

一定程度围岩出现冒落,冒落意味着巷道半径增大,引起塑性区向外扩张;当围压为 1 MPa 时,围岩的应力峰值没有变化,而残余强度却接近 9 MPa,围岩破裂区的岩体强度得到很大提高,围岩残余强度表现出对围压极强的敏感性,这是因为巷道周边围岩的残余强度较低,与预应力锚杆产生的支护阻力基本处于同一数量级,提高了围岩残余强度.因此,锚杆的高预应力对提高围岩的峰值强度作用很小,但能有效提高围岩的残余强度,从而提高破裂区围岩的自承能力,有效抑制了破裂区围岩的冒落,也可间接控制塑性区向外扩张速率,改善深部大变形巷道的支护效果.

通过对层状顶板巷道进行数值模拟也发现,预应力锚杆对顶板的塑性区影响也较小,如图 7 所示.但是预应力锚杆能有效减小顶板的离层量,无锚杆支护时位于围岩表面的顶板最大下沉量为 298.9 mm,当锚杆施加预紧力为 30,60,120 kN 时,顶板最大下沉量分别为 143.3,139.8,133.6 mm,顶板下沉量降幅分别为 155.60,159.10,165.27 mm,降幅比例为 52.1%,53.2%,55.3%;而预紧力对顶板深处岩层的沉降能力则逐渐下降,最深处测点的沉降幅度仅为 15.7%,16.3%,17.6%,如图 8~图 10 所示.可见,当锚杆预紧力提高到一定程度后,离层可得到较好的控制,但不同预紧力锚杆对相同位置测点的围岩顶板沉降量基本相同,说明一味地提高预紧力并不能完全控制围岩变形,锚杆预紧力对控制深部围岩变形的作用十分有限,围岩中始终存在一部分因开挖导致无法控制的变形,这部分变形即为围岩的“给定变形”<sup>[32]</sup>.由此也说明围岩中存在锚杆无法控制的“给定变形”,而预应力锚杆支护主要是控制浅部破裂区围岩的离层和剪胀变形.

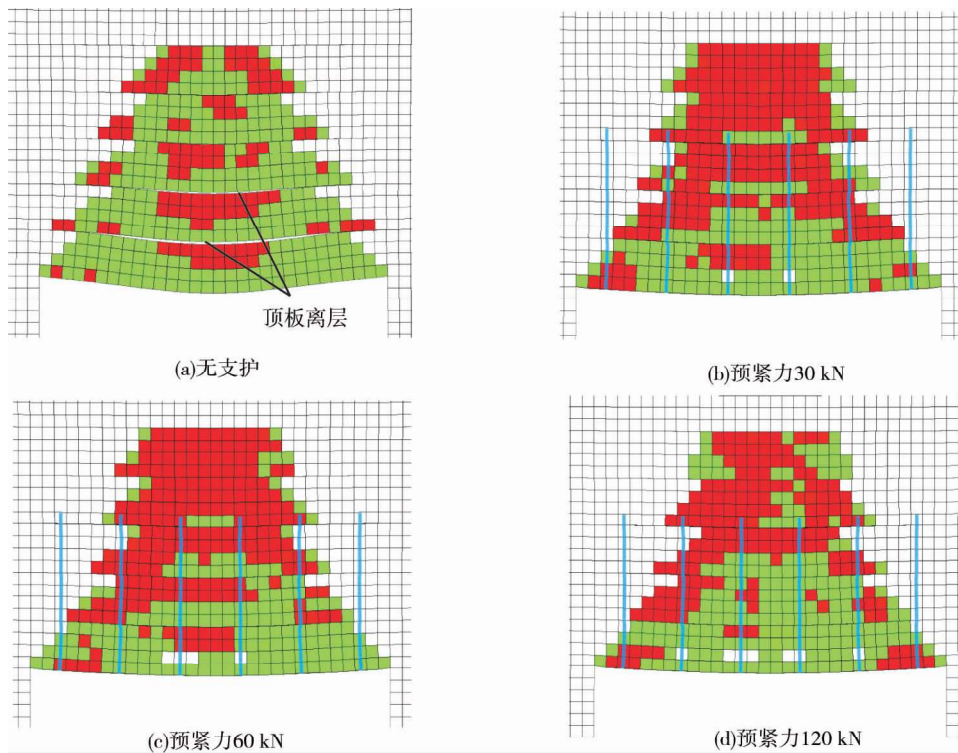


图 7 不同预紧力下围岩塑性区分布

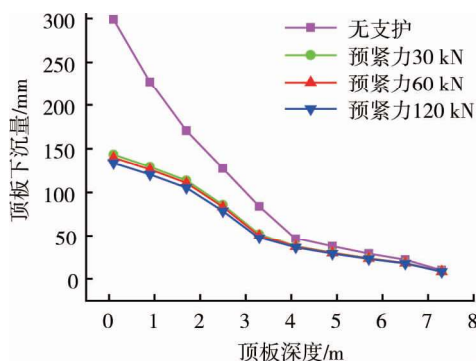


图 8 顶板测点位移

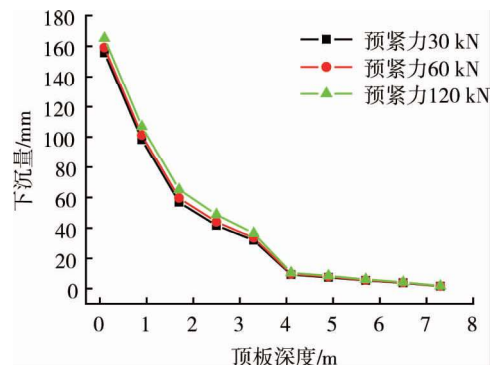


图 9 支护与无支护顶板下沉差值

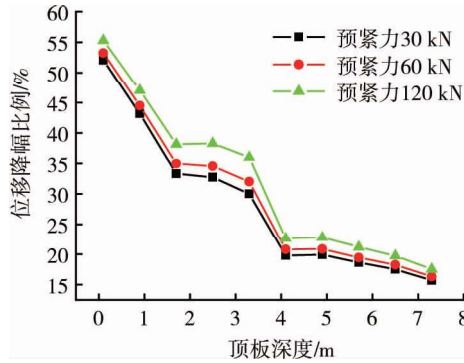


图 10 预紧力锚杆沉降比例

由于锚杆预应力与原岩应力不在同一数量级,锚杆应力场在原岩应力场中无法得到直观体现,为此,通过不考虑原岩应力场来分析不同预紧力锚杆的应力场分布特征,可以发现如下现象:施加预紧力的锚杆会在围岩中产生有效的径向约束,阻止浅部围岩的离层,同时在锚杆尾部形成一定范围的压应力区.当每根锚杆施加预紧力为 30 kN 时,相邻锚杆的锚尾附近形成的压应力值较小,在 0.03~0.06 MPa 之间,锚固段位置压应力区间为 0.01~0.03 MPa,如图 11 所示.当每根锚杆施加预紧力为 120 kN 时,锚杆锚尾之间形成的压应力值较大,压应力区间为 0.07~0.10 MPa,锚固段位置压应力区间为 0.03~0.07 MPa,如图 12 所示.而压应力愈大愈可较好发挥群锚作用,对破裂区围岩自承载能力的保护也更充分,也能有效的降低破裂区的扩展速率.因此,高预应力锚杆在支护范围内能产生较大的压应力,锚杆的主动支护作用得到充分发挥,有效延缓了围岩破裂区的扩展速率.

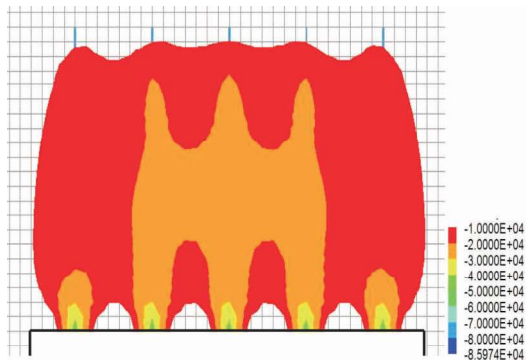


图 11 预紧力 30 kN 压应力场分布

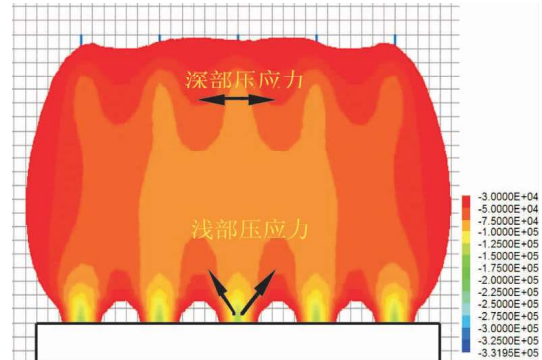


图 12 预紧力 120 kN 压应力场分布

因此,锚杆预应力的作用主要是控制浅部围岩离层、破裂块体滑移剪胀、对破裂区岩体残余强度有所提高以及在锚固区形成有效压应力区,提高预应力可提高锚杆作用效果.但当预应力提高到一定值后,其影响将逐渐降低<sup>[33]</sup>.

### 3 深部大变形巷道锚杆支护的时空效应

#### 3.1 锚杆支护时空效应分析

锚杆要起到有效的支护作用需要有足够的锚固基础提供一定的锚固力来实现,在围岩变形过程中,在锚固基础尚未破坏的情况下,锚杆所受载荷与时间有关,随着围岩变形锚杆受载逐渐上升到弹性极限载荷,然后发生塑性拉伸,直至锚杆发生断裂为止.而在深井巷道中,大部分锚杆受载并未达到弹性极限载荷,巷道却发生了大变形,远远超过了锚杆的可延伸量,这是因为深部巷道围岩在高应力的作用下塑性区扩展削弱了锚固基础所致.假设锚杆为理想弹塑性材料,随围岩塑性区的扩展,根据塑性区的边界位置与锚杆锚固段相对位置,将锚固力随时间的变化划分为 3 个阶段,具体如下:

锚固力稳定阶段(图 13a,图 14AB 段),此阶段的特点是塑性区边界始终位于锚固基础以内部分,锚固基础不受塑性区影响,锚固力也未出现削弱,此时锚杆锚固力最大,锚杆受载随围岩变形持续增加,最大受

载位置位于锚固基础自由端,锚杆受力如图 15 中  $t_1$ .

锚固力逐渐削弱阶段(图 13b,图 14BC 段),此阶段的特点是塑性区边界发展到锚固基础内,位于塑性区内的锚固基础的锚固力降低到残余锚固力,锚杆的总体锚固力受到削弱,其支护能力随之下降,此时锚杆的支护作用主要依靠塑性区外的锚固基础提供的锚固力,锚杆受力如图 15 中  $t_2$ .

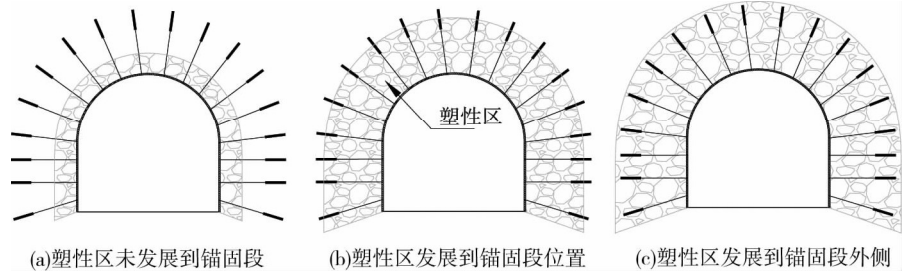


图 13 塑性区与锚固段相对位置示意图

残余锚固力阶段(图 13c,图 14CD 段),此阶段的特点是塑性区的边界位置位于锚固基础以外,锚杆的锚固力基本丧失,仅剩围岩与锚固剂间界面极小的摩擦阻力,锚固力丧失导致巷道围岩的变形不受控制而出现大变形现象,锚杆受力如图 15 中  $t_3$ .

综上所述,随着围岩塑性区范围越来越大,锚杆的有效锚固长度越来越短,锚固力经历一个由大到小的变化过程,当锚杆完全进入围岩塑性区,无论锚杆是否破断,锚杆的作用基本消失.因此,一味的增加锚杆支护密度与支护强度,并不能取得相应的支护效果.深部大变形巷道的锚杆支护应充分考虑锚杆的时间效应与空间效应,保证锚杆具有足够锚固力的同时确保锚固基础不因塑性区范围扩大而失效.

采用锚索固然可以使锚固基础不受塑性区的影响,但是锚索的延伸量有限,远小于围岩变形量,容易引起锚索破断.因此,在深部巷道中充分发挥锚杆支护作用的 2 个条件:所受载荷不超过极限强度、锚固基础在塑性区以外.

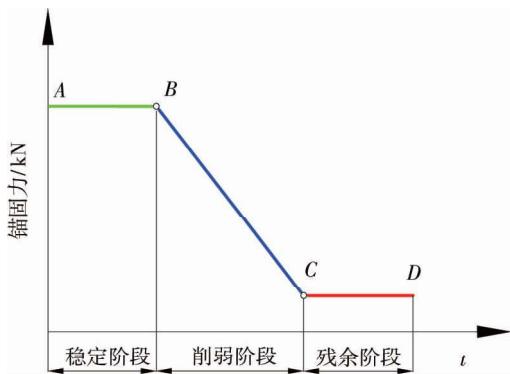


图 14 锚固力变化示意图

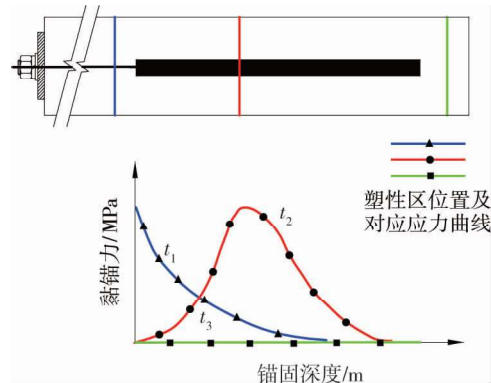


图 15 锚固段黏锚力分布示意图

### 3.2 可接长锚杆的支护原理

中国矿业大学(北京)马念杰教授研制的一种可接长锚杆可满足上述 2 个条件.该锚杆可根据支护的深度设置锚杆的长度,采用该类锚杆进行巷道支护,能够避免塑性区对锚固基础的影响;同时,该锚杆基于高阻让压的设计理念,随围岩变形增加,可接长锚杆的拉应力增加到设定应力阈值后,杆体迅速进入塑性变形阶段,杆体伸长后,围岩变形能得到充分释放,外载荷下降到设定阈值以下,锚杆停止延伸,巷道围岩再次处于相对稳定状态,如此反复避免了杆体拉应力无节制增加,避免了锚杆过早破断以及锚固剂与围岩界面的稳定,可接长锚杆布置示意图如图 16 所示.

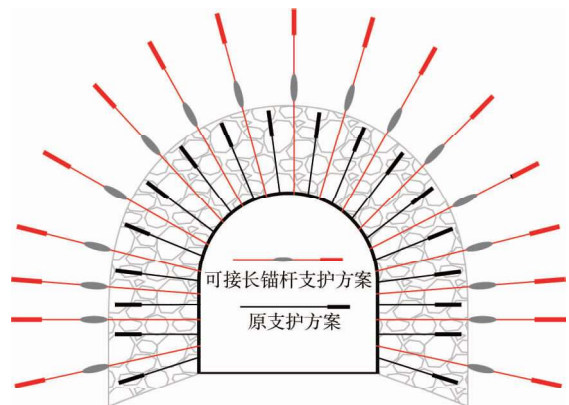


图 16 可接长锚杆支护示意图

## 4 结论

1) 锚杆支护阻力与完整围岩中的地应力不在同一数量级, 支护阻力对完整围岩应力场与塑性区的改变有限, 对控制完整岩体连续变形的作用较小, 但对抑制破碎围岩的离层、剪胀等非连续变形有较大的作用。

2) 高预应力锚杆能在围岩中产生较大的压应力值, 在破碎围岩中形成压应力带, 充分发挥了锚杆的主动支护作用, 并有效延缓围岩塑性区的扩展速率。

3) 深部大变形巷道锚杆的锚固力变化经历 3 个阶段: 锚固力稳定阶段、锚固力逐渐削弱阶段、残余锚固力阶段, 要提高锚杆支护效果, 其所受载荷应不超过极限强度、锚固基础应不受塑性区影响。

4) 采用基于高阻让压设计理念设计的可接长锚杆可满足深部巷道锚杆支护的 2 个条件, 高阻让压保证了锚杆受载一直低于极限强度, 长度可变可保证锚固基础不受塑性区影响。

## 参考文献:

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] 杨双锁, 康立勋. 煤矿巷道锚杆支护研究的总结与展望[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 376-381.
- [3] 王金华. 我国煤矿锚杆支护技术的新发展[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 113-118.
- [4] 朱效嘉. 锚杆支护理论进展[J]. 光爆锚喷, 1996(1): 5-12.
- [5] 方新秋, 赵俊杰, 洪木银. 深井破碎围岩巷道变形机理及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 1-7.
- [6] 李锡润, 林韵梅, 郑雨天. 锚杆支护机理的探讨[J]. 东北工学院学报, 1981, 29(4): 21-31.
- [7] 杨双锁, 康立勋. 煤矿巷道锚杆支护研究的总结与展望[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 376-381.
- [8] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
- [9] 勾攀峰, 韦四江, 张盛. 不同水平应力对巷道稳定性的模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010(2): 143-148.
- [10] 赵庆民. 亭南煤矿煤巷锚杆(索)支护技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [11] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342-345.
- [12] 何满潮. 软岩巷道关键部位二次耦合支护技术[C]//世纪之交软岩工程技术现状与展望. 中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会、煤矿软岩工程技术研究推广中心, 1999: 6.
- [13] 于学馥, 乔端. 轴变论和围岩稳定轴比三规律[J]. 有色金属, 1981, 33(3): 8-15.
- [14] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21-32.
- [15] 冯豫. 我国软岩巷道支护的研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1990(2): 42-44.
- [16] 郑雨天, 祝顺义, 李庶林, 等. 软岩巷道喷锚网——弧板复合支护试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 1-10.
- [17] 方祖烈. 拉压域特征及主次承载区的维护理论[C]//世纪之交软岩工程技术现状与展望. 中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会、煤矿软岩工程技术研究推广中心, 1999: 4.
- [18] 康红普. 高应力巷道强力锚杆支护技术及应用[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 中国岩石力学与工程学会, 2008: 8.
- [19] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [20] 王连国, 陆银龙, 黄耀光, 等. 深部软岩巷道深-浅耦合全断面锚注支护研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 11-18.
- [21] 马念杰, 赵志强, 冯吉成. 困难条件下巷道对接长锚杆支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 117-121.
- [22] 柏建彪, 王襄禹, 贾明魁, 等. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 632-635.
- [23] 李大伟, 侯朝炯, 柏建彪. 大刚度高强度二次支护巷道控制机理与应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1072-1078.
- [24] 常庆粮, 周华强, 李大伟, 等. 软岩破碎巷道大刚度二次支护稳定原理[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 169-172.
- [25] 何富连, 张广超. 深部高水平构造应力巷道围岩稳定性分析及控制[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 466-476.
- [26] 毕业武, 蒲文龙. 深部高应力巷道大变形机理与控制对策[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(10): 1321-1325.
- [27] 李海燕, 张红军, 李术才, 等. 新型高预应力锚索及锚注联合支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 582-589.
- [28] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [29] 王卫军, 袁超, 余伟健, 等. 深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2921-2931.
- [30] 黄醒春. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [31] 陆士良. 锚杆锚固力与锚固技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [32] 王卫军, 袁超, 余伟健, 等. 深部高应力巷道围岩预留变形控制技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2156-2164.
- [33] 孟波, 靖洪文, 杨旭旭, 等. 破裂围岩锚固体变形破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2497-2505.

# 圆巷围岩塑性区形态特征 指标体系构建与分析

袁越<sup>1,2\*</sup>, 王卫军<sup>1,2,3</sup>, 李树清<sup>1,2</sup>, 赵延林<sup>1,2</sup>, 吴海<sup>1,2</sup>, 彭刚<sup>3,4</sup>

(1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,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;

3.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

4.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘要:**科学、合理的表征塑性区几何形态特征是定量分析评价围岩稳定性的重要基础.基于非对称圆巷塑性区边界解析式,探讨了塑性区随双向压力比的形态演化律及分布特征.在此基础上,应用几何形态学理论,建立了由第 I 类与第 II 类指标共同组成的圆巷塑性区形态特征指标体系.深入分析了各形态指标的内涵、差异及其与围岩稳定性的关系.结果表明,塑性区随双向压力比演变为蝶形、长叶蝶形后,各方位的塑性扩展深度均匀性显著减小,塑性区面积的增速远大于极限塑性扩展半径,且塑性区尺寸的变化更敏感,因此,在(超)高偏应力环境下,巷道愈发容易失稳破坏.均匀系数及形状不规则系数均可刻画塑性区形状均匀性、规则性特征,但采用形状不规则系数进行表征更能反映形态的变化差异.最后通过算例分析验证了各指标的科学性及其合理性,为巷道围岩稳定性定量评价及围岩分级奠定了指标基础.

**关键词:**圆巷;塑性区;形态特征;指标体系;围岩稳定性

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)02-0011-09

## Establishment and Analysis of the Index System for Morphological Characteristics of Plastic Zone Around Circular Roadway

Yuan Yue<sup>1,2</sup>, Wang Weijun<sup>1,2,3</sup>, Li Shuqing<sup>1,2</sup>, Zhao Yanlin<sup>1,2</sup>, Wu Hai<sup>1,2</sup>, Peng Gang<sup>3,4</sup>

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

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

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

4. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The important basis for quantitative analysis and evaluation of surrounding rock stability is that morphological characteristics of plastic zone are scientifically and reasonably represented. In this paper, based on analytical formula of plastic zone boundary of asymmetric circular roadway, the evolution law and distribution of plastic zone morphology with biaxial pressure ratio are discussed. On this basis, the index system for morphological characteristics of plastic zone around circular tunnel is established by using theory of geometric morphology, which is composed of class I and class II indexes. The connotation, difference of each index and the relation between surrounding rock stability and indexes are analyzed. Results show that after plastic zone evolves into butterfly-shape, butterfly-shape with long leaf with change of biaxial pressure ratio, uniformity of plastic expansion depth at all directions decreases obviously. Meanwhile, growth of plastic zone area is much greater

收稿日期:2017-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51434006;51504091;51374104);湖南省教育厅科研资助项目(15C0551)

\*通信作者,E-mail:yuanyuekafu@163.com

than that of limit plastic expansion radius, and the change of plastic zone size is more sensitive. So in (super) high deviatoric stress environment, roadway is easy to fail. The uniformity coefficient and irregular coefficient of shape can be used to describe the characteristics of uniformity and regularity of plastic zone shape. But coefficient of irregular shape can better reflect difference of morphologic change. Finally, an example is given to verify the scientificity and rationality of the indexes, which lays a good foundation for quantitative evaluation and classification of surrounding rock stability.

**Keywords:** circular roadway; plastic zone; morphological characteristics; index system; stability of surrounding rock

矿井巷道围岩破坏机理是进行巷道围岩控制的基础和关键,尤其是目前深部大变形巷道、动压巷道、冲击巷道的维护已成为岩石力学界及采矿界面临的重大难题<sup>[1-3]</sup>,使得围岩破坏失稳机制研究的重要性愈加凸显.国内近年来以塑性区的形成、扩展演化为突破点对巷道围岩变形破坏进行了深入研究,为揭示巷道围岩破坏机理提供了新的思路<sup>[4-6]</sup>.

虽然巷道围岩的变形破坏是在多种条件下的复杂过程,但其本质是围岩塑性区形成、发展演化的结果.因此,围岩塑性区的发育形态、演化规律与围岩稳定性、巷道破坏程度、破坏形式密切相关<sup>[7,8]</sup>.实际工程围岩的塑性区分布往往是不规则的,但采用理论解析、数值计算等方法掌握塑性区的一般形态演化及其几何分布特征对巷道围岩稳定性分析、支护设计、工程灾害防控等工程实践仍具有重要的现实意义<sup>[9,10]</sup>.

21世纪初期,人们较为关注地应力环境对塑性区形态分布的影响,其中文献[11,12]导出了非均匀应力场下的巷道围岩塑性区边界线方程,讨论了地应力场中侧压力系数对地下围岩塑性区大小及形状分布的影响.在此基础上,科研人员又开展了进一步的探索,例如文献[13-15]研究了应变软化、支护压力、渗透力、黏聚力、内摩擦角等参数对围岩塑性区的范围、形状、分布特征及岩体破坏形式的影响,获得了巷道围岩塑性区的形态演化规律.此外,文献[16,17]基于 Hoek-Brown, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 不同屈服准则建立了圆形巷道围岩的弹塑性分界线表达式,比较精确的描绘出了不同强度理论塑性区范围和形状,得到了巷道塑性区的形态演化规律.

近年来,蝶形塑性区理论的相关研究取得了重要进展,并有效地进行了应用.文献[4,18]研究了非均匀应力场下塑性区的分布规律、形态特征,得到了蝶形塑性区的形成条件.文献[19]导出了塑性区一般形态(圆形、椭圆形、蝶形)判定准则.文献[5,6]研究了塑性区形态特征及穿透性、旋转性与顶板失稳的关系.文献[20]探讨了动压围岩塑性区形态演化、恶性扩展,揭示了深部动压巷道变形破坏机理.

综上所述,目前对塑性区形成、扩展及其形态分布特征开展了大量研究,但是在如何表征塑性区的形态特征以及怎样更科学、定量的分析评价围岩的稳定性方面的研究仍严重缺乏.因此,本文基于双向非等压圆巷塑性区边界解析式,探讨了塑性区形态演化规律及形态分布特征,建立了圆巷塑性区形态特征指标体系.深入分析了各指标与塑性区形态、围岩变形、稳定的关系.通过算例分析,对各形态指标进行了初步应用,验证了指标的科学性及合理性.

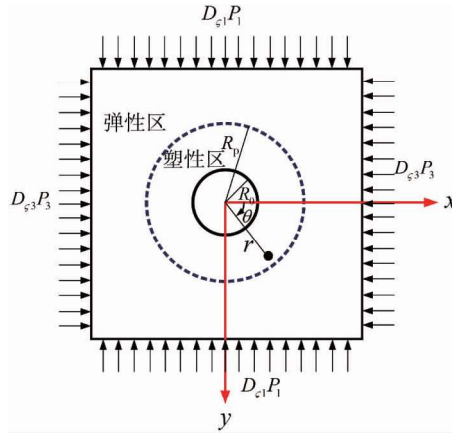
## 1 圆巷塑性区形态演化

巷道围岩失稳破坏过程是围岩塑性区形成、发展的一个动态过程,塑性区的孕育形态与围岩稳定性密切相关.只有在充分认识围岩塑性区演化规律及其分布特征的基础上,才能更好地确立用以表征塑性区形态特征的指标体系,以下就该部分内容进行探讨.

### 1.1 双向非等压下圆巷塑性区边界解析式

工程实际中巷道(硐室)围岩及其他地下工程围岩并不是处于理想的均匀应力场环境,而是存在一定的偏应力,尤其是进入到深部开采及强动压的影响,双向压力的差异更加之大.因此,研究非均匀应力场下圆巷的弹塑性解更具现实意义.为简化数学上的求解,将巷道围岩体假设为各向同性的均匀介质,且为塑性不可压缩材料;不予考虑支护反力,建立围岩受力模型如图1所示,进而可以借助经典弹塑性理论中的平面应变孔口应力集中问题进行求解.

基于图1所示的圆巷平面应变力学模型及弹塑性理论,文献[20]导出了双向不等压下圆巷围岩弹性区与塑性区分界线的隐式方程,即:



$R_0$ : 巷道半径;  $R_p$ : 塑性区半径;  $P_1$ : 最大主应力;  $P_3$ : 最小主应力;  $D_{\zeta_1}$ : 最大主应力影响系数;  $D_{\zeta_3}$ : 最小主应力影响系数;  $r, \theta$ : 围岩中一点的极坐标

图 1 巷道围岩力学模型<sup>[20]</sup>

$$f(r, \theta) = [mw - t(1 + 3w^2 - 2w)]^2 + [n\sin 2\theta(1 - 3w^2 + 2w)]^2 - [(m - 2wt)^2 - 4c^2] \frac{(1 - \cos 2\varphi)}{2} - 4c^2 - 2(m - 2wt)c\sin 2\varphi = 0. \quad (1)$$

式中:  $m = D_{\zeta_1}P_1 + D_{\zeta_3}P_3$ ;  $n = D_{\zeta_3}P_3 - D_{\zeta_1}P_1$ ;  $w = R_0^2/r^2$ ;  $t = n\cos 2\theta$ ;  $c$  为围岩的黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角.

式(1)为一般情况下圆巷围岩塑性区边界的解析式,特别的,在均匀应力场下即  $P_1 = P_3$ ,  $D_{\zeta_1} = D_{\zeta_3} = 1$ , 则可得到常规圆形塑性区的半径公式,即:

$$R_p = R_0 \sqrt[4]{\frac{P_1^2 \csc^2 \varphi}{(P_1^2 - c^2) + c(cc \csc^2 \varphi + 2P_1 \cot \varphi)}}. \quad (2)$$

### 1.2 圆巷塑性区的几何形态演化律

对塑性区几何形态影响最为显著的是巷道所处的区域应力场环境,也可以说是水平向与垂直向压力差异的大小.以下将基于双向不等压圆巷围岩塑性区边界线的隐式方程,探讨圆巷塑性区的几何分布及形态演化特征.

一般而言,水平地应力和垂直地应力并不相等,而大多情况是水平地应力大于垂直地应力,若周边存在开采、掘进、爆破、顶板断裂冲击等扰动源时,水平应力与垂直应力的差异度将更大.分别考虑垂直应力和水平应力受外部因素不同程度的影响,以刻画双向压力差异与塑性区形态之间的关系,根据式(1)绘制出圆巷塑性区的形态演化图(如图 2 和图 3 所示).

图 2 和图 3 为半径为  $R_0 = 2$  m,  $c = 3$  MPa,  $\varphi = 25^\circ$  的圆形巷道在均匀初始应力  $P_1 = P_3 = 20$  MPa, 垂直(水平)方向受不同程度影响时的塑性区形态演化图.从图中可以看出,在常规均匀应力场条件下,圆巷围岩的塑性区形状呈圆形,这是经典弹塑性力学框架下的平面应变轴对称解答,也是人们研究得较多的情形.但是在非均匀应力场条件下,围岩塑性区的形状随着双向压力差值的增大而显著的改变,即自圆形→椭圆→圆角矩形→蝶形逐步变化<sup>[20]</sup>.当塑性区由非蝶形过度至蝶形后,塑性区的形状并没有发生改变,但塑性区的尺寸、范围随着双向压力差异的增大而增大<sup>[19]</sup>.

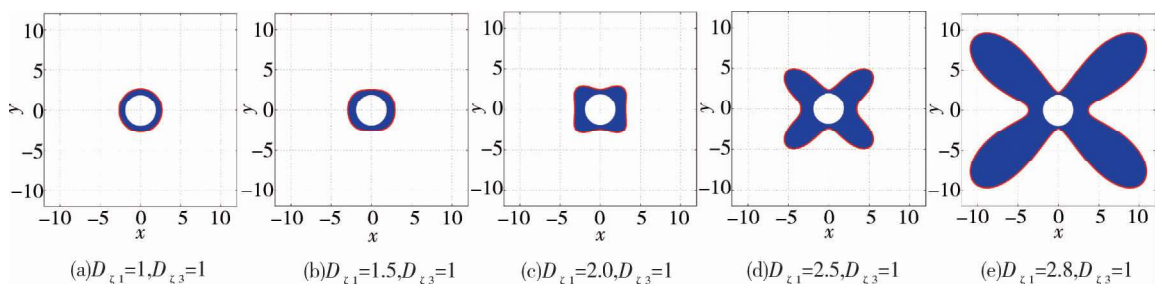


图 2 垂直方向影响下塑性区形态演化图

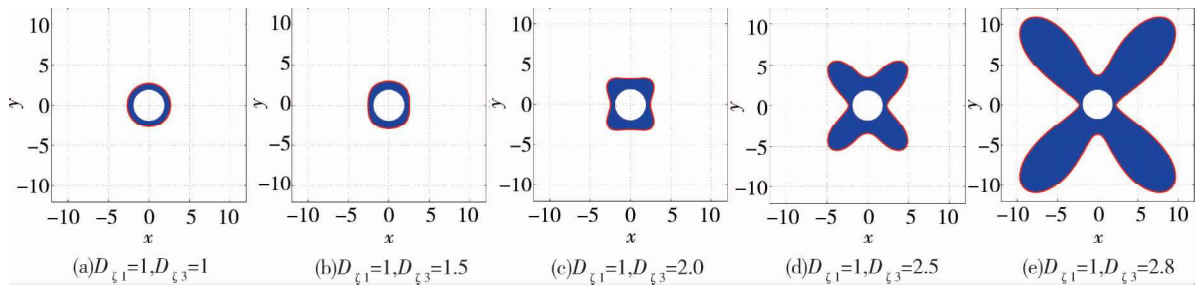


图3 水平方向影响下塑性区形态演化图

水平方向及垂直方向上外部不同程度扰动影响下,塑性区的形态演化仍然遵循上述规律,但是图2和图3这2种情况下塑性区椭圆长轴方向、蝶叶方位角等不同,恰好相差 $\pi/2$ 。这是由于巷道模型是轴对称的,若各自将模型旋转 $\pm\pi/2$ ,均可以得到另一种情形所对应的塑性区形态。因此,本文仅需针对其中一种情况进行探讨和分析。

依据图2及图3不同应力环境下塑性区的分布特征,可以将圆巷围岩塑性区随荷载条件的形态演化过程总结:在初始均匀应力场( $P_1=P_3, D_{\zeta_1}=D_{\zeta_3}=1$ )下塑性区边界为规则的圆形,双向压力出现差异并逐步增加时,圆形塑性区半径沿最大主应力方向上的尺寸减小,而另一方向上的塑性尺寸增大,塑性区形状调整为近椭圆形,长轴位于小主应力方向上。双向压力差值继续增大(约差1倍),塑性区边界则呈现为大主应力方向稍凹的近似圆角矩形;随着双向压力差异的进一步加大,大、小主应力夹角方向上塑性区尺寸显著增大,形成较长的四肢,称之为“蝶叶”,此时塑性区形状为蝶形;随后塑性区的形状在应力环境的变化过程中基本无变化,仍表现为蝶形。

从圆巷围岩塑性区尺寸及范围来看,圆形、椭圆形及圆角矩形的塑性区尺寸相差不太大,最大塑性半径约在2.6~3.2 m的范围,而蝶形塑性区由于四肢蝶叶的快速发育使得塑性半径在大小主应力夹角方向上急剧增大,并达到最大值(如图2e中 $R_{pmax} \approx 13$  m)。同时,蝶形塑性区的塑性破坏范围、面积也较其他形态的明显大,相差可达几倍甚至十几倍,因此,蝶形塑性区围岩的破坏深度、范围均偏大,导致围岩稳定性大幅降低,尤其是巷道顶角及底角部位容易产生较大变形破坏。

## 2 圆巷塑性区形态特征指标体系构建

依据塑性区形态演化规律及分布特征,应用几何形态学理论,从塑性区几何形状及范围、尺寸2方面建立描述圆巷塑性区形态特征的指标体系。分析各个形态指标的内涵,明确指标间的差异及其与围岩稳定性的关系,为塑性区形态特征指标的应用提供理论支撑。

### 2.1 塑性区形态特征主要指标

一般而言,在进行矿井巷道围岩的弹塑性求解时,将其作为平面问题处理,所获得的塑性破坏场亦为平面图形。因此,所建立的塑性区形态特征指标及相关参数均是针对二维图形而言的。对于巷道围岩的三维塑性破坏场的几何特征刻画,今后也可将此指标体系相应进行推广。

#### 1) 轴向系数 $A_c$

轴向系数 $A_c$ 主要是针对近似椭圆、圆角矩形塑性区设置的形态指标,定义为塑性区长轴与短轴(如图4所示)之比。从几何特征上来说, $A_c$ 越大,则塑性区的形状越扁平、针形性越强;同时,也说明塑性区在长轴方向上的塑性破坏深度及范围越大,反映了长轴方向上围岩稳定性较差。轴向系数的计算式为

$$A_c = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

式中: $L_1$ 为塑性区边界的长轴长度; $L_2$ 为塑性区边界的短轴长度。

#### 2) 均匀系数 $U_c$

均匀系数 $U_c$ 表征圆形巷道围岩塑性区在 $0 \sim 2\pi$ 各个方向上塑性破坏深度的差异性;均匀系数越接近

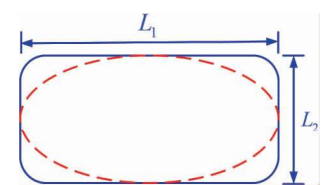


图4 塑性区轴向尺寸



1,表明围岩塑性区各方位的塑性半径差异性越小,塑性区边界形状越接近标准圆形.若  $U_c = 1$ ,则围岩塑性区为常规均匀应力场下的圆巷圆形塑性区.相对来说,圆形塑性区的围岩比相同扩展范围的异形塑性区围岩要稳定,整体性更强.  $U_c$  的计算式为

$$U_c = \frac{P_b^2}{4\pi A_p} \quad (4)$$

式中:  $P_b$  为围岩塑性区边界的周长;  $A_p$  为塑性区边界所围成的面积.

### 3) 扩展因子 $E_f$

扩展因子  $E_f$  定义为围岩塑性区扩展面积与圆形巷道断面面积之比.扩展因子反映了围岩塑性区扩展范围的相对大小,  $E_f$  越大,围岩的塑性破坏范围则越大,围岩越不稳定.  $E_f$  的数学表达式见式(5),该式不仅与塑性区范围有关,而且与巷道开挖尺寸有关,因此,在对不同尺寸巷道围岩塑性区进行对比分析时,扩展因子也能起到较好的作用.

$$E_f = \frac{A_{p0}}{A_0} = \frac{A_{p0}}{\pi R_0^2} \quad (5)$$

式中:  $R_0$  为巷道断面半径;  $A_0$  为巷道断面面积;  $A_{p0}$  为围岩塑性区的面积,其与  $A_p$  的关系为  $A_{p0} = A_p - A_0$ .

### 4) 等效半径 $R_{eq,p}$

围岩塑性区的等效半径  $R_{eq,p}$  刻画了塑性区的等效尺寸与范围的大小,是塑性区宏观几何形态的直观体现及重要几何参数.依据面积相等的原则,可以将一般非规则形状的塑性区转化为常规均匀应力场下的等效圆形塑性区,如图5中虚线所示.等效半径  $R_{eq,p}$  的计算式如式(6).

$$R_{eq,p} = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (6)$$

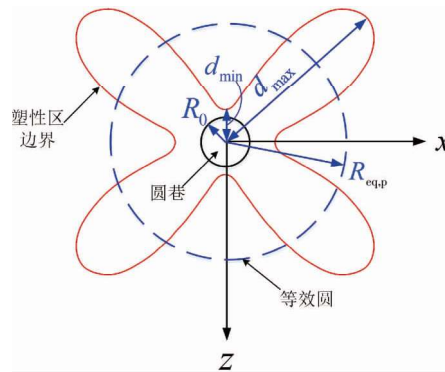


图5 塑性区等效及几何参数

### 5) 扩深系数 $E_{dc}$

围岩塑性区的形状实际上是不均匀的,各个方位上的塑性区半径存在较大差异.为了表征塑性区极限扩展范围的相对大小,引入扩深系数指标  $E_{dc}$ .  $E_{dc}$  值越大,表明巷道围岩在  $d_{max}$  所在的方位上塑性变形破坏越严重、稳定性较差,是巷道围岩的最薄弱环节.值得注意的是,不同巷道  $E_{dc}$  值相等,但  $d_{max}$  是不等的,因此,围岩的局部稳定性也是不同的.扩深系数  $E_{dc}$  的计算式为

$$E_{dc} = \frac{d_{max}}{R_0} \quad (7)$$

式中:  $d_{max}$  为巷道围岩的最大塑性扩展半径.

### 6) 形状不规则系数

围岩塑性区边界的形状与巷道稳定性密切相关.一般而言,塑性区形态规则的比不规则的围岩要稳定;而(极)不规则塑性区围岩存在较多的塑性破坏薄弱环节,使得巷道稳定性明显降低.采用  $I_{sc}$  指标表征围岩塑性区形状的不规则程度,其定义为最大与最小塑性扩展半径的比值.形状不规则系数的取值范围为  $I_{sc} \in [1, +\infty)$ ,  $I_{sc}$  值越接近1,则表示围岩塑性区形状越规则.形状不规则系数的计算式为