

■ 勾攀峰 著

深井巷道围岩锚固体 稳定原理及应用

煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目（50874037，51174078）资助

深井巷道围岩锚固体 稳定原理及应用

勾攀峰 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

深井巷道围岩锚固体稳定原理及应用/勾攀峰著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4145 - 8

I. ①深… II. ①勾… III. ①深井—巷道支护—围岩加固—
锚固—研究 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 270117 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 11¹/₄
字数 257 千字
2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 6968 定价 35.00 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

本书是系统论述深井巷道围岩锚固体稳定原理及其控制技术的专著，主要内容包括锚固体的概念、深井巷道临界深度的确定、预应力锚杆对锚固体强度强化的试验研究、巷道围岩锚固体变形破坏特征及稳定性分析、基于锚固体稳定的锚杆-锚索协调支护原理及工程实践。

本书可供从事采矿、岩土工程的科研、生产、教学、设计单位工程技术人员、科研工作者和师生参考，也可作为采矿工程专业研究生的参考教材。

序

锚杆支护已成为井巷工程的主要支护形式之一。正确设计和应用锚杆支护，必须对锚杆支护机理有正确的认识，并以建立完善的锚杆支护理论作为指导。传统的锚杆支护理论（如悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论等）为锚杆支护的推广应用起到了重要的指导作用，但随着开采深度的增加，上述锚杆支护理论的应用受到了一定程度的限制。

深井巷道围岩形成较大的破碎区，巷道周围锚杆均布置在围岩破碎区中，此类条件下锚杆支护作用机理的研究众多并逐步深入，围岩强度强化理论是其中具有代表性的学说之一。该理论初步揭示了破碎围岩中锚杆支护的作用机理，为发展高强锚杆、超高强锚杆提供了理论依据。

近年来，随着煤矿开采深度的变化，锚杆支护技术快速发展，高强度、高延伸率、高预紧力、低密度锚杆支护系统已成为锚杆支护的发展趋势。但也应该看到，由于煤巷地质条件的复杂性与多变性，对锚杆支护作用机理的认识还有待全面系统地深入研究，对深部高应力巷道、极破碎围岩巷道等困难条件的锚杆支护理论研究还很不够。

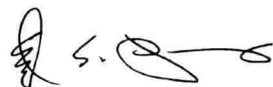
本书作者及其科研团队从深井巷道围岩锚杆与锚固范围岩体组成的锚固体的稳定出发，深化围岩强度强化理论的研究，进一步研究锚固体的稳定原理，分析锚杆预紧力对锚固体稳定性的控制作用，研究锚固体变形过程中锚固强度、锚固体强度的演变过程，建立巷道围岩锚固体的稳定准则。其研究成果对于完善锚杆支护巷道围岩强度强化理论，确定合理的支护参数和支护形式，进行深井巷道围岩控制具有重要的理论意义和实用价值。

本书作者及其科研团队十余年来一直致力于煤巷锚杆支护理论和技术的研究，在《煤炭学报》、《岩石力学与工程学报》、《中国矿业大学学报》等期刊发表过一些有重要见解的文章，如回采巷道锚杆支护两帮稳定性分析、回采巷道锚杆支护顶板稳定性分析、基于突变理论的深井巷道临界深度等。这次作者系统总结其多年来在煤巷锚杆支护理论和技术方面的研究成果，以自己的学术观点和思路撰写成专门著作，丰富和促进了煤巷锚杆支护理论的研究，对深部回采巷道锚杆支护的推广应用必将起到积极的促进作用。

2009年，我应邀担任河南理工大学采矿工程学科特聘教授，每年和本书

作者在一起工作一段时间，深感其科研思路清楚，具有勤奋、扎实的学风，我很高兴为本书作序，并相信该书的出版必将进一步推动锚杆支护的理论和应用研究。

美国国家工程院院士
美国西弗吉尼亚大学教授



2013年4月

前 言

锚杆支护具有支护效果好、支护成本低等优点，在国内外已得到广泛应用，成为井巷工程的主要支护形式之一。在我国，锚杆支护方法主要应用于埋深小于 600 m 的巷道中，普遍取得了较好的支护效果和社会经济效益。但对于深部开采的矿井，尤其是在深井软弱破碎围岩条件下，现有的锚杆支护理论和方法难以满足生产需要，故常采用锚杆锚索联合支护及其他支护形式。锚杆支护可以施加较大的预紧力，能充分利用围岩自身的承载能力，属于主动支护，代表了巷道支护的发展方向。在深井高应力条件下，尽管多种支护形式（如锚网索、U 型钢可缩性支架、围岩注浆加固等）并存，但锚杆支护作为最主要的支护形式仍在应用，并在深井巷道围岩控制中发挥了重要作用。

深井巷道围岩形成较大的破碎区，巷道周围锚杆支护均是在围岩破碎区中进行，传统的锚杆支护理论（如悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论）不能有效揭示破碎围岩中锚杆支护的作用机理。根据理论研究及相似材料模拟试验结果，侯朝炯先生及其科研团队于 1999 年提出了锚杆支护围岩强度强化理论，作者有幸作为侯朝炯先生的学生参与了其中的部分研究工作。锚杆支护围岩强度强化理论揭示了破碎围岩中锚杆支护的作用机理，为发展高强锚杆、超高强锚杆提供了理论依据。

随着开采深度的进一步增加，巷道围岩破碎区的范围进一步加大，巷道周边由锚杆及锚固范围岩体组成的锚固体由于锚杆长度的限制，锚固体的大小有限，锚固体外岩体的运动将对锚固体施加更大的作用力，使锚固体变形、失稳、破坏，从而使巷道断面收缩，严重影响巷道的正常使用，因此研究锚固体的变形特性、稳定特征，建立巷道围岩锚固体稳定的判别准则及支护设计方法，对深井巷道围岩控制至关重要。

本书是作者近年来对煤巷锚杆支护围岩强度强化理论研究的深化，力求从理论上和实用技术上反映目前的研究成果，使其具有科学性和可操作性。本书进一步阐明了锚固体的特征；利用突变理论建立了深井巷道临界深度的确定方法；利用数值模拟和物理模拟试验研究了预应力锚杆对锚固体强度强化机理、巷道围岩锚固体的变形破坏特征，建立了巷道围岩顶板、两帮锚固体稳定性分析模型，并给出了锚固体稳定性判据；进一步分析了基于锚固体稳定的锚杆-锚索协调支护原理；最后介绍了一个工程实例。

本书是作者承担的国家自然科学基金课题“深井巷道围岩锚固体稳定原理研究”（编号：50874037）、“深井巷道围岩锚固体流变特性及控制原理研究”（编号：51174078）的主要研究成果，其中课题组成员韦四江副教授、张盛副教授、汪成兵博士、张振普博士、辛亚军博士、王满想硕士等都作出了较大贡献，在此向他们表示衷心的感谢。

书中也包含了一些其他人的研究成果及作者与企业共同完成的科研成果，对于引用的文章和成果尽可能进行了标注，若有个别遗漏，请谅解。最后要特别感谢侯朝炯先生多年来的指导、关怀和鼓励，感谢美国国家工程院院士 Syd S. Peng 教授为本书作序，同时也要感谢众多煤矿企业在多年的科研合作中给予的启迪和帮助。

由于水平所限，书中可能存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

著 者

2013 年 4 月

目 次

1 绪论	1
1.1 锚固体的概念及研究锚固体稳定的意义	1
1.2 深井巷道锚杆支护理论研究现状	2
1.2.1 国内外锚杆支护理论研究现状	2
1.2.2 小孔径预应力锚索作用机理	4
1.2.3 巷道锚杆支护围岩强度强化理论	5
1.3 研究内容及研究方法	9
1.3.1 研究内容	9
1.3.2 研究方法	10
2 深井巷道临界深度的确定	12
2.1 突变理论	12
2.2 巷道围岩应力分析	14
2.3 巷道围岩系统尖点突变模型	17
2.3.1 势函数的确定	17
2.3.2 尖点突变模型的建立	18
2.3.3 分析与讨论	19
2.4 现场应用	20
2.5 小结	21
3 锚杆预紧力对锚固体强度强化的试验研究	22
3.1 锚杆预紧力的概念	22
3.1.1 预应力锚杆预紧力	22
3.1.2 扭矩与锚杆预紧力的关系	22
3.1.3 提高扭矩转化预紧力效率的途径	23
3.1.4 锚杆预紧力施加的方法及评价	23
3.2 锚杆预紧力作用机理的数值模拟分析	24
3.2.1 锚杆作用力学特性	24
3.2.2 锚固机理的数值模拟分析	25
3.3 锚杆预紧力对锚固体强度强化的相似模拟试验	31
3.3.1 试验设计	31
3.3.2 试验结果	34

3.4	锚固体强度强化后的力学行为分析	50
3.4.1	计算模型	50
3.4.2	理论分析	53
3.4.3	应用示例	65
4	巷道围岩锚固体变形破坏特征的试验研究	67
4.1	变形破坏特征的相似材料模拟试验	67
4.1.1	试验设计	67
4.1.2	试验结果	69
4.2	不同锚杆支护强度下巷道围岩破坏特征的物理模拟试验	78
4.2.1	试验设计	78
4.2.2	试验过程	85
4.2.3	试验结果	87
4.3	不同支护强度下巷道围岩破坏特征的数值模拟试验	99
4.3.1	模拟参数	99
4.3.2	模拟结果	99
4.4	小结	104
5	深井巷道顶板锚固体破坏特征及稳定性分析	105
5.1	回采巷道围岩锚固体破坏特征	105
5.2	巷道顶板稳定性力学模型	106
5.2.1	锚固体失稳机理分析	106
5.2.2	锚杆支护稳定性分析	107
5.2.3	锚索支护稳定性分析	109
5.3	现场验证性试验	110
5.3.1	工程条件	110
5.3.2	锚杆、锚索支护设计	111
5.3.3	顶板稳定性力学分析	111
5.3.4	稳定性数据监测	113
5.4	小结	114
6	深井巷道两帮锚固体作用机理及稳定性分析	115
6.1	巷道两帮锚固体破坏特征及作用机理	115
6.1.1	工程概况	115
6.1.2	巷道两帮锚固体破坏特征	115
6.1.3	巷道两帮锚杆支护作用机理	115
6.2	深井巷道两帮锚固体稳定性力学分析	116
6.2.1	失稳形态	116
6.2.2	稳定性力学分析	117

6.3	试验巷道两帮稳定性分析	120
6.3.1	试验方案	120
6.3.2	稳定性计算	121
6.3.3	结果分析	122
6.4	小结	124
7	基于强力支护的锚杆-锚索协调支护原理	125
7.1	开采深度与巷道围岩破裂范围的关系	125
7.2	深井巷道锚杆-锚索协调支护原理	128
7.2.1	深井巷道强力支护理念的提出	128
7.2.2	锚杆支护系统各物件协调分析	131
7.2.3	深井煤巷锚杆-锚索协调作用原理分析	133
7.2.4	锚杆-锚索协调支护方法	136
7.3	小结	142
8	深井回采巷道锚杆-锚索支护技术	143
8.1	工作面概况	143
8.2	支护设计原则	144
8.3	支护设计方案	144
8.4	支护设计数值模拟分析	147
8.5	结果分析	148
8.5.1	应力分析	148
8.5.2	位移分析	151
8.5.3	围岩塑性区分析	153
8.5.4	锚杆受力分析	153
8.6	施工工艺	155
8.7	施工器具	156
8.8	矿压监测	157
8.8.1	测站布置	157
8.8.2	矿压观测结果	159
8.9	小结	165
	参考文献	166

1 绪 论

1.1 锚固体的概念及研究锚固体稳定的意义

随着矿山工程开采规模的扩大和井巷工程的延深,国内外矿山相继进入深部开采状态。据不完全统计,目前,南非、印度最深的金矿已经深入地下 4000 m,俄罗斯金属矿的开采深度已经向 2000~2500 m 发展,德国、英国、波兰等国的煤矿井深都已达到 1100 m 以上。我国煤矿在近 20 a 的时间内平均以每年 8~12 m 的速度向深部延深,全国已有 25 个煤炭矿区的开采深度超过 800 m,而煤炭资源埋深在 1000~2000 m 的约占保有储量的一半以上(53.17%);我国东部 1000~2000 m 煤炭资源占 2000 m 以内预计储量的 83%。可以预计,在未来 20 a 我国很多煤矿将进入 1000~1500 m 的深度。同时我国金属矿山和有色金属矿山将进入 1000~2000 m 深度开采。

深井巷道围岩控制是深井开采必须首先解决的问题之一。目前,国内外对高应力条件下岩石破坏机理进行了大量的研究,并取得了一定的研究成果^[1-5],为巷道围岩控制奠定了基础,但巷道围岩控制问题远没有解决。

巷道围岩稳定性与围岩状态密切相关,围岩失稳的根本原因在于巷道围岩破碎区的失稳。随着开采深度的增加,巷道围岩破碎区的范围进一步扩大。如冀中能源邢东矿 1122 工作面运输平巷开采深度 980 m,围岩松动范围超过 4 m^[6]。破碎区岩石的变形、破碎导致巷道变形、失稳,使巷道围岩控制难度越来越大,深部高应力巷道维护问题日益突出。

巷道的稳定除与破碎区岩石的性质有关外,还与所采用的支护方式有关,国内外对深井开采中巷道支护问题进行了大量的研究,得出了许多有益的结论^[7-14];形成了以锚杆支护作用为主的锚喷、锚注、锚网索的系列支护技术及与 U 型钢支架联合的支护技术等。

锚杆支护具有支护效果好,支护成本低等诸多优点,在国内外已得到广泛应用,成为井巷工程的主要支护形式之一。在我国,锚杆支护方法在埋深小于 600 m 的巷道中应用,普遍取得了较好的支护效果和社会经济效益,但对于深部开采的矿井,尤其是在深井软弱破碎围岩条件下,现有的锚杆支护理论和方法难以满足生产需要,故常采用锚杆锚索联合支护及其他支护形式。锚杆支护可以施加较大的预紧力,能充分利用围岩自身的承载能力,属于主动支护,代表了巷道支护的发展方向。在深井高应力条件下,尽管多种支护形式(如锚网索、U 型钢可缩性支架、围岩注浆加固等)并存,但锚杆支护仍作为最主要的支护形式在应用,在深井巷道围岩控制中发挥了重要作用。

深井巷道围岩形成较大的破碎区,巷道周围锚杆支护均是在围岩破碎区中进行,传统的锚杆支护理论(如悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论)不能有效揭示破碎围岩中锚杆支护的作用机理。根据理论研究及相似材料模拟试验结果,侯朝炯、勾攀峰等提出了锚杆支护围岩强度强化理论^[15]。

锚杆支护围岩强度强化理论对锚固体的概念进行了定义,即锚杆与锚固范围的岩体相互作用,组成锚固体,形成统一的承载结构。锚固体具有如下特征:

(1) 锚固体是一种多介质体,是由锚杆及锚固范围内的岩体所组成的“锚杆-岩石”复合承载体。

(2) 锚固体强度得到强化,承载能力提高,即锚固体的抗压强度、弹性模量等力学参数在被锚固岩体自身的基础上得到一定程度的提高,力学性能的改善与锚杆所施加的预紧力、杆体自身的力学性能有关。

(3) 单根锚杆不能形成锚固体。锚固体是由多根锚杆在一定的锚杆预紧力作用下,与锚杆支护所产生的附加应力场相互叠加而连成一体所形成的。

随着开采深度的进一步增加,巷道围岩破碎区的范围进一步加大,而巷道周边由锚杆及锚固范围岩体组成的锚固体由于锚杆长度的限制,锚固体的大小有限,锚固体外岩体的运动将对锚固体施加更大的作用力,使锚固体变形、失稳、破坏,从而使巷道断面收缩,严重影响巷道的正常使用,因此研究锚固体的变形特性、稳定特征,建立巷道围岩锚固体稳定的判别准则及支护设计方法,对深井巷道围岩控制至关重要。

1.2 深井巷道锚杆支护理论研究现状

1.2.1 国内外锚杆支护理论研究现状

正确设计与应用锚杆支护必须对其作用机理有充分的认识。由于锚固岩层的复杂性及锚杆锚固方式的多样性,国内外对锚杆支护理论进行了大量研究,相继提出了十几种理论,最具代表性的理论可归纳为以下几种^[16]:

1. 悬吊理论

1952年路易斯·阿·帕内科(Louis A·Panek)等发表了悬吊理论。悬吊理论认为,锚杆支护的作用就是将巷道顶板较软弱岩层悬吊在上部稳固的岩层上,如图1-1所示。

对于回采巷道揭露的层状岩体,直接顶均有弯曲下沉变形趋势,如果使用锚杆及时将其挤压,并悬吊在基本顶上,直接顶就不会与基本顶离层乃至脱落。锚杆的悬吊作用主要取决于所悬吊岩层的厚度、层数及岩层弯曲时相对的刚度和弹性模量,并且还受锚杆长度、密度及强度等因素的影响。悬吊理论较直观地揭示了锚杆的作用,但没有考虑围岩的自承能力,将锚固体与原岩体分开,与现场实际有一定出入,而且其只适用于巷道顶板,不适用帮、底。当巷道顶板软弱岩层较厚或围岩破碎范围较大时,悬吊理论就不适用了。

2. 组合梁理论

组合梁理论认为,巷道顶板中存在着若干分层的层状顶板,该顶板可看做是由巷道两帮作为支点的一种梁,这种岩梁支撑其上部的岩层载荷,如图1-2所示。

使用锚杆将各层“装订”成一个整体的组合梁,防止岩石沿层面滑动,避免各岩层出现离层现象。在上覆岩层荷载作用下,这种较厚的组合梁与单纯的叠加梁相比,其最大弯曲应变和应力将大大减小,挠度亦减小。而且各层间摩擦阻力越大,整体强度越大,补强效果也越好。

3. 压缩拱理论

压缩拱理论是由兰氏(T·A·Lang)和彭德(Pender)通过光弹试验提出来的。压缩拱理论认为,在拱形巷道围岩的破裂区中安装预应力锚杆时,在杆体两端将形成圆锥形

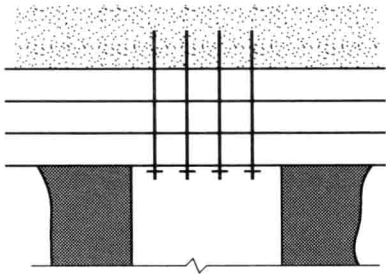


图 1-1 锚杆支护悬吊示意图

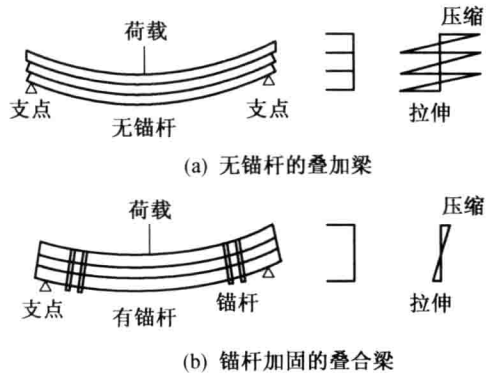


图 1-2 锚杆支护组合梁示意图

分布的压应力，如果沿巷道周边布置的锚杆间距足够小，各个锚杆的压应力锥体相互交错，这样将使巷道周围的岩层形成一种连续的压缩带（拱），如图 1-3 所示。

压缩拱可承受上部岩石的径向载荷，如同硃体起到岩层补强的作用，承载外围的压力。压缩拱理论缺乏对被加固岩体本身力学行为的进一步探讨，与实际情况有一定差距，在分析过程中没深入探索围岩-支护的相互作用。

4. 最大水平应力理论

澳大利亚学者盖尔（W·J·Gale）在 20 世纪 90 年代初提出了最大水平应力理论^[17]。该理论认为，矿井岩层的水平应力一般是垂直应力的 1.3 ~ 2.0 倍，而且水平应力具有方向性，最大水平应力一般为最小水平应力的 1.5 ~ 2.5 倍。巷道顶底板的稳定性主要受水平应力影响，且有 3 个特点（图 1-4）：与最大水平应力平行的巷道受水平应力影响最小，顶底板稳定性最好；与最大水平应力呈锐角相交的巷道，其顶板变形破坏偏向巷道某一帮；与最大水平应力垂直的巷道，其顶底板稳定性最差。

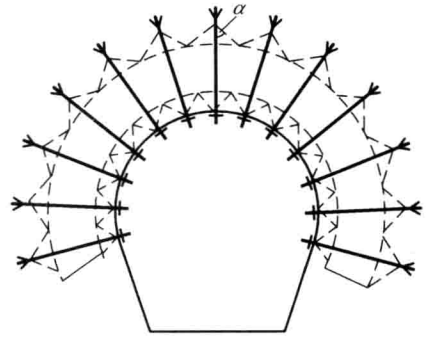


图 1-3 锚杆支护压缩拱原理

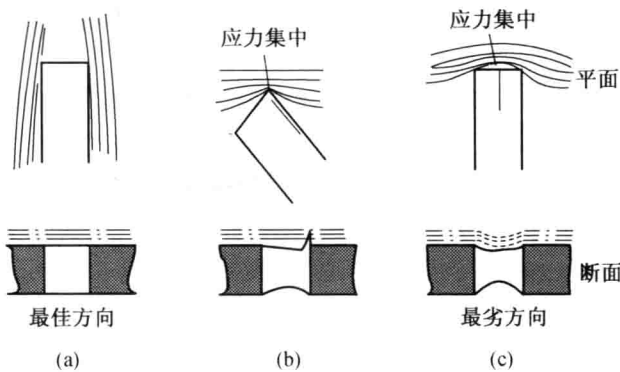


图 1-4 水平应力场效应

最大水平应力理论论述了巷道围岩水平应力对巷道稳定性的影响及锚杆支护所起的作用。在最大水平应力作用下,巷道顶底板岩层发生剪切破坏,因而会出现错动与松动,从而引起层间膨胀,造成围岩变形。锚杆所起的作用是约束其沿轴向岩层膨胀和垂直于轴向的岩层剪切错动,因此要求具备有强度大、刚度大、抗剪阻力大的高强锚杆支护系统。

5. 巷道锚杆支护围岩强度强化理论

该理论于 20 世纪 90 年代由侯朝炯教授、勾攀峰教授提出,该理论的要点如下:

(1) 锚杆支护的实质是锚杆与锚固区域的岩体相互作用组成锚固体,形成统一的承载结构。

(2) 锚杆支护可以提高锚固体的力学参数,包括锚固体破坏前和破坏后的力学参数,改善锚固体的力学性能。

(3) 巷道围岩存在破碎区、塑性区、弹性区,锚杆锚固区域岩体的峰值强度、峰后强度及残余强度均能得到强化。

(4) 锚杆支护可改变围岩的应力状态,增加围压,提高围岩的承载能力,改善巷道支护状况。

(5) 围岩锚固体强度提高后,可减少巷道围岩的破碎区、塑性区范围和巷道表面位移,控制围岩破碎区、塑性区的发展,从而有利于巷道围岩的稳定。

该理论揭示了破碎围岩条件下锚杆支护的作用机理,为深井巷道围岩控制应用锚杆支护奠定了理论基础,为高强度锚杆支护的开发奠定了理论基础^[18-20]。

6. 锚固力作用理论

陆士良教授等对锚杆锚固力的内涵及作用进行了深入研究^[21],认为锚杆对围岩的锚固作用是通过锚固力来实现的,而锚固力是依赖围岩变形而产生和发展的。锚杆支护一般在巷道开挖完成后实施,此时围岩的弹塑性变形已经完成,使锚杆产生锚固力的是围岩峰后的剪胀变形。随着剪胀变形的渐进发展,锚杆从径向和切向两个方向上产生限制剪胀变形的力 σ_r^b 、 σ_θ^b 。剪胀变形越大,锚杆的径向和切向的锚固力越高。锚杆的锚固作用使得围岩在较高的应力状态(能量状态)下获得稳定平衡。

1.2.2 小孔径预应力锚索作用机理

煤巷锚索支护技术来自于岩巷锚索加固技术。20 世纪 60 年代我国引进了国外的锚索技术并在地下工程、边坡治理、建筑基坑护壁等工程中推广应用,在煤矿井巷工程中锚索加固技术也被广泛应用。服务年限长、支护要求较高的岩石大巷及硐室,主要采用锚索与锚喷联合支护。

岩巷工程中使用的锚索一般都是大孔径注浆锚索,锚索钻孔直径一般在 89 mm 及以上,锚索安装后用水泥浆注满钻孔,实现全长锚固。与锚杆支护相比,锚索具有强度高、刚度大、锚固范围大等特点,对于复杂困难条件下的岩巷工程,应用锚索加固可获得较好的支护效果。

随着树脂锚杆在煤巷的推广应用,为了扩大煤巷锚杆支护的使用范围,提高锚杆支护在大断面(如开切眼)、地质构造地段、软弱岩层等困难条件下应用的安全可靠性,人们将岩巷中的锚索加固工艺进行了改造,研制成功了使用锚杆钻机打直径为 28~32 mm 的小钻孔、树脂药卷锚固、单根钢绞线的小孔径预应力锚索加强支护技术。该技术与岩巷锚索施工相比,简化了施工工艺及施工设备,缩短了锚固体养护和施工时间,实现了锚索快

速承载,提高了工效和支护的可靠性。

与岩巷锚索支护不同,煤巷使用锚索支护的主要目的是提高煤巷锚杆支护的安全可靠性,煤巷锚索的主要作用是将下部锚杆支护后仍不稳定的岩层悬吊在上部稳定的岩层中^[19]。

煤巷常用的小孔径预应力锚索最初主要是由7股低松弛钢绞线组成,钢绞线直径为15.24 mm,破断载荷为260.7 kN,延伸率为3.5%。近年来,随着开采深度的增加及锚杆-锚索协调支护应用范围的扩大,锚索直径及破断强度逐渐加大。表1-1为常用锚索力学参数^[22]。

表1-1 常用锚索力学参数

结 构	公称直径/mm	破断载荷/kN	延伸率/%
1 × 7	15.24	260	3.5
	17.8	353	
	18.9	406	
	21.6	490	
1 × 19	18	408	7
	20	510	
	22	607	

锚索参数的确定主要采用悬吊理论进行设计。锚索长度的计算公式为

$$L = L_a + L_b + L_c + L_d$$

式中 L ——锚索长度, m;

L_a ——锚索深入到较稳定岩层的锚固长度,一般取2.0 m;

L_b ——需要锚固的不稳定岩层厚度, m;

L_c ——上托盘及锚具的厚度,一般取0.1 m;

L_d ——需要外露的张拉长度,一般取0.5 m。

根据以上可以看出,锚索长度的确定主要是确定不稳定岩层的厚度。

1.2.3 巷道锚杆支护围岩强度强化理论

1. 机理分析

国内外对锚杆支护理论进行了大量研究,可以归纳为3个方面:一是从布置锚杆、提高锚固岩层(或称锚固体、锚岩支护体、锚岩承载体)的力学参数出发研究锚杆支护作用机理^[23-28];二是围绕锚杆锚固力分布规律,研究锚杆对节理面抗剪性能的影响及杆体阻止节理面发生相对错动的“销钉”作用机制,研究加锚节理岩体本构关系及变形特点^[29-31];三是将锚杆的锚固作用与围岩的自稳作用分开,不考虑围岩的承载能力。上述研究各自从不同的角度阐述了锚杆支护的机理,适用于不同的围岩条件,根据上述理论简化出的力学模型和导出的经验公式,在生产实践中起到了积极作用。

以锚杆锚固后岩体力学性能改善为思路研究锚杆支护的作用机理,最早在岩土锚固领域得到了重视。我国学者朱敬民等人应用相似材料模拟试验研究了岩石锚杆组合材料在单

轴和三轴压缩下峰值前的变形特征^[23]，试验结果表明：锚杆影响区域内围岩具有正交异性，在锚杆沿着试件的轴线方向，围岩的弹性模量随着锚杆的密度增加而增加，围岩强度的提高主要是内摩擦角的提高，而黏聚力几乎没有变化。德国学者 D·伍尔斯莱格通过模型试验和有限元计算后认为，锚固体具有各向异性，加载方向上弹性模量不变，与加载方向垂直的锚杆轴线方向上弹性模量增加，锚固体的承载能力取决于黏聚力 C ，而 C 是锚杆密度的函数，并且认为锚固体与原岩体具有相同的内摩擦角。邹志晖通过模拟试验^[25]认为，合理的锚杆支护可以改变围岩的应力状态和应力应变特性，不同弹模的带锚岩体所表现的锚固效应不同。朱维申、朱浮声、陈进、麦偶曾等人也从不同角度研究了锚固体的特性^[26-31]。这些研究成果表明锚杆支护对岩体峰值前的影响，与地表加固工程和浅埋隧道工程围岩的应力状态相适应。

2. 相似模拟试验

通过相似材料模拟试验可以得到巷道锚杆支护围岩强度强化的情况。其技术思路是：在巷道周边取一分离体，在平面应变情况下研究非预应力全长锚固锚杆作用机理，分析锚固体在不同锚杆支护强度（密度、锚固力）下力学参数的变化。

模拟试验的原型相当于从巷道一侧或顶板“取出”的岩体。选定模型的原型尺寸为 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ，模拟试验的几何相似比为 $1/10$ ，相对密度相似比为 0.75 ，应力相似比为 0.075 ，锚固试体的尺寸为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 。巷道围岩为中硬岩层，其单轴抗压强度为 16.5 MPa ，岩石相似材料由砂、水泥和石膏组成，配比号为 737，含水量为 $1/10$ ，缓凝剂硼砂含量为水量的 1% 。模型中锚杆的强度不变，通过改变锚杆的布置密度来改变锚杆的支护强度。

设锚固体破坏前、后的等效黏聚力、等效内摩擦角分别为 C 、 φ 、 C^* 、 φ^* 。试验结果见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 不同锚杆布置密度的锚固体破坏前的 C 、 φ 值

锚杆布置密度/(根· 400^{-1} cm^{-2})	0	2	3	4	5	6	8
等效黏聚力 C/MPa	0.3466	0.3568	0.3626	0.3677	0.3828	0.3773	0.3869
等效内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	31.51	31.53	33.51	35.57	37.14	38.8	40.4

表 1-3 不同锚杆布置密度的锚固体残余强度对应的 C^* 、 φ^* 值

锚杆布置密度/(根· 400^{-1} cm^{-2})	0	2	3	4	5	6	8
等效黏聚力 C^*/MPa	0.0168	0.0182	0.0183	0.0184	0.0186	0.0194	0.021
等效内摩擦角 $\varphi^*/(\text{°})$	31.51	31.53	33.51	35.57	37.14	38.8	40.4

由此看出，安装锚杆对锚固体的 C 、 φ 值均有影响，但影响程度不一样。从测试结果可看出，安装锚杆对锚固体的 C 影响不大，在试验条件下最大可将岩体的 C 提高 10% 左右。但对锚固体的 φ 值影响较大，且随着锚杆布置密度的增加而增加，但增加的幅度逐渐减小。

破坏后锚固体的 C^* 、 φ^* 与无锚杆时相比均有不同程度提高，锚杆密度越大，锚固体残余阶段的 φ^* 越大，试验条件下最大可提高 50% 以上。