

# 深部大变形巷道锚杆支护理论与 技术研究进展

王卫军<sup>1,2\*</sup>, 董恩远<sup>1</sup>, 袁超<sup>1,2</sup>, 袁越<sup>2</sup>

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**深部大变形巷道的锚杆支护问题是目前煤炭开采领域科学研究的热点之一。简要总结了传统的锚杆支护理论和近年来国内外学者专家提出的深部巷道支护新理论和新技术,介绍了本团队在深部巷道锚杆支护研究方面取得的阶段性成果。认为深部巷道围岩存在不可控的“给定变形”;锚杆预应力及支护阻力无法控制深部巷道塑性区的发展,预应力对抑制破碎区围岩的离层、剪胀等非连续变形作用较大;锚杆施加高预应力可在围岩中产生较大压应力带,充分发挥锚杆主动支护作用与群锚功能,可有效降低塑性区向深处扩展速率;锚杆从支护到失效,其锚固力随围岩变形一般要经历稳定、减小、残余锚固力3个阶段;深部大变形巷道锚杆支护应满足2个条件,所受载荷不超过极限强度、锚固基础不受塑性区影响;采用基于高阻让压设计理念的可接长锚杆能较好的适应深部巷道锚杆支护要求。

**关键词:**深部大变形;锚杆支护;给定变形;塑性区;可接长锚杆

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)02-0001-10

## Research Progress on Theory and Technology of Bolt Support in Deep Roadway with Large Deformation

Wang Weijun<sup>1,2</sup>, Dong Enyuan<sup>1</sup>, Yuan Chao<sup>1,2</sup>, Yuan Yue<sup>2</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The problem of bolt support in deep roadway with large deformation is one of the hotspots in the field of coal mining. In this paper, the traditional theory of bolt support are briefly summarized, and the new theory and new technology of deep roadway support are put forward by experts both at home and abroad in recent years, and it introduces the achievements of the team in the research of deep roadway bolting. It is considered that there is a “given deformation” in deep roadway. The prestress and support resistance of anchor rod cannot control the development of the plastic zone of deep roadway, but the prestress has a greater effect on the discontinuous deformation of separation and shear expansion of the surrounding rock. The application of high prestress of anchor bolt can produce a large compressive stress zone in the surrounding rock, and give a full play to the function of bolt active support and group anchor, which can effectively reduce expansion rate of the plastic zone to the depth. From the support to failure of the anchor, with the deformation of surrounding rock the anchoring force usually has three stages of stability, reduce and residual anchoring force. The bolt support of deep large deformation roadway should meet two conditions, the load is not exceeding the ultimate strength, the anchor

收稿日期:2017-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51434006;51374105);湖南省教育厅科研资助项目(15C0551)

\*通信作者,E-mail: wjwang@hnust.edu.cn

foundation is not affected by plastic zone. Based on the design concept of high resistance and pressure, the long bolt can meet the two conditions of bolt support.

**Keywords:** deep deformation; bolt support; given deformation; plastic zone; butt long bolt

锚杆支护由于其成本低、施工简单、巷道有效断面大、有利于采煤工作面快速推进、有利于提高掘进速度等优点,在煤矿巷道围岩控制中得到了广泛的应用。目前国内70%以上的煤矿巷道采用锚杆支护,部分矿区甚至达到100%。同时,锚杆支护理论与技术的研究也取得了很重要成果,如高预应力锚杆支护理论,锚杆支护成套技术等,有力地推动了煤矿的技术进步<sup>[1-5]</sup>。然而,随着煤矿开采深度的不断加大,巷道围岩条件和应力环境的劣化,尽管大幅度提高了锚杆支护强度,巷道维护仍然难以取得预期效果,大变形、报废的巷道越来越多,安全事故也时有发生。因此,简单照搬现有理论指导深部巷道的支护已无法满足要求,对深部巷道的支护机理需要进行进一步审视和认识。

## 1 锚杆支护理论的研究成果

### 1.1 传统支护理论

传统锚杆支护理论都是基于一定的假说提出的,主要有悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论和最大水平应力理论等<sup>[6-10]</sup>,它们分别从不同的角度和不同的条件阐述了各自的作用机理。这些理论对生产实践中的不同围岩条件下的支护起到了一定的指导作用,但也都具有一定的局限性。

**悬吊理论.**由于巷道开挖以后围岩应力状态的变化,围岩中一定区域内将可能发生岩石的松动和破裂现象,或被裂隙切割的岩块因失去足够约束而成为危岩,此时锚杆的作用如同“钉钉子”原理,就是利用其抗拉能力将松软岩层或危岩悬吊于稳定岩层之上,从而保持巷道顶帮的稳定。该理论只考虑锚杆的抗拉作用,不考虑抗剪作用,能较好地解释锚固顶板范围内有坚硬岩层时的锚杆支护,如果顶板中没有较为稳定的坚硬岩层或软弱破损岩层厚度较大,围岩破裂松动范围较大,无法将锚杆锚固到顶板的坚硬岩层上,悬吊理论就不适用。

**组合梁理论.**在许多情况下,坚固稳定的老顶并不在普通顶板锚杆长度范围内,不过顶板锚杆仍然能够应用其中。为了解决悬吊理论的局限性,在层状地层中提出了组合梁理论。实际上,层状顶板的下垂和离层导致了沿层界面的垂直运动和水平运动。此时,锚杆的主要作用在于一方面依靠锚杆提供的锚固力增加各岩层之间的摩擦力,防止其之间的滑动,避免离层现象的产生;另一方面锚杆杆体可以增加岩层之间的抗剪刚度,阻止岩层之间的水平错动,将锚固区内的若干薄岩层锁紧成一个较厚的岩层,即“组合梁”。该理论可以较好的解释锚杆对层状顶板的支护作用,但对巷道帮部、底板不适用,组合梁的厚度也很难确定,当顶板较为破碎,各个岩层的连续性受到破坏时,组合梁也就不存在了,难以应用于工程实践中。

**组合拱理论.**组合拱理论主要是针对拱顶巷道提出的,在拱顶围岩破裂区范围内安装间距较小的预应力锚杆,锚固范围内的岩体会形成一个均匀的压缩带,即“组合拱”。该压缩带一方面可以承受自身的重量,同时又可承受一定的外部载荷。组合拱理论在一定程度上揭示了锚杆的整体支护作用,在拱形巷道的软弱岩层中得到了广泛的应用。组合拱理论的关键在于获取较大的组合拱厚度,其厚度越大,越有利于拱顶的稳定。但实际工程中影响组合拱厚度的影响因素很多,难以准确估计。当组合拱厚度远小于巷道的跨度时,组合拱是否能够有效保障自身的稳定性,在该理论中并没有考虑。

**最大水平应力理论.**该理论认为矿井岩层的水平应力通常大于垂直应力,并且水平应力具有明显的方向性,巷道顶底板的稳定性主要受水平应力的影响。与最大水平应力方向平行的巷道受其影响最小,顶底板的稳定性也最好;与最大水平应力方向垂直的巷道,其顶底板稳定性最差。在最大水平应力作用下,顶底板岩体易于发生剪切破坏,产生较大范围的破裂区,锚杆的主要作用在于约束沿轴向岩层的膨胀变形和垂直与轴向的岩层剪切错动。因此,要求锚杆具有高刚度、高强度、高剪切阻力的工作性能,但由于受煤层赋存条件和开采方式的限制,很难确保巷道布置方向与最大水平应力方向平行,在巷道开拓之前,也难以准确判断出某地方的最大水平应力方向和其大小,因此,该理论也存在一定的局限性。

## 1.2 锚杆支护理论与技术研究进展

20世纪80年代以来,随着我国煤矿开采深度的增加,我国学者对深部巷道支护理论与技术逐渐重视起来,经过几十年的发展,现已形成的几种具有代表性的支护理论有:轴变理论、联合支护理论、锚喷-弧板支护理论、松动圈理论、围岩强度强化理论、主次承载区支护理论、关键部位耦合支护理论以及高预应力、强力锚杆一次支护理论等<sup>[11-19]</sup>,同时形成了一系列的支护技术<sup>[20-27]</sup>。

侯朝炯教授基于物理模拟试验研究,提出了“围岩强度强化理论”。该理论的提出主要针对的是峰后破裂区范围内的围岩,通过锚杆锚固强化作用改善锚固区巷道围岩力学参数与力学性能,提高锚固区围岩的强度,进而增强锚固区围岩的承载能力,减小破碎区和塑性区的范围,抑制破碎区和塑性区的发展,以达到维护巷道围岩稳定性的目标。“围岩强度强化理论”揭示了锚杆支护的作用机理,为工程实践中锚杆合理支护参数的设计提供了理论依据。

何满潮院士基于巷道围岩变形破坏时空关系提出了“关键部位耦合支护理论”。该理论认为,深部高应力巷道总是从某一部位或其他几个部位最先开始变形破坏,并不断向其它部位发展最终导致巷道整体失稳,将最先发生破坏的部位称之为“关键部位”。“关键部位”的产生是由于支护结构与巷道围岩在强度与刚度不耦合造成的。因此,该理论强调只要巷道围岩与支护体在强度、刚度以及结构上相互耦合时,巷道围岩控制才能取得较好的效果。

于学馥教授提出了“轴变理论”,该理论认为巷道围岩应力超过岩体强度极限后将会发生顶板冒落,巷道顶板冒落后可以自稳,但是顶板冒落改变了巷道轴比,围岩应力会出现重新分布,直至达到自稳平衡,应力均匀分布的巷道轴比将是巷道最稳定的轴比。据此建立了椭圆形破坏区力学计算模型,提出了巷道最佳轴比的计算公式,对巷道断面设计和支护提供了理论依据。

董方庭教授等人根据声波检测仪在现场探测的结果提出了“围岩松动圈理论”,其基本观点是:开挖巷道后围岩应力重分布,当围岩应力超过围岩极限强度后,便会产生塑性破坏形成松动圈,该理论认为围岩变形主要是由于其碎胀压力引起,巷道支护的对象主要是松动圈形成过程中产生的碎胀变形压力,围岩产生塑性破坏的深度即为围岩松动圈的大小,其决定了围岩的稳定性,因此根据松动圈的大小来确定支护的强度。

冯豫教授根据工程实践,在总结新奥法支护的基础上,提出了“联合支护理论”。该理论认为,巷道开挖后的初期支护应进行柔性支护,允许巷道存在一定的变形,释放部分变形压力,当巷道围岩变形到相对稳定状态时再进行刚性支护,强调对巷道围岩采用“先柔后刚、先让后抗、柔让适度、稳定支护”的支护原则。在工程应用中先后出现了锚网喷+注浆+U型钢支架、锚网喷+工字钢、锚网喷+注浆加固等形式。

孙均,郑雨天教授等提出的“锚喷-弧板支护理论”,该理论是对“联合支护理论”的补充和发展,对深部软岩巷道不能总是强调放压,放压到一定程度,需要坚决顶住,控制围岩向临空面的移动,以满足软岩“边支边让,先柔后刚,柔让适度,刚强足够”的支护特点,强调了软岩巷道先柔后刚的支护特征。

方祖烈教授根据围岩中拉压域的分布提出了“主次承载区”协调作用的支护理论,该理论认为巷道围岩压缩域在围岩稳定中起关键作用,作为主承载区;经过支护的张拉域也具有一定的承载能力,起辅助作用,作为次承载区。主次承载区协调作用,承担着围岩开挖失去的承载以及围岩强度降低转移过来的荷载,而张拉域的增大将会引起压缩域的减小,因此围岩表面的张拉域是围岩控制中的关键所在。

康红普院士针对深部开采与受强烈动压影响的2类高应力巷道的特点,分析锚杆支护作用机制的基础上,提出了“高预应力、强力锚杆一次支护理论”,遵循“三高一低”原则,即高刚度、高强度、高可靠性、低密度原则。指出对于高应力、复杂困难巷道,应尽量实现一次支护就能有效控制围岩变形与破坏,避免二次或多次支护。

马念杰教授针对深部大变形巷道研发了可接长锚杆取代锚索的支护技术,可接长锚杆消除了锚索延伸率不足,抗冲击性能差的缺陷,安装时不受巷道断面的限制,能够适应巷道大变形的要求。

柏建彪教授针对深部软岩巷道四周来压、整体收敛、变形强烈的特点,研究深部软岩巷道支护原理,提出了主动有控卸压的方法,释放围岩膨胀变形能,将高应力向围岩深部转移,减小浅部围岩应力。

王连国教授针对深部高应力软岩巷道变形特征,根据长期现场监测结果,提出了“中空注浆锚索和高强注浆锚杆”为核心的新型深-浅耦合全断面锚注支护技术体系,借助渗流力学理论建立了深-浅耦合锚注浆液的渗流基本方程,并结合 COMSOL 软件模拟再现了浆液在围岩内的渗透扩散过程。

李大伟教授基于理论研究和现场多种支护方式分析,针对软岩巷道提出了一次支护让压,二次大刚度高强度支护原理.一次支护让压主要作用在于充分发挥围岩的承载能力,二次大刚度高强度支护主要为避免处于高应力条件下的巷道围岩强度劣化所导致的自身承载能力降低,最大程度的减小岩体偏应力,促进巷道围岩长期稳定。

何富连教授认为巷道围岩开挖引起偏应力集中,塑性破坏范围增大,岩层内部剪切错动,产生膨胀性大变形,支护系统极易失效.因此,深部高水平构造应力巷道围岩控制重点在于降低应力集中程度,实现围岩应力均匀分布,避免局部高水平应力对围岩的破坏,据此提出“高强度高预紧力长锚杆+大直径高强锚索+U型钢可缩性支架+壁后注浆”的综合控制方案,并阐述了其支护机理。

毕业武针对双河煤矿深部大变形巷道的控制难题,提出“围岩改性增强+围岩表面应力恢复+围岩卸压应力转移”相结合的围岩控制对策,并结合实际提出“钻锚注一体化+高预应力多维锚索桁架支护系统+顺层钻孔与巷道基角药壶爆破卸压”成套技术体系。

何满潮院士为解决煤矿锚索材料在缓慢大变形和瞬时大变形支护时出现的问题,提出了基于巷道大变形控制理念,研制了恒阻值为 350 kN 的煤矿专用恒阻大变形锚索,恒阻大变形锚索能够在适应围岩大变形过程中,通过对围岩提供恒定的支护阻力,实现岩体内部变形能量的有控制性释放,从而达到支护体-围岩共同作用的巷道稳定性控制目标。

李海燕教授针对现有支护材料及工艺难以适用于深部软岩巷道大变形的支护难题,研发了新型预应力锚索及配套工艺,提出了以新型高预应力锚索和注浆锚杆为核心的联合控制技术,即支护初期采用以新型高预应力锚索为主,金属网、混凝土喷层为辅的柔性支护,后期进行全断面注浆,内外结合,从根本上提高支护强度。

综上所述,过去几十年国内学者已经围绕深部大变形巷道支护做了大量深入的研究,提出了一系列重要的关于锚杆支护机理的论述和卓有成效的支护技术.但总体来看,深部巷道锚杆支护效果仍然不太理想,因此,对深部巷道锚杆支护机理的认识仍然有必要进一步深入。

## 2 锚杆作用机理分析

### 2.1 掘巷对围岩应力场的影响

采矿工程中最根本的问题不是阻止围岩破坏,而是确保巷道围岩不发生不可控的过量位移.巷道开挖前后围岩分别处于 2 种不同的应力状态,开挖后应力重新分布,使得巷道最大主应力(如切向应力)高于原岩应力,而最小主应力(如径向应力)却相对原岩应力有所降低,巷道周边围岩将产生很大的应力差,当应力差未达到岩体破坏强度时巷道仍处于弹性平衡的稳定状态,相反,围岩会产生塑性变形或剪切错动而形成破裂区与塑性区,围岩的应力峰值点逐渐转移到深部,直到形成新的平衡<sup>[28]</sup>,如图 1 所示。

对于双向等压巷道,围岩处于弹性变形状态时,围岩应力为

$$\sigma_{\theta} = p \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right). \quad (2)$$

围岩处于弹塑性状态时,弹塑性边界处的应力为

$$\sigma_{\theta} = p \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{R_p^2}{r^2} [p(1 - \sin\varphi) - C \cos\varphi]; \quad (3)$$

$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{R_p^2}{r^2} [p(1 - \sin\varphi) - C \cos\varphi]. \quad (4)$$

式中: $\sigma_\theta$  为切向应力; $\sigma_r$  为径向应力; $p$  为原岩应力; $a$  为巷道半径; $r$  为围岩中任意点半径; $R_p$  为塑性区半径; $C, \varphi$  为围岩的粘聚力与内摩擦角.

通过比较弹性状态与弹塑性状态的应力分布可知,相当于巷道半径为  $R_p$  的弹性应力状态,  $\frac{R_p^2}{r^2}[p(1 - \sin\varphi) - C\cos\varphi]$  则是由于塑性区的存在而产生的应力变化.正是由于塑性区的存在,导致最小主应力增大,而最大主应力减小,应力圆半径变小使岩体不容易发生破坏,塑性区对弹性区起到了支护的作用.假如将塑性区岩石取出,巷道半径变为  $R_p$ ,应力圆将再一次增大,重新产生新的塑性区,如图 2 中莫尔圆①与莫尔圆②.因此,通过维护塑性区内岩石防止发生冒顶而间接增大巷道半径的途径,能有效改善塑性区外的应力状态,有利于维护巷道.

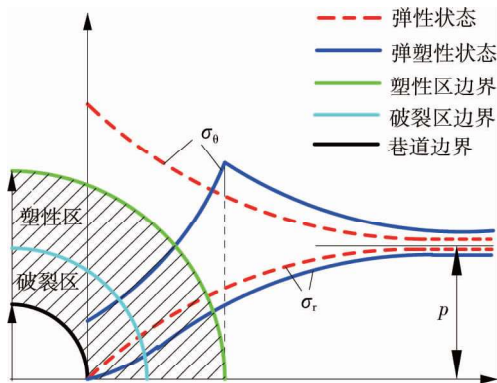


图 1 围岩弹塑性应力分布

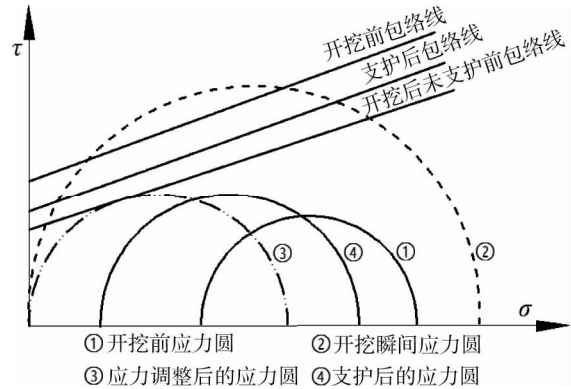


图 2 巷道开挖前后应力状态的变化

### 2.2 锚杆支护阻力对围岩塑性区、应力场的影响

在深埋巷道顶板中施加 120 kN 的预紧力锚杆,通过数值模拟发现, -1 MPa 应力曲线至顶板深处的应力场基本没有发生变化,而浅部的拉应力场被压应力场所代替,如图 3 和图 4 所示<sup>[29]</sup>.导致这种现象的原因在于,由于巷道围岩原岩应力与其所处理深有关,深部巷道原岩应力能达到几十兆帕,由于锚杆材料极限强度及施工技术决定了目前的锚杆支护阻力不足 1 MPa,远远小于原岩应力,两者远不在同一个数量级,相对较小的支护阻力难以改变围岩深部应力场的演化进程;而巷道周边围岩的残余强度较低,锚杆支护阻力与其残余强度基本处于同一数量级,锚杆支护阻力能够明显改善浅部破裂区围岩的受力状态.对该巷道锚杆施加 1 MPa 的支护阻力与无锚杆支护时的塑性区对比图也可以看出,如图 5 和图 6.施加较大的锚杆支护阻力与无锚杆支护情况下相比,塑性区范围基本没有变化,依靠支护阻力不能达到减小塑性区的目的.

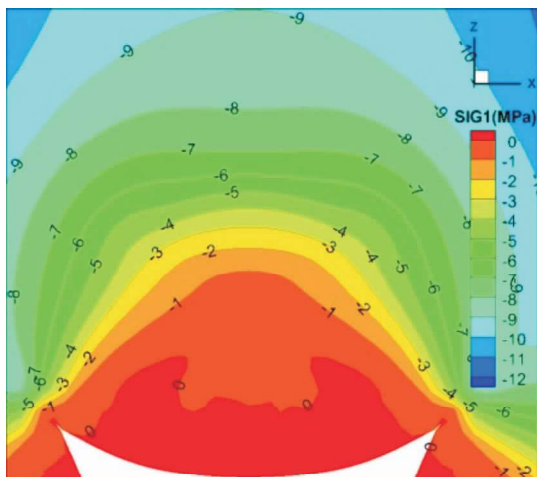


图 3 原岩应力场分布

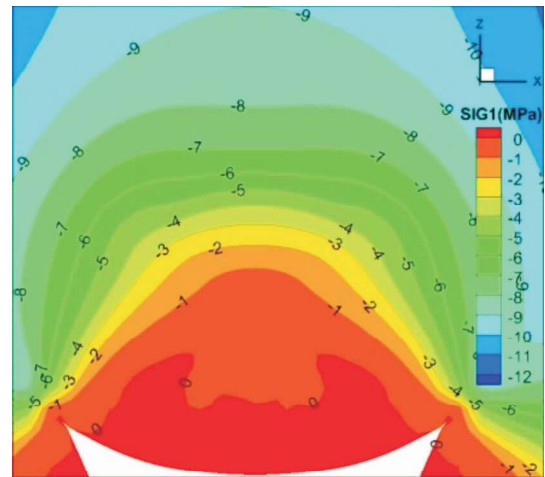


图 4 预紧力锚杆支护应力场分布

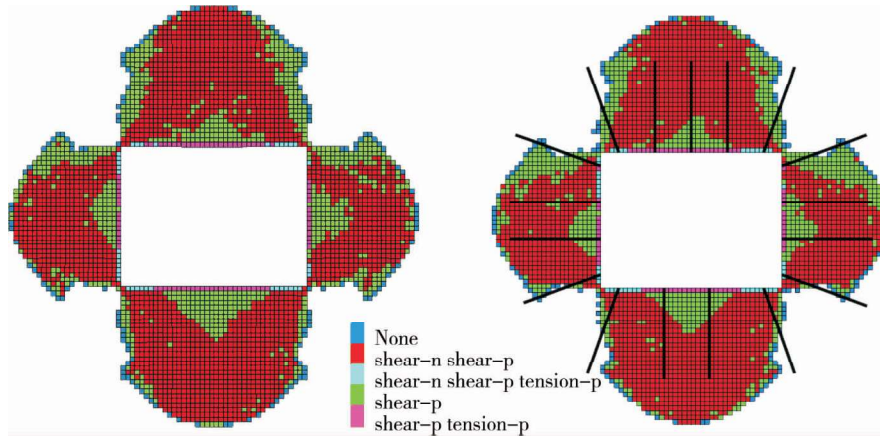


图5 无锚杆支护塑性区分布形态

图6 有锚杆支护塑性区分布形态

### 2.3 锚杆支护阻力对围岩变形的作用分析

深部高应力巷道围岩位移主要由2部分组成,一部分为高应力致使巷道围岩产生的以弹塑性变形为主的连续性变形,包括弹性变形与塑性变形;另一部分是以巷道周边浅部围岩破裂区岩体的剪胀及离层为主的非连续性变形.由于塑性分析较为复杂,一般仅分析处于均质各向同性无限介质中静水压力作用下的圆形巷道,岩石的塑性遵循线性莫尔-库伦准则.同时,在计算塑性区位移时,假定塑性区内体积不变,因此,弹性区位移与塑性区位移计算公式相同,不同之处在于半径 $r$ 的取值范围,分别为各自的区间,围岩位移公式<sup>[30]</sup>为

$$u = \frac{\sin\varphi}{2Gr} \left( p + \frac{C}{\tan\varphi} \right) R_p^2; \quad (5)$$

$$R_p = a \left[ \frac{2}{\xi + 1} \frac{p(\xi - 1) + \sigma_c}{\sigma_c + (\xi - 1)p_i} \right]^{\frac{1}{\xi - 1}}; \quad (6)$$

$$\xi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}. \quad (7)$$

式中: $u$ 为围岩位移; $G$ 为剪切模量; $p_i$ 为支护阻力; $\sigma_c$ 为单轴抗压强度.

由式(5)~式(7)知,当围岩所处应力环境一定时,弹塑性区位移量随锚杆支护阻力增加而减小,且随支护阻力的增加位移量降低幅度逐渐减小,说明支护阻力对减小围岩位移量的作用是有限的,总是存在一部分变形量无法控制,即巷道围岩存在“给定变形”.

塑性区与弹性区相比,虽岩性发生变化,但仍属于完整岩体,通过弹塑性理论可以计算出其位移,而破裂区岩体为非完整性岩体,不适用于弹塑性理论方法,无法用解析方法得到精确结果.但是,破裂区围岩沿剪切面错动导致的剪胀变形是围岩变形的主要部分,是支护的主要对象.破裂区岩体剪胀变形量与破裂区围岩体积成正相关,因此,控制围岩的变形主要是控制破裂区范围的扩大以控制破裂区围岩的剪胀变形.

### 2.4 锚杆预应力的作用分析

由围岩的极限平衡条件<sup>[30]</sup>可知:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} + 2C \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}. \quad (8)$$

在破裂区,式(8)中相当于最大主应力(切向应力),相当于锚杆支护阻力(最小主应力).对于深部高应力巷道, $C$ 值较小,而巷道开挖后,围岩又发生损伤软化.大量实验结果表明,围岩发生破坏后, $\varphi$ 值降低较小,主要是 $C$ 值的降低,而巷道周边破裂区围岩无围压, $C$ 值更是基本降为零,需要施加支护阻力来保持围岩稳定.由式(8)可知增加支护阻力则最大主应力值增大,莫尔圆整体右移而变得远离强度包络线,如图2中由莫尔圆③变成了莫尔圆④;同时,增加支护阻力能改善围岩不连续面的强度和变形模量等力学特性,可一定程度提高破裂岩体的内聚力与内摩擦角,有利于围岩的稳定.

由文献[31]知,当围岩围压为零时,残余强度接近零,岩石变形主要表现为沿裂隙面的滑动,滑动到