

锚杆锚固力与锚固技术

陆士良 汤 雷 杨新安 著

煤炭工业出版社

锚杆锚固力与锚固技术

陆士良 汤 雷 杨新安 著

煤炭工业出版社

876318

图书在版编目 (CIP) 数据

锚杆锚固力与锚固技术/陆士良等著. —北京:煤炭工业出版社, 1998

ISBN 7-5020-1579-5

I. 锚… I. 陆… II. 巷道支护-锚杆 N. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 06918 号

锚杆锚固力与锚固技术

陆士良 汤 雷 杨新安

责任编辑: 黄朝

煤炭工业出版社

(北京朝阳区曙光里 8 号 100016)

煤炭工业出版社印刷厂

新华书店北京发行所



开本 850×1168mm¹/₃₂ 印张 8⁷/₈ 插页 1

字数 231 千字 印数 1—1,855

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷

书号 4348 定价: 20.65 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书在对巷道锚杆支护进行现场测试、实验室试验和理论分析的基础上,较系统地论述了锚杆锚固力的内涵及作用机理;锚杆与围岩的相互作用关系及锚固力的变化规律;大变形巷道岩体和锚固体的位移;煤层和软岩巷道锚杆的支护阻力、工作特性和支护效果;决定锚杆锚固力的主要参数;锚杆护表构件的效应及其对发挥锚固力的作用;以及实现锚杆与注浆一体化的锚注技术。

本书可供从事岩土和采矿工程的科研、设计、生产单位的工程技术人员及大专院校相关专业师生参考。

前 言

在岩土和采矿工程中，锚杆支护是兼有支架和加固两种作用的围岩控制技术，与框式支架相比，以其显著的技术经济效益，在世界各国获得广泛应用。我国锚杆支护技术经过 40 年的探索和实践，取得了很大进展。在全国煤矿中，1996 年锚杆支护率已达 29.1%。但是锚杆支护的应用范围仍局限于围岩比较稳定的巷道。在围岩较松软和受采动影响的煤层巷道中，锚杆支护率还只有 15.7%。所以解决深井、软岩和动压等大变形巷道的锚杆支护问题，是扩大锚杆使用范围的关键。

巷道支护的主要功能是将支承载荷作用于岩体，加强巷道围岩的稳定性，发挥岩体的自承能力，以控制巷道围岩变形及防止岩块塌落，所以支护阻力是所有支架的主要参数。支护阻力对提高大变形巷道围岩的自承能力和控制围岩变形更为重要。锚杆是通过约束围岩的约束力——锚固力来提高围岩体强度、改变围岩应力状态而稳定围岩的。锚杆的锚固力对控制大变形巷道的围岩变形具有极为重要的作用。锚杆技术先进的国家，锚杆支护的发展历程表明，锚固力的大幅度提高是锚杆支护得以迅速发展的重要原因。与国外锚杆支护技术相比，我国锚杆支护还存在着锚固力低、可靠性差等问题。

锚固力是在锚杆与围岩相互作用过程中形成和变化的。锚杆的锚固力不仅取决于锚杆本身的结构、参数、锚固方式和锚固长度，金属网、钢带和梁等护表构件，锚固岩体的坚硬程度、结构和性质等，还取决于锚固岩体的位移、流变、离层和破裂等围岩的损伤破坏过程。在围岩大变形巷道中，随着锚杆锚固岩体的松动破裂，锚杆的锚固力大都会迅速下降，实际的锚固力往往远低于理论计算值，甚至完全失效，这是软岩和煤层动压巷道锚杆支

护成败的关键问题。

针对我国的地质、开采和经济条件,研究和掌握锚杆与围岩的相互作用关系,从包含锚杆、锚固方法、托板、钢筋网等锚杆体系各组成部分的功能和作用规律着手,研究影响锚固力的诸因素,锚固力稳定围岩的机理,使锚杆具备强初撑、急增阻和高阻力的工作特性,并封闭围岩,控制不稳定岩块,就有可能防止岩层过大离层而引起岩体松动及围岩变形损伤过程中锚杆锚固力的丧失。锚固力是提高锚杆支护作用的核心,是我国锚杆支护技术赶上世界先进水平的关键。

本书在现场测试、实验室试验和理论分析的基础上,较系统地论述了锚杆的锚固力及锚固技术,全书概括了锚杆锚固力的理论、实践及应用三部分。第一部分论述了锚杆锚固力的内涵,锚固力作用机理,锚杆与围岩的相互作用关系。阐述了锚固力是峰后围岩剪胀变形与锚杆相互作用的结果,并随围岩变形损伤而不断变化的规律。第二部分论述了大变形巷道岩体和锚固体的位移规律,巷道围岩变形损伤过程中锚固力和工作特性的变化规律;阐述了煤层和软岩巷道锚杆的实际支护阻力、工作特性和支护效果。第三部分阐述了锚杆的材质和杆径、锚固方式、锚杆的长度和布置等决定锚杆锚固力的主要技术和参数,锚杆护表构件的效应及其对发挥锚固力的作用,以及实现锚杆与注浆一体化的锚注技术。

本书是在前人研究和实践的基础上,结合作者近几年的研究成果,加以系统总结而写成的。书中参考了国内外大量文献和实践成果,为此深表谢意。

由于水平所限,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

1998年5月

目 录

第一章 锚杆支护现状和发展概况	1
第一节 国外锚杆支护概况	1
第二节 我国锚杆支护概况	4
第三节 锚杆支护理论的发展和现状	8
第二章 锚杆的锚固力	18
第一节 锚固力概述	18
第二节 锚固力测试	19
第三节 锚固能力计算	23
第四节 锚杆失效类型	33
第三章 锚固力的作用机理	35
第一节 径向锚固力的作用机理	35
第二节 切向锚固力的作用机理	39
第三节 锚杆与围岩的相互作用关系	44
第四节 巷道围岩峰后剪胀变形模型及应用	46
第五节 锚杆锚固机理力学模型及应用	55
第四章 巷道岩体变形及锚固力变化规律	63
第一节 巷道围岩应力	63
第二节 巷道围岩变形	65
第三节 单一巷道周边和岩体深处的变形规律	68
第四节 采动巷道周边和岩体深处的变形规律	72
第五节 巷道岩体位移同围岩应力和岩体强度的关系	74
第六节 巷道岩体变形与锚固体位移的关系	76
第七节 巷道围岩损伤变形过程中锚固力的变化规律	79
第五章 锚杆的加固作用及支护阻力	88
第一节 锚杆对岩体的加固作用	88
第二节 巷道支护阻力	93
第三节 巷道围岩变形量与支护阻力的关系	97
第四节 大变形巷道锚杆和框式支架的工作阻力	100
第六章 煤层和软岩巷道锚杆的工作特性和支护效果	109

第一节	软岩动压巷道围岩大变形特征	109
第二节	锚杆支护的设计工作特性	110
第三节	软岩动压巷道锚杆支护失效的工作特性	114
第四节	煤层巷道锚杆与框式支架的支护效果	121
第五节	强初撑急增阻高阻力锚杆支护煤层动压巷道的效果	133
第七章	决定锚杆锚固力的主要参数	138
第一节	锚杆材质及杆径	138
第二节	锚固剂	147
第三节	锚固方式与锚固长度	151
第四节	锚杆长度	155
第五节	锚杆间距	164
第六节	锚杆的安装工艺	169
第八章	锚杆护表构件的效应及其对发挥锚固力的作用	172
第一节	托板的效应	172
第二节	金属网的效应	180
第三节	梁和钢带的效应	186
第四节	锚杆桁架	193
第五节	喷射混凝土层的效应及其选择	201
第九章	锚杆技术的进展	209
第一节	预应力锚索	209
第二节	可拉伸锚杆	214
第三节	锚杆防治巷道底鼓	218
第四节	厚煤层放顶煤开采的巷道锚杆支护	224
第十章	锚注支护	232
第一节	锚注支护原理概述	232
第二节	国外锚注支护技术	233
第三节	我国外锚内注式锚杆的结构和密封	236
第四节	注浆材料	239
第五节	锚注支护工艺	240
第六节	锚注支护效果检测	250
第七节	锚注支护模拟试验	257
参考文献		266

第一章 锚杆支护现状和发展概况

巷道开挖之后，破坏了岩体原始的力学平衡，围岩应力重新分布，其表现为顶板下沉、底板鼓起、两帮挤入，甚至冒顶和片帮等。矿压观测表明应力重新分布是个渐进过程，并且围岩的收敛由浅入深，收敛速度逐渐衰减。安设在围岩中的锚杆，其刚度、强度与围岩有较大差别，并且只能整体移动，这与围岩的不均匀变形相矛盾，从而产生了限制围岩变形的力，在国标 GB 86—85 中定义为锚固力。根据对围岩作用机理的不同，巷道支护基本上可分为两大类。一类是用支架、砌体等方法直接支承围岩，称为支护；另一类是注入水泥浆或化学剂等来补强围岩，以发挥围岩的自承作用，称为加固。从锚杆与围岩的相互作用关系来看，锚杆是兼有支护与加固两种作用的支护形式。

第一节 国外锚杆支护概况

一、国外锚杆支护应用概况

1912 年，艾尔弗雷德·布希（Alfred Busch）在阿伯施莱辛（Aberschlesin）的弗里登斯（Friedens）煤矿开始使用锚杆支护顶板。1915～1920 年美国金属矿也开始使用锚杆，并得到迅速发展和推广。50 年代英、法、德、瑞典等也开始应用和研究锚杆支护。英国 1946 年首次试验机械涨壳式锚杆，1952 年在 NCB 矿开始大规模应用，到 1959 年英国锚杆支护巷道已达 60 多英里。但由于机械式点锚固锚杆不适应英国的煤层条件，60 年代英国锚杆支护实际上已停止使用。法国 1949 年开始在铁矿中应用锚杆，后推广到钾碱矿。50 年代在煤矿中进行了点锚固锚杆的试验，1959～1963 年，煤矿锚杆支护仍未获得成功。美国因地质和开采条件较好，机械点锚固锚杆得到大量推广，1951 年就有 500 多个矿井使

用锚杆,其中煤矿达 450 多个,锚杆每月的使用量达 260 万套。其它各国锚杆支护都处于徘徊不前,甚至萎缩的境地。

60 年代中期后,法国引进试验了 50 年代由德国发明、60 年代进入商品化的树脂全长锚固锚杆。由于法国巷道发生了几起严重的围岩坍塌,促使法国煤科院在 Lorraine 煤田对树脂锚杆进行了深入的研究,使法国锚杆支护获得较快发展,千吨煤锚杆用量从 1970 年的 23 根上升到 1982 年的 80 根。

英国到 80 年代中后期才重新发展锚杆支护。在与美国煤炭局(USBM)(1986~1989 年)及澳大利亚煤炭工业研究所(ACIRL)(从 1987 年至今)的两个联手协议的推动下,主要引进澳大利亚锚杆技术,包括:(1)采用高强的澳大利亚锚杆系统(AT 锚杆),包括高强树脂全锚、清洁钻孔、锚杆与钻孔的紧密装配,树脂粘结强度达到 5~10MPa,锚固力达 250kN 以上;(2)根据实际的地质、开采条件,研究围岩的应力状态,掌握岩层移动、锚杆载荷的分布和发展,合理设计锚杆支护。此后,英国锚杆支护获得了迅速发展,1994 年英国锚杆支护巷道已占巷道总量的 80%,超过了 300km,并且有 60 个采深 1100m 的后退式工作面的平巷采用了锚杆支护。美国、澳大利亚几乎所有巷道都采用锚杆支护,并认为不能用锚杆支护的煤层,开采是不经济的。

锚杆支护经过 50 年代至 60 年代的徘徊期后,在世界各国获得了蓬勃发展,成为煤矿巷道支护的主要型式。

二、锚杆支护型式发展概况

50~60 年代锚杆支护的主要型式为机械端头锚固,分为楔缝式、涨壳式、倒楔式等,其特点为锚固力低、系统刚度小、可靠性差、受岩性影响大,不宜在软岩中使用。如 N. M. Dwarkin 等在“A”西部矿山和“A”北部矿山用 B、C、D、E、F 五种涨壳式锚杆 142 根进行锚固力试验,锚固力为 40~160kN,在“A”西部矿山,锚固力从大到小顺序为 C、B、F、D、E,而在“A”北部矿山,从大到小顺序为 F、E、B、C、D,说明锚固力随地质开采条件不同而发生很大变化。

70~80年代各种型式锚杆相继出现,如砂浆锚杆、树脂锚杆、管缝式锚杆、水胀锚杆等。它们的特点为全长锚固、锚固力大、可靠性高、适应性强。以树脂锚杆为例,B. Caverson 在 White Pine 矿进行的用聚酯树脂锚杆和涨壳锚杆的拔出试验,树脂锚杆平均锚固力为 180kN,而涨壳锚杆平均只有 80kN。J. A. Fvanklin 也做过类似试验,得出粘结式锚杆比机械式锚杆的锚固力大 1.7~3 倍。此外,E. W. Parsons 和 L. Osen 的测试还证实了粘结式锚杆锚固力随着围岩变形的增长而逐渐增大,机械点锚锚杆的锚固力初期总有个急剧下降过程,然后就维持在较低的水平。上述研究成果对机械点锚锚杆的淘汰和全锚锚杆尤其是树脂锚杆的推广应用发挥了重要作用。

90 年代,树脂锚杆以其优越的锚固性能和简易的操作工艺逐渐占领了锚杆市场。砂浆锚杆由于灌浆工艺复杂、凝固时间长、胶结质量难以保证,管缝式锚杆和水胀锚杆易锈蚀且锚固力受到钢材和围岩松弛的影响,只能有条件地发展应用。此外,各种适应特殊开采条件的锚杆型式得到发展,如适应可切割要求的玻璃纤维锚杆、塑料锚杆,适应软岩巷道大变形要求的等塑性锚杆、可拉伸锚杆、钢股(Steel Strand)锚杆,以及适应大断面巷道和硐室的桁架锚杆、锚索等。

三、国外锚杆支护发展方向

国外锚杆支护应用十分广泛,但仍然局限于围岩较稳定的巷道。著名的雪山(Snowy Mountain)工程的 Pender 围岩分类法将围岩分为 6 类,雪山隧道工程协会根据 Pender 的分类选取支护方式,在质量较好的三类围岩中,建议采用锚杆支护或以锚杆支护为主的支护形式,而在质量较差的三类围岩中,不宜采用锚杆或以锚杆为主的支护。新奥法(NATM)围岩分类(John, 1980)将围岩分为 7 个级别,建议采用锚杆支护或以锚杆为主要支护形式的属质量较好的前 4 类。软岩锚杆支护问题在美、澳等国并不突出,德国比较重视采深大、岩体质量差等地质条件下的锚杆支护问题,P. Stephan 和 W. Gotze 通过模拟试验证实提高锚杆支护

强度可有效地控制巷道围岩变形。

锚杆的安设速度是制约更好、更广泛地应用锚杆的一个重要因素，尤其在煤层巷道中，尽管已研制成多种锚杆安装机械，但在锚杆间距较小、密度较大时，很难跟上掘进机的掘进速度。因此，必须提高锚固强度以增大锚杆间距。为此，英国研制成锚固力达 500kN 的“大锚杆”(Big Bolt)，并在 Asfordby 矿试验成功了用间距 1.0m 的“大锚杆”代替了间距 0.6m 的“AT”锚杆。

国外锚杆支护的发展方向为：提高锚杆的锚固力，并使其得到充分发挥，扩大锚杆支护应用范围，提高锚杆支护效率。

第二节 我国锚杆支护概况

一、我国锚杆支护概况

我国锚杆支护始于 50 年代，在铁路隧道、矿山、水利、人防各部门都获得应用。煤矿于 1956 年开始使用锚杆支护巷道。当时主要采用机械端锚和钢丝绳砂浆无托板锚杆，这种单体锚杆在较稳定的岩石巷道中获得成功。但是在围岩较松软的岩巷及动压巷道中没有取得预期效果。70~80 年代，国家“七·五”、“八·五”科技攻关中将锚杆支护列为软岩巷道支护的主攻方向之一。铁路部门的成昆、丰沙、太焦、枝柳、京原等干线隧道，煤炭系统的山东龙口，吉林舒兰、梅河、珲春，辽宁沈北，浙江长广，广东石鼓，山西汾西，安徽潘集，青海大通，内蒙大雁、扎赉诺尔及平庄等矿区，都展开了锚杆支护的研究和推广应用工作。

我国煤矿锚杆支护经过 40 年的探索，取得了很大进展。1996 年掘进巷道 5412.2km，锚杆支护巷道 1574.3km，占 29.09%，其中岩巷锚杆支护率 57.34%，煤巷锚杆支护率 15.68%。在锚杆支护技术上取得了以下成绩：

(1) I、II 类巷道单体锚杆支护技术已经成熟，并获得广泛应用；

(2) III 类巷道锚梁网支护研究获得成功，IV、V 类巷道的锚梁网、锚网架支护也积累了一定的经验；

(3) 引进消化了国外的锚杆支护技术, 如管缝式锚杆、桁架锚杆等;

(4) 开发研制了廉价的快硬水泥锚杆;

(5) 引进消化高强锚杆技术;

(6) 提高了锚杆支护机械化水平;

(7) 研制成功锚注支护技术。

二、我国锚杆支护存在的问题

我国锚杆支护主要存在以下问题:

(1) 锚杆支护应用范围还不广泛, 在煤层巷道中锚杆支护只占 15.68%, 不但Ⅳ、Ⅴ类巷道难以应用, Ⅰ、Ⅱ类巷道也亟需推广。

煤层巷道围岩一般比较松软, 且经受动压影响, 而现用的刚性端锚锚杆锚固强度低, 一般都低于 0.1MPa, 煤层巷道的变形量一般都较大, 巷道服务期限较短的区段巷道的围岩变形量一般从 100mm 到 1000mm 以上。服务期限较长的上下山的围岩变形量通常达 300mm 到 3000mm 以上。如表 1—1 所列, 刚性端锚锚杆支护的巷道, 围岩位移量超过 50mm 左右时巷道周边围岩就会出现开裂; 超过 100mm 左右时就会碎裂剥落; 超过 200mm 左右时, 巷道顶板就会出现“抽条”和煤帮明显鼓出, 锚杆的锚固力逐渐丧失, 进而原锚固岩层与岩体离层及锚杆脱落, 巷道发生冒顶和坍塌。刚性端锚锚杆支护的巷道, 围岩的极限变形量甚小, 一般只有 100~200mm, 煤层动压巷道中仅有约 15% 的围岩较稳定的回采巷道及围岩稳定的准备巷道, 围岩变形量小于 200mm 左右。煤层巷道的围岩变形量普遍较大, 而锚杆的锚固强度和允许的围岩变形量甚小, 这是锚杆支护在煤层动压巷道中应用还不广泛和难以推广的主要原因。

(2) 主要使用锚固力低、可靠性差的端锚锚杆, 全锚锚杆主要是水胀式和管缝式锚杆, 树脂全长锚固锚杆使用比例很小。如表 1—2 所示。新汶矿务局端锚锚杆平均抗拔力仅为 45kN, 全锚锚杆也只有 84kN。如表 1—3 所示, 其它矿区锚杆抗拔力一般低于 50kN。

表 1—1 现有锚杆支护巷道围岩极限位移量

围岩位移量 锚杆类别	50mm	100mm	200mm	300mm
端锚锚杆	✓			
全锚锚杆		✓		
全锚锚喷网			✓	
全锚锚梁网				✓

(3) 锚杆密度大 (间距一般为 0.6~0.8m), 安装速度慢, 跟不上掘进机的掘进速度。

上述三个问题都涉及锚杆的锚固力问题, 提高锚固力是扩大锚杆使用范围、减少顶板事故、加大锚杆间距、加快安设速度的技术关键。

表 1—2 新汶矿务局、矿各种锚杆抗拔力的比较

锚杆种类	锚杆规格		锚固方式	抗拔力 (kN)		
	外径 (mm)	长度 (m)		平均值	最大	最小
倒楔式锚杆	14	1.5	端头锚固	37	54	12
管缝式锚杆	44.8	1.5	全长摩擦锚固	48	62	38
楔管式锚杆	43.8	1.5	全长加端点摩擦锚固	87.6	93.7	84.9
水胀式锚杆	48	1.5	全长摩擦锚固	116.4	12.21	108.7
树脂锚杆	14	1.5	端头集中粘结锚固	44	49	31
快速水泥锚杆	14	1.5	端头集中粘结锚固	56	70	32
快速膨胀水泥锚杆	14	1.5	端头集中或全长粘结锚固	60	79	40

注: 新汶矿务局是我国锚杆支护应用较早、较广泛、较成功的矿务局之一。

表 1-3 锚杆抗拔力统计

矿 名	锚杆规格 (mm)	锚固剂	锚固长度 (mm)	抗拔力 (kN)
晋城王台铺矿	φ16×1600 钢筋	树脂	250	<35.6
潞安王庄矿	φ16×1600 钢筋	水泥药卷	300~350	50
辽源梅河矿区	管缝			30~50
平顶山六矿	φ16×1600 钢筋	树脂	端锚	42
	竹锚杆		端锚	16.6

三、国内外锚杆支护的比较和我国锚杆支护的发展方向

同国外相比，我国锚杆支护主要存在锚固力低、可靠性差等问题，见表 1-4。锚杆支护发展的历史表明，随着锚固力的提高，锚杆支护就迅速发展，因此锚固力是发展锚杆支护的关键。

表 1-4 国内外锚杆支护技术特征比较

	英、 澳	中 国
锚杆类型	全长粘结树脂锚杆	端锚锚杆、管缝锚杆
锚杆直径	>20mm	14~16mm、30mm(管缝)、43mm
长 度	1.8m、2.4m、3.0m	1.6~2.0m
间 距	≥0.9m	0.6~0.8m
锚杆钻孔间隙	6mm	26mm
粘剂性质	树脂 抗剪强度:30MPa 抗压强度:70MPa 粘结强度:12~16MPa(钢筋) 5~16MPa(软岩)	水泥药卷 抗压强度:40~50MPa 粘结强度:5~10MPa(钢筋) 3~4MPa(软岩)

第三节 锚杆支护理论的发展和现状

锚固理论是随锚杆支护实践而不断发展的,它有两方面作用:
(1) 使人们认识、理解锚杆支护对围岩的稳定功能;(2) 为锚杆支护设计提供理论依据。

一、国外锚杆支护理论的发展和现状

1. 悬吊作用

1952~1962年, Louis A. Panek 经过理论分析及实验室和现场测试, 提出锚杆的作用是将直接顶板悬吊到上覆坚硬岩层上(图 1-1); 在软弱围岩中, 锚杆的作用是将直接顶板的破碎岩石悬吊在其上部的自然平衡拱上(图 1-2), 拱高可采用普氏的压力拱理论估算。

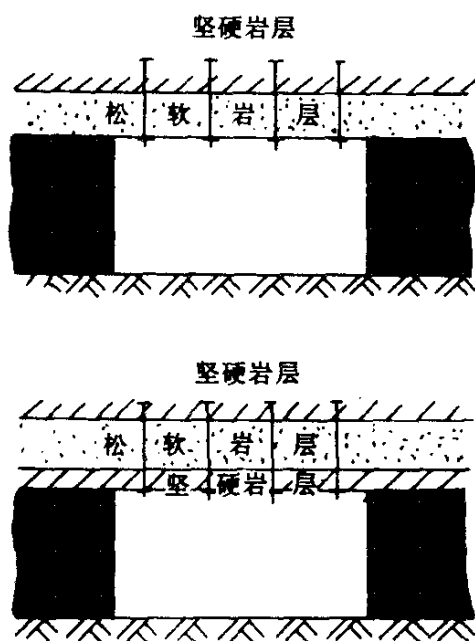


图 1-1 坚硬顶板锚杆的
悬吊作用

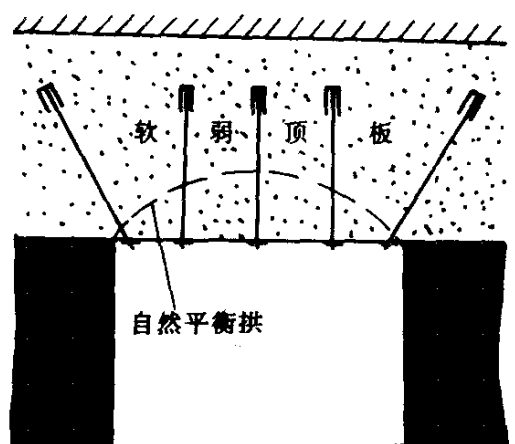


图 1-2 软弱顶板锚杆的
悬吊作用

利用悬吊作用进行锚杆支护设计时, 锚杆长度可根据坚硬岩层的高度或平衡拱的拱高来确定, 锚杆的锚固力及布置可根据所

悬吊岩层的重量来确定。

悬吊作用能很好地解释锚固顶板范围内有坚硬岩层时的锚杆支护。跨度较大的软岩巷道中，普氏拱高往往超过锚杆长度，悬吊作用难以解释锚杆支护获得成功的原因。

2. 组合梁作用

1952 年德国 Jacobio 等发表了组合梁作用理论，其实质是通过锚杆的径向力作用将叠合梁的岩层挤紧，增大层间的摩擦力，同时锚杆的抗剪能力也阻止层间错动，从而将叠合梁转化为组合梁。图 1-3 是 Jacobio 所作的叠合梁试验，在均布荷载下，组合梁的承载能力是叠合梁的 n 倍。

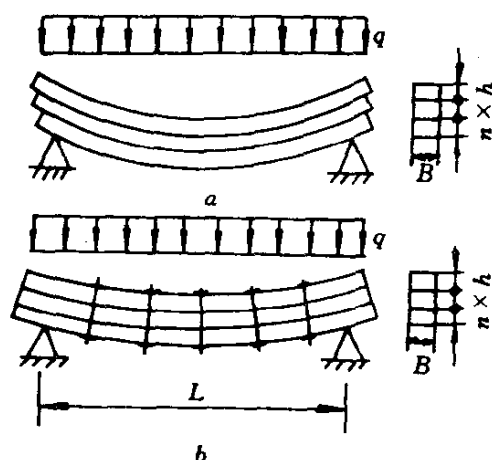


图 1-3 组合梁作用
a—叠合梁；b—组合梁

利用组合梁作用进行锚杆支护设计时，锚杆的锚固力 Q 由下式确定：

$$Q \geq D^2 P_i \quad (1-1)$$

式中 D ——锚杆的间距；

P_i ——组合梁载荷，不小于锚固深度范围内岩体自重，可取 $P_{i\min}$ （最小支护抗力，根据弹塑性地压理论，若支护阻力小于最小支护抗力，则围岩压力由变形地压转为松动地压，巷道失稳）。

锚杆长度由式 (1-2) 和式 (1-3) 确定：

$$t = 0.612B \sqrt{\frac{KK_p P_i}{\psi \eta \sigma_L}} \quad (1-2)$$

式中 t ——组合梁的有效组合厚度；

B ——组合梁跨度；

K ——安全系数，掘进机掘进取 2~3、钻爆掘进取 3~5；

K_p ——软岩或动压巷道围岩荷载增大系数；