

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0712-05

锚固体应力分布演化规律及其影响因素研究

尹延春¹, 赵同彬^{1,2}, 谭云亮¹, 张泽¹

- (1. 山东科技大学矿山灾害预防控制—省部共建国家重点实验室培育基地, 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 通过室内试验与细观颗粒流模拟相结合的方法, 研究了锚固段应力分布演化规律及其影响因素。锚固体的拉拔破坏过程可以分为3个阶段: 黏弹阶段、黏脱阶段和破坏阶段。在黏弹阶段, 剪应力呈先增后减的分布形式, 峰值点靠近拉拔端孔口处; 在黏脱阶段, 拉拔端处的界面黏结首先失效, 并向内部扩展, 在此阶段, 剪应力的峰值点随之向锚固段内部移动。锚杆和锚固剂弹性模量影响锚杆轴力和界面剪应力的分布形式, 锚杆弹性模量越大, 锚固剂弹性模量越小, 剪应力在锚固段拉拔端的集中程度越小。

关键词 应力分布; 拉拔试验; 颗粒流模拟; 弹性模量

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Research of stress distribution evolution law and influencing factors

YIN Yan-chun¹, ZHAO Tong-bin^{1,2}, TAN Yun-liang¹, ZHANG Ze¹

- (1. State Key Laboratory Breeding Base for Mining Disaster Prevention and Control, College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract With laboratory tests and particle flow simulation, stress distribution evolution law and influencing factors along anchorage segment are studied. The failure process of anchor system can be divided into three stages: viscoelastic stage, de-viscosity stage and failure stage. In the viscoelastic stage, the shear stress first increases and then decreases along the anchorage segment, and the peak point is close to the pull end. In the de-viscosity stage, the bond at the pull end first fails, and then expands to the internal layer. The shear stress peak point also moves inward. Elastic modulus of anchor and anchor agent influences the stress distribution. With the increase of anchor's modulus and decrease of anchor agent's modulus, the intensity of stress at pull end weakens.

Key words stress distribution; pull test; particle flow simulation; elastic modulus

锚固支护技术是一种有效的巷道围岩加固技术^[1-2], 在煤矿生产中得到了广泛的应用, 是实现煤矿高产高效开采的一种关键技术。但是由于巷道围

岩条件的多样性, 导致了锚固作用机理极其复杂, 锚固支护设计没有确定的理论依据, 因此大多数设计是按照工程类比法或经验法确定的^[3-4], 这给实际

收稿日期: 2012-07-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226805); 国家自然科学基金项目(51004068, 51074099, 51274133); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2012EEZ002); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011NJ014); 山东科技大学杰出青年科学基金项目(2011KYJQ106); 山东科技大学“矿山压力与岩层控制”创新团队基金项目(2010KYTD105)

作者简介: 尹延春(1988-), 男, 山东省济南市人, 博士生, 从事矿山压力与岩层控制方面的研究。

通信作者: 赵同彬

E-mail: ztbwh2001@163.com

Tel: 0532-86057946

工程造成了不必要的浪费，有时甚至是不安全的，由此造成的工程事故在国内外多有发生^[5]。大量的现场测试和室内试验表明，锚固体的失效大多数情况是出现在黏结界面上的，因此界面剪应力分布形式是研究锚固机理的一个重点^[6]。尤春安^[7]根据 Mindlin 问题的位移解得到了剪应力沿锚固段的分布曲线，并将锚固界面的力学行为分为弹性、滑移和脱黏 3 个阶段，获得了各种状态下的应力分布规律的理论解，但是并未研究剪应力分布随着拉拔力增加的演化规律。张瑞良等^[8]对预应力锚索锚固段的剪应力分布进行了理论分析和现场试验测量，得到了剪应力的分布曲线，其峰值点靠近端口位置，分布是呈集中态势的，并且研究了剪应力分布随预应力的变化规律，发现随着预应力的增大，剪应力逐渐增大，分布区域向孔底扩展，但峰值点位置几乎固定不变。战玉宝等^[9]采用有限元法研究了不同因素对预应力锚索锚固段应力分布的影响，包括岩石的坚硬程度、锚固长度和锚固体的直径，得到了一些有价值的结论，但是关于锚杆和锚固剂力学性能对应力分布的影响并未进行研究。

本文采用室内试验和数值模拟相结合的方法，从细观角度对锚杆承受拉拔力作用下的应力分布演化规律及其影响因素进行了研究，并且通过细观颗粒流模拟，可以将宏观力学行为和细观变化联系起来，对锚固机理下一步的研究提供理论基础。

1 室内试验

1.1 锚固体制备

为了测试应力沿锚固段的分布形式^[10-11]，曾进行了锚固体的拉拔试验，所设计的锚固体模型如图 1a 所示。为了固定锚固基体，在其中嵌入了 3 根贯穿基体的长锚杆，但是由于其深入基体部分较长，拉拔试验过程中，3 根锚杆受到拉伸作用时，也会产生一定的应力分布，对中部锚杆的应力分布产生一定的影响，为了消除这种影响，本文对锚固体模型进行了改进，如图 1b 所示。基体采用 C20 混凝土制备，在基体中嵌入 1 个钢筋三脚架，以便拉拔时固定基体。锚杆为 $\Phi 18$ mm 的螺纹钢，弹性模量为 200 GPa，总长度为 250 mm，锚固段长度为 200 mm。在锚杆锚固段内对称设计 2 个切槽，在切槽内对称交错地布置 8 个应变片，间距为 25 mm。由于试验条件的限制，本文的锚固体模型中未能考虑围压影响，而且由于锚固长度比较短，应变片布置数量偏少，最终得到的应力曲线不够平滑，但并不

影响对应力分布形式的研究。

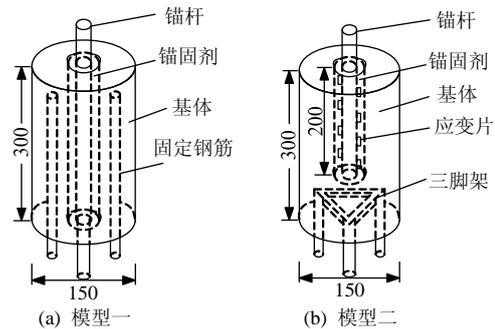


图 1 锚固体模型图 (mm)

Fig.1 Model of anchorage system

1.2 试验结果分析

根据试验所得数据可得到锚杆轴力沿锚固段的分布曲线，如图 2 所示。轴力沿锚固段的分布是不均匀的，在锚杆拉拔端有明显的应力集中，并且沿着锚固段逐渐减小。随拉拔力的增大，锚固段的轴力逐渐增大，而且在拉拔端处增加幅度最大，沿着锚固段轴力增大幅度逐渐减小。由此可知，轴力的影响范围是一定的，存在一个有效的锚固长度。

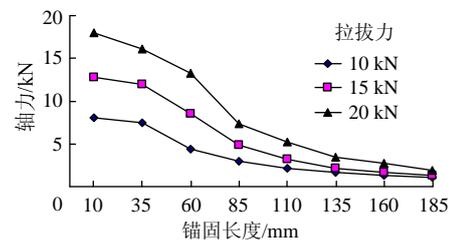


图 2 轴力分布曲线

Fig.2 Axial force distribution

图 3 为得到的剪应力沿锚固段的分布曲线。

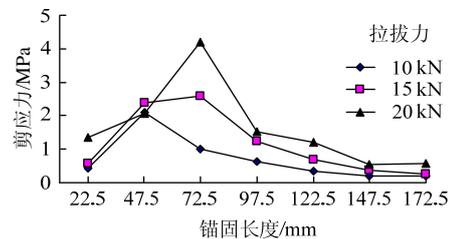


图 3 剪应力分布曲线

Fig.3 Shear stress distribution

界面剪应力的分布是不均匀的，在锚杆拉拔的孔口处，剪应力比较小，在远离孔口一定距离后达到峰值，然后剪应力迅速下降。在锚固段后半部分，剪应力变化幅度很小，说明同轴力一样，剪应力也有一定影响范围。随着拉拔力的增大，界面剪应力逐渐增大，而且剪应力的影响范围逐渐增大，但剪

应力仍然主要集中在锚固段拉拔端部分。在低拉拔力下，剪应力的峰值靠近拉拔端孔口位置，随拉拔力的增大，剪应力峰值逐渐向锚固段内部移动。

2 细观颗粒流模拟

2.1 二维颗粒流程序简介

二维颗粒流程序是一种采用离散元法对微细观颗粒进行数值模拟的软件系统，分析颗粒介质的运动及相互作用，通过微细观变化研究材料的宏观力学行为，克服了传统连续介质力学模型的宏观连续性假设，是目前研究岩土力学破坏机理问题的一种有效手段。

颗粒流程序通过颗粒单元之间简单的接触本构来模拟材料的物理力学行为，接触本构模型一般包括 3 个部分：刚度模型、滑动模型和黏结模型。刚度模型反映了接触力和相对位移之间的弹性关系，滑动模型反映了 2 个接触颗粒相对滑动时法向和切向接触力之间的关系，黏结模型通过设定接触间黏结强度限制了法向和切向接触力的合力。黏结模型包括接触黏结模型和平行黏结模型，接触黏结表示颗粒之间点的黏结，常用于模拟散体材料，如土体；平行黏结模型表示颗粒之间面的黏结，常用于模拟密实材料，如岩石。本文模拟选用的模型为平行黏结模型。

2.2 模型建立

本文利用二维颗粒流软件对锚杆拉拔试验进行了模拟，基本模型如图 4。锚杆由 11 个相同半径的颗粒组成，半径为 10 mm，运算过程中记录锚固段中的 10 个锚杆颗粒的竖直方向的力作为锚杆轴力。基体和锚固剂由相同大小的颗粒组成，半径为 1.3~1.7 mm，在锚固剂中布置 10 个半径为 8 mm 的测量圆，用以记录界面的剪应力。具体的细观参数如表 1 所列。

表 1 锚杆拉拔模型细观参数设定
Table 1 Parameters of anchor pull model

参数	锚杆	第 1 界面	锚固剂	第 2 界面	基体
颗粒半径 r/mm	10	-	1.3~1.7	-	1.3~1.7
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	-	1 200	-	2 600
颗粒弹性模量 E_p/GPa	200	-	12	-	10
颗粒黏结强度 σ_p/MPa	500	16	50	7	20
颗粒刚度比 k_n/k_s	2.5	-	2.5	-	2.5
颗粒摩擦因数 μ	0.5	-	0.5	-	0.5
平行黏结半径 λ	1	1	1	1	1

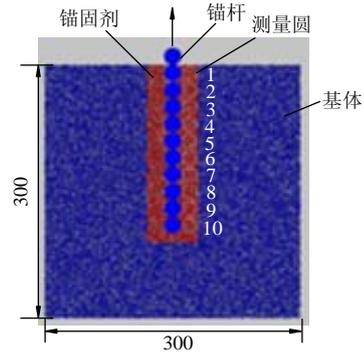


图 4 锚杆拉拔试验细观模型图 (mm)

Fig.4 Mesoscopic model of anchor pull test

2.3 模拟结果分析

图 5 为得到的拉拔力与裂纹数量曲线，根据曲线可以将拉拔破坏过程分为 3 个阶段：黏弹阶段、黏脱阶段和破坏阶段。在黏弹阶段，界面的黏结力发挥主要作用，剪应力峰值点在测点 2 附近，如图 6 中的 20 kN 和 40 kN 时刻的剪应力分布曲线所示。

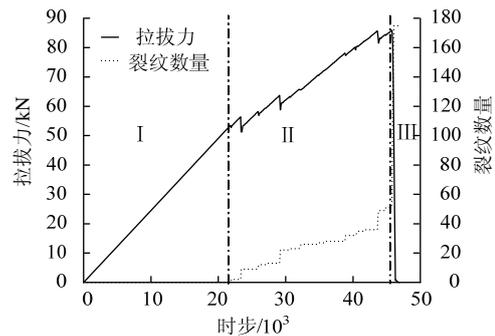


图 5 锚杆拉拔力及裂纹数量曲线

Fig.5 Pull-out force and crack number curves

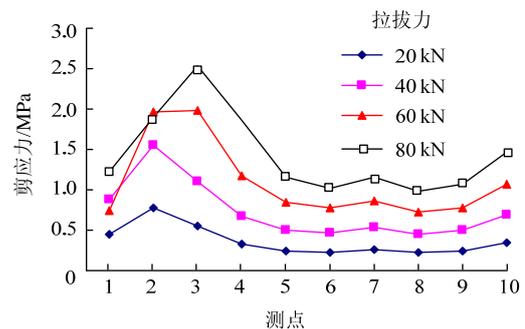
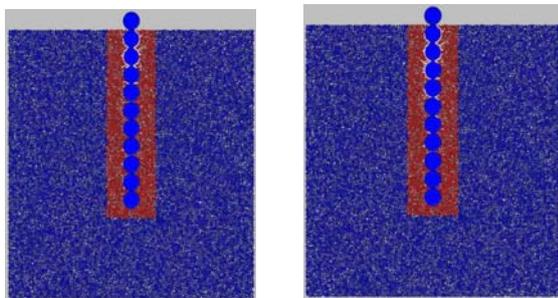


图 6 界面剪应力分布曲线

Fig.6 Shear stress distribution

当拉拔力达到 55 kN 时，界面黏结逐渐失效，开始生成裂纹，每次裂纹的产生都会导致拉拔力的变化。在锚杆拉拔端处的黏结首先失效，并逐渐向内部扩展，如图 7 所示的 60 kN 和 80 kN 时刻的模型图所示。拉拔端处的黏结失效导致了剪应力峰值

点向锚固段内部的测点 3 移动，如图 6 中的 60 kN 和 80 kN 时刻的剪应力分布曲线所示。



(a) 60 kN (b) 80 kN

图 7 不同拉拔力下的模型图
Fig.7 Models under different loads

3 应力分布的影响因素

根据上述的试验和数值模拟可知，应力沿锚固段的分布是不均匀的，因此锚固设计中按应力均匀分布的假设进行计算是不正确的。为了对锚固设计提供更多的理论依据，本文研究了锚杆和锚固剂力学参数对应力分布的影响。由于室内试验的局限性，只利用了数值模拟手段进行分析研究。

3.1 锚杆弹性模量的影响分析

图 8 为锚杆弹性模量对应力分布的影响，通过分析曲线可得到以下结论：

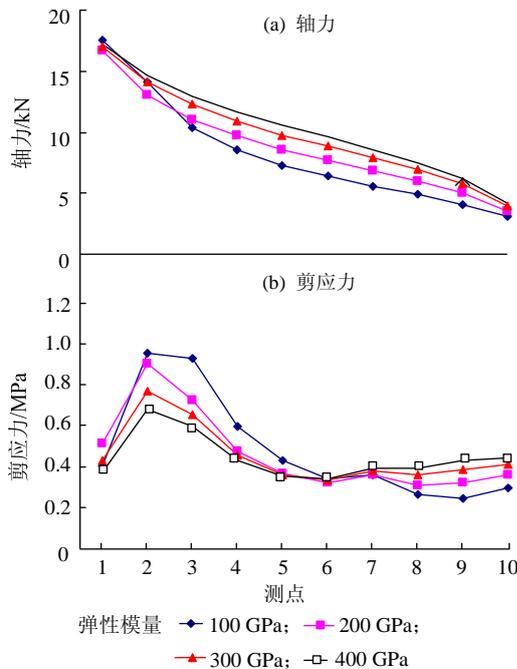


图 8 锚杆弹性模量对应力分布的影响
Fig.8 Influence of anchor's modulus on stress distribution

1) 由图 8a 可知，锚杆弹性模量对锚杆轴力分

布是有影响的。随着弹性模量的增大，轴力增加，在锚固段中部增加幅度较大，在锚固段两端头变化很小。弹性模量较大时，轴力曲线弯曲程度比较小，轴力分布梯度变化相对均匀。

2) 由图 8b 可知，锚杆弹性模量对界面剪应力分布是有影响的。随着锚杆弹性模量的增大，剪应力峰值减小，在锚杆拉拔端的集中程度减弱，剪应力的影响范围减小。由此可知，选用弹性模量较大的锚杆可以降低剪应力集中程度，增加锚固可靠性。

3.2 锚固剂弹性模量的影响分析

图 9 为锚固剂弹性模量对应力分布的影响，通过分析曲线可以得到以下结论：

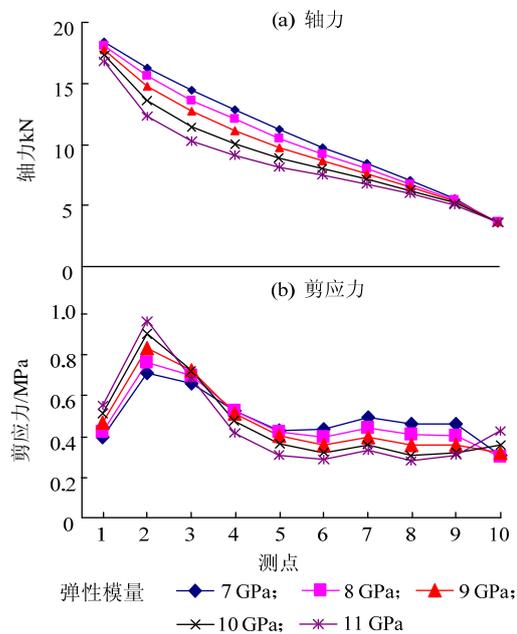


图 9 锚固剂弹性模量对应力分布的影响
Fig.9 Influence of anchor agent's modulus on stress distribution

1) 由图 9a 可知，锚固剂弹性模量对锚杆轴力分布是有影响的。弹性模量较低时，轴力分布曲线梯度变化比较平缓，随着弹性模量的增大，曲线弯曲程度加大，在锚杆两端头，轴力变化较小，在锚固段前半部分变化较大。

2) 由图 9b 可知，锚固剂弹性模量对界面剪应力分布是有影响的。随着锚固剂弹性模量的增大，在锚固段外端部分的剪应力增大，在内半部分的剪应力相应地减小，而且在锚杆拉拔端的集中程度增大，剪应力的影响范围减小。由此可知，选用弹性模量较小的锚固剂可以降低剪应力集中程度，增加锚固可靠性。

4 结 论

1) 锚杆轴力和界面剪应力沿锚固段的分布是不均匀的。轴力沿锚固段逐渐减小, 并且存在一个有效的锚固长度。剪应力在锚杆拉拔的孔口处值较小, 在远离孔口一定距离后达到峰值, 然后迅速下降。

2) 锚固体拉拔破坏过程可以分为 3 个阶段: 黏弹阶段、黏脱阶段和破坏阶段。在黏脱阶段, 锚杆拉拔端处的黏结首先破坏, 并且裂纹逐渐向内部扩展, 与此同时, 剪应力的峰值点随之向锚固段内部移动。

3) 锚杆和锚固剂弹性模量影响锚杆轴力和界面剪应力的分布形式。当锚杆弹性模量较大, 锚固剂弹性模量较小时, 剪应力在拉拔端附近的集中程度将降低。因此, 锚固设计中应选择弹性模量较大的锚杆或弹性模量较小的锚固剂, 以增加岩体工程锚固可靠性。

参考文献:

- [1] 谭云亮, 宁建国, 赵同彬, 等. 深部巷道围岩破坏及控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- [2] 赵同彬, 谭云亮. 岩体锚固理论与技术研究的进展[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(4): 1-7.
ZHAO Tong-bin, TAN Yun-liang. Progress of research on theories and technologies of rock mass anchorage[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2010, 29(4): 1-7.
- [3] 伍永平, 杨永刚, 来兴平, 等. 巷道锚杆支护参数的数值模拟分析与确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 398-401.
WU Yong-ping, YANG Yong-gang, LAI Xing-ping, et al. Numerical simulation and determination of bolt parameters of roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 398-401.
- [4] 杨峰, 王连国, 贺安民, 等. 复合顶板的破坏机理与锚杆支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 286-289.
YANG Feng, WANG Lian-guo, HE An-min, et al. Failure mechanism and bolt support technique of complex roof [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 286-289.
- [5] 沈荣喜, 刘长友, 郭永峰. 试谈锚杆支护的适应性[J]. 能源技术与管理, 2004, 28(1): 47-48.
SHEN Rong-xi, LIU Chang-you, GUO Yong-feng. Research of adaptability of the bolt supporting[J]. Energy Technology and Management, 2004, 28(1): 47-48.
- [6] 赵同彬. 深部岩石蠕变特性试验及锚固围岩变形机理研究[D]. 青岛: 山东科技大学资源与环境工程学院, 2009.
- [7] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学土木建筑学院, 2004.
- [8] 张瑞良, 董燕军, 唐乐人, 等. 预应力锚索锚固段周边剪应力分布特性的弹性理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4735-4738.
ZHANG Rui-liang, DONG Yan-jun, TANG Le-ren, et al. Elasticity analysis on distribution of shear stress along anchoring section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp 2): 4735-4738.
- [9] 战玉宝, 毕宣可, 尤春安. 预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 49-53.
ZHAN Yu-bao, BI Xuan-ke, YOU Chun-an. Analysis of factors influencing the stress distribution in prestressed cables[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 49-53.
- [10] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 锚杆界面力学试验及剪应力传递规律微观模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 220-224.
ZHAO Tong-bin, YIN Yan-chun, TAN Yun-liang, et al. Mechanical test of bolt interface and microscopic simulation of transfer law for shear stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 220-224.
- [11] 韦四江, 勾攀峰. 巷道围岩锚固体变形破坏特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 199-204.
WEI Si-jiang, GOU Pan-feng. Experimental study on deformation and failure characteristics of anchored body in roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 199-204.