

深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考

刘泉声^{1,2,3}, 雷广峰¹, 彭星新¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:高地应力、高地温、高渗透压以及强时间效应使得深部裂隙岩体表现出一定的延性、蠕变性等软岩力学特性, 现有锚固理论落后于工程实践的现状, 导致许多锚固工程设计多采用经验、半经验方法。几十年来, 国内外诸多学者对深部岩体锚固机制开展了大量现场、室内试验及数值计算工作, 岩体锚杆锚固作用机制方面的理论研究取得了丰硕成果, 但由于深部岩体所处地质条件的复杂性, 这些成果普适性和准确性较低。结合已有的锚固理论, 运用合理的数值模拟方法与现场、室内试验对岩土锚固机制进行深入研究, 进而指导锚固工程设计施工具有重大意义。对深部裂隙岩体锚固机制研究现状进行了系统全面的总结, 归纳分析了该研究领域存在的关键科学问题, 主要包括: 选择合理的锚固力学传递计算模型、正确描述锚固体应力分布规律、建立合理的锚固界面力学模型。深部裂隙岩体锚固机制研究应综合考虑工程应用效果和加锚岩体形态、加锚构件效应等因素。

关键词: 岩石力学; 裂隙岩体; 锚固机制; 计算模型; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)02-0312-21

Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass

LIU Quansheng^{1,2,3}, LEI Guangfeng¹, PENG Xingxin¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The high ground stress, high temperature, high osmotic pressure and strong time effect cause the deep fractured rock to show certain ductility and creep in mechanical characteristics of soft rock. The current anchoring theory lagging behind the engineering practice leads to the common usage of the empirical and semi-empirical methods in most of the anchoring engineering. During the last several decades, a number of on-site and laboratory tests and numerical calculations were carried out by many scholars home and abroad, and significant achievement in the theoretical research of bolt anchorage mechanism in rock mass were made. The universality and accuracy of these results are low because of the complexity of deep geological conditions. Combined with the existing anchorage theory, it is of great significance to use a reasonable numerical simulation method and on-site and

收稿日期: 2015-03-07; **修回日期:** 2015-11-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904); 国家自然科学基金重点项目(41130742); 湖北省自然科学基金重点项目(2011CDA119)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No.2014CB046904), Key Program of the National Natural Science Foundation of China(Grant No.41130742) and Key Program of the Natural Science Foundation of Hubei Province(Grant No.2011CDA119)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩石工程方面的教学与研究。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0203

laboratory tests to investigate the rock and soil anchoring mechanism and to guide the design and construction of anchoring engineering. Systematic summary was made regarding the deep fractured rock anchoring mechanism, and the key issues for the study of the deep fractured rock anchoring mechanism were concluded, including the choose of a reasonable calculation model for anchoring force transfer, the correct description of the stress distribution of the anchoring force and the establishment of the reasonable mechanical model for anchoring interface. The factors such as the effect in engineering application, the condition of anchoring rock mass and the effect of anchoring components should be considered in the research of the deep fractured rock mass.

Key words : rock mechanics ; fractured rock mass ; anchoring mechanism ; computational model ; numerical simulation

1 引言

随着岩土力学与工程的发展,岩土锚固技术成为各类工程建设中不可或缺的加固手段之一。岩土锚固工程所涉及的工程地质及施工现场等因素极其复杂,这导致目前锚固机制的研究和设计理论远远落后于工程实践。锚固设计理论落后于工程实践的现状,直接影响到锚固技术的合理应用和发展。大量工程实践证明:岩体工程的失稳破坏与其内部节理、裂隙等的扩展和贯通密切相关,而锚杆锚固在节理岩体中表现出明显的加固效果。国内外诸多学者从各个方面对岩体锚固机制进行了研究,但是关于深部裂隙岩体锚杆锚固作用机制尚未完全了解。目前国内外学者主要从两方面对岩体锚杆锚固机制展开研究:一方面是锚固段载荷传递机制的微观研究;另一方面是从锚固体加固效果角度出发,对岩土锚固作用机制的宏观研究^[1]。自然界中岩体由于节理裂隙的存在多为非均质体,深部裂隙岩体随着地下深度增加,围岩所处地质条件恶化、破碎岩体增多、地应力增大、水头压力和涌水量加大、地温升高,这些因素使得深部裂隙岩体表现出完全不同于浅部岩体的力学特性^[2-3],高地应力、大变形和长时间效应是深部裂隙岩体的主要特点。未来地下工程发展的趋势是向深部地层发展岩土工程,因而深部岩体的物理力学特性将会影响到地下工程的安全稳定。深部岩体与浅部岩体主要区别在于岩体所处应力环境的差别,应力环境的不同导致岩体物理力学特性不同,进而导致岩体强度和变形性质的明显差异。在浅部地层十分普通的岩石,在深部可能表现出易变形、强度低、延性强、蠕变性强等软岩特征。本文从深部裂隙岩体锚固机制这一关键科学问题出发,主要对锚杆锚固系统中锚固体内锚固段载荷传递机制、锚杆围岩锚固体力学效应、锚固机制

数值计算模型与试验研究、锚杆锚固机制相关理论研究进展进行了系统的归纳分析,并对深部裂隙岩体锚固机制研究中亟待解决的热点、难点问题进行了探讨。

2 裂隙岩体锚固机制研究存在的问题

尽管锚固技术出现较早,但是对锚固机制的力学研究及其计算理论研究却起步较晚。目前国内外已有诸多专家学者对岩土锚固机制这一关键问题进行了许多理论研究、室内模型试验、现场原位试验等工作,取得了一定成果。由于深部裂隙岩体所处工程地质条件复杂、深部锚固工程施工难度大、锚固体在深部裂隙岩体中力学行为不明确等因素,导致模拟深部裂隙岩体锚杆锚固机制的理论与试验研究开展难度大,故现有成果多集中在锚杆体受拉拔条件下,且侧重于分析锚杆锚固段的应力分布规律。因而现阶段锚固机制研究所取得的成果结论普遍性和准确性较低,这导致岩土工程中锚固设计主要依靠经验和半经验方法。目前深部裂隙岩体锚固机制研究还存在诸多不足之处^[4-10]。

2.1 锚固力学传递计算模型

深部锚固工程中,锚杆锚固裂隙岩体后,锚杆与周围岩体组成锚固系统,锚固系统主要包括高强预应力锚杆杆体、锚杆与围岩间注浆浆液、锚杆周围岩土体及以上介质之间的界面^[11]。这些介质由于处于深部复杂的地质环境中,因而具有复杂的物理力学特性,包括物理参数非线性、几何边界非线性和介质本身非连续性。不难发现,锚固体本身所涉及的因素众多,锚固系统各组分之间物理力学特性复杂,使得锚固系统各介质之间力学传递机制尤为复杂。因此研究深部裂隙岩体锚固机制的关键问题之一是选择合理的锚固力学传递计算模型,简化锚固问题,做到在理论分析的同时能更加准确地反映

客观实际。

深部裂隙岩体锚固工程中采用的锚杆体表面存在许多微观皱曲,锚杆与周围裂隙岩体未发生相对位移前,锚杆杆体与灌浆体之间主要依靠黏结力来传递力的作用,微观皱曲的存在极大地增加了这种静力黏结作用,但是如果锚杆杆体与灌浆体之间产生相对位移后,二者之间的黏结力破坏,随后摩阻力便成为力传递的主要形式。锚杆杆体表面的粗糙程度会影响锚杆与岩石之间的化学黏结力及机械互锁力。当节理面发生错动位移,化学黏结力、机械互锁力失效,此时锚杆自身的强度成为影响锚固力的主要因素。该研究方向目前存在的问题是尚没有合理的锚固力学传递计算模型^[12-13]。

2.2 锚固体应力分布规律

锚固体应力的分布规律是锚固机制研究中的关键问题之一,只有明确了锚杆与周围岩体之间的应力大小及其分布规律,才能正确的指导锚固工程的设计与施工。在裂隙岩体锚固理论发展的很长一段时间内,很多学者为研究方便,简单的假定作用在锚固体上的剪应力沿着锚固体长度均匀分布,锚固体的锚固力大小与锚固段长度成正比。实际上,大量现场试验及实测数据已经验证了锚固段上剪应力并不是均匀分布^[14-16]。这种剪应力分布的非均匀现象在深部岩体的锚固工程中尤为突出。

加拿大 S. H. E. Phillips^[17]提出锚杆剪应力 τ 沿锚杆长度按幂函数分布,其分布函数为

$$\tau(x) = \tau_{\max} \exp\left(-\frac{Ax}{d}\right) \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为锚固体最大剪应力,该点位于锚固体外端部,即 $x=0$ 处; d 为锚固体直径; A 为反映岩土体和锚固体二者间结合力的相关参数。式(1)在岩体锚固工程中得到广泛的应用。

C. Li 和 B. Stillborg^[18]对 I. W. Farmer^[19]已有的计算模型做了改进与优化,推导出普通岩石锚杆在均匀岩体中的实际受力分布函数,随后进行了大量的现场实测分析,分析结果表明利用改进后的计算模型得到的计算结果和现场实测结果基本一致。

张季如和唐保付^[20]建立了锚杆荷载传递的双曲函数模型,进而通过大量试验得出了锚杆摩阻力和剪切位移沿锚固长度的分布规律及其影响因素。其研究中假定锚固体与锚杆周围岩(土)体之间的剪力与剪切位移呈线性增加关系。尤春安等^[21-23]进行了大量的锚杆拉拔试验,获得了锚杆在拉拔条件下沿锚杆轴向的正应力和剪应力分布规律,进而通过

理论分析推导出了全长黏结式锚杆受力的弹性解,利用数值计算软件建立相关模拟锚杆真实受力状态的计算模型,得出锚杆在外荷载作用下剪应力分布规律及主要的影响因素。张幼振等^[24]通过大量锚杆锚固力学试验得出锚杆轴力及剪应力分布规律:岩石锚杆锚固段剪应力的分布集中在锚固段前部;高斯函数可以较好地描述临界破坏状态下锚杆杆体的轴力分布特征。锚杆锚固机制研究中,锚杆正应力与剪应力分布特性的研究为锚杆锚固工程的设计与施工提供了理论依据。

通过以上的总结分析不难发现,国内外诸多研究成果是基于一定假定简化条件下所得出的,有的甚至与实际情况出入较大,并且对于锚固体应力分布规律未能得出一致结论。由此可知,裂隙岩体锚固机制研究的关键问题之一是得到能够合理地描述锚杆与裂隙岩体间锚固段的载荷传递规律的计算模型,进而准确地描述锚固段剪应力和锚杆轴向力的分布规律。

2.3 锚固系统介质及其界面力学特性

锚杆杆体本身、注浆后的灌浆体和裂隙岩体三者所组成的锚固系统界面力学特性是岩体锚固机制研究的另一关键问题。锚固系统介质各交界面的剪切强度由化学黏结力、机械互锁力和摩擦阻力3个部分组成,锚杆与裂隙岩体未发生相对位移时,界面间的剪切强度主要为化学黏结力和机械互锁力提供,当岩体变形增大,锚杆与岩体间产生相对位移时,化学黏结力及机械互锁力丧失,界面间的剪切强度仅依靠摩擦阻力。岩体锚固工程中锚固单元的破坏主要表现为锚杆体与注浆体之间界面破坏、注浆体与围岩之间界面破坏、裂隙岩体自身变形破坏等类型。目前已有的大量试验研究证明,锚固工程中锚固单元的破坏主要发生在锚杆体与注浆体之间、注浆体与围岩体之间的2个界面上。深部裂隙岩体表现出软岩特性,破坏主要发生在锚固体与围岩体之间的界面上^[25-26]。锚固体与围岩体之间的介质多为注浆浆液,因此,注浆材料在深部岩体裂隙地质条件下物理力学特性的变化、注浆材料各参数对锚固力学效应的影响以及建立准确的锚固界面力学计算模型这3个研究方向值得业内专家学者关注。

目前国内外关于锚固系统介质及其界面力学特性方面的研究较少。尤春安和战玉宝^[27]在该研究领域做了一些代表性工作,在预应力锚索锚固段界面力学特性试验的基础上,研究锚固体界面在荷载作

用下的变形规律及失效条件。试验结果表明，锚固体界面层是具有一定厚度并具有特殊力学性质的材料，其力学性质不仅与岩土体性质有关，而且与灌浆体材料组成密切相关；通过分析得出锚固体界面上的变形分为弹性变形、塑性变形和脱黏变形 3 个阶段；由于锚固体界面层的剪胀效应，在滑移段中，越靠近荷载的近端，锚固体所受剪应力越大；在整个锚固体中，主要的受力部分是塑性滑移区，而弹性区和脱黏区的受力都较小。

3 裂隙岩体锚固机制理论研究

3.1 浅部裂隙岩体锚固理论

(1) 支撑理论

以 L. A. Panek 为代表的支撑理论^[28-34]的范畴包括破碎危岩吊挂、软弱岩层悬吊、组合梁、组合拱以及松动圈理论(见图 1，图中， P 为锚杆预紧力)。

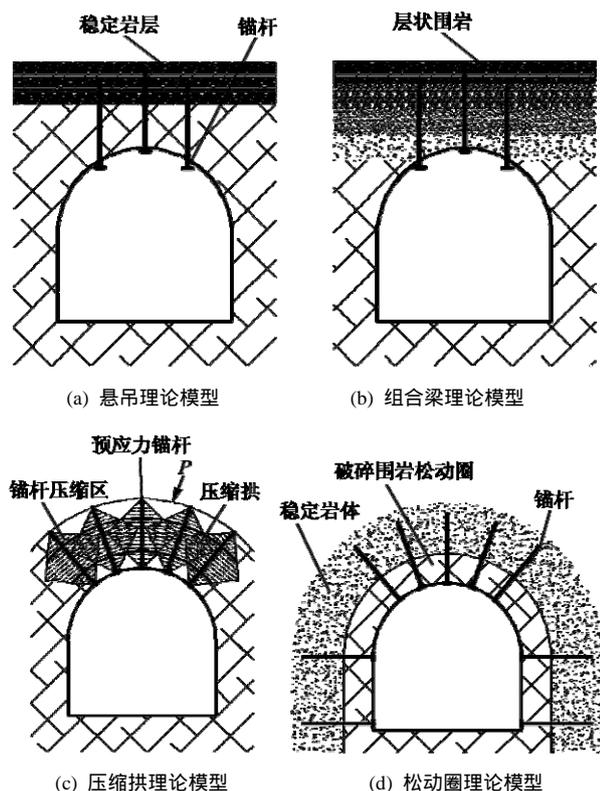


图 1 锚固机制支撑理论模型

Fig.1 Theoretical supporting model of anchoring mechanism

悬吊理论强调对洞室顶板围岩的加固支护，悬吊理论成立的前提是洞室顶板上部一定范围内必须要有稳定岩层，锚杆锚固支护是将巷道、洞室顶板处的软弱岩层悬吊在上部稳定岩层上，进而增强顶板软弱岩层的整体稳定性。此时锚杆受到的锚固力是洞室顶板下部被悬吊岩层的重量。

组合梁理论认为，当洞室顶板围岩在一定范围内不存在稳定岩层时，悬吊理论不能解释锚杆锚固作用机制。此时锚杆锚固的作用主要有 2 个方面：一方面锚杆贯穿各岩层，依靠锚杆黏结互锁作用增加各岩层间的黏结力及摩擦力，限制了岩体沿层面间的相对位移；另一方面锚杆杆体自身存在抗剪强度，锚杆贯穿裂隙岩体后可增加岩层间的抗剪强度。通过上述两方面的作用机制，锚杆将巷道顶板一定范围内的几个岩层锚固形成一个较厚的岩层(组合梁)。锚杆锚固岩层形成的组合梁在外部荷载作用下，最大弯曲应变和应力都大为减小，组合梁的挠度也减小，锚杆锚固作用显著。

组合拱理论主要描述高强预应力锚杆锚固机制。在岩体拱形洞室围岩破裂区中安装预应力锚杆时，由于锚杆预紧力的存在，在锚杆杆体两端的岩体中将形成圆锥形分布的压应力区，众所周知，岩石的抗压强度远高于其抗拉强度，故在裂隙岩体中形成压应力区有利于提高岩体强度。在洞室周边以较小的间距布置预应力锚杆时，各锚杆两端形成的压应力圆锥体将相互交错，在洞室围岩中形成一个均匀压缩带，即承压拱。这个承压拱可以承受其上部破碎岩石施加的径向荷载，锚杆锚固作用形成的承压拱极大的增加了围岩强度。

围岩松动圈理论是锚杆锚固理论的一大突破。地下工程中巷道洞室掘进过程中必然会对原岩造成巨大扰动，洞室的开挖破坏了原岩应力平衡，洞室围岩由稳定的三向应力状态转变为二向应力状态。在巷道洞室周围一定范围内形成不利于围岩稳定的松动岩体(松动圈)，松动圈的范围决定了巷道的稳定性。松动圈理论的重要突破在于：指出巷道锚固支护的对象是巷道周围的松散软弱岩体，既不是弹塑性支护理论中的塑性区岩体，也不是冒落拱内的岩石重量，松动圈理论的极大的促进了裂隙岩体锚固理论的发展。松动圈理论中，对于软弱破碎岩体松动圈的时变效应有待进一步深入研究。

(2) 中性点理论

T. J. Freeman^[35]做了大量现场原位试验研究，在此基础上首次提出中性点理论，并在全长岩石锚杆锚固中提出了中性点、拉拔段、锚固段等基本概念，其研究工作奠定了中性点理论的基础。国内学者王明恕等^[36]也提出了中性点理论，其基本内容和 T. J. Freeman^[35]的内容基本相同。

中性点理论的基本内容是：地下工程中施加锚杆后，靠近洞室空间的围岩体部分，锚杆锚固体与

围岩体变形导致二者界面上的剪应力指向地下洞室空间方向。在远离地下洞室的围岩体深部，锚固体和围岩体之间界面上的剪应力方向指向围岩体深部。由于上述 2 个剪应力的方向相反，因此在锚杆体上必然存在一个剪应力的零值点，T. J. Freeman 等^[35-36]把此点称为“中性点(neutral point)”，中性点处剪应力为 0。从中性点开始指向地下洞室空间方向的锚杆部分称为“拉拔段(pick-up length)”，从中性点开始指向围岩体内部的锚杆部分称为“锚固段(anchor length)”。

朱训国^[4]通过大量现场试验及数值模拟研究得出，裂隙岩体中岩石锚杆的中性点位置 ρ 与锚杆长度 L 及开挖洞室半径 r 有关：

$$\rho = \frac{L}{\ln\left(1 + \frac{L}{r}\right)} \quad (2)$$

分析不同洞室半径以及不同锚杆长度下锚杆中性点位置变化^[4]如图 2, 3 所示(图 2 中假定隧洞半径 $r = 2 \sim 4$ m, 锚杆长度 $L = 4$ m; 图 3 中假定隧洞半径 $r = 4$ m, 锚杆长度 $L = 2 \sim 4$ m)。

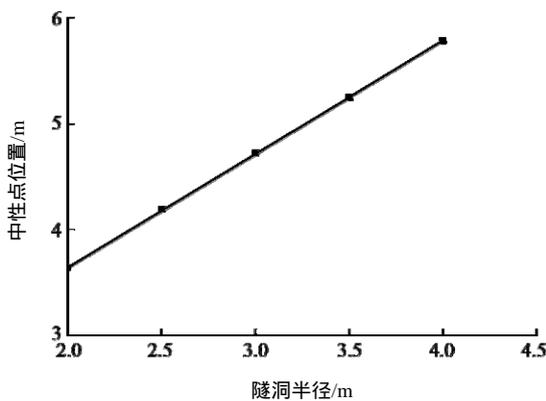


图 2 锚杆中性点位置与隧洞半径的关系^[4]

Fig.2 Relationship between neutral point and tunnel radius^[4]

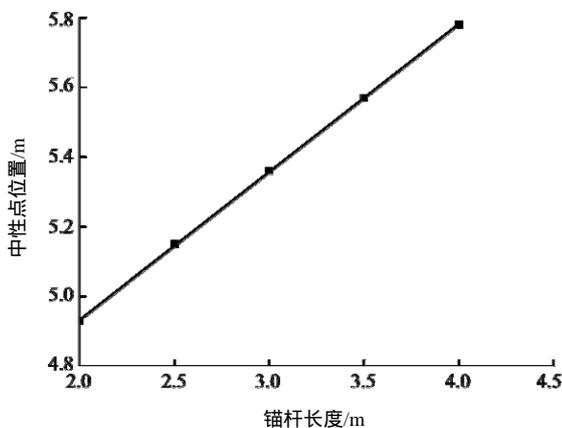


图 3 锚杆中性点位置与锚杆长度的关系^[4]

Fig.3 Relationship between neutral point and length of a rock bolt^[4]

中性点理论目前被广泛应用，它清晰地描述了锚杆在锚固裂隙岩体时实际受力过程和锚杆杆体剪应力分布情况。实际锚固工程的设计施工中可以根据该理论比较明确地确定锚杆锚固段有效长度等设计参数，该理论对锚固工程的设计具有指导意义。

3.2 深部裂隙岩体锚固理论

(1) 加固理论

加固理论^[37]是在岩体工程地质力学的基础上发展形成的。深部裂隙岩体锚杆加固的实质是改变了岩体受力状况，增加了洞室开挖自由面处岩体的围压，使开挖后岩体由二向应力状态恢复到较为稳定的三向应力状态，进而提高了裂隙岩体的力学参数，改善了被锚固岩体的力学性能。高强预应力锚杆中预紧力的存在使锚杆作用范围内的岩体产生压应力，增加了岩体间节理裂隙的摩擦力，改善了压缩区内岩体的应力状态。大量试验研究发现，锚杆锚固区域内岩体峰值强度、峰后强度和残余强度都能得到强化，岩体强度和自承能力均有所提高。加固理论所提出的观点在锚固理论和锚固施工设计分析中均有所突破。

(2) 能量学理论

能量学理论^[38]以能量守恒和能量相互转化为理论基础。锚杆锚固裂隙岩体后形成锚固体，在这个过程中锚杆会吸收围岩的一部分能量，同时释放多余的能量，总能量不变，故锚杆和围岩具有自动补偿作用。能量学理论在实际应用较少。

(3) 突破点理论

突破点理论^[39]认为，岩体整体失稳破坏是一个渐进发展的过程，岩体软弱区一处或几处在外部扰动作用下会首先破坏。软弱区破坏后，破坏应力传递到相邻岩体，进而导致该部分岩体达到强度极限后发生破坏，这个过程发展到一定程度将引起岩体整体失稳破坏。岩体软弱区首先发生破坏的点称为“突破点”。深部裂隙岩体锚杆锚固支护可以使裂隙岩体充分发挥自支撑能力，以消除突破点的影响，使渐进破坏过程在可控范围内，并使其较快的向稳定状态转化。突破点理论类似于关键块体理论。

通过比较浅部与深部裂隙岩体锚固理论二者的不同之处不难发现：浅部裂隙岩体中，锚杆锚固作用依靠“被动支护”原理，它以提供足够的抗力为手段阻止围岩变形；然而深部裂隙岩体锚固工程采用的多为高强预应力锚杆(索)，其锚固机制基于“主动支护”原理，它以加固围岩和改善围岩的受力状态为手段，充分发挥岩体的自承能力来减小围岩变形。

3.3 裂隙岩体载荷传递机制研究

深部裂隙岩体锚固工程中，锚杆与裂隙岩体之间载荷传递机制及其复杂，高强预应力锚杆的作用力如何传递到裂隙岩体中是困扰业内专家学者的一大难题。目前，国内外利用荷载传递法对裂隙岩体锚固机制的研究较少，即使有些研究也是基于一定简化假设条件下进行的。朱训国^[4]在该方面做了一系列研究工作，取得了丰硕的成果。基于荷载传递机制，建立了岩石锚杆与围岩体之间相互作用的载荷传递微分方程。在隧道锚固工程施工现场长期监测隧道围岩安装锚杆前后的应变变形，并根据监测数据分析建立了锚杆锚固岩体时轴向载荷传递方程，推导了理想弹塑性围岩中注浆岩石锚杆的轴向应力的计算模型，通过大量的试验验证了以上分析模型的正确性。根据岩石锚杆与围岩体微段界面摩阻力与二者之间相对位移呈线性函数关系的力学模型建立了弹塑性函数关系，推导出岩石锚杆轴向荷载和摩阻力的表达式。深入地研究了锚杆锚固机制中锚杆体、围岩体及二者界面上的力学传递问题，为准确量化描述锚固工程中锚杆体与围岩体的力学性状奠定了坚实的基础。研究得出的锚杆剪应力和轴向力分布特征规律如下：

(1) 锚杆剪应力分布特征

深部裂隙围岩洞室开挖后，其剪应力分布仅仅与界面剪切刚度系数、洞室初始变形位移、洞室半径有关，通过已有数据分析得出沿锚杆长度方向剪应力分布 $\tau(x)$ 计算式为

$$\tau(x) = Ku_0r_0 \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (3)$$

式中： K 为锚杆与注浆体界面上的剪切刚度， u_0 为洞室壁位移变形， r_0 为洞室半径， ρ 为中性点位置。

可得沿锚杆长度方向剪应力分布曲线^[4]如图 4

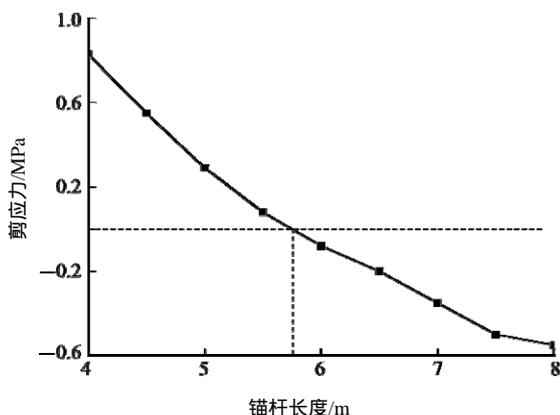


图 4 剪应力分布曲线^[4]

Fig.4 Curve of shear stress along a rock bolt^[4]

所示，图中，隧洞半径 $r = 4 \text{ m}$ ，岩体弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$ ， $\mu = 0.3$ ，锚杆中性点位置 $\rho = 5.77 \text{ m}$ 处。

由图 4 可得，在锚杆整个长度范围内，锚杆杆体与围岩体之间存在摩阻力。摩阻力在锚杆中性点两侧作用方向相反：在中性点左侧其作用方向指向地下洞室空间，在中性点右侧摩阻力作用方向指向围岩体内部，中性点处摩阻力为 0。以上分析结果也验证了锚固理论中“中性点理论”的合理性。

(2) 锚杆轴向力分布特征

已有研究证明，锚固工程中锚杆轴向力与界面剪切刚度系数、洞室初始变形位移、洞室半径以及中性点位置有关，沿锚杆长度方向轴向力分布 $F(x)$ 计算式为

$$F(x) = 2\pi rKu_0r_0 \left[\ln\left(\frac{x}{r_0}\right) - \frac{1}{\rho}(x - r_0) \right] \quad (4)$$

锚杆轴向力分布曲线^[4]如图 5 所示。

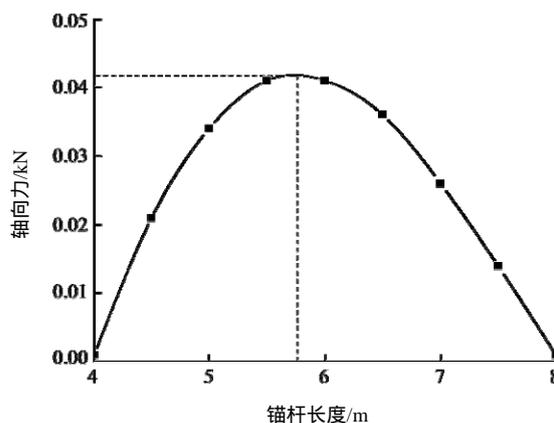


图 5 锚杆轴向力分布曲线^[4]

Fig.5 Curve of axial force along a rock bolt^[4]

由图 5 可得：普通的无预应力锚杆轴向载荷分布与预应力端锚锚杆轴向载荷分布特征不同，其最大值在中性点处，而锚杆两端则为 0。

(3) 锚杆轴力与剪力相互关系

深部裂隙岩体锚固工程中，锚杆轴力与剪力之间并不是单独作用的。张伟和刘泉声^[40]模拟深部岩体的软岩特性，在软岩中开展了无锚、端锚无预应力、端锚有预应力、全锚无预应力、全锚有预应力 5 种锚固类型的剪切试验研究，得出以下结论：深部裂隙岩体锚固中全锚锚固形式下的复合剪切刚度远大于端锚和无锚情况，锚杆的抗剪效果主要是由剪应力和剪切位移关系曲线中的塑性阶段决定。通过大量的试验研究得出软岩不同锚固类型屈服荷载与极限荷载如图 6 所示。通过节理岩体剪切试验研究发现：锚固节理岩体剪切过程中伴随着锚杆轴

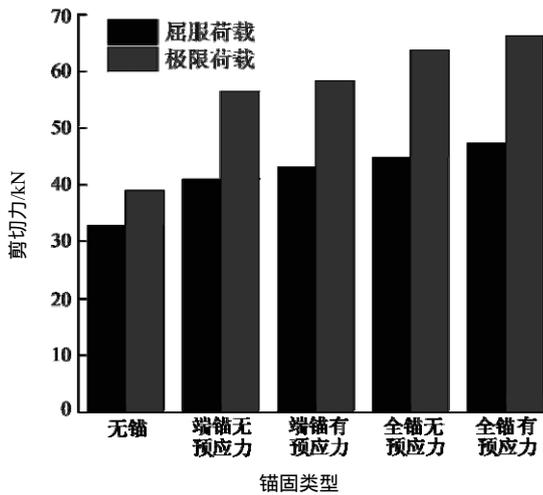


图6 软岩不同锚固类型屈服荷载与极限荷载

Fig.6 The yielding and ultimate loads of soft rock in different anchoring types

向附加变形的产生，锚杆剪力和轴力之间满足一定关系，剪力 T 和轴力 N 的关系曲线^[40]如图7所示，图中， T_{yield} 和 N_{yield} 分别为剪力和轴力的屈服极限。

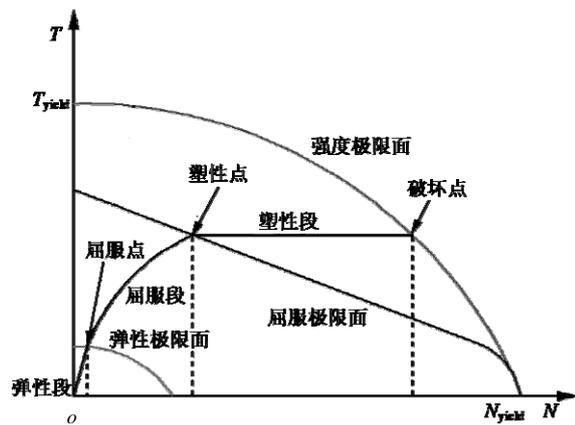


图7 剪力与轴力关系^[40]

Fig.7 Relationships between shear force and axial force^[40]

图7中曲线明显分为3个阶段：弹性段、屈服段和塑性段。通过分析不难发现，弹性段锚杆剪力迅速增大，而轴力增长幅度较小，说明初始阶段岩体主要依靠锚杆“销钉作用”抗剪。张伟和刘泉声^[40]得出弹性极限时锚杆的轴力和剪力满足：

$$\left(\frac{N}{K_n}\right)^2 + \left(\frac{T}{K_s}\right)^2 = 1 + \tan^2 \varphi \quad (5)$$

式中： K_n ， K_s 均为待定系数； φ 为锚固角度。

屈服段锚杆轴力开始迅速增大，剪力的增长幅度变小，屈服段裂隙岩体间开始发生相对位移，锚杆与岩体间的化学黏结力失效，此时必须同时发挥锚杆的“销钉作用”和约束作用来达到岩体的抗剪切效应。塑性段剪力维持在一个稳定值，而轴力持

续增大，当锚杆的伸长率大于规定的极限伸长率时，锚杆破坏。

3.4 锚杆锚固方向优化研究

深部锚固工程中，高强预应力锚杆以不同的角度贯穿裂隙岩体，其锚固效果有所差异。国内外诸多学者对锚杆在节理岩体中锚固角度优化的问题进行了大量试验研究，大大推动了锚杆锚固支护在岩体工程中的应用。葛修润和刘建武^[41]开展了大量室内试验和理论分析工作，对比了裂隙岩体节理面施加锚杆前后抗剪性能的变化，结合相关试验推导出估算节理面抗剪强度和锚杆最优锚固安装角的公式。系统研究了加锚节理面抗剪强度的影响因素，进而将加锚节理面抗剪强度细化为4个部分，分别为：加锚节理面本身的抗剪强度、由锚杆杆体“销钉作用”引起的换算抗剪强度、由锚杆杆体轴向力相对节理面的法向分量引起的换算抗剪强度、由杆体轴向力相对节理面切向分量引起的换算抗剪强度。张治强等^[42]进行了模拟加锚节理面强度和剪切刚度的试验研究，试验中锚杆分别施加几组不同的预应力，然后以不同角度安装到节理岩体中，其研究表明：锚杆安装角和预应力的对节理面强度和切向刚度有较大影响，加锚后节理面抗剪强度和切向刚度均有明显提高。

为发挥锚杆的最佳锚固效果，国内外学者在锚杆最优锚固角方面做了大量研究工作。P. Egger 和 K. Spang^[43]在混凝土块体中开展了大量锚杆锚固试验研究，结果表明：锚杆的最优安装角度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，并且当锚杆垂直于节理面安装时提供的极限抗剪能力最小，锚杆安装角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时剪切破坏位移最小。N. Barton 和 K. Bakhtar^[44]经过大量试验研究得出的结论是锚杆最优锚固角为 $35^\circ \sim 60^\circ$ ，与 P. Egger 和 K. Spang^[43]的结论基本一致。N. Barton 和 K. Bakhtar^[44]认为在深部裂隙岩体中，锚固工程中锚杆的施加会使围岩裂隙面上产生附加黏聚力 τ_b^* ， τ_b^* 由锚杆抗剪作用产生，其大小计算式为

$$\tau_b^* = \frac{F_{bmax}}{S / \cos \beta} \quad (6)$$

式中： S 为锚杆截面积， β 为裂隙倾斜角， F_{bmax} 为在纯剪切条件下锚杆可以承受的最大剪力。

深部裂隙岩体锚固工程中锚杆最优锚固角方面的研究较少。在深部裂隙岩体中，由于围岩所处的地质环境复杂多样，岩体节理面形式多样，导致锚固工程中锚杆的材料、形式不同，想确定一个最优的锚固角比较困难。刘泉声等^[45]对煤矿深部岩巷围

岩稳定控制与支护进行了深入研究，认为煤矿等深部岩巷有效的支护手段是锚杆支护，通过试验研究与现场监测得出：锚杆与围岩潜在滑移面的最佳锚固角度为 $\pm 22.5^\circ$ 。

韩建新等^[46]以锚固后岩体抗压强度为目标函数，以锚杆锚固角度为变量，建立了锚固后贯穿裂隙岩体抗压强度与锚杆安装角度之间的函数关系，得出了贯穿裂隙岩体抗压强度最大时的锚固角度，并提出了贯穿裂隙岩体锚固方向优化的基本方法。研究中建立的锚固岩体应力场及锚杆加固物理模型如图 8 所示。

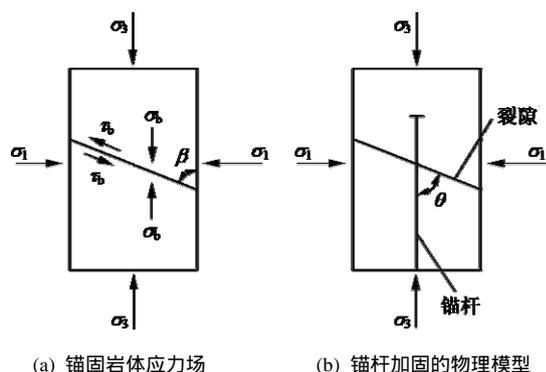


图 8 锚固岩体应力场及锚杆加固物理模型

Fig.8 The stress field of rock mass and physical model of bolting

在贯穿裂隙岩体强度和破坏方式研究的基础上得出以下结论：锚杆锚固裂隙围岩时，若锚杆贯穿裂隙面，保持锚杆与裂隙面所成角度 $\theta = \pi - \phi_w$ （即与最小主应力面夹角为 $\beta + \phi_w - \pi/2$ ，其中， β 为裂隙倾斜角， ϕ_w 为裂隙面内摩擦角），则锚固后岩体抗压强度最大；若锚杆未穿过裂隙面，仅仅锚固岩石时，保持锚杆与最小主应力面夹角为 $3\phi_0/2 - \pi/4$ （ ϕ_0 为岩石内摩擦角），则锚固后岩体抗压强度最大。

3.5 节理岩体锚固力学效应研究

锚杆及锚索在节理岩体加固工程中应用较广，诸多学者对其锚固力学效应开展了大量研究工作。G. S. Little John 和 D. A. Bruce^[47]研究了锚固系统的不同破坏模式，将锚固系统的破坏细分为岩体破坏、胶结面破坏和锚杆失效破坏 3 种破坏类型；A. Kilic 等^[48]研究了锚固工程中影响锚杆承载力的因素；G. Grasselli^[49]对开展了模拟锚杆锚固效应的物理模型试验，试验时在类岩石材料试件中预置 2 条平行节理，试件养护成型后进行直剪试验，其试验结果表明：锚杆与节理面法向夹角越大，则节理面剪切位

移越小；C. Li 和 B. Stillborg^[50]对影响全长黏结式锚杆承载力的因素进行了系统研究，这些因素包括：水灰比，添加剂，埋置长度，试验中没有涉及围压，提出了含单一节理锚杆加固时锚杆受力解析模型；C. J. Haas^[51]的研究采用不同类型锚杆分别锚入石灰岩和页岩中进行剪切试验，以此来探究锚固岩体力学效应，试验结果表明：全场锚固锚杆安装后，节理面抗剪能力增大了约 3.7 倍；R. Yoshinaka 等^[52]根据节理岩体锚固试验提出了反映锚杆“销钉作用”引起的岩体抗剪刚度增量表达式，讨论了岩体抗剪刚度与锚杆数量、弹性模量、截面几何性质、倾角及岩体变形参数等因素之间的关系；K. Spang 和 P. Egger^[53]研究了不同岩性的岩体中锚杆的抗剪作用，提出岩体自身的变形能力会在很大程度上影响锚固节理岩体抗剪能力，同时将剪应力-位移曲线划分为弹性、屈服和塑性 3 个阶段并分别进行了讨论；A. Bezuijen^[54]研究发现：锚杆锚固节理岩体后，节理岩体在外荷载作用下仍会产生剪切位移，随着节理面剪切位移的增大，锚杆也会产生塑性变形，进而形成塑性铰，此时作用在锚杆上的抗剪力达到最大，约为锚杆最大剪切强度的 90%。

李术才和张宁^[55]进行了大量的锚杆锚固单轴拉拔试验，通过室内试验结合理论分析，研究单轴拉伸条件下锚杆对含贯穿裂隙岩体的加固效应。结果表明：与不加锚试件的破坏形式相比，加锚试件均表现出塑性破坏特征；锚杆提高了节理岩体的变形模量和单轴抗拉强度。对于裂隙岩体而言，由于锚固角的不同，锚杆的黏结性能和抗剪切性能的复合作用会有所不同，从而导致锚固岩体从锚固角较小时的拉裂破坏变化为锚固角较大时的拉剪复合破坏。

含交叉裂隙岩体锚固效应研究方面，张波和李术才^[56]通过一系列模型试验研究，得出以下结论：含交叉裂隙岩体锚固时，在主裂隙与次裂隙位置不变的情况下，锚杆锚固位置在裂隙交叉点上方或下方时能得到最大锚固强度，而当锚固位置在交叉裂隙交叉点时锚固试件峰值强度最稳定。岩体本身主次裂隙夹角会影响节理岩体加锚后的力学性能。

总结概括以上研究成果，笔者提炼得出，深部裂隙岩体中锚杆加固支护的原理是增强了岩体节理面的抗剪性能，约束了岩体沿节理面的层间错动。锚杆锚固作用分为 2 个方面：一方面，锚杆锚固裂隙岩体后，锚杆杆体与岩体间存在黏结力与机械互锁力，加之高强预应力锚杆本身具有较高的抗剪强度，因而施加锚杆后，会极大地限制岩体沿节理面

的位移变形，维持岩体的整体稳定性；另一方面，深部裂隙岩体在较高的地应力或其他外荷载作用下，沿节理面发生剪切位移，随着位移的增大，截面黏结力失效，此时锚杆受到轴向拉伸作用，锚杆本身具有很高的抗拉强度，会对节理面施加法向应力，有效地限制了节理面的法向离层位移。锚杆对不同岩性岩体的锚固效应不同，岩性越软布锚对岩性的影响越敏感，岩性越硬，布锚影响越小。当岩体的弹模提高到某一值时，布锚的作用就很微小了。当岩体由硬到软时，岩体中锚杆约束效应逐渐增大。

3.6 岩体锚固界面力学特性及时效性分析

地下锚固工程中，锚杆贯穿裂隙岩体后形成整体性较强的锚固体。然而锚杆与裂隙岩体 2 种材料物理力学性质差异较大，导致二者接触面上变形不一致，因此，锚固界面力学机制及界面模型的研究尤为重要^[57-59]。

诸多学者对岩体施加锚杆后锚固体界面力学特性开展了大量的理论与试验研究，S. Yazici^[60]提出了锚固黏结介质强度理论。该理论认为锚杆黏结强度取决于锚杆和砂浆界面压力产生的摩擦力。通过现场试验得出结论：岩体自身刚度、注浆时采用的砂浆强度、锚杆与砂浆界面摩擦因数及锚杆钻孔直径均会影响锚固黏结强度。A. J. Hyett 等^[61]探究了锚固系统界面破坏的摩擦-剪胀力学机制，讨论了注浆浆液对锚杆与围岩界面黏结强度的影响，分析了洞室围压、径向剪胀位移及开挖扰动等因素对锚固体强度的影响。

锚杆锚固支护是地下深部岩体加固工程必不可少的加固手段。深部地层高地应力、高地热、高渗透压的地质环境，使得深部裂隙岩体具有流变性强的软岩特性。岩体流变特性会极大的影响深部岩土工程的稳定与安全。预应力锚杆锚固深部裂隙岩体后，预应力会随时间推移发生损失，即预应力锚杆锚固作用具有时效性。锚杆时效性与岩体流变性二者共同作用，会对深部锚固工程产生巨大影响。因此，深入研究锚固体对围岩流变性的控制机制至关重要。

目前，国内外有关深部裂隙岩体锚杆锚固时效性的研究较少，已有的研究大多基于很多特殊性假设，未能准确的反映客观实际。在锚杆锚固时效性研究方面，陈安敏等^[62]进行了锚杆锚固软岩的相似模型试验，探讨了锚索张拉预紧力随时间的变化特征，提出了锚索张拉预紧力随时间损失的估算方法。张玉军和孙 钧^[63]在模型试验的基础上建立了锚固

岩体的流变模型，通过物理试验确定了锚固体本构方程中各参数的取值，建立数值分析模型对试验过程进行了模拟计算，验证了流变模型及本构方程的正确性。刘全林和杨 敏^[64]将洞室围岩施加锚杆群后的锚固作用简化为作用于围岩的一种体积力，建立了锚固注浆联合作用时的力学模型，分析了锚杆加固高流变性岩体作用机制。

传统的反映裂隙岩体锚固界面接触本构模型未考虑锚杆预应力的时间效应，且锚杆与岩体接触面法向采用的是“硬接触”形式，这导致计算分析时难以收敛。伍国军等^[57]提出了一种考虑时间效应的锚固界面接触力学本构模型，该模型克服了上述难题，并提出了锚固界面法向刚度服从指数分布的“软接触”形式(见图 9)。“软接触”形式的优点是避免了传统“硬”接触形式和切向黏结、滑移 2 种状态下计算分析难以收敛的问题。建立了剪切面的非线性流变本构模型，并编制相关程序来模拟锚杆体与裂隙岩体界面接触问题。伍国军等^[57]的研究工作为深部地下工程中锚固时效性计算分析提供了理论支持。

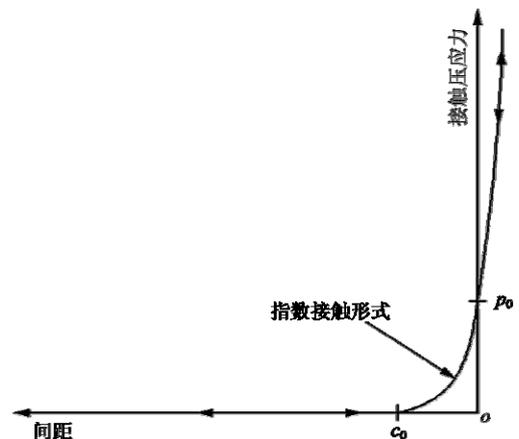


图 9 法向软接触指数形式^[57]

Fig.9 Exponential softened contact formulation in normal direction^[57]

伍国军等^[57]提出的“软接触”指数形式的表达式为

$$\sigma_n = \frac{p_0}{e-1} \left(\frac{v}{c_0} + 1 \right) \left(e^{\frac{v}{c_0} + 1} - 1 \right) \quad (7)$$

式中： σ_n 为法向压应力， p_0 为实际刚接触时压应力， v 为物体之间法相相对位移， c_0 为定义的初始间隙。

3.7 岩体锚固系统破坏失效形式

由众多锚固工程案例可知，锚固体破坏与否关系到整个锚固工程的成败，锚固体的破坏失效形式

也是地下工程研究的热点问题之一。由于锚固体所处地质条件和工程环境十分复杂，因而锚固体的破坏失效形式多种多样。如何准确判断锚固体的破坏属于何种形式并确定发生此种破坏的原因，对于岩体锚固工程的经济性和合理性具有重大意义。

岩土锚固技术最基本的要求是锚杆锚固岩土体后，形成的锚固体单元(见图 10)能提供足够的锚固力^[65]。随着岩土锚固技术及高强度锚杆制作工艺的发展，单根锚杆的力学性能越来越高。锚杆锚固围岩形成锚固体单元，锚固体单元由多种介质组成。锚杆锚固段的失效形式会影响锚固力的大小，研究发现锚固体的破坏形式主要有以下几种^[27](见图 11，图中， F 为锚杆受的拉拔力)：

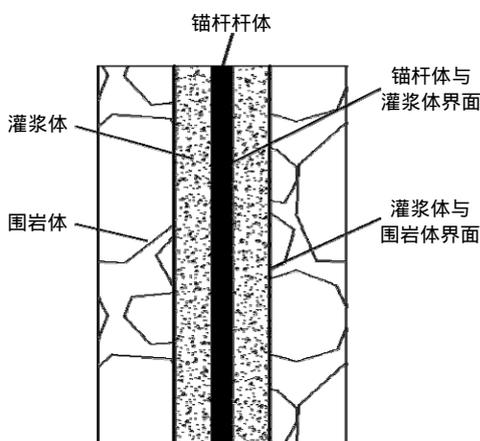


图 10 锚固体单元

Fig.10 Anchoring unit

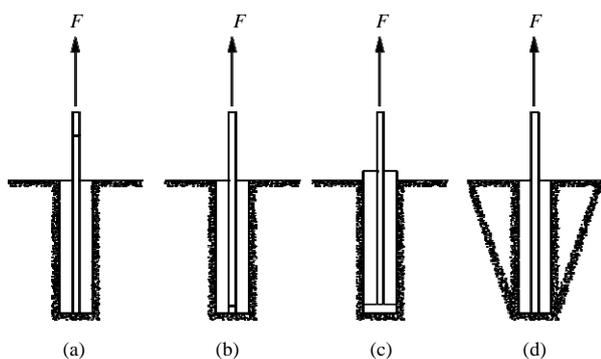


图 11 锚固失效主要形式

Fig.11 Main failure forms of anchoring

(1) 锚杆杆体本身断裂，如图 11(a)所示。当锚杆两端的轴向拉拔荷载大于锚固体抗拉强度时，锚固体产生断裂，使锚固单元失效。锚固体的断裂一般发生在锚杆锚固端头附近，该部分往往是防腐处理的薄弱环节，在岩土介质中受到腐蚀后，其强度降低，因而在外荷载的作用下会首先发生断裂破坏。提高锚杆体本身的强度有利于增强锚固体的整体强度。

(2) 锚杆体与灌浆体产生滑脱，如图 11(b)所示。当岩土体与灌浆体的界面处黏结强度足够大，高于锚杆体与灌浆体之间的黏结强度时，在外荷载的作用下，锚杆体与灌浆体之间的黏结力会首先失效，导致二者发生滑脱。锚杆体与灌浆体之间的滑脱一般是从锚杆锚固端头开始，随后逐渐向深部扩展，具有渐进破坏特征。如果锚杆锚固岩体形成的锚固体单元比较长，则不会出现锚杆体与灌浆体滑脱现象。选择合理的锚固材料或采用合理的锚固体结构能够显著提高锚杆体与灌浆体之间的抗滑脱能力。

(3) 岩土体与灌浆体界面的滑脱，如图 11(c)所示。很多工程实践证明，岩土体与灌浆体界面是整个锚固系统的薄弱环节，由于岩土体与灌浆体二者物理化学性质的差异，导致二者交界面的黏结强度较低，锚固系统的失效破坏往往发生在该界面处。大量现场原位试验发现，岩土体与灌浆体界面破坏时会形成一定厚度的薄层。如果岩土体的强度大于灌浆体的强度，则界面破坏发生在灌浆体一侧，界面强度由灌浆体的力学物理特性决定。如果岩土体的强度小于灌浆体的强度时，则界面破坏发生在岩土体一侧，此时界面层的强度与岩土体的力学特性有关。锚固工程的岩土体强度由地质条件决定，不能人为的改变，因而提高灌浆体的强度成为增强锚固系统整体强度的手段之一。

(4) 岩土体破坏，如图 11(d)所示。这种破坏形式多发生在表面锚固型锚杆的情况，内部锚固型锚杆则不会出现这种破坏形式。如果岩土体为均质材料且强度较低，这时破坏形式表现为漏斗型，此时岩土体材料的强度决定锚固强度。现场试验发现，随着荷载的增加，灌浆体周围的岩土体表面首先出现微小的环状裂纹，随后出现放射状裂纹，最后形成漏斗状锥体拔出。对于裂隙发育的非均质破碎岩土体，则岩土体破坏形式为不规则体。

大量现场试验以及工程案例表明，锚固工程中锚杆锚固裂隙岩体后形成锚固系统，锚固系统的薄弱环节是岩土体与灌浆体之间的界面，其界面黏结强度较低。因此，增强岩土体与灌浆体界面强度是提高锚固工程安全性与稳定性的关键，应当加强对岩土体与灌浆体界面物理力学性质的研究^[66-67]。

4 深部裂隙岩体锚固机制数值模拟与试验研究

随着深部地下工程的发展，深部裂隙岩体锚固

机制成为国内外学者研究的一大热点问题,该方向在试验模拟与数值计算两方面取得了一定成果。但是很多研究成果都是基于一定的简化假设的基础上,不能准确地反映锚固机制的真实情况,而且现有的各种计算模型存在很多不足,导致数值计算与实际情况出入较大。深部裂隙岩体锚固机制的研究需要通过理论探讨、室内物理模型试验与现场原位试验相结合的方法。从目前国内外已有的文献资料不难看出,大量岩土锚固机制的研究结论来自于模型试验或是缩小几何尺寸的室内模拟试验。

4.1 锚杆锚固机制数值模拟研究现状

随着有限元、离散元、非连续变形分析等数值计算方法的发展,数值模拟技术被广泛应用到深部裂隙岩体锚固机制的分析中。地下工程洞室开挖通常采用高强预应力锚杆锚固作为加固方式,深部地层的岩体多为非连续裂隙介质,在模拟此种情况下锚杆锚固作用时,通常将锚固作用力简化为均匀分布的附加内压力,即采用“等效模型”。等效模型将锚杆锚固岩体后形成的锚固体看作一个各向同性的均质体,称为“等效连续体”。深部裂隙岩体处于复杂的地质力学环境中,岩体节理裂隙及其发育,具有非连续、各向异性特征。只有将锚固后的锚固体简化为均质的等效连续体,才能利用有限元、离散元等数值计算方法进行锚固岩体的变形及稳定性分析。目前实际工程中应用的许多数值计算模型都是在“等效模型”的基础上建立的。M. Nakayama等^[68-70]对锚杆锚固岩体的等效模拟计算方法进行了大量研究,等效模拟方法能够处理大规模的复杂三维问题。

朱维申和李铀^[71]在裂隙岩体锚杆锚固机制方面做了大量的物理试验和数值计算工作。以上研究工作表明,锚杆锚固作用仅在锚头、锚杆附近范围内有效。深部裂隙岩体节理及其发育,结构面产状复杂,其强度稳定性由软弱结构面控制,在此种岩体中采用锚杆加固方法时,改变锚杆锚固倾角、增大锚杆预紧力、增加锚杆长度等措施不会使锚固应力的影响范围发生较明显变化。

李宁等^[72]采用数值分析方法对深部裂隙岩体预应力锚杆、锚索的加固机制进行了仿真模拟研究。考虑节理岩体的“岩桥理论”,建立了摩擦接触型节理单元的数值模型。通过对比分析发现单根锚杆的加固机制和群锚加固机制有所不同,群锚效应会在更大程度上影响被锚岩体的物理力学性状。

锚杆的模拟是裂隙岩体锚固机制数值模拟的关

键,很多数值计算模型中锚杆被简化为杆单元或梁单元。结构力学分析中,锚杆经常被简化为两端点为铰接点的杆单元。地下锚固工程的有限元分析计算中,为简化计算模型,提高计算效率,将锚杆看作仅在轴线方向受力的简单杆单元,在锚杆数量较多的群锚加固工程的模拟计算中体现出较大的优越性。然而必须承认,杆单元模型存在许多不足,其仅考虑锚杆的抗拉抗压作用,这种简化能够适用于锚杆抗剪作用不明显的群锚工程。当锚固工程中单根锚杆受横向剪力较大时,或者需要模拟锚杆与岩体接触面受力情况时,杆单元模型与实际情况有很大出入^[73-74]。在刚架结构的有限元分析中锚杆则被看作梁单元。梁单元模型的优点是考虑了锚杆的横向抗剪力及剪切变形,因此能够较好地模拟锚杆的横向抗剪作用。梁单元模型的缺点是无法模拟接触面上剪切滑移的力学行为。这2种锚杆单元模型被很好地应用于岩土锚固工程中锚杆的数值模拟中。

深部裂隙岩体锚固工程中采用的多为高强预应力锚杆,预应力锚杆锚固机制数值模拟方法在其发展历程中主要有2类方法^[75-77]:一类是锚杆和岩体的等效连续模拟;另一类则是锚杆和岩体的离散模拟。

(1) 预应力锚杆和岩体等效连续模拟

预应力锚杆和岩体等效连续模拟将锚杆锚固岩体后的锚固体看作均质各向同性,极大简化了模拟条件。其思路是将预应力锚杆的锚头、锚杆体采用隐式方法隐含在普通单元中,锚杆体单元的刚度采用拉伸刚度产生的附加刚度,经过坐标系转换后再添加到整体刚度矩阵中。

建立深部裂隙岩体锚杆锚固本构模型是研究锚杆锚固机制的关键。杨延毅和王慎跃^[78-79]运用等效抹平的处理方法,推导出了裂隙岩体锚杆锚固体的损伤张量和等效柔度张量。一般裂隙岩体具有脆性材料特性,杨延毅和王慎跃^[78-79]运用损伤力学的相关理论,建立了能够反映加锚裂隙岩体渐进破坏过程的损伤演化模型,并嵌入到有限元程序中,验证了该模型的正确性。数值分析结果表明:裂隙岩体锚杆锚固后,岩体的峰值强度和变形模量显著提高,岩体原有结构面强度增大,岩体整体稳定性加强,这表明锚杆锚固裂隙岩体的加固效果十分显著。

高强预应力锚杆(索)锚固深部裂隙岩体,极大地增强了松散破碎岩体的整体性,锚杆与岩体联合作用,共同抵抗外荷载及变形扰动。张强勇等^[80]深入研究了裂隙岩体的损伤断裂变形特性和锚索的空

间锚固效应，并建立了数值计算模型，有效地模拟了锚索锚固裂隙岩体的整体作用效果。

预应力锚杆和岩体的等效连续模拟对研究问题进行了一定的简化，其最大的优点是可以高效的处理大规模复杂的三维问题，但该方法最大的难点是如何准确的选取加锚后岩体的力学参数。

(2) 预应力锚杆和岩体离散模拟

预应力锚杆和岩体离散模拟将岩体和锚杆的物理力学特性分别进行模拟，能够更准确地反映锚杆与岩体之间的相互作用规律。该方法建立的预应力锚杆模型被广泛地应用到实际工程的数值模拟中。

朱维申和李 铀^[71]采用有限单元法模拟了预应力锚索的加固机制。研究中将锚索的自由张拉段取作一对集中力作用的两节点单元，用实体单元模拟锚索的锚根部分。

丁秀丽等^[81]运用三维显式有限差分法建立了预应力锚索数值计算模型，该模型准确模拟了三峡船闸高边坡岩体预应力锚索的锚固作用效果。

预应力锚索中锚固段和自由段作用机制不同，数值计算中应当对这 2 个部分分别进行模拟。徐前卫等^[82]模拟锚索锚固段时采用的是空间杆单元模型，锚索自由段则采用一种三维杆单元来模拟。杆单元模型只考虑锚杆的轴向拉拔力，研究中考虑了裂隙岩体的非线性特征，较好地模拟了裂隙岩体的预应力锚杆锚固作用机制。

预应力锚杆与节理岩体的离散模拟法对锚杆与岩体分别建立数值模型，考虑了锚杆自由段、锚固段和岩体节理粗糙度等细节。目前大多数数值计算模型将锚杆看作二结点或三结点的杆单元，杆单元模型虽然能够反映锚杆的特性，但是存在一些不足之处：只考虑锚杆的轴向拉拔力未考虑其抗剪作用力，杆单元模型个别区段转角不能协调。当岩体节理发育，锚杆数量多时，导致计算工作量大。

4.2 岩体锚固支护机制 DDA 与数值流行方法模拟

国内外关于岩土锚固机制数值模拟方面的研究较多，已有的对于岩体锚固支护机制的数值模拟研究采用的多为有限单元法，预应力锚杆对岩体的预压作用及锚杆对锚固体刚度的贡献都以杆单元模拟。然而有限单元法的弊端是模拟加固锚杆的几何参数(长度、倾向和倾角)及裂隙岩体中锚杆复杂的布局受有限单元网格的限制，因此只能将锚杆的作用进行简化处理，这使得有限元锚杆计算模型与实际锚杆状态存在较大差异。

目前锚固机制数值模拟研究领域发展较快且较为流行的是数值流行方法^[83]。G. H. Shi^[84]提出的二

维 DDA 中，锚杆被看作一个线弹簧元件，只考虑锚杆的轴向受力，未涉及到锚杆杆体本身的抗剪切作用。焦玉勇等^[85]提出了锚杆三维分析方法，给出了相应的算法和公式，并且考虑了在不连续面处锚杆的横向剪切作用。姜清辉和丰定祥^[86]给出了非连续变形方法 DDA 模拟锚杆锚固作用机制时相应的算法和公式，研究中假设锚杆为理想弹塑性材料，主要承受轴向拉拔力，这与实际情况有所出入。张秀丽等^[87]在 DDA 程序中建立了预应力锚杆的表达形式，较好地解决了 DDA 模拟预应力锚杆锚固时施加预应力的问题，并提出了相应的锚杆单元模型，但该模型仍不能很好地体现锚杆的切向剪切作用。通过以上分析不难发现，诸多学者在研究锚杆锚固机制时建立的锚杆计算模型都基于一定的简化条件下，未能准确的反映锚杆与裂隙岩体的相互作用机制。建立合理的锚杆计算模型是该研究方向的关键。

数值流行方法在模拟锚杆锚固机制方面具有许多优势。曹文贵和速宝玉^[83]基于数值流行方法^[88-89]建立了锚杆锚固裂隙岩体的数值流行方法模型。该模型是不协调位移模型，采用块体间的流行单元来模拟岩体的加锚构件，较好地反映了锚杆与岩体的协同变形作用。数值流行方法模拟锚杆锚固时考虑了块体接触反映块体之间的应力不协调。预应力锚杆的几何参数不受计算网格的限制，能够模拟节理发育岩体中锚杆复杂的几何布置形式，较准确地反映裂隙岩体加锚后的协调变形机制，从而更为真实地反映了裂隙岩体锚杆锚固机制。

岩体锚杆的数值流行方法模型较好地模拟了锚杆对裂隙岩体的锚固支护效应。该方法突出的优点是可以完全仿真模拟锚杆复杂的布置形式及几何参数，且不会增加网格剖分的工作量，研究中建立的锚杆流行单元模型如图 12 所示。图中， A, B 分别为锚杆 2 个端点； L 为锚杆长度； e_1, e_2 分别为 2 个流行单元； $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ 分别为锚杆 2 个端点的位移； $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 分别为锚杆 2 个端点的坐标。

4.3 裂隙岩体锚杆轴向作用试验研究

锚杆轴向作用方面的试验旨在研究锚杆与黏结剂界面、黏结剂与岩体界面剪力分布规律。已有的研究成果为对锚杆锚固工程的设计与施工具有指导意义。

国外有关锚杆轴向作用试验研究开展较早。I. W. Farmer 等^[90]研究了树脂锚杆锚固段的力学传递

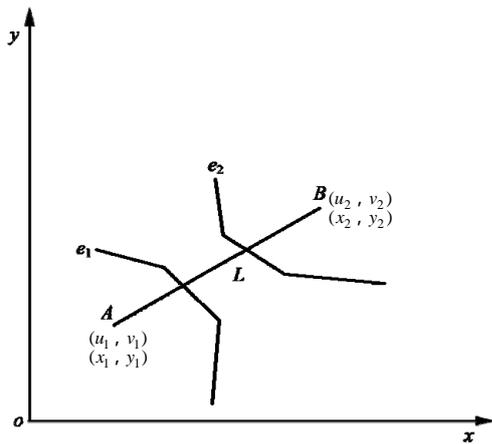


图 12 锚杆流行单元模型计算

Fig.12 Computation of manifold element model for reinforced bolts

机制，由于锚杆强度较低，锚杆杆体被拉断称为锚杆失效的主要形式。

注浆材料的物理力学性质会对锚杆承载力造成较大影响。A. Kilic 等^[77]利用拉拔试验研究了注浆浆液特性对锚杆抗拔能力的影响，得出锚固体在不同水灰比、锚杆锚固深度、化学添加剂等不同条件下的极限承载力，并得出了砂浆浆液的最佳水灰比和养护时间。试验结果表明：锚固体破裂面出现在锚杆与砂浆界面上；锚孔深度、锚杆直径、砂浆的抗剪强度和弹性模量会影响锚固体的极限承载力，这些参数与锚固体承载力成正比关系。

D. J. Jarred 和 C. M. Haberfield^[91]通过物理模型试验研究了注浆锚杆的侧限刚度、注浆长度及膨胀水泥含量对杆体与注浆体界面力学性质的影响。总结得出了不同锚杆与裂隙面夹角情况下裂隙面的位移，所得结果如图 13 所示，分析对比了裂隙倾角对锚杆轴向锚固效应的影响。

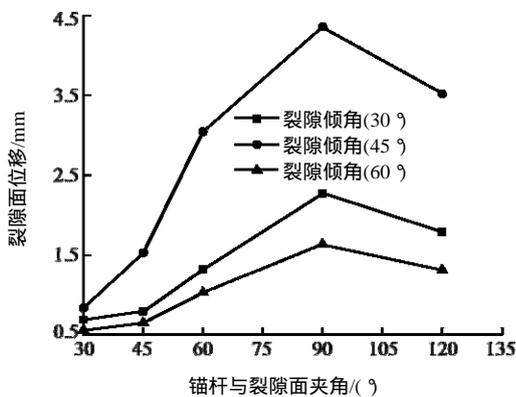


图 13 加锚岩体裂隙面的位移^[91]

Fig.13 Displacements of anchoring fracture surface^[91]

A. J. Hyett 等^[92]对锚杆承载力的影响因素进行

了系统的研究，通过大量现场原位试验和室内模拟试验得出，水泥砂浆特性是影响锚杆承载力的主要因素，水灰比、锚杆锚固长度、围压等也会在一定程度上影响锚杆承载力。具体而言，低水灰比水泥砂浆可提高锚杆承载力，锚杆承载力随锚固长度的增加而增加，但不成正比；锚杆承载力随水泥砂浆外表面径向侧压力的增大而增大。

国内学者刘汉东等^[93-94]通过试验研究了砂浆黏结 GFRP 锚杆在拉拔条件下沿杆体的轴力和剪应力分布规律，试验中制备了 3 种锚杆拉拔模型，并埋设应变片监测试验过程中荷载的变化过程，得出了锚杆拉拔条件下轴力、剪力的传递规律。

谭忠盛等^[95]针对锚杆的加固效果，开展了一些现场试验工作，对比施加锚杆与未施加锚杆 2 种条件下，试验系统几种典型工况下位移、应力的不同响应规律。主要试验内容有：拱顶下沉、拱脚下沉、水平收敛、围岩压力、初支钢架应力等。

陈妙峰等^[96]通过静载作用试验研究了岩体锚杆锚固机制，通过轴向拉拔试验，得出了沿锚杆长度方向的轴力与黏结应力分布规律。试验结果表明，注浆黏结材料的强度等级与锚杆几何尺寸是影响锚杆抗拉拔性能的主要因素。

锚杆锚固裂隙岩体时，较小的锚固深度即可满足锚杆抗拔力要求。朱焕春和荣冠^[97]对张拉荷载作用下全长黏结锚杆的工作机制进行了探讨，由于锚杆杆体表面存在粗糙的螺纹，锚杆在轴向受拉过程中，锚杆与注浆浆液之间将产生法向剪胀变形，产生的法向应力会造成锚固体应力分布范围小、应力高。

裂隙岩体经锚杆锚固后，其力学参数会发生改变，这在一定程度上反映了锚杆锚固对岩体的加固效应。叶金汉^[98]进行了锚固后岩体的室内三轴压缩试验，得出了其应力-应变强度，并绘制出应力-应变曲线，深入研究了加锚岩体的力学特性。总结得出以下结论：(1) 加锚岩体在三向应力状态下应力-应变曲线由脆性转变成弹塑性，岩体强度和弹性模量增大，最终变形量减小；(2) 锚杆加固裂隙岩体能有效防止岩体变形，增大岩体抗剪强度，岩体破坏性状由脆性变成弹塑性或者黏弹性，加强了岩体的整体稳定性。

陈胜宏等^[99]开展了模拟深部裂隙岩体变形特性和锚杆锚固效应的物理模拟试验，试验中对地下洞室进行分步开挖，监测记录了施加锚杆后，洞室

围岩力学行为的变化,探讨了不同地应力场条件对锚杆锚固机制的影响。其试验结果表明:裂隙岩体的整体变形破坏受内部结构面的影响。岩体内部原有的节理面与洞室开挖后形成的自由面共同作用,制约围岩垮落区的发展,锚杆锚固岩体能够较好地控制围岩变形和破坏,增强围岩的整体稳定性。

4.4 岩体锚杆剪切试验研究

很多学者在研究锚杆锚固机制时,只考虑了锚杆的轴向作用,未考虑锚杆的抗剪切作用。近年来,诸多学者已经认识到锚杆横向抗剪作用对岩体加固效应的重大贡献,开展了一系列锚杆剪切试验研究,得到了许多指导性的结论。

国外关于锚杆抗剪力效应研究开展较早。S. Bjurström^[100]首先开展了锚杆横向抗剪试验研究,指出锚杆的横向抗剪作用能限制节理岩体的层间错动,较好地维持了节理岩体的整体稳定性。P. G. Fuller 和 R. H. T. Cox^[101]考虑锚杆在节理面处的剪切变形及转角位移,建立了节理面处锚杆抗剪作用计算模型,该模型较好地反映了锚杆的横向抗剪作用。P. M. Dight^[102]假设锚杆材料服从 Tresca 屈服准则,在考虑锚杆抗剪强度及节理面处锚杆平衡状态的基础上,建立了锚杆对节理面抗剪强度贡献的计算模型。

K. Spang 和 P. Egger^[103]建立了利用弹性梁理论计算节理位移的数值模型,并通过现场原位试验与室内剪切试验研究了锚杆不同锚固方式对裂隙岩体强度及稳定性的影响。具体的室内剪切试验采用 8 mm 直径钢锚杆,现场补充试验采用 40 mm 直径钢锚杆,试验结果表明:(1) 锚杆直径对极限荷载时节理面剪切位移有较大影响,剪切位移的增加,会使锚杆中产生附加拉应力;(2) 锚固节理面的抗剪能力受锚杆预应力及锚杆锚固角度的影响,增加锚杆预应力及锚杆锚固倾角会相应的增加锚固节理面的抗剪能力,被锚固节理面的刚度随摩擦角增加而增加;(3) 较小的剪切位移就能发挥锚杆的抗剪强度极限,剪胀角也会影响锚杆的最大抗剪强度;(4) 全长水泥灌浆锚杆的“销钉效应”能够增强锚杆的抗剪强度,全长水泥灌浆锚杆的“摩擦效应”可增强锚固节理面的抗剪强度。

S. Hibino 和 M. Motjima^[104]利用在混凝土试件中开展了砂浆黏结锚杆的全锚和端锚剪切试验,指出岩体节理面发生相同剪切位移的情况下,全长锚固锚杆的抗剪能力远高于端锚锚杆。预应力锚杆锚固能够有效的减小初始剪切位移,但对极限抗剪能

力几乎没有影响。

A. M. Ferrero^[105]在通过预应力锚杆剪切试验研究发现,围岩力学特性及变形能力对锚杆杆体变形破坏性状具有较大影响。锚杆在较硬岩石中抗剪切作用更加显著,安装在软岩中的锚杆能够显著提高软岩结构体的变形能力。

P. Egger 和 L. Zabuski^[106]开展了节理岩体的直剪试验,试验中岩体节理面处未施加垂直应力,得出以下几点结论:裂隙岩体施加锚杆后锚杆沿节理面产生附加抗力,节理面位移减小,进而减小了锚杆杆体的剪切变形。节理面产生微小位移的同时剪切力发生较大变化,直至达到岩体极限抗压强度。节理面破坏表现出剪切和张拉破坏特征。试验中锚杆剪切变形仅仅发生在节理面附近较小范围内,距离节理面约 10 mm 处,锚杆没有发生明显变形,锚杆和岩体界面之间黏结完好。

D. P. Roberts^[107]开展了光滑锚杆和锥形锚杆的剪切试验,并对存在 2 个节理面岩块与只有一个节理面的岩块分别进行物理模拟试验,发现前者的剪切强度并不是后者的双倍关系,双节里面岩块的剪切失效首先在其中一个节理面发生,进而导致另一个节理面的破坏。D. P. Roberts^[107]将试验结果与 K. Spang 和 P. Egger^[103]的理论进行对比,其试验结论基本一致。试验结果表明,裂隙岩体施加锚杆后节理面抗剪能力明显提高,但是目前仍没有理论可以较好地预测这个抗剪能力。

国内学者也开展了大量锚杆剪切试验研究。葛修润和刘建武^[41]为研究锚杆对节理面抗剪性能的控制作用,进行了加锚岩体节理面抗剪性能的模型试验,提出了锚杆遏制节理面发生相对错动的“销钉作用”机制。试验结果表明,岩体加锚节理面抗剪强度受剪切位移的影响,剪切位移增大,节理面抗剪强度随之增大,此外,加锚节理面的抗剪强度很大程度上受锚杆倾斜角度的影响。

陈安敏和顾金才^[108]深入研究了高强预应力锚杆对裂隙岩体的加固作用机制,探讨了锚杆锚固长度和预应力大小对岩体加固效果的影响程度,并总结了影响裂隙岩体整体锚固效果主要因素。

李术才和朱维申^[109]基于断裂损伤力学理论,分析了裂隙岩体在锚固节理面在剪切作用下的应力-应变特点,构建了加锚断续节理岩体的本构模型,并推导出损伤演化方程。构建的模型真实地反映了加锚节理岩体的力学特性,较准确地反映开挖卸荷阶段围岩渐进破坏规律。

锚杆锚固裂隙岩体后与岩体形成一个整体(锚固体),使层间错动和变形量减小,锚固体的力学与变形特性是锚固机制研究的重点问题之一。杨建辉和夏建中^[110]研究锚固体单元的变形性质,得到了锚固体纵、横向载荷与挠度全程的关系曲线。曲线存在峰值前和峰值后2个变形阶段,横向载荷首先达到峰值,破坏进一步发展后纵向载荷达到峰值。研究成果反映了锚杆抗剪强度对锚杆加固作用的重大贡献。

总结国内外学者对岩体锚杆锚固机制的剪切试验研究成果不难发现:节理面剪切过程中锚杆由最初的弹性状态进入塑性状态,较小的剪切位移就能使锚杆达到抗剪强度极限。节理岩体在节理面附近被挤压变形破坏的同时,锚杆也最终屈服破坏。深部裂隙岩体具有软弱围岩大变形的特性,锚杆锚固深部裂隙岩体时,其横向剪切效应不容忽视,因而锚杆锚固岩体的剪切试验研究具有重大意义。

5 讨 论

总结概括目前国内外学者对于深部裂隙岩体锚固机制研究所取得的成果不难发现,虽然近年来关于岩体锚固机制方面的研究有了一定突破,但是笔者认为以下几点仍然值得业内专家学者的思考与重视:

(1) 正确的分析锚固体与围岩体接触面上的受力变形机制、界面荷载传递过程及剪切破坏发展趋势,并在数值计算中加以模拟,是锚固机制研究中的关键点和难点。深部裂隙岩体处于复杂的地质力学环境中,岩体具有很高的蠕变性,这会对锚杆与围岩体界面力学特性产生较大影响,进而影响到锚固工程的安全与稳定。此外,目前对于深部裂隙岩体锚固工程时效性方面的研究较少,因此,开展岩体锚固接触界面的流变力学特性及时效性研究尤为重要。

(2) 通过理论研究分析,笔者总结得出对于浅部地层连续性较好的岩体,锚杆锚固的基本原理就是依靠岩体自身的抗剪力作为荷载传递的主要方式,并发挥岩体的自稳能力来保持地层开挖面的稳定。但是对于深部裂隙岩体,由于所处的地质力学环境极其复杂,且岩体内部节理极其发育,导致岩体强度较低,这些因素都会影响锚杆的锚固效果。上述因素综合作用,使得深部裂隙岩体锚固机制非常复杂。虽然目前在该方面的研究取得了一定的进

展,但是很多研究成果都是基于一定简化假设基础上所取得的,与实际情况有所出入,所以进一步开展细致缜密的理论与试验研究仍然十分必要。

(3) 岩体中加锚物理效应是目前国内外非常关注的一个研究课题。锚杆加固对岩体的弹性模量、抗压强度、内摩擦角、黏聚力和渗透系数等都会产生影响,而且岩性越软这种影响越明显。高地应力、高地温、高渗透压使得深部裂隙岩体多表现出软岩特性,故锚杆对于深部裂隙岩体的锚固作用效果显著。目前对岩体加锚效应还仅仅是定性的认识,如何定量的描述岩体加锚物理效应是岩体锚固机制研究的一大热点、难点。

(4) 深部裂隙岩体锚固机制中对于锚固体耐久性方面的研究需要关注,目前国内该方面的研究非常少。深部地层高地应力、高地热、高渗透压的环境加快了预应力锚杆杆体的腐蚀破坏过程,由于在深部岩体高应力条件下腐蚀破坏过程比较复杂,目前尚未没有成熟的防腐处理方法,这对锚固体的耐久性是一个严峻的考验。由于锚固体耐久性研究中防腐处理方法涉及到许多岩土物理化学方向的专业知识,该方面研究对于化学因素影响下岩土的长期强度、长期稳定性的评估预报及对策研究具有重大意义。

(5) 岩土锚固机制研究中提出合理的模拟锚杆锚固作用的数值计算模型是关键课题之一。如何准确、合理的描述拉力型、压力型、剪力型锚固体内应力传递规律是数值计算模拟的关键。目前已经存在的计算模型都是基于单根锚杆加固效果的模拟,岩土锚固中单锚加固效应与群锚加固效应有所区别。笔者认为,深部裂隙岩体中采用的是高强预应力锚杆(索),锚杆(索)几何尺度及其布锚间距与深部地下空间尺度相比较小,群锚效应研究中可将群锚看作在围岩表面施加一均布荷载,形成一整体加固带,高强预应力锚杆(索)压应力的叠加,提高了围岩抵抗不利荷载的能力,进而增强了围岩稳定性。另外多根锚杆使内锚固段部位的拉、压应力相互叠加,这种拉应力区的联合可能使锚杆部分受整体拉力作用而发生剪切破坏。同时内锚固段前部压应力区域的联合也将有助于改善锚根部的拉应力区分布,提高其承载力。所以群锚加固效应不仅仅是单锚加固效应的简单叠加,其具体加固效应有待进一步细致研究。

(6) 大量工程实践表明,锚固工程中锚杆的屈服荷载并不是锚杆的最终破坏荷载,实际上锚杆屈

服后会产生塑性强化，但由于塑性强化段本构关系复杂，所以当前研究中大多都假设锚杆为理想弹塑性材料，导致与实际情况出入较大。因而确定真实反映锚杆锚固裂隙岩体实际情况的塑性强化段本构关系对研究锚杆锚固机制至关重要。

深部裂隙岩体锚杆锚固机制的研究应综合考虑实际工程的应用效果和加锚岩体的性态、加锚构件的效应等。需要进一步研究以下几个问题：(1) 重点研究锚杆承载力的时空效应，探讨锚杆对岩体软弱结构面的加固作用机制；(2) 研究锚杆体与岩体共同形成的锚固体在预应力及外部荷载作用下应力重分布特性；(3) 在锚固力学效应方面，需进一步研究锚杆体与围岩体界面力学特性、群锚效应机制、锚杆锚固对岩体力学参数的影响；(4) 研究洞室开挖、地震荷载、冲击荷载等扰动条件对锚固体力学性能的影响。

6 结 论

本文对深部裂隙岩体锚固机制研究现状进行了系统全面的概括，归纳分析了裂隙岩体锚固机制研究中的关键科学问题，包括：合理的锚固体单元本构模型、锚固体的应力分布规律、锚固界面力学传递机制等。在总结近年来国内外有关研究成果的基础上，结合笔者在淮南矿区进行的深部岩巷围岩稳定控制与支护研究得出以下几点结论：

(1) 深部裂隙岩体锚固工程多采用高强预应力锚杆，其锚固机制不同于浅部裂隙岩体锚固机制。浅部裂隙岩体中，锚杆锚固作用依靠“被动支护”原理，它以提供足够的抗力为手段阻止围岩变形；深部裂隙岩体锚固工程其锚固机制基于“主动支护”原理，它以加固围岩和改善围岩的受力状态为手段，充分发挥岩体的自承能力来减小围岩变形。

(2) 尽管锚杆锚固的作用机制在不同的围岩特性及地应力场条件下略有差异，但是作用本质可归结为改善被锚岩体的应力状态，提高其强度指标，形成具有较高强度指标及较强变形适用性的锚固体。锚杆的抗剪强度对岩体加固效果贡献巨大。深部裂隙岩体中锚杆抗剪作用的实质是：调动岩体自身的抗压强度抵抗节理面切向荷载。在抗压强度较高的硬岩中，锚固体变形破坏局限于节理面附近，锚杆加固作用的影响范围小；在抗压强度较低的软岩中，锚固体破坏段较大，而且会产生较大的剪切变形，锚杆加固的影响范围较大。由此可知，锚杆

锚固在深部裂隙岩体中的加固效果比浅部裂隙岩体更为显著。

(3) 深部地层具有高地应力、高地温、高渗透压以及强时间效应的地质力学特性，复杂的地质环境，使得深部裂隙岩体的内部结构、物理力学特征和工程响应与浅部岩体相比均发生了根本性变化。具体表现为在浅部强度高、稳定性强的围岩，在深部一般都表现出显著地大变形、非连续等软岩特性。由于存在高赋存地应力和深部岩体低强度之间的突出矛盾，深部岩体开挖后造成的应力集中和应力重分布将导致很大范围内的围岩进入峰后破裂碎胀状态。锚杆锚固使得开挖后二向应力状态的不稳定岩体恢复到稳定的三向应力状态。

(4) 深部岩体工程的失稳破坏大部分与其内部节理、裂隙的扩展和贯通以及锚杆屈服失效密切相关。锚杆在浅部裂隙岩体中多发生剪切屈服，在深部裂隙岩体中多发生弯曲屈服。国内外目前的研究工作对锚固机制的认识和岩体锚固工程的设计施工具有指导意义。深部裂隙岩体强度低、蠕变性强，加之高强预应力锚杆(索)会随时间产生预应力损失，2 种因素叠加势必会对深部裂隙岩体锚固工程的安全与稳定造成威胁。纵观以往研究工作，考虑时间因素对锚固岩体稳定性影响的研究非常少，且考虑深部裂隙岩体流变性的锚固机制方面的研究存在明显不足。因此深部裂隙岩体锚杆锚固时效性研究值得业界专家学者的高度关注。

笔者认为深部裂隙岩体锚固机制这一关键科学问题具有涉及范围广、与实际工程相关性强、研究持续时间长、试验开展难度大等特点。长期以来，国内外诸多学者对该方向做了大量研究工作，在一些方面达成了一定共识，但由于诸多研究侧重点不同，并且基本都对所研究的问题进行了简化假设，因而取得的研究成果较为零散，缺乏代表性。本文系统全面的总结概括了该方向国内外具有代表性的研究成果，并针对具体的研究成果、试验结论提出一些建设性的观点，结合笔者自身研究得出了几点重要结论，分析了该领域现阶段研究存在的不足，指出了下一步研究的侧重点。上述研究工作对于深入研究深部裂隙岩体锚固机制以及指导岩体锚固工程设计具有重大意义。

参考文献(References)：

- [1] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627-631.(ZHANG Lewen, WANG Ren. Research on status

- quo of anchorage theory of rock and soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 627–631.(in Chinese))
- [2] 刘泉声, 张华, 林涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3732–3737.(LIU Quansheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3732–3737.(in Chinese))
- [3] LIU Q S, ZHU W S, WANG P. Determination for optical parameters of full-column grouted bolts for reinforcing soft rocks[C]// *Proceedings of International Symposium on Modern Mining Technology and Method*. Taian: International Academic Publishers, 1989: 201–207.
- [4] 朱训国. 地下工程中注浆岩石锚杆锚固机制研究[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2006.(ZHU Xunguo. The reinforcement mechanics of fully grouted rock bolt in underground engineering[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [5] 李术才, 陈卫忠, 朱维申, 等. 加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1661–1666.(LI Shucai, CHEN Weizhong, ZHU Weishen, et al. Catastrophe model of crack propagating in bolt-supported jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1661–1666.(in Chinese))
- [6] 李术才. 加锚断续节理岩体断裂损伤模型及其应用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1996.(LI Shucai. Anchored discontinuous jointed rock mass fracture-damage model and its application[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996.(in Chinese))
- [7] KEMENY J, COOK N G W. Effective moduli non-linear deformation and strength of a cracked elastic solid[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1986, 23(2): 107–118.
- [8] WONG T F, WONG R H C, JIAO M R, et al. Micromechanics and rock failure process analysis[J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 261–263(5): 39–44.
- [9] SHEN B, BARTON N. The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(1): 117–125.
- [10] 章青, 卓家寿. 加锚岩体的界向应力元模型[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(5): 50–53.(ZHANG Qing, ZHUO Jiashou. The interface stress element model for anchored rock mass[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 50–53.(in Chinese))
- [11] WINDSOR C R. Rock reinforcement system[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(6): 919–951.
- [12] LUTZ L, GERGELEY M. Mechanics of band and slip of deformed bars in concrete[J]. *Journal of American Concrete Institute*, 1967, 64(11): 711–721.
- [13] GOTO Y. Cracks formed in concrete around deformed tension bars[J]. *Journal of American Concrete Institute*, 1971, 68(4): 244–251.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. CECS 22—90 土层锚杆设计与施工规范[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1990.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. CECS 22—90 Code for design and construction of soil anchors[S]. Beijing: China Engineering Construction Standardization Association, 1990.(in Chinese))
- [15] HSUCH C H. Interfacial debonding and fiber pullout stresses of fiber-reinforced composites, Part II: Non-constant interfacial bond strength[J]. *Materials Science and Engineering*, 1990, A125: 67–73.
- [16] HSUCH C H. Interfacial debonding and fiber pullout stresses of fiber-reinforced composites, part VI: interpretation of fiber pull-out cures[J]. *Materials Science and Engineering*, 1991, A145: 11–18.
- [17] PHILLIPS S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock[R]. London: Cementation Research Ltd., 1970.
- [18] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. *International Journal of Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1013–1029.
- [19] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(11): 347–351.
- [20] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机制分析的双曲线函数模型[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 188–193.(ZHANG Jiru, TANG Baofu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 188–193.(in Chinese))
- [21] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 339–341.(YOU Chun'an. Mechanical analysis on wholly grouted ancho[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 339–341.(in Chinese))
- [22] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(6): 925–928.(YOU Chun'an, ZHAN Yubao. Distributing characters and analysis of stresses in[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 925–928.(in Chinese))
- [23] 尤春安, 高明, 张利民, 等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(增): 63–66.(YOU Chun'an, GAO Ming, ZHANG Limin, et al. Experimental research on stress distribution in anchorage body[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.): 63–66.(in Chinese))
- [24] 张幼振, 石智军, 张晶. 岩石锚杆锚固段荷载分布试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增): 184–188.(ZHANG Youzhen, SHI Zhijun, ZHANG Jing. Experimental study of load distribution of anchoring section for rock bolts[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Supp.):

- 184–188.(in Chinese)
- [25] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 等. 张拉荷载下全长黏结锚杆工作机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379–384.(ZHU Huanchun, RONG Guan, XIAO Ming, et al. Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 379–384.(in Chinese))
- [26] 晏启祥, 何川, 姚勇. 软岩隧道施工特性及其动态力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 572–577.(YAN Qixiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on construction characteristic and dynamic behavior of soft rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 572–577.(in Chinese))
- [27] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1976–1985.(YOU Chun'an, ZHAN Yubao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1976–1985.(in Chinese))
- [28] RABCEWICZ L. Principles of dimensioning the support system for the New Austrian Tunneling Method[J]. Water Power, 1973, 25(3): 88–93.
- [29] LANG T A, BISCHOFF J A. Stability of reinforced rock structure[C]// Design and Performance of Underground Excavations. London: British Geotechnical Society, 1984: 11–18.
- [30] WONG R H C, TANG C A, CHAU K T, et al. Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(17): 1853–1871.
- [31] ORESTE P P, PEILA D. Modeling progressive hardening of shotcrete in convergence-confinement approach to tunnel design[J]. Journal of Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(3): 425–431.
- [32] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type material under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863–888.
- [33] VASARHELYI B, BOBET A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(2): 129–139.
- [34] KEMENY J M, COOK N G W, WONG T F. Crack models for the failure of rock under compression[C]// Proceedings of the 2nd International Conference Constitutive Laws for Engineer Materials. [S.l.]: [s.n.], 1987, 26(2): 879–887.
- [35] FREEMAN T J. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. Tunnels and Tunneling June, 1978, 10(5): 37–40.
- [36] 王明恕, 何修仁, 郑雨天. 全长锚固锚杆的力学模型及其应用[J]. 金属矿山, 1983, 4: 24–29.(WANG Mingshu, HE Xiuren, ZHENG Yutian. The mechanical model of full length anchoring bolt and its application[J]. Metal Mine, 1983, 4: 24–29.(in Chinese))
- [37] 赖应得, 崔兰秀, 孙惠兰. 能量支护学概论[J]. 山西煤炭, 1994, (5): 17–23.(LAI Yingde, CUI Xiulan, SUN Huilan. Overview of energy support subject[J]. Shanxi Coal Mine, 1994, (5): 17–23.(in Chinese))
- [38] BROWN E T, 王金安, 蔡美峰. 地下开挖的岩层控制——成就与挑战[J]. 国外金属矿山, 1990, (3): 17–25.(BROWN ET, WANG Jin'an, CAI Meifeng. The rock stratum control of underground excavation——achievement and challenge[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 1990, (3): 17–25.(in Chinese))
- [39] 王思敬, 杨志法. 地下工程中岩体工程地质力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(4): 301–308.(WANG Sijing, YANG Zhifa. The rock mass geology mechanics in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(4): 301–308.(in Chinese))
- [40] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231–2240.(ZHANG Wei, LIU Quansheng. Analysis of deformation characteristics of prestressed anchor bolt based on shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2231–2240.(in Chinese))
- [41] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 8–19.(GE Xiurun, LIU Jianwu. Study of the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8–19.(in Chinese))
- [42] 张治强, 张国, 赵赤云. 边坡预应力锚固结构的实验研究[J]. 东北大学学报, 1999, 20(5): 536–539.(ZHANG Zhiqiang, ZHANG Guo, ZHAO Chiyun. Experimental study on prestressly anchoring structure of slope[J]. Journal of Northeastern University, 1999, 20(5): 536–539.(in Chinese))
- [43] EGGER P, SPANG K. Stability investigations for ground improvement by rock bolt at a large dam[C]// Proceedings of VI International Conference ISRM. Montreal: [s. n.], 1987: 349–354.
- [44] BARTON N, BAKHTAR K. Bolt design based on shear strength[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting. Stockholm: A. A. Balkema, 1983: 367–376.
- [45] 刘泉声, 张华, 林涛. 煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3732–3737.(LIU Quansheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on the stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3732–3737.(in Chinese))
- [46] 韩建新, 李术才, 李树忱. 贯穿裂隙岩体锚固方向优化的模型研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 163–170.(HAN Jianxin, LI Shucui, LI Shuchen. The model study on optimization of bolting direction of rock mass with persistent cracks[J]. Engineering Mechanics, 2012,

- 29(12) : 163 – 170.(in Chinese))
- [47] LITTLE JOHN G S ,BRUCE D A. Rock anchors :state-of-the-art part I , design , ground engineering[M]. Essex , England : Foundation Publications Ltd. , 1975 : 163 – 175.
- [48] KILIC A , YASAR E , CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. Tunneling Underground Space Technology , 2002 , 17(4) : 355 – 362.
- [49] GRASSELLI G. 3D behaviour of bolted rock joints : experimental and numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2005 , 42(11) : 13 – 24.
- [50] LI C , STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1999 , 36(8) : 1 013 – 1 029.
- [51] HAAS C J. Shear resistance of rock bolts[J]. Transactions AIME , 1976 , 260(1) : 32 – 41.
- [52] YOSHINAKA R ,SKAGUCHI S ,SHIMIZU T. Experimental study on the rock bolt reinforcement in discontinuous rock[C]// Proceedings of 6th ISRM Congress. Montreal : ISRM , 1987 : 1 329 – 1 332.
- [53] SPANG K , EGGER P. Action of fully-grouted bolt in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 1990 , 23(3) : 201 – 229.
- [54] BEZUIJEN A. Compensation grouting in sand : experiments , field experiences and mechanisms[Ph. D. Thesis][D]. Delft : Delft University of Technology , 2010.
- [55] 李术才 , 张 宁. 单轴拉伸条件下断续节理岩体锚固效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2011 , 30(8) : 1 579 – 1 587.(LI Shucai , ZHANG Ning. Experimental study of anchoring effect of discontinuous jointed rock mass under uniaxial tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(8) : 1 579 – 1 587.(in Chinese))
- [56] 张 波 , 李术才. 含交叉裂隙节理岩体锚固效应及破坏模式[J]. 岩石力学与工程学报 , 2014 , 33(5) : 996 – 1 004.(ZHANG Bo , LI Shucai. Bolting effect failure modes of jointed rock masses with cross-cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2014 , 33(5) : 996 – 1 004.(in Chinese))
- [57] 伍国军 , 褚以惇 , 陈卫忠. 地下工程锚固界面力学模型及其时效性研究[J]. 岩土力学 , 2011 , 32(1) : 237 – 244.(WU Guojun , CHU Yidun , CHEN Weizhong. Constitutive model of anchorage interface in underground engineering and its time-effect analysis[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32(1) : 237 – 244.(in Chinese))
- [58] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1997 , 34(2) : 249 – 262.
- [59] TANG C A , LIN P , WONG R H C , et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part II : numerical approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2001 , 38 (7) : 925 – 936.
- [60] YAZICI S. Damage mechanics around a tunnel due to incremental ground pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1997 , 34(3/4) : 655 – 627.
- [61] HYETT A J , BAWDEN W F , MACSPORRAM G R , et al. A constitutive law for bond failure of fully ground cable bolts using a modified Hoek cell[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1995 , 32(1) : 11 – 34.
- [62] 陈安敏 , 顾金才 , 沈 俊 , 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2002 , 21(2) : 251 – 256.(CHEN Anmin , GU Jincai , SHEN Jun , et al. Model testing research on the variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(2) : 251 – 256.(in Chinese))
- [63] 张玉军 , 孙 钧. 锚固岩体的流变模型及计算方法[J]. 岩土工程学报 , 1994 , 16(3) : 33 – 46.(ZHANG Yujun , SUN Jun. Rheological models and calculation methods for bolts rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1994 , 16(3) : 33 – 46.(in Chinese))
- [64] 刘全林 , 杨 敏. 软弱围岩巷道锚注支护机制及其变形分析[J]. 岩石力学与工程学报 , 2002 , 21(8) : 1 158 – 1 161.(LIU Quanlin , YANG Min. Analysis of deformation of surrounding rock masses of tunnel using bolt-grouting support and its mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(8) : 1 158 – 1 161.(in Chinese))
- [65] HANNA T H. 锚固技术在岩土工程中的应用[M]. 北京 : 中国建筑工业出版社 , 1987 : 89 – 93.(HANNA T H. Anchorage technology application in geotechnical engineering[M]. Beijing : China Building Industry Press , 1987 : 89 – 93.(in Chinese))
- [66] MASSARSCH K R , OIKAWAK. Design and practical application of Soilex anchors[C]// Proceedings of Ground Anchorages and Anchored Structures. London : Thomas Telford , 1997 : 118 – 124.
- [67] SERRANO A , OLALLA C. Tensile resistance of rock anchors[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1999 , 36(4) : 449 – 474
- [68] NAKAKYAMA M , BEAUDOIN B B. A novel technique determining bond strength developed between cement paste and steel[J]. Cement and Concrete Research , 1987 , 22 (3) : 478 – 488.
- [69] FULLER P G , COX R H T. Mechanics load transfer from steel tendons of cement based grouted[C]// Proceedings of the Fifth Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. Melbourne : Australasian Institute of Mining and Metallurgy , 1995 : 189 – 203.
- [70] 张 伟. 基于预应力锚杆模型的节理岩体稳定性非连续分析[博士学位论文][D]. 武汉 : 中国科学院武汉岩土力学研究所 , 2010.

- (ZHANG Wei. Discontinuous deformation analysis on stability of jointed rockmass based on pre-stressed rockbolt model[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan : Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Science , 2010.(in Chinese))
- [71] 朱维申,李 铀. 预应力锚索锚固机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,1995 ,15(3) :305 – 311.(ZHU Weishen ,LI You. Prestressed anchor cable anchoring mechanism research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1995 , 15(3) : 305 – 311.(in Chinese))
- [72] 李 宁,韩 恒,陈飞熊,等. 预应力群锚加固机制数值试验研究[J]. 岩土工程学报,1997 ,19(5) :60 – 66.(LI Ning , HAN Heng , CHEN Feixiong , et al. Prestressed anchor reinforcement mechanism numerical experiments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1997 , 19(5) : 60 – 66.(in Chinese))
- [73] LAABMAYR F , SWOBODA G. The importance of shotcrete as support element of the NATM[C]// Proceedings of the 2nd Shotcrete Conference. Stanton : [s. n.] , 1978 : 65 – 79.
- [74] KEUSER M , MEHLHORN G. Finite element models for bond problems[J]. Journal of Structural Engineering , 1987 , 113(10) : 2 160 – 2 173.
- [75] AYDAN O , KOYA T , ICHIKAWA Y. Anchorage performance and reinforcement effect of fully grouted rock bolts on rock excavations[C]// Proceedings of the 6th ISRM Congress. Montreal : [s.n.] , 1987 : 757 – 760.
- [76] AYDAN O. The stabilization of rock engineering structures by rockbolts[Ph. D. Thesis][D]. Nagoya ,Japan :Agoya University ,1989.
- [77] KILIC A , YASAR E , CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2000 , 17(4) : 355 – 362.
- [78] 杨延毅. 加锚层状岩体的变形破坏过程与加固效果分析模型[J]. 岩石力学与工程学报,1994 ,13(4) :309 – 317.(YANG Yanyi. Deformation and failure process of anchoring stratified rock mass and the reinforcement effect analysis model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1994 , 13(4) : 309 – 317.(in Chinese))
- [79] 杨延毅,王慎跃. 加锚节理岩体损伤增韧止裂模型研究[J]. 岩土工程学报,1995 ,17(1) :9 – 17.(YANG Yanyi , WANG Shenyue. Study on toughening of jointed rock masses reinforced with bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1995 ,17(1) 9 – 17.(in Chinese))
- [80] 张强勇,李术才,陈卫忠. 裂隙岩体加索支护模型及其工程应用[J]. 岩石力学,2004 ,25(9) :1 465 – 1 468.(ZHANG Qiangyong , LI Shucai , CHEN Weizhong. Reinforcing model for anchor cable in jointed rockmass and its application to engineering[J]. Rock and Soil Mechanics , 2004 , 25(9) : 1 465 – 1 468.(in Chinese))
- [81] 丁秀丽,盛 谦,韩 军,等. 预应力锚索锚固机制的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002 ,21(7) :980 – 988.(DING Xiuli ,SHENG Qian ,HAN Jun ,et al. The numerical simulation of the mechanism of prestressed anchor cable anchorage experiment research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(7) : 980 – 988.(in Chinese))
- [82] 徐前卫,尤春安,朱合华. 预应力锚索的三维数值模拟及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004 ,23(7) :4 942 – 4 945.(XU Qianwei , YOU Chunan , ZHU Hehua. Three-dimensional numerical simulation of prestressed anchor cable and its application research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(7) : 4 942 – 4 945.(in Chinese))
- [83] 曹文贵,速宝玉. 岩体锚固支护的数值流形方法模拟及其应用[J]. 岩土工程学报,2001 ,23(5) :581 – 584.(CAO Wengui , SU Baoyu. Simulation of numerical manifold method for supports by reinforced bolt and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2001 , 23(5) : 581 – 584.(in Chinese))
- [84] SHI G H. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of Block system[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley , California : University of California , 1988.
- [85] 焦玉勇,葛修润,谷先荣. 三维离散元法中地下水及锚杆的模拟[J]. 岩石力学与工程学报,1999 ,18(1) :6 – 11.(JIAO Yuyong , GE Xiurun ,GU Xianrong. The three-dimensional discrete element method in the simulation of the groundwater and anchor rod[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1999 , 18(1) : 6 – 11.(in Chinese))
- [86] 姜清辉,丰定祥. 三维非连续变形分析方法中的锚杆模拟[J]. 岩石力学,2001 ,22(2) :176 – 178.(JIANG Qinghui , FENG Dingxiang. Anchor simulation of three dimensional discontinuous deformation analysis method[J]. Rock and Soil Mechanics , 2001 , 22(2) : 176 – 178.(in Chinese))
- [87] 张秀丽,焦玉勇,刘泉声. 非连续变形分析(DDA)方法中的预应力锚杆模拟[J]. 地下空间与工程学报,2008 ,4(1) :38 – 41.(ZHANG Xiuli ,JIAO Yuyong ,LIU Quansheng. Prestressed anchor simulation in discontinuous deformation analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2008 , 4(1) : 38 – 41.(in Chinese))
- [88] SHI G H. Manifold method[C]// Proceedings of the 1st International Forum on DDA and Simulations of Discontinuous Media. Berkeley : [s.n.] , 1996 : 2 – 204.
- [89] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京 :清华大学出版社,1993 :15 – 36.(SHI Genhua. Manifold method and discontinuous deformation analysis[M]. Beijing : Tsinghua University Press , 1993 : 15 – 36.(in Chinese))
- [90] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1975 , 12(11) : 347 – 351.
- [91] JARRED D J , HABERFIELD C M. Tendon/grout interface performance in grouted anchors[C]// Proceedings of Ground Anchorages and Anchored Structures. London :Thomas Telford ,1997 :3 – 13.

- [92] HYETT A J, BAWDEN W F, Reichert R D. The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(5) : 503 – 524.
- [93] 刘汉东, 高磊, 李国维. GFRP 锚杆锚固机制试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(3) : 63 – 65. (LIU Handong, GAO Lei, LI Guowei. The experiment study of GFRP anchoring mechanics[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(3) : 63 – 65. (in Chinese))
- [94] 李国维, 高磊, 黄志怀. 全长黏结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8) : 1 653 – 1 663. (LI Guowei, GAO Lei, HUANG Zhihui. Pull-out model experiment on failure mechanism of full-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8) : 1 653 – 1 663. (in Chinese))
- [95] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面浅埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2) : 491 – 506. (TAN Zhongsheng, YU Yu, WANG Mingnian, et al. Experimental study on bolt effect on large section shallow depth loess tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2) : 491 – 506. (in Chinese))
- [96] 陈妙峰, 唐德高, 周早生, 等. 锚杆锚固机制试验研究[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(4) : 21 – 23. (CHEN Miaofeng, TANG Degao, ZHOU Zaosheng, et al. The experiment study of anchoring mechanism[J]. Building Technique Development, 2003, 30(4) : 21 – 23. (in Chinese))
- [97] 朱焕春, 荣冠. 张拉荷载全长黏结锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3) : 379 – 384. (ZHU Huanchun, RONG Guan. Working mechanism of full-length bond anchor tension load test research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3) : 379 – 384. (in Chinese))
- [98] 叶金汉. 裂隙岩体的锚固特性及其机制[J]. 水利学报, 1995, (9) : 68 – 74. (YE Jinhan. Anchorage characteristics and mechanism of the fractured rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (9) : 68 – 74. (in Chinese))
- [99] 陈胜宏, 强晨, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1) : 1 – 8. (CHEN Hongsheng, QIANG Chen, CHEN Shangfa. Anchoring three-dimensional composite element model study of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1) : 1 – 8. (in Chinese))
- [100] BJURSTROM S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted un-tensioned bolts[C]// Proceedings of the 3rd International Congress on Rock Mechanics Denver. [S.l.] : [s.n.], 1974, 2(B) : 1 194 – 1 199.
- [101] FULLER P G, COX R H T. Rock reinforcement design based on control of joint displacement—a new concept[C]// Proceedings of the 3rd Australian Tunnelling Conference. Sydney, Australia : [s. n.], 1978 : 28 – 35.
- [102] DIGHT P M. Improvements to the stability of rock walls in open mines[Ph. D. Thesis][D]. Melbourne, Australia : Monash University, 1982.
- [103] SPANG K, EGGER P. Action of fully-grouted bolt in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990, 23(3) : 201 – 229.
- [104] HIBINO S, MOTJIMA M. Effects of rock bolting in jointly rock[C]// Proceedings of International Symposium on Weak Rock. Tokyo : [s. n.], 1981 : 1 052 – 1 062.
- [105] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6) : 590 – 600.
- [106] EGGER P, ZABUSKI L. Behaviour of rough bolted joints in direct shear tests[C]// Proceedings of 7rd ISRM Congress. Aachen, Germany : [s.n.], 1991 : 1 285 – 1 283.
- [107] ROBERTS D P. Testing of mining tunnel support elements and systems for hard rock mines[M. S. Thesis][D]. South Africa : Department of Mechanical Engineering, University of Natal, 1995.
- [108] 陈安敏, 顾金才. 预应力锚索的长度与预应力值对其加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6) : 848 – 852. (CHEN Anmin, GU Jincai. The length of prestressed anchor cable and the prestressing value on its reinforcement effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6) : 848 – 852. (in Chinese))
- [109] 李术才, 朱维申. 加锚断续节理岩体力学特性的研究及其应用[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5) : 490 – 494. (LI Shucai, ZHU Weishen. Anchor discontinuous joint rock mechanical characteristics of research and application[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5) : 490 – 494. (in Chinese))
- [110] 杨建辉, 夏建中. 层状岩石锚固体全过程变形性质的试验研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4) : 414 – 417. (YANG Jianhui, XIA Jianzhong. Test study on the complete deformation property of bolted stratified surrounding rock masses[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4) : 414 – 417. (in Chinese))