平及煤炭学报编辑部参加了部分制图和编辑工作，在此表示深切的谢意。

目 录

前言

第一章 采掘空洞围岩应力分布基础	1
第一节 概述	1
第二节 原岩应力场	4
第三节 均质弹性体圆形及矩形巷道围岩应力	8
第四节 采煤工作面围岩应力分布的解析研究	17
第五节 采场围岩应力的数值法研究概况	22
第六节 新差分法的应用	34
第七节 开采大范围岩层应力简化计算模型的发展	49
第二章 矿井多煤层开采大范围岩体应力简化计算	
程序的应用	69
第一节 矿井多煤层开采大范围岩体应力简化模型	69
第二节 GMEAP 程序的功能和使用	85
第三节 计算实例	96
附 录	100
第三章 典型开采系统应力分析	117
第一节 单一煤层开采围岩应力分布	117
第二节 多阶段开采围岩应力分布	130
第三节 近距煤层开采的相互影响	135
第四节 开采层及煤柱下方的底板岩层应力分布及 巷道布置优化选择	150
第五节 典型开采系统围岩应力特征	175
第四章 采场围岩支承压力的解析计算	184
第一节 计算原理概述	184
第二节 支承压力解析计算结果分析	191
第三节 端部支承效应的分析	208
第五章 倾斜煤层应力分布特征	214
第一节 沿开采层走向的围岩应力分布	214

第二节	沿煤层倾斜方向的围岩应力-位移分布	225
第三节	伪倾斜工作面围岩应力变形特征	231
第六章	长壁工作面矿压显现的离散元法研究	244
第一节	离散元法的基本原理	244
第二节	离散元程序设计及基本功能	252
第三节	长壁工作面矿压显现的离散元数值法研究 ...	258
第四节	放顶煤开采矿压问题的离散元数值法研究 ...	272
结论		285
参考文献		291

第一章 采掘空洞围岩应力分布基础

第一节 概 述

采煤工作面的推进,引起上覆岩层强烈的卸压运动和变形,煤层底板岩层也会发生一定的卸压变形和破坏,同时在采场围岩中发生应力重新分布,形成采场周围的高应力和低应力区。这种区域不仅在开采煤层内形成,而且按一定规律向其上、下岩层中传递和扩散,以致衰减。处在高应力区的巷道或其他井下工程,往往导致较强烈的变形和破坏。因此,研究高、低应力区的分布,对于改善巷道布置,减轻支架压力甚为重要,对采煤工作面顶板控制也同样如此。当开采范围较大时,特别是近距多煤层开采时,往往出现多种残留煤柱或停采线,有可能出现高应力区迭加或高、低应力区的影响在某一区域相互削弱的复杂现象。在此情况下,用解析法研究采场围岩应力分布是极为困难的。这不仅是由于岩体结构在力学上的各向异性,而且由于开采几何图形及其叠加的复杂性和非对称性。

有限元数值解法的出现,是数学与力学方法的重大进展。过去用常规解析法不能或难以解决的力学问题,特别是材料各向异性、几何非对称问题,力学非线性问题,得以较易解算,从而使岩石工程力学问题不再停留于仅依靠经验判断作决策的阶段。例如,非圆形巷道的支架—围岩力学相互作用问题;长壁工作面对称面上顶板—支架—底板力学关系;巷道与采场合理相对位置等岩石工程问题,现在均可用二维有限元法处理。这方面的研究成果有待加以总结。另一方面,大多数现实工程问题目前还难以用二维有限元或边界元法予以解算,例如,长壁工作面端头区域的应力分布,伪倾斜布置的大倾角工作面围岩应力变形问题,多煤层开采的相互影响问题。这些问题由于没有任何对称平面可以简化为二维问题,必须求助于三维有限元解法。但三维问题的计算量及计算时间大大高于二维问题,为此,必须投入很高的计算费

用。这种状况阻碍了很多岩石工程问题用数学力学方法解算。但是，随着开采深度、开采厚度和开采层数的增加，岩层应力和变形随之强化，并呈现非常复杂的形势，给采场和巷道的围岩控制带来很大困难，必须寻求技术上可行，经济上可以承受的围岩应力计算途径，以进行科学的开采设计和支护设计。德国学者 G·埃维林 (Everling) 等，提出了简化三维有限元程序，经过 20 多年的修改、完善和试用，达到了较好的预期效果。其直接成果是，可以根据给定的开采平面图计算四至十层开采层围岩的应力和位移，并根据计算结果，预测巷道的变形，选定支架参数。在鲁尔矿区 170 多个工作面巷道的试用结果，达到了满意的效果；计算的巷道围岩应力与实测的巷道变形成比例，并且误差较小。

但是，该大范围岩层应力简化计算程序 (APDIMO) 只适用于德国中厚煤层和层间距大于 4 倍采高的条件。而我国厚煤层和近距煤层赋存和开采量所占比重很大。为使开采技术和岩层控制科学化和现代化，针对我国的具体条件，作者经过 3 年多的研究，完成了适用于厚煤层和近距煤层的大范围岩层应力简化计算程序编制，初步试用效果很好。本书将对这些成果及其在典型开采条件下的应用进行全面介绍。

数值解法的上述发展，并不排除或轻视解析法在一定地质技术条件下的适用性和发展。理论解通常可提供围岩应力和变形的一般规律，可为数值法解算提供指导。同时，对于特定的较为简单的地质技术条件可提供某些有实际意义的计算结果。随着解析法的进一步发展，可供实际应用的解析解也将日趋增加。

最早的地下工程围岩应力解析解，是针对处于水静应力场的圆形巷道或具有均等围压的圆形井筒，取得了满意的解答。随后对不等围压和非水静应力场的圆形及椭圆形巷道，进而包括矩形巷道求得解算结果。在此基础上，又对有衬砌的非圆形巷道及洞室求得解算结果。对于非均质、各向异性围岩在空洞周围的应力变形也在深入研究中。

采场相当于其轴线作平移运动的巷道，移动结果使其轴向两

侧的围岩性质有很大差异。针对层状介质的特征，波兰学者以弹性基础梁（板）为理论依据，分别建立了对水砂充填法和薄煤层垮落法计算支承压力分布的多种解法。所得结果能够较好地解释采煤工作面前方支承压力变化规律及顶板来压有关的矿压显现规律。但上述计算方法的缺点是假设直接顶上部载荷均匀分布。作者在第四章完善了弹性基础梁解法，提出了支承压力逐层计算综合法。

用常规平面有限元和边界元法计算分析典型的开采系统，处于对称平面位置的应力分布，以及用三维有限元分析计算单一长壁工作面上、下层同时开采的工作面围岩应力分布，也是作者多年来进行的重要研究课题。本章列举了一些主要研究成果。鉴于所用计算程序（SAP-5）的局限性，作者在参数选取上，选定了若干弱分层，其弹性模数及厚度极小，用以描述岩体的层状特性，并取得满意结果。

采场围岩应力的解析法和数值法研究成果表明，采空区的支承特性对于支承压力分布特征有显著影响。它主要取决于采高、直接顶垮落厚度及上覆岩层下沉运动幅度。这就很好地解释了水砂充填与垮落法，薄煤层与厚煤层矿压显现差别很大的原因。同时，工作面前方岩层和煤层的力学特性和厚度，老顶和直接顶悬垂长度及动态，对围岩应力的影响的研究结果与实测的矿压显现特征相当吻合。

近几年我国发展了大倾角煤层伪倾斜开采方法。这种方法使得工作面矿压显现在任何一个位置和方向上，都不存在对称性。不仅一般解析法，而且任何二维有限元法都难以全面分析其围岩应力和变形特征。为此，作者曾运用常规三维有限元法，并采用倾斜网格划分，进行了计算。所得结果对改善此类采煤法的岩层控制有重要意义。详见第五章。

如前所述，开采大范围应力计算，对于岩层控制技术现代化，科学化有很大的现实意义和迫切性。但由于我国厚煤层和近距煤层居多，不能简单地搬用德国埃维林方法，必须作较大的改

进和发展，本章第七节和第二章将阐明以作者史元伟为主发展的 GMEAP 程序的基本设计原理，而程序的编制及应用在其他各章中阐明。

第二节 原岩应力场

地壳内任何岩体均承受着重力作用，形成按一定规律分布的重力场。由重力形成的单位面积的内力称为重力应力。由地壳内构造运动形成的单位面积上的残余内力称为构造应力。

重力应力根据弹性理论的分析，具有下列特征：

岩体的垂直应力：

$$\sigma_z = \gamma H \quad (1-1)$$

式中 γ ——岩石容重；

H ——地表以下深度。

当岩层具有不同容重时， σ_z 可表示为：

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \quad (1-2)$$

式中 γ_i , H_i ——相应岩层的容重和厚度。

岩体的水平应力 σ_x , σ_y 可以计算得：

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H \quad (1-3)$$

或

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \gamma H$$

式中 λ ——侧压力系数， $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ ；

μ ——岩体的泊松比，一般在 0.1~0.35 之间，坚硬岩石较小，软弱岩石较大。

当采深足够大，例如 $H=1200\sim 1700\text{m}$ 时，实测岩石泊松系数 $\mu \approx 0.5$ ，从而 $\sigma_x = \sigma_y \approx \sigma_z$ ，即垂直应力与水平应力差别很小，称为静水应力状态。德国近年来在鲁尔等矿区用水力压裂法测定的水平应力接近或高于垂直应力。

构造应力的存在,使地应力分布在空间上呈现不均匀性,在时间上也不是常数,并造成岩层中的垂直应力与水平应力之间无明确的比例关系。从而可以说,地应力是非稳定的应力场。

实测表明,垂直应力 σ_z 随距地表深度呈线性增长,如图1-2-1所示⁽¹⁾。

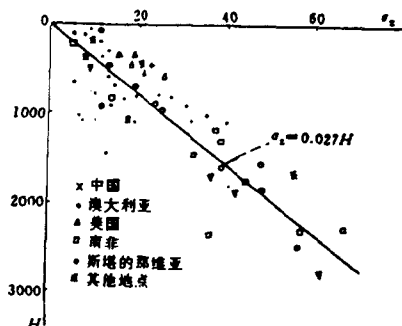


图1-2-1 垂直应力 σ_z 与深度 H 关系

根据 H·K·布林资料, σ_z 的值相当于按 $\gamma = 2.7\text{g/cm}^3$ 计算出来的值,即 $\sigma_z = 0.027H$ (MPa)。但是根据我国实测资料, $\sigma_z / \sigma_H > 1.2$ 的却占 79%,这是多在浅部 ($H < 200\text{m}$)测得的。

水平应力的测定结果与上述理论值差异很大。在大多数情况下,水平应力大于垂直应力。水平应力 σ_H 与垂直应力 σ_z 的比值一般为 0.5~5.5,大部分在 0.8~1.2 之间。根据我国实测资料,二个方向的水平应力与垂直应力之比约在 0.8~3.0 之间。

平均水平应力 σ_H 与垂直应力 σ_z 的比值 λ 与地区应力场有关。该值随深度 H 增加。大致可按下式表示:

$$\frac{100}{H} + 0.30 \leq \lambda \leq \frac{1500}{H} + 0.5 \quad (1-4)$$

例如,当 $H = 500\text{m}$, $\lambda = 0.5 \sim 3.5$; $H = 1000\text{m}$, $\lambda = 0.4 \sim 2.0$ 。

根据实测表明,在深度不大时 λ 值的分散性很大,而在深度

增加时, 其分散性减小, 看来与构造应力在浅部较显著有关。侧压系数 λ 与深度 H 的关系如图 1-2-2 所示。

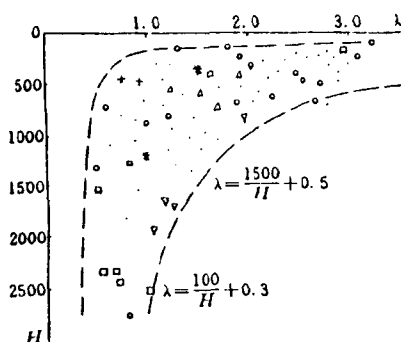


图 1-2-2 侧压系数与深度关系 (实测结果综合图)

岩层垂直应力与水平应力的大小, 不仅取决于所在深度, 而且与地质构造、断层及地震活动、地形、地貌以及岩石力学性质及岩体有关。水平应力与垂直应力之比及两个水平应力的比值在不同地区的分布见表 1-2-1、1-2-2。

表 1-2-1 σ_H / σ_z 的统计百分率

国家名称	σ_H / σ_z (%)			$(\sigma_H / \sigma_z)_{max}$
	<0.8	0.8-1.2	>1.2	
中 国	32	40	28	2.09
澳大利亚	0	22	78	2.95
加 拿 大	0	0	100	2.56
美 国	18	41	41	3.29
挪 威	17	17	66	5.56
瑞 典	0	0	100	4.99
南 非	41	24	35	2.50
原 苏 联	51	29	20	4.30
其他地区	37.5	37.5	25	1.96

表 1-2-2

两个水平应力的比值

实测地点	统计数目	$\sigma_{Hy} / \sigma_{Hx}$ 的比值分布 (%)				合计
		1.0~0.75	0.75~0.5	0.5~0.25	0.25~0.0	
斯堪地那维亚等	51	14	67	13	6	100
北 美	222	22	46	23	9	100
中 国	25	12	56	24	8	100
其中: 华北地区	18	6	61	22	11	100

德国在深度 680~1340m 用水力压裂法测定的结果见表 1-2-3 和图 1-2-3.

表 1-2-3 德国硬煤矿区地应力测定结果

测试地区	钻孔编号	$\frac{S_v}{\gamma H}$	$\frac{S_H}{S_v}$	$\frac{S_H}{\gamma H}$
威斯特伐伦	1~2	1.0	1.43	1.43
	3~4	0.81	1.11	0.91
	5~6	1.47	0.63	0.93
	11~12	0.97	0.58	0.57
豪斯阿登	1165~1166	1.1	1.20	1.33
	1172			1.37
弗利德利希海利希	1~2	1.04	1.72	1.78
隆贝尔格	1V-1H	0.91~0.93	1.18	1.08
	2V			1.53

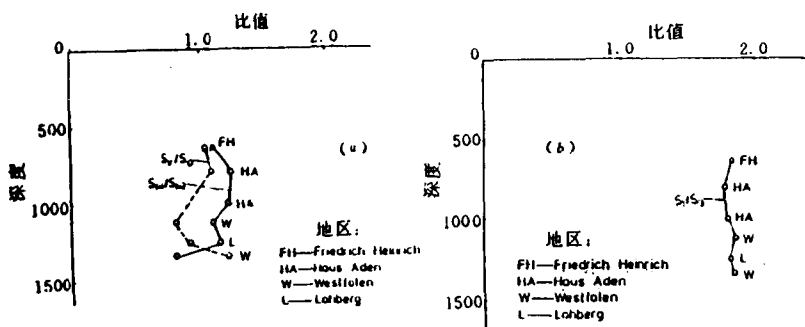


图 1-2-3 德国矿区垂直应力与水平应力比值与深度关系

a: 水平应力与垂直应力随深度变化; b: 最大最小主应力之比与开采深度

S_y / S_x ——垂直应力与覆层压力之比; S_{n1} / S_{n1} ——两个方向的水平应力之比
地区:

FH——弗利德利希·海因利希; HA——豪斯阿登

W——威斯特伐伦; L——郎贝尔格

第三节 均质弹性体圆形及矩形巷道围岩应力

一、圆形巷道围岩应力状态

采掘活动导致围岩应力重新分布, 根据弹性理论的计算, 对于无限弹性体中的圆孔, 当边界面上分别作用均布压力 p_x 和 p_y 时, 圆孔周围的应力分布, 类似厚壁圆筒应力分布的理论解:

半径为 a 的圆孔外面的应力分布如下式:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(p_x + p_z)(1 - a^2/r^2) + \frac{1}{2}(p_x - p_z)(1 - 4a^2/r^2 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(p_x + p_z)(1 + a^2/r^2) - \frac{1}{2}(p_x - p_z)(1 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(p_z - p_x)(1 + 2a^2/r^2 - 3a^4/r^4)\sin 2\theta \quad (1-5a)$$

α ——巷道内半径;

r ——至巷道中心距离;

P_z ——原岩应力场垂直应力;

P_x ——原岩应力场水平应力;

θ ——与巷道水平轴夹角。

在巷道周边, 当 $r = a$, 径向应力 $\sigma_r = 0$, 切向应力 $\tau_{r\theta} = 0$, 而切向正应力 σ_{θ} 为:

$$\sigma_{\theta} = p_z(1 + 2\cos 2\theta) + p_x(1 - 2\cos 2\theta) \quad (1-5b)$$

在巷道水平轴两侧 $\theta = 0$, $\theta = 180^\circ$

$$\sigma_{\theta} = 3p_z - p_x \quad (1-6)$$

在巷道垂直轴方向 $\theta = 90^\circ$, $\theta = 270^\circ$

$$\sigma_{\theta} = 3p_x - p_z \quad (1-7)$$

对于不同的 p_x/p_z 比值, 圆形巷道周边的切应力值, 见表 1-3-1, 其中负值为压应力, 正值表示拉应力。

表 1-3-1 圆形巷道周边切应力

岩体中原岩应力比值	最大切向应力	
	顶板和底板	两帮
$p_x = 0$	$+1.0p_z$	$-3.0p_z$
$p_x = p_z/6$	$+0.5p_z$	$-2.8p_z$
$p_x = p_z/3$	0	$-2.7p_z$
$p_x = 2/3p_z$	$-1.0p_z$	$-2.3p_z$
$p_x = p_z$	$-2.0p_z$	$-2.0p_z$

表 1-3-1 中, $p_x = p_z$ 为水静应力状态, 相当于泊松比 $\mu = 0.5$, 若考虑岩石容重, 不考虑构造应力, 则 $p_z = rh$, h 为巷道至地表深度, 从该式可得到圆形巷道两帮应力与深度的关系。对比切向正应力与岩石强度, 可得到各种岩体中巷道的临界深度, 见表 1-3-2。

表 1-3-2 中硬岩石两帮压力与深度的关系

深度 h (m)	压力 p_z (N/cm ²)	两帮最大正应力 (N/cm ²)	平均抗压强度(N/cm ²)		
			砂岩	泥质页岩	硬煤
200	450	900	1980	2700	1820
400	920	1840	2360	3400	1200
600	1410	2820	4550	4100	1580
800	1900	4820	5830	4800	1460
1000	2410	5840	7100	5500	1340
1400	3450	6900	9700	6900	1100

由表 1-3-2 中可见, 泥质页岩在 1400m 深度以下才出现平均应力超限, 而硬煤则在深度超过 400m 时即出现应力超限, 巷道两帮维护困难。

由 (1-4) 至 (1-7) 式, 如果令 $p_x = \lambda p_z$, λ 称为侧压力系数, 则 (1-5) 式变为:

$$\sigma_\theta = p_z [(1 + \lambda) - 2(1 - \lambda)\cos 2\theta] \quad (1-8)$$

$$\text{当 } \theta = 180^\circ \text{ 时} \quad \sigma_\theta = p_z (3 - \lambda) \quad (1-9)$$

$$\theta = 0^\circ \text{ 时} \quad \sigma_\theta = p_z (3\lambda - 1) \quad (1-10)$$

除巷道周边外, 在水平轴方向 ($\theta = 0, 180^\circ$), 正应力、切应力随远离巷道周边的变化规律为:

$$\sigma_r = p_z \left[\lambda + \frac{1}{2}(3-5\lambda)\frac{a^2}{r^2} - \frac{3}{2}(1-\lambda)\frac{a^4}{r^4} \right] \quad (1-11)$$

$$\sigma_\theta = p_z \left[1 + \left(\frac{1+\lambda}{2} \right) \frac{a^2}{r^2} + \frac{3}{2}(1-\lambda)\frac{a^4}{r^4} \right] \quad (1-12)$$

圆形巷道周围的应力分布，如图 1-3-1a、b 所示。

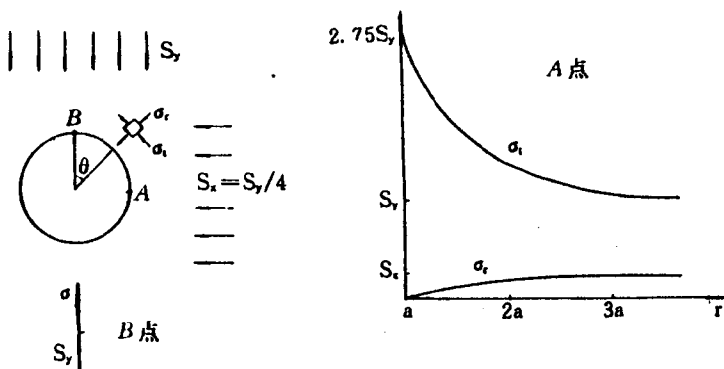


图 1-3-1 圆形巷道周围的应力分布

a—弹性解（虚线）；b—非弹性解（实线）

当 $\lambda=1$ ，即静水应力状态时，(1-11)、(1-12) 式可改写为：

$$\sigma_r = p_z \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (1-13)$$

$$\sigma_\theta = p_z \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (1-14)$$

在巷道周边切向正应力集中系数为 2，如图 1-3-1⁽¹⁾ 所示。

巷道周边有支护结构物时（见参考文献⁽¹⁾及图 1-3-2），如果支架是封闭的，且与巷道周边紧贴、无摩擦时，对于 $\lambda=1$ ，围岩应力为：