

深埋巷道锚杆破断失效机理

刘金海¹, 孙广京², 谭文峰²

(1. 华北科技学院 安全工程学院, 北京 065201; 2. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274918)

摘要: 锚杆破断失效是深埋巷道支护面临的工程问题之一。采用现场调研、理论分析等方法, 对深埋巷道锚杆破断失效形式、机理进行了分析。得到结论: 1) 深埋巷道锚杆破断失效形式主要有剪断失效、脆断失效、折断失效、拉断失效、崩盘失效和松脱失效; 2) 材料缺陷和受载性能是深埋巷道锚杆破断失效的内因, 荷载超过极限荷载是深埋巷道锚杆破断失效的外因; 3) 拉伸、剪切、扭转等载荷复合作用下, 锚杆有效直径减小, 拉应力增大, 导致破断失效; 4) 采用恒阻大变形锚杆或二次支护工艺, 能够实现深埋巷道锚杆破断失效和围岩变形的协调控制。研究结果对深埋巷道围岩控制具有参考意义。

关键词: 深埋巷道; 锚杆破断; 失效机理; 加载模式; 控制思路

中图分类号: TD32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)02-0008-06

Mechanism of bolt breaking in deep roadway

Liu Jinhai¹, Sun Guangjing², Tan Wenfeng²

(1. Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing 065201, China;

2. Shandong Xinjulong Energy Limited Liability Company, Heze 274918, China)

Abstract: Bolt breaking is one of engineering problems of deep roadway support. The form and mechanism of bolt breaking was studied by using site investigation and theoretical analysis. Following results were obtained: 1) The forms of bolt breaking in deep roadway are shear failure, brittle fracture failure, breaking failure, tensile failure, ejection failure and loosening failure; 2) Material defect and bearing behavior are the intrinsic cause of bolt breaking in deep roadway, and the extrinsic cause lies in the overload, namely the load of bolt exceed its limit load; 3) Under the combined effect of tensile load, shear load and torsion load, the effective diameter of the bolt decrease and the tensile stress in the bolt increase, as a result, the bolt is broken easily; 4) Coordinated control of bolt breaking and surrounding rock deformation in deep roadway can be realized using constant resistance and large deformation anchor bolt or secondary support technology. The results provide a reference for surrounding rock control of deep roadway.

Keywords: deep roadway; bolt breaking; failure mechanism; load pattern; control idea

目前, 锚杆支护已经成为我国煤矿巷道围岩控制的首选方式^[1-5]。据统计, 我国部分矿区煤巷锚杆支护率已超过 90%。随着煤矿开采深度逐年增加, 部分煤矿进入深井开采阶段, 个别矿井回采巷道的埋深已超过 1 300 m。进入深部开采后, 受“三高一扰动”^[6-7] 复杂环境影响, 巷道围岩稳定性控制难度增大^[8-9]。为有效控制围岩变形, 推广采用高强度锚杆支护技术^[10], 但实践中锚杆破断失效问题突出, 甚至出现了锚杆破断弹射伤人的现象。针对锚杆破断失效问题, 我国学者曾开展一些研究工作, 如杜计平等^[11] 指出锚杆、锚固剂、托板、钢带和螺母等构件的力学性能应基于锚杆破断力进行合理匹配, 何炳银等^[12] 分析了沿

收稿日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274022); 中央高校基本科研业务费资助(3142014067); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2014329)

通信作者: 刘金海(1982-), 男, 河南扶沟人, 博士, 主要从事矿山压力方面的研究。E-mail: jh_liu1982@163.com

空巷道锚杆、锚索破断原因,推荐采用可延长锚杆和锚索,马念杰^[13]、孔垣^[14]分析了锚杆尾部受到偏心载荷作用发生破断的机理,研制了一种新型金属粗尾锚杆,但这些研究工作都是针对浅埋巷道锚杆破断失效问题进行的,关于深埋巷道锚杆破断失效机理未做深入探讨.本文基于对现场失效锚杆变形、断口特征的分析,研究深埋巷道锚杆破断失效机理,以期对深埋巷道锚杆破断失效和围岩变形控制提供基础.

1 深埋巷道锚杆破断失效形式

新巨龙矿井位于山东省巨野煤田内,回采巷道埋深接近 1 000 m,自 2009 年推广应用高强度锚杆支护技术以来,回采巷道锚杆破断失效问题突出.作者对锚杆破断失效地点及失效形式进行了勘查,并进行了现场拍照.根据失效锚杆变形特征及断口特征,可将锚杆破断失效形式分为 6 种.

1) 剪断失效

剪断失效锚杆的断口较平整,没有明显颈缩,杆体弯曲,如图 1 所示.这种失效形式主要出现在巷道肩角、肩窝处.巷道断面形成后,水平应力向顶底板转移,顶板在集中水平应力作用下发生弯曲,并沿厚度方向产生相对水平位移,造成肩角锚杆承受较大的剪切力作用;垂直应力向两帮转移,巷帮在集中垂直应力作用下发生弯曲,并沿水平方向产生相对垂直位移,造成肩窝锚杆承受剪切力作用.锚杆的剪切强度较小,一旦肩角、肩窝锚杆承受的剪切力大于其极限剪切载荷时,就可能发生破断.

2) 脆断失效

锚杆在端部小螺距与大螺距分界处破断,杆体产生明显颈缩,杆体配件有明显挤压痕迹,如图 2 所示.脆断失效锚杆都为小螺距螺纹钢锚杆,破断位置处于锚杆端部小螺距段.这种失效形式在整个巷道围岩都出现过.锚杆脆断失效原因之一是锚杆端部小螺距段存在加工应力,其二是锚杆端部螺纹部位有效断面直径小于锚杆杆体直径,即破断发生在“薄弱带”.



图 1 锚杆剪断失效

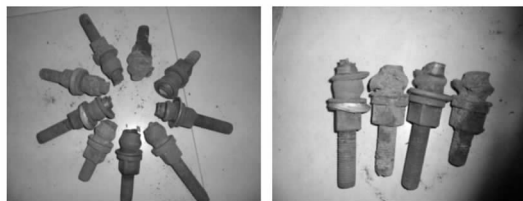


图 2 锚杆脆断失效

3) 折断失效

锚杆在托盘孔口处破断,断口倾斜,配件有明显偏斜挤压痕迹,如图 3 所示.锚杆折断失效的主要原因是受偏心载荷作用,而产生偏心载荷的主要原因是锚杆受力中心线偏离托盘中心线^[13].锚杆易受横向载荷作用发生弯曲,若螺母与托盘接触力偏小,结合处极易产生偏心载荷.锚杆截面上轴向拉力产生的拉应力和弯曲力矩产生的正应力叠加,造成锚杆截面一侧承受的拉应力增大,另一侧承受的拉应力减小,从而造成锚杆尾部在拉应力偏大一侧发生破断,在另一侧产生挤压.

4) 拉断失效

杆体基本不发生弯曲,断口有明显颈缩,如图 4 所示.锚杆拉断失效的主要原因是杆体内轴向拉应力超过了其抗拉强度.服役期间,锚杆承受的拉伸载荷远小于其极限破断载荷,即锚杆很少被单纯拉断,通常是在多种载荷复合作用下发生破断失效.现场实测结果也证实了这种现象,极限拉伸载荷为 216 kN 的等强全螺纹锚杆服役期间实测最大拉应力为 130 kN,但却发生了破断,且断口存在明显颈缩.

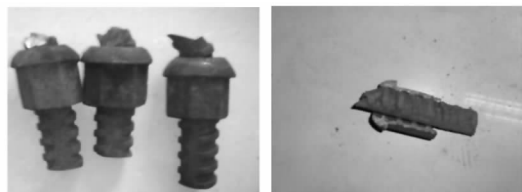


图 3 锚杆折断失效

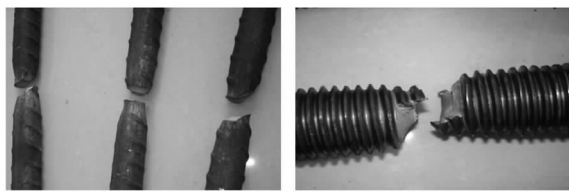


图 4 锚杆拉断失效

5) 崩盘失效

锚杆从钻孔内弹出,螺母与托盘分离,或托盘与围岩分离,断口较平整,如图 5 所示.锚杆崩盘失效的

主要原因有二,一是锚杆承受较大的拉伸载荷导致杆体内积聚较多的弹性能,二是锚杆杆体受到瞬间剪切荷载作用并造成锚杆被剪断.锚杆崩盘失效属于一种动力现象,伴随弹性能的急剧释放.

6) 松脱失效

锚杆螺母松动,缓慢退丝,螺纹直径减小,螺母和杆体螺纹之间产生间隙,如图6所示.根据现场勘查,松脱失效锚杆都是等强全螺纹锚杆,发生在巷道两帮中上部.锚杆松脱失效的原因有二,一是螺母抱紧力差,二是锚杆承受的拉伸载荷较大.



图5 锚杆崩盘失效

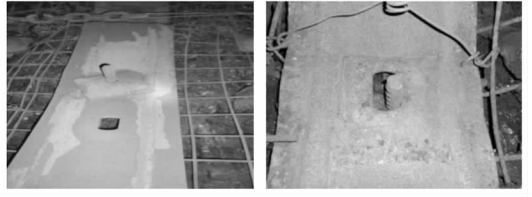


图6 锚杆松脱失效

根据现场勘查,发生破断失效的锚杆既有等强全螺纹锚杆破断,也有小螺距高强锚杆.等强全螺纹锚杆破断失效主要发生在自由段和托盘孔口处.小螺距高强锚杆破断失效主要发生在自由段、端部小螺距段.锚杆破断失效形式多,发生地点广.

2 锚杆受载的力学行为

锚杆服役期间承受的载荷主要有拉伸载荷、剪切载荷、扭转载荷及多种载荷的复合作用.锚杆承受的载荷不同,其表现出力学行为不同.下面运用材料力学^[15],分析拉伸载荷、剪切载荷、扭转载荷及拉伸载荷与剪切载荷复合作用下锚杆的力学行为.

1) 轴向拉伸载荷作用下锚杆的力学行为

锚杆承受轴向拉伸载荷的主要原因是围岩膨胀或产生离层.设锚杆直径为 d ,承受轴向拉伸载荷 F ,则锚杆横截面上的拉应力 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{4F}{\pi d^2}. \quad (1)$$

根据锚杆材料的力学性能,当 σ_1 大于屈服极限 σ_s 时,锚杆进入塑性变形阶段,延伸量明显增大,此后进入强化阶段,锚杆的延伸性能充分发挥;当 σ_1 大于抗拉强度 $[\sigma_1]$ 时,锚杆产生颈缩,直至拉断.

2) 横向剪切载荷作用下锚杆的力学行为

锚固范围内的岩层产生错动,导致杆体承受剪切载荷,如图7所示.设杆体长度为 l ,一侧作用着均布载荷 q_1 ,另一侧作用着均布载荷 q_2 .采用截面法对杆体右端进行分析,力矩 M 产生的正应力 σ 为

$$\sigma = \frac{16q_1 x^2}{\pi d^3}. \quad (2)$$

由式(2)可知,横向剪切载荷作用下锚杆截面的应力分布如图7(b)所示,截面一侧产生拉应力,另一侧产生压应力,且截面边缘处拉应力最大.根据锚杆材料抗压、不抗拉的特点,锚杆易在拉应力侧发生破断,在压应力侧产生挤压,断口为一斜面.

3) 扭转载荷作用下锚杆的力学行为

深埋巷道锚杆安装时需施加很高的预紧力,过程中锚杆承受较大的扭矩 T .图8所示为扭转载荷作用下锚杆受力状态.锚杆可视为等直径圆杆,在小变形条件下,其截面上只有剪应力,任一点处的剪应力 τ_ρ 为

$$\tau_\rho = T\rho/I_p. \quad (3)$$

式中: ρ 为考察点到轴心的距离; I_p 为截面极惯性矩, $I_p = \pi d^4/32$.

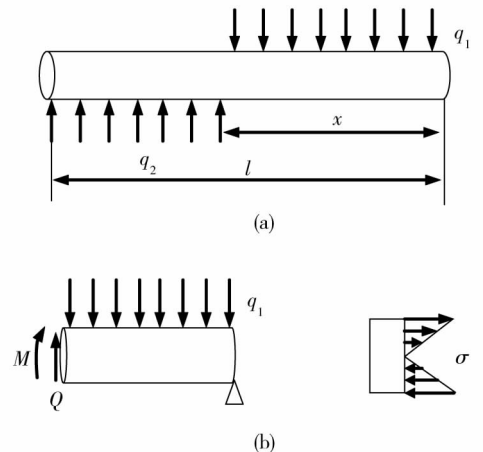


图7 横向剪切载荷作用下锚杆受力状态

扭转载荷作用锚杆截面周边的剪应力最大,为 $16T/\pi d^3$. 可见,在较高扭矩作用下,杆体最外层沿截面切线方向产生变形,甚至成“麻花”状,有效直径减小,极限拉伸载荷降低.

4) 拉伸、剪切载荷复合作用锚杆的力学行为

深埋巷道锚杆一方面承受较大的轴向拉伸载荷,另一方面承受较大的剪切荷载. 图9所示为拉伸、剪切载荷复合作用下锚杆受力状态.

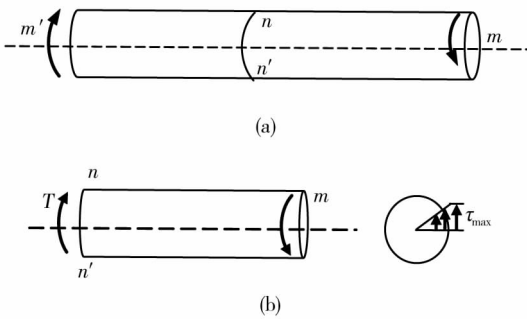


图8 切向扭转载荷作用下锚杆受力状态

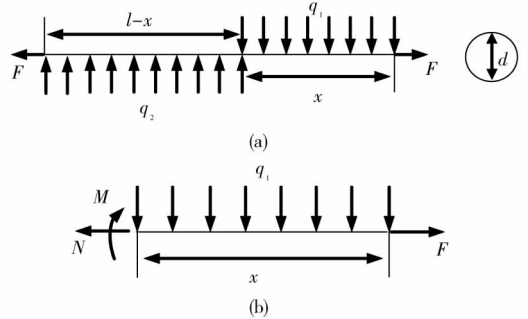


图9 拉伸、剪切载荷复合作用下锚杆受力状态

根据上述轴向拉伸载荷、横向剪切载荷作用下锚杆轴向应力计算公式,可得2种载荷复合作用下锚杆横截面上的正应力分布特征,

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \sigma_t + \sigma_b = \frac{4F}{\pi d^2} + \frac{16q_1 x^2}{\pi d^3}; \\ \sigma_{\min} = \sigma_t - \sigma_b = \frac{4F}{\pi d^2} - \frac{16q_1 x^2}{\pi d^3}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_{\max} , σ_{\min} 分别为锚杆截面上、下边沿处的正应力.

由式(4)可知,2种载荷复合作用下锚杆拉应力增大,其破断失效可能性增大. 考虑扭转载荷对锚杆直径的影响,锚杆破断失效的可能性更大. 根据深埋巷道的应力环境、围岩变形大和锚杆预紧力大的特点,锚杆承受较大的轴向拉伸载荷、横向剪切载荷和切向扭转载荷,其破断失效可能性大.

3 深埋巷道锚杆破断失效机理

锚杆服役期间承受轴向拉伸载荷、横向剪切载荷和切向扭转载荷,其中轴向拉伸载荷来自围岩扩容、离层,横向剪切载荷来自岩层错动,切向扭转载荷来自预紧力施加过程. 从加载模式来看,锚杆轴向拉伸载荷及横向剪切载荷都属于围岩位移加载,切向扭转载荷属于人为应力加载. 位移加载是造成锚杆破断失效的主要原因.

深埋巷道支护系统接近于极限状态,受到外力作用,就可能破断失效. 根据围岩变形范围及大小,可将巷道围岩变形模式分为2类:一是巷道围岩松动圈厚度大于锚固体厚度,即围岩与支护系统一同变形,这种状态下锚杆与围岩之间不产生相对位移,虽然巷道围岩变形量大,但锚杆受力小,不会发生破断;二是围岩松动圈厚度小于锚固体厚度,松动圈内岩体扩容导致锚杆承受较大载荷,这种状态下,锚杆受载与围岩变形有关,锚杆易发生破断失效. 基于围岩控制目的,期望围岩变形模式属于第二类,但这种模式下锚杆易破断失效;基于锚杆破断失效控制目的,期望围岩变形属于第一类,但这种模式下巷道围岩变形量大. 因此,深埋巷道围岩变形模式多属于第二类,为有效控制该类巷道围岩变形,通常采用高预应力支护技术^[10, 16],实现早抗、强抗,但锚杆破断失效问题突出.

锚杆受载性能是造成深埋巷道锚杆破断失效的重要原因之一. 现有锚杆材料达到屈服极限后,其延伸特性才能得到发挥,此时工况接近强度极限,即锚杆一直处于“危险”工作状态,一旦受到横向载荷作用,就可能发生破断失效.

此外,材料缺陷也是诱发深埋巷道锚杆破断失效的重要原因之一. 如小螺纹高强锚杆端部直径偏小,易造成锚杆在小螺纹段破断失效;小螺纹与大螺纹分界点存在应力集中,锚杆易在分界点发生破断失效.

综上所述,深埋巷道锚杆破断失效存在内因和外因,内因是指材料缺陷和材料受载性能,属材料问题,外因是指锚杆承受的载荷超过了其极限载荷,即力源问题,取决于深埋巷道变形特点和支护特点.

4 深埋巷道锚杆破断失效控制思路

深埋巷道锚杆破断失效控制思路是:避免锚杆材料进入塑性屈服状态,如提高锚杆材料屈服载荷及极限载荷、降低锚杆实际荷载。

4.1 提高锚杆材料屈服载荷及极限载荷

图 10 所示为锚杆受载特性曲线,图中空心圆点表示当前锚杆工况,其工作状态处于极限状态或接近极限状态,易发生破断失效,实心圆点表示锚杆理想工况.若使当前锚杆工况向左偏移,则锚杆的受力状态将得到改善.具体措施有:

1) 加强锚杆材料. 锚杆破断失效是其受载与承载能力博弈的结果,当其受载大于其承载能力时就可能发生破断. 锚杆整体强度提高后,其弹性变形范围增大,与普通锚杆相比,其工况向下偏移,受载小于其承载能力. 因此,加强锚杆材料,可有效控制锚杆破断失效,但需研发高强度锚杆钢材和加工工艺.

2) 增大锚杆直径. 锚杆屈服载荷、破断载荷、剪断载荷与锚杆直径的平方成正比. 对于同一种锚杆材料,直径增大后,其屈服载荷、破断载荷、剪断载荷将显著提高. 如锚杆直径从 22 mm 增大到 28 mm 时,其屈服载荷、破断载荷、剪断载荷都相应的提高了 61.9%. 可见,增大锚杆直径能够显著提高锚杆承载能力,有利于控制锚杆破断,但需研发相应的安装工艺.

4.2 降低锚杆实际荷载

深埋巷道围岩载荷由支护结构和围岩共同承担,其中支护结构能够承担的载荷较小,其主要作用是促使围岩承载结构形成,支护结构受载与围岩变形之间具有图 11 所示的关系,称为“支护—围岩”相互作用关系. 当支护工况位于 *a* 点时,围岩变形得到控制,但所需支护阻力太大,锚杆支护系统难以达到,认为该工况是非法的;当支护工况位于 *b* 点时,围岩变形得到有效控制,所需支护阻力为支护结构极限,一旦受外载作用,即可能破断失效;当支护工况位于 *c* 点时,围岩变形得到有效控制,但需要的支护阻力较大,现有锚杆难以满足要求,但可通过加强锚杆材料或增大锚杆直径实现这种工况;当支护工况位于 *d* 点时,围岩变形量较大,锚杆处于屈服状态,其延伸特性已得到发挥,这是当前深埋巷道支护系统的工作状态,若变形量继续增大,锚杆也可能破断失效;当支护工况位于 *e* 点时,围岩变形量较大,但锚杆承受的载荷较小,且处于弹性状态;当支护工况位于 *f* 点时,巷道围岩变形大,断面不能满足生产要求,锚杆不会破断失效,但可通过预留变形空间,从而适应这种工况;当支护工况位于 *g* 点时,锚杆载荷很小,但巷道围岩变形量不断增大,易发生巷道失稳,认为该工况也是非法的. 可见,允许围岩产生一定变形,可有效降低锚杆实际荷载,具体措施有:

1) 改善锚杆延伸特性

普通高强锚杆服役期间处于弹性状态时,其延伸量很小,只有进入屈服状态后,其延伸特性才得到发挥,而此时锚杆承受的载荷已接近极限,一旦再承受其它载荷作用,即破断失效. 若增大弹性变形阶段的延伸特性,锚杆既可适应深埋巷道围岩变形,又可确保承受载荷小于屈服极限,始终处于弹性变形阶段. 实践表明,恒阻大变形锚杆^[17]具有这种特性,恒阻力为锚杆屈服载荷的 80%~90%,恒阻阶段最大延长量可达 1 000 mm,即围岩膨胀量小于 1 000 mm 时,锚杆始终处于弹性变形阶段.

2) 优化支护工艺

“遇强则强”易引起锚杆破断失效. 对于深埋巷道,应积极采用“抗、让、抗”的支护理念,巷道成形后及时支护,对围岩变形进行适度的“抗”,同时允许围岩产生一定量的变形,实现适度的“让”,改善锚杆支护

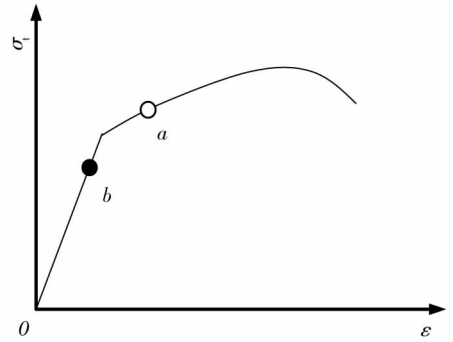


图 10 锚杆受载特性曲线

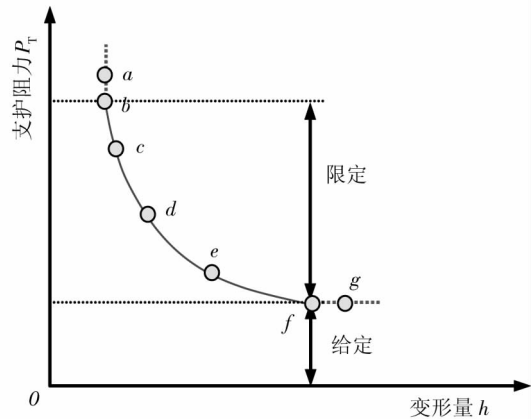


图 11 “支护—围岩”相互作用关系

工况,此后对围岩进行强“抗”,阻止围岩继续变形.可通过优化支护工艺,如二次支护,实现该支护理念,即巷道形成后及时进行一次支护,适度限制围岩变形,围岩变形到一定程度后,进行二次支护,遏制围岩变形.二次支护应在一次支护尚未失效、围岩变形速率趋于稳定时进行,其目的是实现锚杆破断失效和围岩变形的协调控制.新巨龙矿井2302S工作面下平巷里段掘进过程中采用二次支护工艺,一次支护加固顶板和两帮,二次支护滞后15~20 m加固帮角,锚杆破断数量明显减小.

4.3 锚杆破断失效控制措施选择

有些措施对控制锚杆破断失效能够起到革命作用,如增大锚杆直径、加强锚杆材料;有些措施通过改变支护工艺就能有效控制锚杆破断失效,如改善锚杆延伸特性、实施二次支护等;有些措施只能起到“修枝节”的作用,如使用偏心托盘等.锚杆破断失效控制措施选择应综合考虑3个原则:①兼顾原则.实现锚杆破断失效控制的同时,应兼顾实现巷道围岩变形控制,避免以牺牲巷道围岩变形实现锚杆破断失效控制.②实用原则.能够从根本上实现锚杆破断失效控制,不能只对某一种破断失效形式起作用.③实施原则.能够适应目前的技术水平,易实施.综合考虑上述原则,推荐通过改善锚杆延伸特性或实施二次支护,降低锚杆服役期间承受的载荷,从而实现深埋巷道锚杆破断失效和围岩变形的协调控制.

5 结论

1)深埋巷道应力条件复杂,围岩变形量大,支护锚杆在拉伸、剪切、扭转等载荷及多种载荷复合作用下,可能发生剪断、脆断、折断、拉断、崩盘和松脱失效.

2)对于深埋巷道锚杆破断失效,材料缺陷和受载性能是内因,荷载超过强度极限是外因;通过采用恒阻大变形锚杆或二次支护工艺,改变锚杆受载特点,可有效控制锚杆破断失效,同时实现围岩变形控制.

参考文献:

- [1] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):649-664.
- [2] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰.煤巷锚杆支护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999.
- [3] 康红普.煤巷锚杆支护成套技术研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3959-3964.
- [4] 王金华.我国煤巷锚杆支护技术的新发展[J].煤炭学报,2007,32(2):113-118.
- [5] 张农,高明仕.煤巷高强预应力锚杆支护技术与应用[J].中国矿业大学学报,2004,33(5):524-527.
- [6] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [7] 杨生彬,何满潮,刘文涛,等.底脚锚杆在深部软岩巷道底臆控制中的机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增1):2913-2920.
- [8] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.
- [9] 李术才,王琦,李为腾,等.深部厚顶煤巷道让压型锚索箱梁支护系统现场试验对比研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):656-666.
- [10] 李志深,孙广京,刘金海,等.深井大断面煤巷控制技术[J].煤炭科学技术,2012,40(9):35-39.
- [11] 杜计平,侯朝炯.深井破碎围岩条件下煤巷锚杆构件合理配套[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):401-404.
- [12] 何炳银,王珏.沿空巷道锚杆与锚索破断的调查分析[J].矿山压力与顶板管理,2005,22(1):55-58.
- [13] 马念杰,刘少伟,邓广涛,等.巷道锚杆尾部破断机理及合理结构的设计[J].煤炭学报,2005,30(6):327-331.
- [14] 孔垣,王梦恕,马念杰,等.锚杆尾部的破断机理研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(3):383-386.
- [15] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,1979.
- [16] Kang H P, Lin J, Wu Y Z. Development of high pretension and intensive supporting system and its application in coal mine roadways[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 479-485.
- [17] 何满潮,郭志彪.恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1297-1308.