

全长黏结大变形让压锚杆波纹套筒 阻力计算及试验研究

殷齐浩^{1,2}, 王洪闪¹, 李廷春¹, 朱庆文¹, 李春廷¹, 冉金林¹

(1.山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2.成都基准方中建筑设计有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266590)

摘要:软岩巷道在建设过程中常常出现大变形现象,极易造成锚杆与围岩之间变形不协调而使锚杆过早屈服破坏,严重影响矿井生产的安全及效率。为了更好地支护软岩巷道,提出一种全长黏结大变形让压锚杆,相较于普通锚杆,该锚杆可以提供较大让压距离和连续工作阻力。首先,介绍了该锚杆的主要结构特点,分析了工作原理,指出其工作全过程分为弹性变形阶段、让压变形阶段及极限变形阶段;然后,通过理论分析得到波纹套筒阻力计算公式,研究了各参数对阻力大小的影响;最后,通过室内拉拔试验对该锚杆波纹套筒阻力值进行测试,试验结果表明理论计算结果与实测数据误差为7.4%,两者吻合度较好。

关键词:软岩巷道;让压锚杆;工作原理;拉拔试验;波纹套筒;阻力

中图分类号:TD353

文献标志码:A

Calculation and experimental study on the resistance of corrugated sleeve of full-length bonded and large deformation yielding bolt

YIN Qihao^{1,2}, WANG Hongshan¹, LI Tingchun¹, ZHU Qingwen¹, LI Chunting¹, RAN Jinlin¹

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2.Qingdao Branch, Chengdu Jizhun Fangzhong Architectural Design Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The large deformation of soft rock roadway in the construction often leads to the premature yield failure of bolt due to the uncoordinated deformation between bolt and surrounding rock, seriously affecting the safety and efficiency of mine production. To support the soft rock roadway effectively, in this paper, a full-length bonded and large deformation yielding bolt was studied and compared with the ordinary bolt, this could provide large deformation and continuous working resistance. First, the structural characteristics and working principle of the bolt were introduced and the work process was divided into elastic deformation stage, pressure deformation stage and ultimate deformation stage. Subsequently, the resistance calculation formula of corrugated sleeve was obtained through theoretical analysis, and the influence of various parameters on the resistance was investigated. Finally, the resistance value of the corrugated sleeve was tested by the pull-out test. The test results show that with an error of 7.4%, the theoretical calculation results and the measured data are in good agreement.

Key words: soft rock roadway; yielding bolt; work principle; pull-out test; corrugated sleeve; resistance

锚杆支护具有对原岩扰动小、支护效果好、经济安全等诸多优势^[1]。但是软岩巷道具有变形量大、变形

收稿日期:2019-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41772299,51604166,51279096)

作者简介:殷齐浩(1994—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事巷道支护理论与技术研究。

李廷春(1968—),男,山西朔州人,教授,博士生导师,主要从事岩石体力学方面的研究,本文通信作者。

E-mail: tchli_sd@163.com

速率快的特点,同时后期的蠕变过程也会产生较大变形,最终变形量一般大于 200 mm,甚至超过 500 mm^[2]。特别在埋深大、地应力高的软岩巷道中,普通刚性锚杆或小变形锚杆无法适应围岩的大变形,造成锚杆多次返修,不但增加成本,而且容易形成巨大的安全隐患。Ansell^[3]研制出一种无套筒能量吸收岩石锚杆,通过杆体的伸长进行让压,极限变形量为 240 mm,让压距离较短。Simser^[4]改进锥形锚杆得到树脂锚固锥形锚杆,能够在围岩变形过程中保持恒定阻力,但对锚固剂的敏感性较高,会出现锚杆未让压变形杆体即屈服破坏的现象。Li^[5]研制出一种全长灌浆多节点锚固锚杆,在静力拉伸试验中,最大变形量仅为 60 mm,让压距离小。国内相关研究人员也对不同类型让压锚杆进行相关的试验^[6-8],设计并应用了一系列全长黏结锚杆,但是此类锚杆变形能力差,难以适应大变形巷道的支护要求^[9-12]。

根据上述各类锚杆存在的问题,研制出一种适用于大变形软岩巷道的新型全长黏结大变形让压锚杆,对其结构组成、工作原理进行研究,分析得出波纹套筒阻力计算公式,分析各类参数对阻力大小的影响,最后采用室内拉拔试验验证理论计算的准确性。

1 全长黏结大变形让压锚杆的结构特点

1.1 全长黏结大变形让压锚杆的结构

全长黏结大变形让压锚杆由扩张锚固头、杆体、波纹套筒、托盘和阻尼螺母组成(如图 1)。其中杆体端部加工外螺纹,尾部设置增阻头;波纹套筒包括卡头、波纹段和平直段,波纹段外凹陷被橡胶变形层填充(如图 2),套筒平直段设置外螺纹安装托盘和阻尼螺母。该锚杆可使用全长锚固方式,并提供较大让压距离和连续工作阻力。同时,控制锚杆工作阻力小于杆体的屈服强度,避免在未出现让压变形时杆体屈服破断。

1.2 全长黏结大变形让压锚杆的工作原理

高应力软岩巷道开挖后并非立即出现大变形,围岩在高应力作用下表现出流变特性,导致巷道围岩在开挖一段时间后才产生大变形破坏。因此,在巷道出现大变形破坏之前须采取一定的支护手段,提高围岩强度,维护巷道稳定性。图 3 显示该新型锚杆工作阻力 P 与围岩变形 U 之间的关系,锚杆工作过程可以分为弹性变形阶段、让压变形阶段和极限变形阶段三部分。

1) 弹性变形阶段。锚杆安装后施加一定的预应力 P_1 ,当围岩释放能量较小,作用于锚杆上的轴力小于设计让压阻力 P_2 时,杆体增阻头与套筒之间相对静止。随着围岩的变形,锚杆自身材料产生一定弹性变形 U_1 ,同时支护阻力不断增大。由于采用全长锚固方式,其增阻速度将比端锚提高 3~6 倍,有利于快速达到让压阻力,迅速发挥围岩承载能力^[13]。

2) 让压变形阶段。随着围岩变形能的不断累积,巷道围岩继续收敛变形。当杆体上的轴力等于或大于设计让压阻力 P_2 时,杆体增阻头与

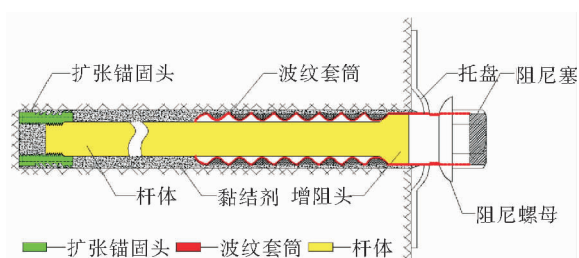


图 1 全长黏结大变形让压锚杆结构

Fig. 1 Structure of full-length bonded and large deformation yielding bolt

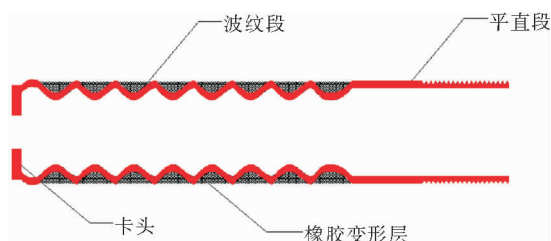


图 2 波纹套筒结构

Fig. 2 Structure of corrugated sleeve

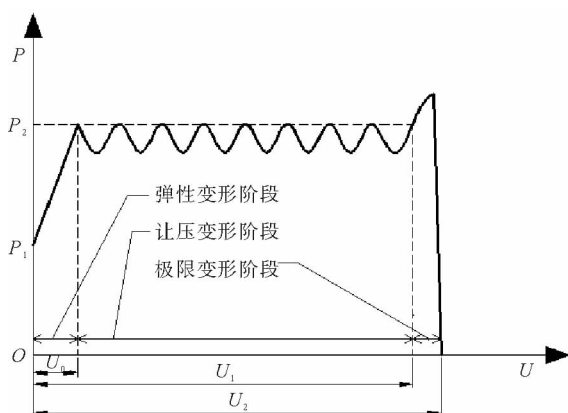


图 3 工作阻力与围岩变形的关系

Fig. 3 Relationship between working resistance and surrounding rock deformation

套筒产生相对运动,不断释放围岩内部能量,抵抗围岩的变形破坏。当围岩变形能释放至一定程度,杆体承受轴力小于 P_2 时,锚杆在围岩由 U_1 变形至 U_2 的过程中停止伸长让压,巷道围岩再次处于稳定状态, U_2 为锚杆极限让压量。

3) 极限变形阶段。当围岩变形量达到 U_2 后,锚杆无法继续进行让压变形,杆体轴力随着围岩变形将进一步增大,直至达到极限变形量 U_3 。

当巷道开挖产生大变形时,该锚杆能够通过杆体伸长让压,释放围岩变形能,从而有效维护大变形软岩巷道的稳定性。同时,设计合理的锚杆极限让压距离,避免锚杆进入极限变形阶段。

2 全长黏结大变形让压锚杆波纹套筒阻力计算

当杆体端部增阻头与波纹套筒出现相对运动时,增阻头开始挤压套筒波纹段使其出现塑性扩张变形,产生让压阻力。该部分的相对运动过程可以看成管材拉拔的逆过程,即增阻头对套筒波纹段的扩张。因此,参考金属塑性理论计算该部分作用力。为简化计算,同时将工程误差控制在许可范围之内,假设:①在一定范围内应力分布均匀;②忽略沿壁厚的应力变化;③套筒在增阻头的作用下产生大塑性变形,忽略套筒的弹性变形;④套筒材料进入塑性变形即产生不受应变影响的塑性流动^[14]。

2.1 增阻头锥形面与波纹段作用力计算

在增阻头锥形面与波纹段接触部分取一段微元为研究对象,如图 4。经受力分析,可得平衡方程:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} [(D + dD)^2 - (d + dD)^2] - \sigma_x \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \frac{\pi}{2} d\sigma_n dD - \frac{\pi}{2} \sigma_n d \frac{f}{\tan\alpha} dD = 0. \quad (1)$$

式中: α —增阻头锥角, ($^\circ$); f —套筒与增阻头的摩擦系数; d —套筒内径, mm; D —套筒外径, mm; σ_x —波纹套筒微元上轴向拉应力, MPa; σ_n —增阻头对波纹套筒作用的压应力, MPa。式(1)略去高阶无穷小量,整理可得:

$$2\sigma_x (D - d) dD - 2\sigma_n d (1 + \frac{f}{\tan\alpha}) dD + (D^2 - d^2) d\sigma_x = 0. \quad (2)$$

管材拉拔时的塑性条件为:

$$\sigma_x + \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (3)$$

式中: σ_θ —波纹套筒微元上径向拉应力, MPa; σ_s —材料变形抗力, MPa。

σ_n 和 σ_θ 的关系如图 5 所示,由平衡原理,可得:

$$2 \cdot \frac{1}{2} (D - d) \sigma_\theta dx = \int_0^\pi \sigma_n \frac{d}{2} \sin\theta dx d\theta.$$

$$\text{解得: } \sigma_\theta = \sigma_n \frac{d}{D - d}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$\sigma_n \frac{d}{D - d} + \sigma_x = \sigma_s. \quad (5)$$

令 $B = f/\tan\theta$, 将式(5)代入式(2), 解得:

$$\frac{2}{D + d} dD = \frac{1}{(1 + B)\sigma_s - (2 + B)\sigma_x} d\sigma_x. \quad (6)$$

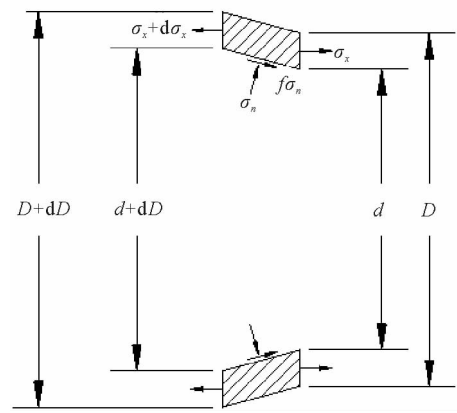


图 4 锥形部与套筒之间应力状态

Fig. 4 Stress state between the taper and the sleeve

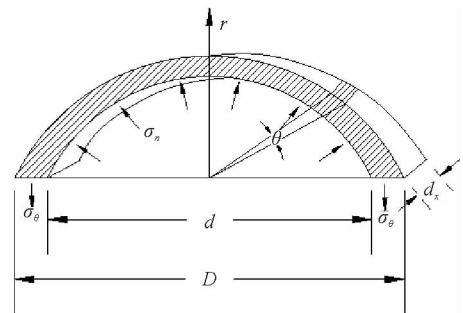


图 5 σ_n 与 σ_θ 的关系

Fig. 5 Relationship between σ_n and σ_θ

对式(6)两边同时积分,得:

$$2\ln(D+d)+C=-\frac{1}{2+B}\ln[(1+B)\sigma_s-(2+B)\sigma_x]。 \quad (7)$$

通过边界条件进行求解,由 $D=D_1$ 、 $d=d_1$ 、 $\sigma_x=0$,可得:

$$C=-\frac{1}{2+B}\ln[(1+B)\sigma_s]-2\ln(D_1+d_1)。 \quad (8)$$

由 $D=D_2$ 、 $d=d_2$ 、 $\sigma_x=\sigma_{x1}$,可得:

$$\sigma_{x1}=\sigma_s\frac{1+B}{2+B}[1-\eta^{-2(2+B)}]。 \quad (9)$$

式中: $\eta=(D_2+d_2)/(D_1+d_1)$; d_1 、 D_1 —套筒波纹段波谷的内外直径,mm; d_2 、 D_2 —套筒波纹段波峰的内外直径,mm; σ_{x1} —波纹套筒微元上最大轴向拉应力,MPa。

2.2 增阻头平直部与波纹段作用力计算

受力如图6所示,可得平衡方程为:

$$(D_2+d_2)d\sigma_x=f\sigma_n d_2 dx。 \quad (10)$$

将式(4)代入式(10),可得:

$$\frac{1}{\sigma_s-\sigma_x}d\sigma_x=\frac{4f}{D_2+d_2}dx, \quad (11)$$

对式(11)两边同时积分:

$$\int_{\sigma_{x1}}^{\sigma_b} \frac{1}{\sigma_s-\sigma_x} d\sigma_x = \int_0^l \frac{4f}{D_2+d_2} dx,$$

解得:

$$\sigma_b=\sigma_s-(\sigma_s-\sigma_{x1})e^{\frac{-4fl}{D_2+d_2}}。 \quad (12)$$

式中: σ_b —套筒平直段断面上的轴向拉应力,MPa; l —增阻头平直部分长度,mm。

由此可以解得阻力为:

$$F=\frac{\pi}{4}(D_2^2-d_2^2)[\sigma_s-(\sigma_s-\sigma_{x1})e^{\frac{-4fl}{D_2+d_2}}]。 \quad (13)$$

令壁厚 $\delta=D_2-d_2$, 波纹段波高 $h=D_2-D_1$, 由式(13)可知,影响增阻头与波纹段之间让压阻力的因素为:材料性质、套筒壁厚 δ 以及增阻头锥角 θ 大小等。在材料性质确定并且 $D_2=30$ mm、 $h=2$ mm、 $\theta=45^\circ$ 的情况下,不同套筒壁厚与让压阻力之间的关系如图7(a)所示;当 $D_2=30$ mm、 $\delta=2$ mm、 $h=2$ mm 时,不同增阻头锥角与让压阻力之间的关系如图7(b)。由图7(a)可知,在无黏结状态下,壁厚每增加0.25 mm,让压阻力约提高5.7 kN,随着套筒壁厚的增加,让压阻力近乎呈线性增加,其阻力增加速率为22.8 kN/mm。由图7(b)可知,当锥角由 15° 调整至 45° 后,阻力减小2.93 kN,随着锥角的增大,阻力不断减小,降低速率

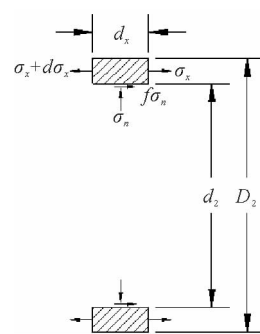
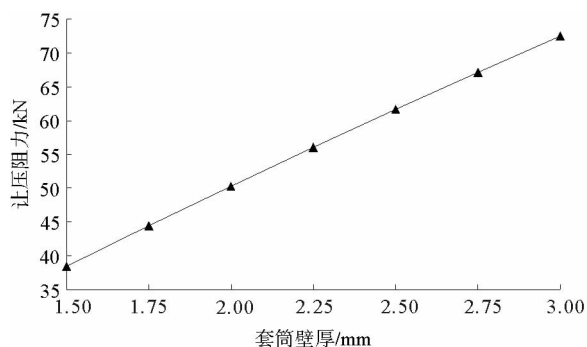
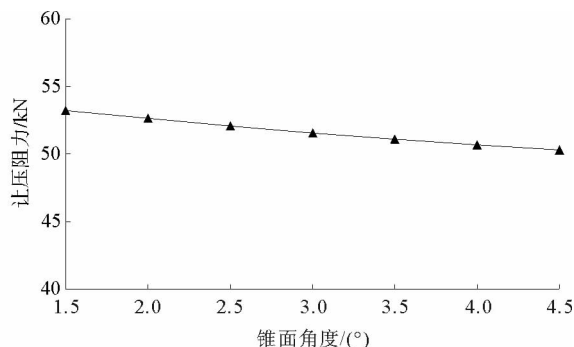


图6 平直部与套筒之间应力状态

Fig. 6 Stress state between straight portion and sleeve



(a) 套筒壁厚与让压阻力之间的关系



(b) 锥面角度与让压阻力之间的关系

图7 构件尺寸与让压阻力的关系

Fig. 7 Relationship between component size and yielding pressure resistance

仅为 $0.098 \text{ kN}/(^{\circ})$, 锥面角度的改变对阻力大小影响较小。

2.3 让压阻力变化过程分析

杆体增阻头锥体部分在平面上为直线, 波纹段在平面上为曲线, 增阻头锥体与波纹段的相对运动是直线与弧线的相切过程, 前述计算的是增阻头锥体与波纹段达到最大接触面积时的阻力, 即计算的结果为增阻头与波纹段相对运动过程中的最大让压阻力 P 。当增阻头锥体部分与波纹段接触后, 波纹段产生塑性变形提供让压阻力。在与一个波纹相对运动的前半过程中接触面积不断增大, 让压阻力也随之增大, 接触面积达到最大时让压阻力到达峰值; 由波纹形状的特性可知, 当接触面积达到极大值之后, 在后半过程中接触面积开始反向减小, 让压阻力也随之减小, 直至增阻头开始与下一个波纹接触。让压阻力重复上述变化过程, 其整体变化趋势呈波形。

3 让压套筒阻力测试

3.1 试验设备及材料

采用恒定速率加载方式, 对两组参数相同的试件进行拉拔试验。采用外径 32 mm , 壁厚 1 mm 的 304 不锈钢管作为波纹套筒, 杆体采用 GCr15 圆钢加工。套筒平直部分外径和内径分别为 32.9 和 29.5 mm 。为避免杆体与试验机夹具脱离, 在杆体端部加工外螺纹。另外, 波纹套筒为壁厚较小的空心管, 试验机夹头在高压模式下, 极易夹扁套筒, 导致套筒夹具之间无法保持足够的摩擦力。因此, 设计加工填充铁块, 并在外表面加工外螺纹以增加摩擦力, 试件组合方式如图 8 所示。

3.2 试验过程及数据分析

本次试验对两个相同试件进行拉拔试验, 将组合完毕的试件两端夹在试验机夹具上, 通过恒定速率对试件进行加载。根据试验测试数据, 可得位移与让压阻力之间的关系如图 9 所示。

由图 9 可知, 在非黏结状态下, 该锚杆让压阻力随着拉伸呈波形变化, 该变化趋势与 2.3 节让压阻力计算分析一致。两试件阻力变化趋势一致, 峰值大小基本相同, 峰值阻力平均值为 28.00 kN 。根据试验选取材料及结构尺寸, $D_2 = 32 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$, $\theta = 10^{\circ}$, $\delta = 1.35 \text{ mm}$, 不考虑黏结力, 让压阻力理论值为 26.06 kN 。与实际数据相比, 理论计算低了 1.94 kN , 误差为 7.4% , 相对较小。另外, 由于试件 2 的杆体居中度不够, 导致套筒在拉拔过程中出现破裂, 但是破裂区域的阻力峰值与试件 1 几乎相同, 说明该设计结构下套筒的破裂不会导致让压阻力的下降, 该锚杆让压峰值阻力具有较强的稳定性。

4 结论

1) 全长黏结大变形让压锚杆可提供较大让压距离和连续工作阻力。其工作全过程可分为弹性变形阶段、让压变形阶段及极限变形阶段, 工作过程中具有较快的增阻速度, 同时在围岩发生大变形时通过让压变

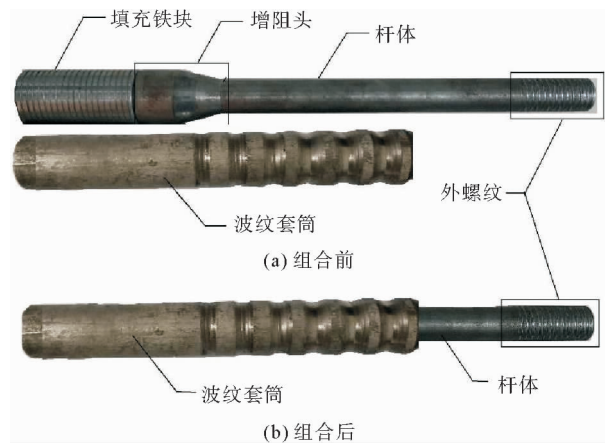


图 8 试件组合方式

Fig. 8 Combination mode of each component

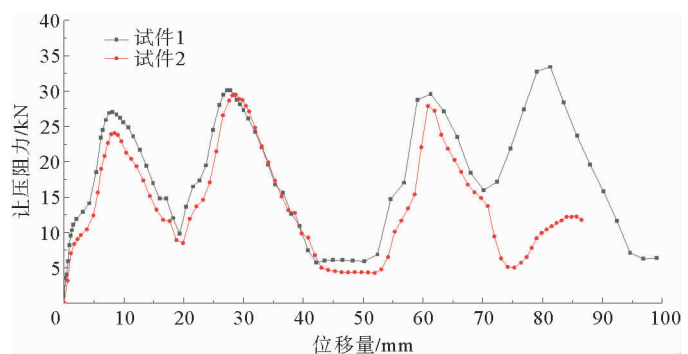


图 9 位移-让压阻力曲线图

Fig. 9 Displacement-yielding resistance curve

形有控制的释放围岩内部能量,可以有效维护围岩稳定,为大变形软岩巷道提供了一种新型的支护结构。

2) 该锚杆波纹套筒让压阻力由增阻头锥面及平直部与波纹套筒之间作用力组成。让压阻力随着套筒壁厚的增加近乎呈线性提高,其阻力增加速率为 22.8 kN/mm;而随着锥角的增大,阻力不断减小,降低速率仅为 0.098 kN/°。

3) 通过室内拉拔试验得到该锚杆在非黏结状态下的位移-让压阻力曲线,试验结果显示,理论计算结果与实测数据吻合度较高,两者之间偏差仅为 7.4%。同时,在拉拔过程中套筒的破坏对阻力峰值造成影响极小,具备很好的阻力峰值稳定性。

参考文献:

- [1] 孙晓明,王冬,王聪,等.恒阻大变形锚杆拉伸力学性能及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1765-1771.
SUN Xiaoming, WANG Dong, WANG Cong, et al. Tensile properties and application of constant resistance and large deformation bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1765-1771.
- [2] 何满潮,袁和生,靖洪文,等.中国煤矿锚杆支护理论与实践[M].北京:科学出版社,2004:71-76.
HE Manchao, YUAN Hesheng, JING Hongwen, et al. Theory and practice of bolt support in coal mine of China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 71-76.
- [3] ANSELL A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 291-300.
- [4] SIMSER B. Modified cone bolt static and dynamic tests[R]. Quebec: Noranta Technology Center Internal, 2002.
- [5] LI C C. A new energy absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 396-404.
- [6] 杨喻声.一种大尺度让压锚杆特性分析及其应用研究[J].隧道建设,2017,37(3):321-329.
YANG Yusheng. Study of performance and application of yielding anchor bolt with large allowable deformation[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 321-329.
- [7] 郭永建,姜飞,周浩,等.新型让压锚杆作用机理研究[J].力学与实践,2015,37(2):193-196.
GUO Yongjian, JIANG Fei, ZHOU Hao, et al. The mechanism of the new-type yielding bolt[J]. Mechanics and Practice, 2015, 37(2): 193-196.
- [8] 张彪,张志强,汪波,等.让压锚杆在大变形隧道支护应用中试验研究[J].岩土力学,2016,37(7):2047-2055.
ZHANG Biao, ZHANG Zhiqiang, WANG Bo, et al. Experimental study of application of yielding bolt to large deformation tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2047-2055.
- [9] 张耀.全长黏结型水泥砂浆锚杆设计及基本试验浅析[J].高速铁路技术,2018,9(3):18-22.
ZHANG Yao. Brief analysis on design and basic test of full-length bonded cement mortar anchor bolt[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3): 18-22.
- [10] 杨新华,王连国,陆银龙.新型高强让压螺纹钢注浆锚杆研究[J].煤矿机械,2011,32(10):160-162.
YANG Xinhua, WANG Lianguo, LU Yinlong. Research on new high strength and yield rebar grouting bolt[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(10): 160-162.
- [11] 马振乾,杨英明,张科学,等.新型中空注浆锚索及其在动压巷道中的应用[J].煤炭科学技术,2015,43(7):15-19.
MA Zhenqian, YANG Yingming, ZHANG Kexue, et al. New hollow grouting anchor and application to dynamic pressure roadway[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 15-19.
- [12] 白晓宇,张明义,匡政,等.全长黏结岩石 GFRP 抗浮锚杆变形特性分析[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1466-1473.
BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, KUANG Zheng, et al. Deformation of full-length bonded GFRP anti-floating anchor in rock foundation[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(4): 1466-1473.
- [13] 漆泰岳.大变形巷道锚杆力学特性的数值模拟[J].西安科技学院学报,2003(4):379-381.
QI Taiyue. Mechanical characteristics of rock bolts in the roadway with large deformation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003(4): 379-381.
- [14] 湛理全,杨丹,龙爱伟,等.基于管材拉拔计算膨胀管膨胀力及有限元分析[J].自动化应用,2015(3):31-33.
CHEN Liqun, YANG Dan, LONG Aiwei, et al. Calculation of expansion tube expansion force and finite element analysis based on pipe drawing[J]. Automated Application, 2015(3): 31-33.

(责任编辑:吕海亮)