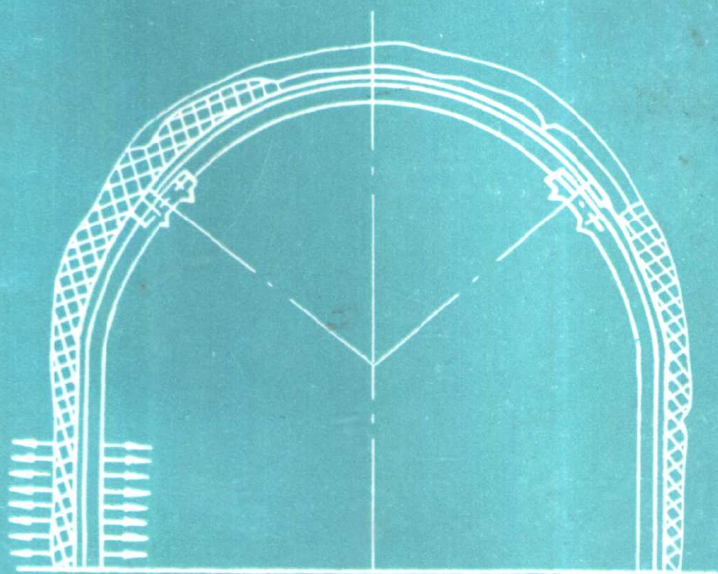


巷道支架壁后 充填技术

王悦汉 王彩根 周华强 著



煤炭工业出版社

巷道支架壁后充填技术

巫悦汉 王彩根 周华强 著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

图书在版编目(CIP)数据

巷道支架壁后充填技术/王悦汉等著. -北京:煤炭工业出版社, 1995

ISBN 7-5020-1203-6

I. 巷… II. 王… III. ①巷道支护-井壁-机械充填②巷道支护-井壁-水砂充填 ③巷道支护-井壁-风力充填 IV. T D353

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第09940号

巷道支架壁后充填技术
王悦汉 王彩根 周华强
责任编辑:黄朝阳

*

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平里北街21号)

北京市怀柔燕文印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $6\frac{1}{4}$ 插页2
字数161千字 印数1—620
1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷
书号3971 定价11.90元



前 言

目前，国内外所采用的巷道掘进和支护工艺都不可避免地会在支护结构与围岩表面之间形成一定大小的超挖空间，或因局部冒顶而形成不规则的空穴。这些支架壁后空间若不及时、有效地加以充填，支护结构与围岩将呈随机的点、线接触，从而使支护结构承受集中载荷或偏心载荷，恶化支护结构的受力状况，使支护结构受损或使其支撑能力得不到充分发挥。同时，由于现阶段煤矿巷道所采用的各种支护结构均为被动承载型结构，壁后空间的存在使得支护结构向围岩提供的初撑力很低，甚至根本不能向围岩提供任何初撑力，以限制围岩变形的发展。不受控制的围岩变形和破坏又将使支护结构受到不均匀的动载荷的作用，使支护结构遭到破坏并进而影响到巷道的整体稳定性。这种现象在地应力较大、围岩较松软的巷道条件下尤为严重。

为了提高巷道稳定性，改善巷道支架与围岩关系，必须对支架壁后空间进行及时、有效地充填，并将支架壁后充填与巷道支护改革有机地结合起来。我国煤矿过去对巷道支架壁后空间一直采用木料或矸石进行手工充填，不仅劳动强度大，而且充填质量差，往往会引起巷道周边岩体的进一步松动和垮落、支架折损或发生事故。为解决这一问题，近年来国内外均加强了对巷道支架壁后充填的研究工作，尤其是在壁后充填材料、机械化壁后充填工艺及设备、与壁后充填相适应的新型支护结构等方面进行了大量的试验和研究。在德国、英国及原苏联等主要煤炭生产国家，巷道支架壁后充填已发展成为一种成熟的、先进的巷道支护工艺，在生产实践中得到广泛的应用，并取得了良好的技术经济效益。在我国煤矿中，随着开采深度的逐渐加深以及软岩巷道的逐渐增多，巷道支架壁后充填的研究工作也开始引起愈来愈广泛的

ABA 14/07

关注，作者运用理论分析、实验室试验及现场试验等手段研究了巷道壁后充填的作用及机理，并在一些矿区进行了试验、推广和应用。本书在对工程实用型壁后充填材料的配比及性能、充填工艺及机具，以及与壁后充填相适应的合理巷道支架结构和参数等研究和应用情况进行总结的基础上，吸收了国内外的先进技术和成果，对巷道支架壁后充填技术进行了系统地介绍。

本书由王悦汉、王彩根、周华强合著。其中第一章、第八章由王悦汉撰写，第三章、第五章、第六章、第七章由王彩根撰写，第四章由周华强撰写，第二章由王悦汉、王彩根合著，第九章由王彩根、周华强合著。我国著名的巷道矿压专家、学科带头人陆士良教授主持了巷道支架壁后充填课题的研究，为探求适合我国国情的壁后充填工程理论及工程实践进行了开创性的工作，并审校了本书。淮南、鹤壁、兖州、铁法等矿区为壁后充填的现场试验作了大量的工作。在此谨向以各种方式为撰写本书提供帮助的所有同志表示谢意。

由于水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1994年12月

内 容 提 要

本书在对巷道支架壁后充填进行理论研究、实验室试验和现场试验的基础上,较系统地论述了巷道支架壁后充填的作用和原理,工程实用型壁后充填材料的配比及性能,壁后充填系统及设备,壁后充填工艺,与之配套的合理支护结构及参数,以及壁后充填的现场试验情况及实际应用效果等内容。

本书主要供从事地下工程的科研、设计、生产单位的工程技术人员和矿业院校师生阅读和参考。

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 我国煤矿巷道支架壁后充填的现状	1
第二节 巷道支架壁后充填的近期发展成果	4
第二章 巷道支架壁后充填的机理	8
第一节 复杂条件下难维护巷道的围岩变形特征	8
第二节 巷道支架壁后充填的作用原理	15
第三节 对壁后充填材料的一般技术要求	30
第三章 普通水泥型充填材料及其特性	32
第一节 矸石粉类充填材料及其特性	32
第二节 粉煤灰充填材料及其特性	40
第三节 普通砂浆及混凝土型充填材料及其特性	45
第四节 普通水泥型充填材料性能的改良途径	47
第四章 高水型和泡沫型充填材料及其特性	52
第一节 高水充填材料及其特性	52
第二节 泡沫水泥充填材料及其机具	83
第五章 特殊充填材料及其特性	92
第一节 胶结性磷石膏类充填材料及其特性	92
第二节 (合成)硬石膏充填材料及其特性	94
第三节 聚氨酯类充填材料及其特性简介	96
第四节 ISOSCHAUM类膨胀发泡型充填材料 特性及使用介绍	98
第五节 轻质混凝土充填材料及其特性	99
第六章 巷道支架壁后充填工艺	101
第一节 壁后充填工艺的概念及其分类	101
第二节 形成整体充填层的充填工艺	102
第三节 袋装充填层的充填工艺	111
第七章 壁后充填系统	117
第一节 壁后充填系统的分类	117

第二节	充填材料的供应与运输系统·····	117
第三节	两种常用充填系统·····	121
第四节	井下破碎矸石的充填系统·····	122
第五节	罐装充填料的充填系统·····	123
第八章	巷道支架壁后充填设备 ·····	125
第一节	风力输送壁后充填设备·····	125
第二节	泵送壁后充填设备·····	135
第九章	壁后充填护巷技术在我国的应用及其前景 ·····	147
第一节	整体壁后充填在淮南矿务局谢一矿和谢桥矿的应用·····	147
第二节	刚性支架壁后充填柔性袋装材料的护巷实践·····	164
第三节	鹤壁四矿高水灰渣材料支架壁后充填·····	171
第四节	壁后充填护巷技术在我国的应用前景·····	186
参考文献 ·····		188

第一章 概 述

第一节 我国煤矿巷道支架壁后充填的现状

现阶段我国煤矿巷道的支护结构主要有锚喷、金属及混凝土支架、砌碇等形式。锚喷支护是将支护体与围岩紧密结合在一起的支护结构，不会形成壁后空间，也没有进行壁后充填的必要。各种类型的支架及砌碇都不可避免地会在支护结构背后与围岩之间形成一定大小的壁后空间。这些壁后空间若不及时地进行有效地充填，将会使围岩与支护体呈随机的点、线接触，从而使支护结构承受不均匀分布的集中载荷或偏心载荷，恶化支护结构的受力条件，使其有效支撑能力得不到充分发挥。同时，由于现阶段煤矿巷道支护所采用的各种支护结构均为被动承载型结构，支护体壁后空间的存在使支护体的初撑力很低，甚至在支护前期不能向围岩提供任何初撑力，以限制围岩中非弹性变形区的发展。当围岩因初撑力太小而产生较大的变形和破坏时，又将使支护结构受到不均匀的动载荷而损坏，从而影响到巷道的稳定性。因此，必须对巷道支护结构的壁后空间进行及时、有效地充填。我国煤矿过去一直采用木料或巷道掘进过程中产生的废矸石对壁后空间以手工作业的方式进行充填，不仅劳动强度大、效率低，而且充填质量差，往往会引起巷道周边岩体的进一步垮落、支架变形或发生事故。80年代末期以来，我国加强了对巷道壁后充填的研究试验工作，在充填材料的配比及性能改善、充填设备和工艺等方面取得了新的进展。概括起来，在我国煤矿生产实践中主要采用过以下几种巷道壁后充填形式：

1. 矸石充填

利用掘进工作面产生的矸石进行壁后充填。这种方式多用于

砌碛巷道。随着料石碛或混凝土碛的砌筑，及时用矸石将碛体背后的超挖空间或冒落空穴填满。特别是在上山掘进时，材料、设备的运输较困难，在掘进工作面就地取材利用矸石进行壁后充填较之其它充填方式往往更具有方便、成本低、速度快、充填较密实等优点。当巷道采用各类支架进行支护时，支架的背板应采用满帮满顶铺设，或采用小网眼的金属网背板。

矸石充填时，由于矸石块度大小不一，手工充填的矸石在壁后空间中杂乱堆积，充填体内孔隙率较大，围岩来压时因充填体体积收缩不均而向碛体传递不均匀的围岩压力，因此充填效果不够理想。特别是当矸石中含有的膨胀性岩石成分较多时，充填后由于矸石吸水后产生大量的膨胀变形，往往会使支护结构遭到严重破坏。

2. 毛石充填

毛石充填一般应用于砌碛巷道，即采用专门从地表采制的较坚硬的石块对壁后空间进行充填。充填体刚度较大，可缩性很小，密实充填后不给围岩留膨胀余地，便于碛体早期承载。但毛石充填时易在碛体上造成应力集中，使碛体受力不均。同时，由于整个支护结构没有可缩让压能力，当围岩变形及压力较大时，易使碛体遭到破坏。另外，毛石充填的成本也较高。

3. 水泥砂浆充填

水泥砂浆充填一般应用于砌碛巷道。水泥砂浆凝结后具有较高的强度，且具有一定的向围岩裂隙中渗透的能力，充填后起到加固围岩的作用。水泥砂浆流动性较好，充填物能很好地充满壁后空间，凝结后的充填体孔隙少，与围岩及碛体紧密胶结在一起，使碛体受力均匀，改善碛体的受力条件。但水泥砂浆凝结后成为脆性材料，不具备可缩让压性能，当围岩变形时会使砂浆充填层碎裂，大幅度地降低充填层的强度。

4. 木料充填

即采用半圆木或方木垛砌在壁后空间，使支护结构与围岩相接触。在处理壁后存在着宽帮、高顶和较大的冒落洞穴时，木料

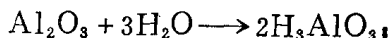
充填是一种简易、快速、有利于安全施工及省工省料的壁后充填方式。但木料充填时造成的空隙较大，不能阻止围岩的持续小范围冒落；木料充填不能封闭围岩，往往还会在支护结构上造成应力集中；木料在壁后空间湿度大、不通风的条件下，极易腐烂而丧失充填体的传递围岩载荷的功能。

5. 炉渣充填

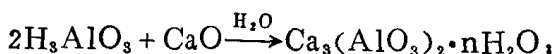
炉渣颗粒较细，结构疏松，具有一定的可缩让压性能。炉渣中不含泥质成分，吸入一定水分后还具有一定的胶结能力，是一种较好的壁后充填材料。潞安常村煤矿井底车场的主要开拓巷道穿过一层2.5m厚、具有较大膨胀性的泥岩层时，最初采用砂浆或矸石进行壁后充填的砌碇支护，在砌碇后一至二个星期的时间内碇体均遭到严重破坏，沿泥岩层的层面碇体被剪切破断，并被向巷道内推移达200~300mm；后来采取在砌碇体或金属支架壁后用塑料编织袋装炉渣进行充填，取得了理想的支护效果，混凝土砌碇的碇体没有出现明显变形和破坏，巷道保持了长期稳定性。炉渣是工业和民用锅炉燃料燃烧后排放的工业废料，利用炉渣材料进行壁后充填可以废物利用，也有利于环境保护。

6. 粉煤灰类充填材料

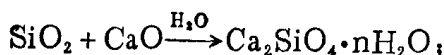
粉煤灰是电厂的废弃物，成分主要是酸性氧化硅(SiO_2)和氧化铝(Al_2O_3)，具有较高的化学活性，在实际应用中可与一定比例的砂子、生石灰混合而成为一种组合材料充填在壁后空间。这种组合材料吸收水分后自行产生化学反应，粉煤灰中的 Al_2O_3 与生石灰遇水后，在碱性催化作用下生成铝酸：



然后铝酸又与氧化钙结合生成水化铝酸钙：



而粉煤灰中的 SiO_2 与生石灰混合遇水后生成水化硅酸钙，



水化铝酸钙和水化硅酸钙都具有一定的强度，与围岩和料石

砌碛或混凝土砌碛的碛体可紧密封胶结，既可加固碛体又可增加围岩的自身强度。

平庄矿务局红庙煤矿采用粉煤灰、河砂、生石灰重量比为2:2:1的组材料装入塑料袋内进行料石砌碛的壁后充填。当围岩变形时压碎塑料袋，使袋中的组材料吸收水分后产生胶结。充填材料在终凝前随围岩变形而受到压缩，使其孔隙率减小，从而为围岩释放能量提供了让压的机会，可大幅度减轻围岩对料石碛体的膨胀压力。采用粉煤灰类人工材料进行壁后充填后，料石砌碛巷道保持了稳定，取得了较好的支护效果及经济效果。

淮南孔集煤矿在大弧板混凝土预制块组合支架的壁后空间，采用了粉煤灰、砂、生石灰按一定配比混合而成的组材料装在塑料编织袋内，手工堆砌密实充填，改善了弧板支架构件的受力条件，取得了较好的巷道支护效果。

除了以上几种主要的壁后充填形式外，我国少量煤矿也采用其它一些种类的壁后充填材料，如片石、粗砂等。以上各种壁后充填形式的共同特点是均为人力手工充填，主要工序没有实现机械化作业，劳动强度大，充填质量差，充填速度慢，充填材料的力学性能不佳、充填效果不理想。所以，近年来研制和发展性能优良的新型壁后充填材料、壁后充填工艺和设备已成为生产急需解决的重要课题之一。

第二节 巷道支架壁后充填的 近期发展成果

自本世纪70年代以来，采用物理力学性能优良的人工材料和机械化作业方式对巷道支护结构的壁后空间进行密实充填已引起了国内外采矿界的日益重视，在这一方面已进行了大量的试验研究工作，并取得了可喜的进展。

德国是世界上最早采用机械化壁后充填的国家之一。从1924年开始即在采煤工作面采空区进行风力充填，后来逐渐将这种风力干式充填工艺应用于巷道支架壁后充填。自1971年以来，

又在巷道支架壁后充填中试验了石膏、水泥、粉煤灰、聚氨脂等各种不同的充填材料，并发展了适于泵送的湿式充填工艺及相应的充填机具和设备。现在德国煤矿中的大断面永久巷道、硐室、乃至竖井马头门之类的大断面巷道交叉点，均采用金属可缩性支架、钢筋网背板辅以壁后充填的支护结构。壁后充填已成为一种成熟的、规范化的支护工艺。自80年代以来，原苏联也广泛地进行了对巷道支架壁后空间进行机械化充填的试验研究，先后在顿巴斯等矿区试验了以磷石膏、聚氨脂、脲醛树脂等材料为主料的壁后充填材料及泵送壁后充填工艺。

磷石膏是化工厂为提取磷酸而产生的工业废料，把磷石膏制成具有胶结性的充填材料采用了两种工艺：一种类似于水泥的生产工艺；另一种是热压法生产工艺，即在一种热压器的装置中用水力热压法将磷石膏加工成为容重为 $1.18 \sim 1.20 \text{ t/m}^3$ 的白色粉末，将其配制成水灰比为 $0.35 \sim 0.37$ 的灰浆，即可作为理想的壁后充填材料。其初凝时间为 $8 \sim 11 \text{ min}$ ，终凝时间为 $20 \sim 22 \text{ min}$ ，初凝抗压强度为 $1.5 \sim 1.6 \text{ MPa}$ ，1天后的单向抗压强度为 $1.7 \sim 1.9 \text{ MPa}$ ，7天后的单向抗压强度为 $2.5 \sim 3.5 \text{ MPa}$ 。井下试验表明，胶结性磷石膏的物理性能不受矿井环境（如温度、湿度变化等）的影响，充填物凝固体积基本不变，充填灰浆渗入围岩裂隙的能力较强，约为水泥浆渗透能力的1.5倍。充填物在固化过程中升温，1h后温度可提高 $10\% \sim 12\%$ ，这种升温效应有利于充填物固化为均质体。因此，胶结性磷石膏是一种较理想的壁后充填材料。在实际应用中，为节省磷石膏的用量，可加入砂、碎石子等中性填料，但其含量最多不超过总量的50%，否则会使充填层强度显著降低。

原苏联、德国、英国等国家的煤矿中曾采用合成硬石膏掺加速凝剂后配制成水灰比为0.35左右的灰浆进行巷道壁后充填，亦取得了较理想的效果。

英国于70年代研制成功了一种新型的高水人工石充填材料。这种材料的主要成分是水，其配比中水的含量占75%以上。充填时

将高水充填材料与添加剂用双液泵注入预先铺设在支架壁后空间内的聚乙稀充填袋内,使其充分混合,产生固化反应,迅速凝固成具有一定强度的硬体材料,将壁后空间充满并向支架传递围岩压力。现在德国、英国等国的一些煤矿中已将袋装高水速凝材料应用于巷道支架壁后空间的整体或局部充填。后者主要用于一些冒落洞穴的充填,或某些围岩极不稳定、掘进后允许暴露时间过短致使来不及进行整体壁后充填,但又必须使支架尽快承载的巷道支护。

我国煤矿近几年来也开始进行了各种不同性能的壁后充填材料、充填工艺、充填设备和系统等方面的研究试验工作。例如在淮南谢李深部井的主要开拓巷道中进行了采用矸石粉为主料、掺入一定量减水剂等添加剂的低水充填材料,利用液压柱塞泵加压后通过输料软管进行U型钢可缩性支架壁后充填的试验。试验巷道位于埋深为700m左右的砂质泥岩、粉砂岩岩层中,压力大、岩性松软,且受上部煤层的采动影响,未采取壁后充填措施前巷道采用U型钢可缩性支架及水泥背板支护,巷道支架安设后一般在两周左右即产生严重变形,支架棚腿内移、支架构件严重翘曲、水泥背板大量折断,巷道产生大量底臃,致使巷道掘进后1~2个月内又需进行修复工作;采取壁后充填措施后,支架承载能力提高了一倍以上,巷道掘进后前期的围岩变形量可降低50%左右,巷道维护后期(掘进15天以后)的围岩变形量可降低75%以上,改善巷道维护效果十分显著。

鹤壁矿务局四矿自1992年起采用由中国矿业大学研制、徐州矿务局水泥厂生产的ZKD型高水速凝充填材料,对金属支架支护的软岩巷道进行了壁后充填。ZKD型高水速凝充填材料是一种特种水泥混合材料,分主料和配料两部分分别包装。在井下充填点将主、配料分别加水搅拌成浆后,由泵送至壁后空间的充填袋(或模板隔离的空间)内充分混合,即可速凝成坚硬的充填体。这种充填材料可用于净浆充填,采取较高的水灰比,混合后浆液中水体积可高达90%以上,具有固体用料少、速凝早强等特点,通过调整水灰比可满足不同强度性能要求的工程需要。该种充填

材料又可掺加一定量的灰渣材料（如沸腾炉渣或烟道灰、电厂粉煤灰、矸石粉、水泥厂窑灰、石粉、河砂等）制成高水灰渣充填材料。高水灰渣充填材料的突出优点是可就地取材，大量消耗工业废渣，具有良好的抗风化性能，巷道壁后充填时可采用活动钢模板而不用充填袋，可降低充填成本。灰渣充填材料充填体的强度较高，高水净浆充填材料1天后的单向抗压强度为1.4~3.8 MPa，7天后的单向抗压强度为2.2~5.77 MPa，而灰渣充填材料充填1天后的单向抗压强度可达3.2~5.3 MPa，7天后的单向抗压强度可达5.3~7.8 MPa，其强度完全可以满足一般地应力较大的软岩巷道壁后充填的要求。

兖州矿务局东滩煤矿于1991年在埋深为600余米的大断面软岩巷道修复中，进行了采用水泥砂浆为充填材料及罐式风力充填机为充填机具的巷道支架壁后充填试验。巷道支护形式为U型钢可缩性支架及金属网背板。壁后充填后消除了巷道修复前产生的严重变形和底臃，使巷道保持了长期稳定。

以上试验均采用了性能优越的新型充填材料及机械化壁后充填工艺和设备，代替了过去靠工人手工操作的繁重体力劳动，壁后空间被充填得均匀、密实，充填材料可将支架构件与围岩胶结为一个整体，使它们共同承载，可使围岩得到很好的封闭，防止围岩风化及遇水软化。经壁后充填后的巷道围岩变形量显著减少，变形速度自壁后充填后迅速衰减并趋于稳定。巷道可保持长期稳定性，壁后充填取得了明显的技术经济效益。

以上各种壁后充填材料及充填设备仍在继续研究发展之中。目前充填材料的主攻方向是进一步提高材料的物理力学性能及适合于机械化充填的材料工艺性能，并努力降低充填材料的成本。充填设备的主攻方向是进一步提高充填设备的充填能力及可靠性，使设备小型化，以便于在井下移设，另外使设备动力与掘进工作面其它机械的动力单一化。我国煤矿中巷道壁后充填试验的初步成功，为复杂条件下难维护巷道的支护改革开辟了一条新的技术途径，并展示了广阔的应用前景。

第二章 巷道支架壁后充填的机理

第一节 复杂条件下难维护巷道的围岩变形特征

巷道的稳定性主要取决于围岩应力场的强度和分布特征，围岩本身的物理力学特性以及支护形式和特征。

巷道的开挖打破了岩体内应力的原始平衡状态，巷道围岩应力重新分布的结果将从巷道周边到围岩深部形成三个力学形态不同的区域，如图2-1所示。

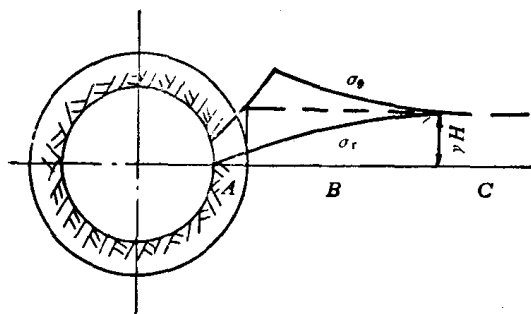


图 2-1 巷道围岩应力分布示意图
A—破坏区；B—塑性变形区；C—弹性变形区

根据弹性理论的研究成果，巷道掘进后应力重新分布的结果将在巷道周边形成很高的切向集中应力，而巷道周边的岩体因处于二向应力状态及受到矿井环境的影响，强度明显降低，

如果高的集中应力超过了岩体的强度极限，巷道周边的岩体就要产生破坏及大量的塑性变形，并从周边向岩体深部扩展到一定范围，在围岩内形成塑性区，并引起集中应力向围岩内部转移。在塑性区内圈，围岩可能松动塌落，产生大量裂隙，形成被一些学者称之为松塌区或松动圈的破坏区(图2-1中A区)。松塌区(或松动圈)内的岩石不能传递切向应力，但仍可传递径向应力。塑性区外圈是应力升高部分，它与弹性区内的应力升高部分结合在一起，构

成了被一些学者称为应力升高区的承载区 (图2-1中B区)。应力升高区以内的深部岩体为原始应力区 (图2-1中C区)。A区内的岩体已被大量裂隙切割成碎的岩块, 仅保持很小的残余强度, 当其暴露后如不及时有效地支护, 就会在较短的时间内向巷道空间内垮落。巷道支架与上述各区内的岩体组成一个统一的力学体系, 体系中各部分的相互作用将影响整个体系的平衡和稳定。支护结构所承受的地压主要由两部分组成, 一部分是A区中整体结构已遭破坏的破碎岩体重量所形成的松散地压, 另一部分则是由A区内松散岩体的膨胀扩容变形、B区内岩体在高地应力作用下产生的塑性及弹性变形所形成的形变地压。显然, A区即松动圈的范围越大, 松散地压就越大。松动圈是塑性区的内圈, 根据极限平衡理论, 在各向等压的情况下, 圆形巷道的塑性区半径为:

$$R = r_0 \left[\frac{(P + C \cdot \text{ctg} \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(p_i + C \cdot \text{ctg} \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (2-1)$$

式中 P —— 围岩应力;

p_i —— 支架阻力;

r_0 —— 巷道半径;

C —— 围岩粘结力;

φ —— 围岩内摩擦角。

由式2-1可知, 巷道塑性区的半径 R 随巷道所在处原岩应力 P 的增大呈指数关系迅速增长。这是当随着开采深度 H 的增大, 受高构造应力或回采影响后, 巷道支护承受的地压随之增大, 巷道塑性区及松动圈范围也随之增大。从式2-1中也可看出, 围岩的内摩擦角 φ 及粘结力 C 愈小, 围岩的强度也愈低, R 值就愈大。且 P 值愈大, 对 R 值的影响愈剧烈。这是地压越大、围岩越松软时, 巷道越难维护的原因。

另外, 根据开尔文流变模型可得到巷道围岩的径向蠕变变形量 u , 及变形速度 $\dot{u}$ 与围岩力学特性之间的关系:

$$u = \frac{r_0^3 P}{2Gr} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{\eta} t} \right) \quad (2-2)$$