

产品·设计

止浆塞外塞胶料的设计及优化

肖明清¹, 王克金², 崔浩铖³, 杨海波³

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 3. 北京化工大学 材料学院/先进弹性体材料研究中心, 北京 100029)

摘要:设计一种新型具有密封和排气功能的止浆塞, 采用有限元方法对止浆塞的实际工作状态进行数值模拟分析, 对外塞胶料进行优化。结果表明: 随着止浆塞外塞胶料的硬度的减小, 止浆塞的密封性能提高; 综合考虑密封性能和成本, 确定止浆塞外塞采用邵尔A型硬度为40度的天然橡胶胶料。

关键词:止浆塞; 外塞; 胶料; 密封性能; 优化设计; 有限元分析

中图分类号: TQ336.4⁺2

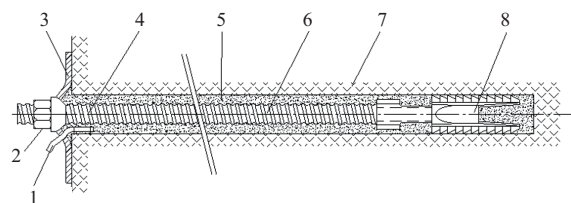
文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2024)04-0281-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2024.04.0281

锚杆支护在交通隧道、水工洞室等地下洞室中广泛应用^[1-3]。目前隧道锚杆施工质量不理想, 其主要原因为砂浆孔注浆困难或者注浆不密实, 无法充分发挥锚杆的支护性能, 一些工点甚至出现了少打锚杆或者取消锚杆的做法。国内常用的注浆锚杆一般由锚固件、中空杆体、止浆体、垫板、螺母、排气(注浆)管组成, 如图1所示。当锚杆用于隧道拱部支护时, 锚杆往上倾斜, 因此采用排气(注浆)管进浆、中空杆体排气(浆)的方式进行砂浆孔注浆; 当锚杆用于隧道边墙支护时, 锚杆往下倾斜, 因此采用中空杆体进浆、排气(注浆)管排气(浆)的方式进行砂浆孔注浆。现有技术存在的主要问题是: (1) 由于排气(注浆)管、中空杆体没有止浆塞, 注浆过程中无法稳压, 浆液无法渗入围岩, 降低了锚固效果; (2) 对于拱部锚杆, 注浆完成并拔除注浆连接管后, 由于浆液尚处于流动状态, 部分浆液会从排气(注浆)管回流, 使锚杆周边形成局部空洞, 造成注浆不饱满。因此本研究设计了一种新型具有密封和排气功能的止浆塞, 使用有限元方法对止浆塞的实际工作状态进行数值

模拟分析, 以确定止浆塞外塞所需要的合适材料性能。



1—注浆(排气)管; 2—螺母; 3—垫板; 4—止浆体; 5—注浆固结体;
6—中空杆体; 7—地层; 8—涨壳式锚固件。

图1 现有锚杆总成结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of existing anchor rod assembly

1 有限元模型建立

止浆塞是由外塞和内塞组成(如图2所示), 内塞内部的螺纹旋入锚杆, 施工时止浆塞插入砂浆孔, 在砂浆压力的作用下, 止浆塞外表面与砂浆孔、内表面与锚杆接触实现密封, 内塞外表面开有排气孔, 实现排气。

通过试算, 发现外塞上部外表面与砂浆孔的接触面是主要工作部分, 而其接触应力与外塞和

作者简介:肖明清(1970—), 男, 湖南邵阳人, 中铁第四勘察设计院集团有限公司正高级工程师, 博士, 主要从事隧道与地下工程的设计与研究

E-mail: tsyxmq@163.com

引用本文:肖明清, 王克金, 崔浩铖, 等. 止浆塞外塞胶料的设计及优化[J]. 橡胶工业, 2024, 71(4): 281-286.

Citation: XIAO Mingqing, WANG Kejin, CUI Haocheng, et al. Design and optimization of compound for outer part of stop-grouting plug[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(4): 281-286.

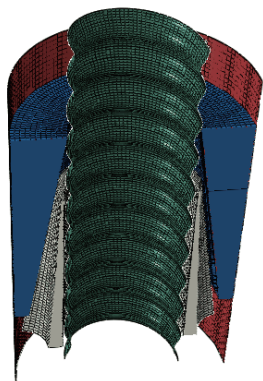
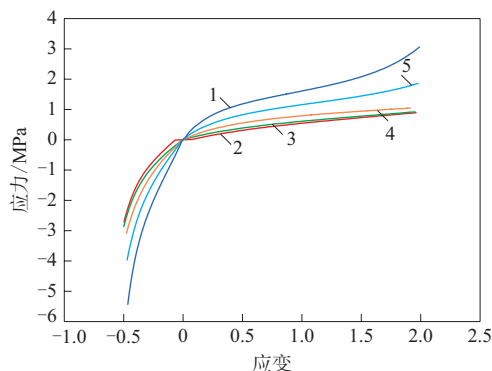


图2 止浆塞的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stop-grouting plug

锚杆的接触状态相关,因此不能忽略锚杆的螺纹形状,而螺杆不具有轴对称性,这样就需要建立全尺寸的三维分析模型。

设计了5种外塞胶料(三元乙丙橡胶胶料简称为EPDM,天然橡胶胶料简称为NR),试验获取胶料的单轴拉伸和压缩数据(如图3所示),关于高弹性材料本构方程的选择文献[4-8]中有很多讨论,本课题根据高弹性材料本构方程与试验数据的拟合精度,确定外塞胶料采用Ogden超弹本构方程。



1—EPDM40(表示邵尔A型硬度为40度的EPDM胶料,后类同);
2—EPDM50;3—EPDM60;4—EPDM70;
5—NR40。

图3 止浆塞外塞胶料的力学性能曲线

Fig. 3 Mechanical performance curves of compounds of outer parts of stop-grouting plugs

因为锚杆、砂浆孔材料的弹性模量远远大于内塞胶料的弹性模量,所以模型中锚杆和砂浆孔采用刚性面,内塞胶料的弹性模量设定为2.2 GPa,泊松比为0.394。

根据止浆塞的工作条件,模型中外塞与内塞和锚杆、外塞与内塞以及外塞与砂浆孔建立接触条件,接触的法向为硬接触,接触的切向采用罚函

数并通过设定摩擦因数而建立摩擦条件,以分析各接触对间的摩擦作用。

以外塞(如图4所示)上表面的内外两个圆(图4中红色圆)上每个节点为起始点,确定每个起始点在泄漏方向(高度方向)上的最大接触应力,将此定义为最大接触应力,而在确定的所有最大接触应力中,将最小值定义为当前载荷下的最小接触应力。

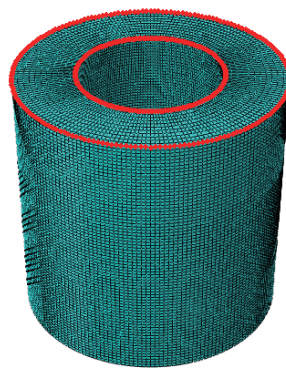


图4 止浆塞的外塞

Fig. 4 Outer part of stop-grouting plug

2 计算结果分析

2.1 止浆塞外塞与砂浆孔的接触应力

止浆塞外塞胶料的硬度不仅影响外塞与砂浆孔的接触应力大小,也影响外塞与砂浆孔的接触应力分布位置,砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与砂浆孔的最大接触应力分布和接触应力分布分别如图5和6所示。对于EPDM外塞,EPDM40外塞与砂浆孔的最大接触应力分布于外塞外表面的上部,对应外塞内表面与锚杆的接触位置,说明最大接触应力主要是由锚杆与外塞接触造成挤压形成的,最大接触应力最大值为0.692 8 MPa,最小值为0.634 9 MPa,分布比较均匀。EPDM50, EPDM60和EPDM70外塞与砂浆孔的最大接触应力位置下移到外塞外表面的中上部,对应外塞内表面与内塞上表面的接触线位置,说明最大接触应力除了由锚杆与外塞接触造成挤压形成外,还有由内塞上表面与外塞内表面的挤压作用形成的。EPDM50外塞与砂浆孔的最大接触应力最大值为0.688 4 MPa,最小值为0.588 7 MPa; EPDM60外塞与砂浆孔的最大接触应力最大值为0.668 2 MPa,最小值为0.500 4 MPa; EPDM70

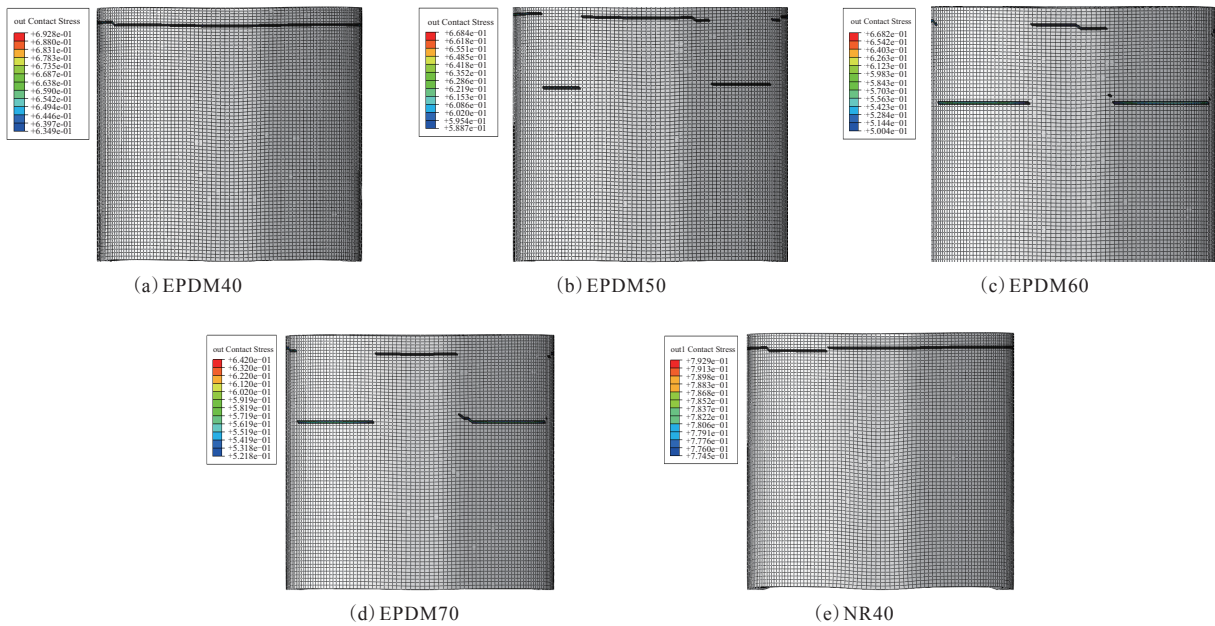


图5 砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与砂浆孔的最大接触应力分布

Fig. 5 Maximum contact stress distributions between outer parts of stop-grouting plugs and mortar holes under mortar pressure of 1 MPa

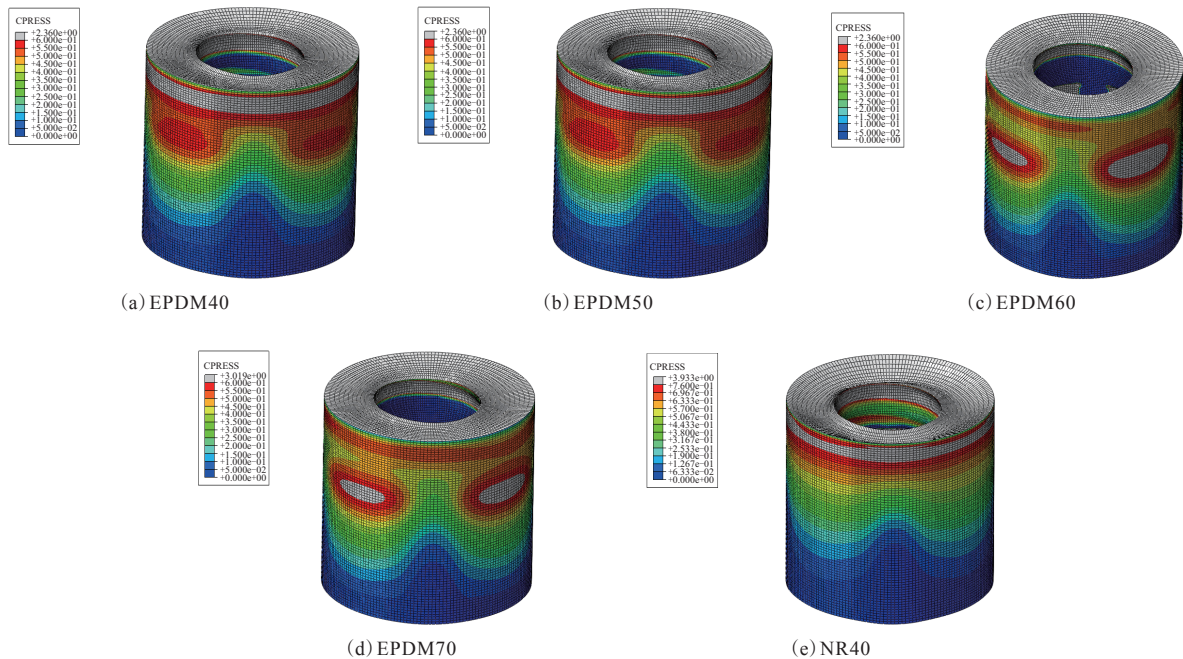


图6 砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与砂浆孔的接触应力分布

Fig. 6 Contact stress distributions between outer parts of stop-grouting plugs and mortar holes under mortar pressure of 1 MPa

外塞与砂浆孔的最大接触应力最大值为0.642 0 MPa,最小值为0.521 8 MPa,接触应力分布不均匀。NR外塞与砂浆孔的最大接触应力分布于外塞外表面的上部,对应外塞内表面与锚杆的接触位置,NR40外塞与砂浆孔的最大接触应力最大值

和最小值分别为0.792 9和0.774 5 MPa,均大于EPDM40外塞与砂浆孔的相应值,且分布均匀。

止浆塞外塞与砂浆孔的最小接触应力随砂浆压力的变化曲线如图7所示。

从图7可以看出:对于EPDM外塞,当砂浆压力

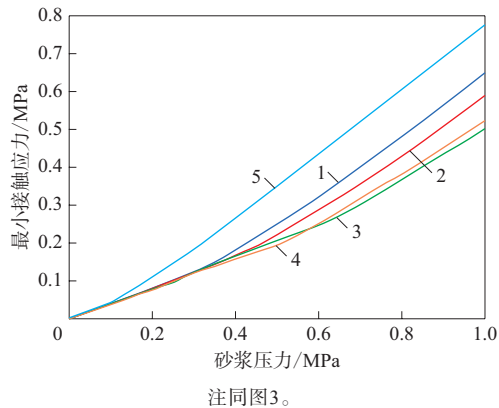


图7 止浆塞外塞与砂浆孔最小接触应力随砂浆压力的变化曲线

Fig. 7 Curves of minimum contact stresses between outer parts of stop-grouting plugs and mortar holes as variation of mortar pressures

小于0.3 MPa时,外塞胶料的力学性能对外塞与砂浆孔的最小接触应力几乎没有影响;当砂浆压力达到1 MPa时,EPDM60和EPDM70外塞与砂浆孔的最小接触应力几乎相等,约为0.50 MPa,而EPDM40外塞与砂浆孔的最小接触应力为0.65 MPa,增大了30%。当砂浆压力大于0.1 MPa, NR40外塞与砂浆孔的最小接触应力大于EPDM胶料,且随砂浆压力增大而增长较快。NR40外塞与砂浆孔的最小接触应力(y)与砂浆压力(x)的拟合

关系式为

$$y=0.15x^2+0.65x-0.02$$

当砂浆压力分别为0.2, 0.5和1.0 MPa时,外塞与砂浆孔的最小接触应力分别为0.116 0, 0.342 5和0.780 0 MPa。由此可知, NR40外塞与砂浆孔间的密封作用更大。

2.2 止浆塞外塞与内塞和锚杆的接触应力

砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与内塞和锚杆最大接触应力分布和接触应力分布分别如图8和9所示。

从图8和9可以看出:对于EPDM外塞,砂浆压力为1 MPa时,除了排气孔位置,EPDM40外塞与内塞和锚杆的最大接触应力位于外塞内表面与内塞上表面的接触位置;在排气孔处,最大接触应力位于外塞内表面与锚杆的接触位置,外塞内表面与锚杆间的接触应力大于1.0 MPa;EPDM50, EPDM60和EPDM70外塞与内塞和锚杆的最大接触应力位于外塞内表面的上部,即外塞内表面与锚杆的接触位置,说明外塞与内塞和锚杆间的密封主要靠外塞与锚杆的接触实现。砂浆压力为1 MPa, EPDM40, EPDM50, EPDM60和EPDM70外塞与内塞和锚杆的最大接触应力的最大值和最小值分别对应为2.352和1.009, 1.434和0.993,

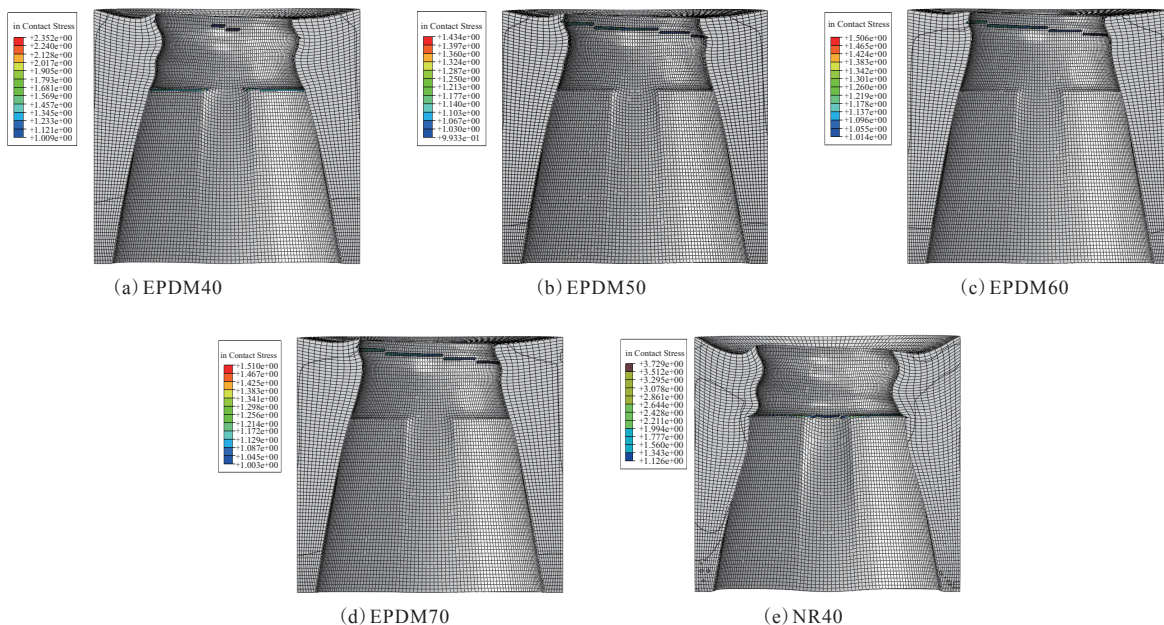


图8 砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与内塞和锚杆最大接触应力分布

Fig. 8 Maximum contact stress distributions between outer parts and inner parts of stop-grouting plugs and anchor rods under mortar pressure of 1 MPa

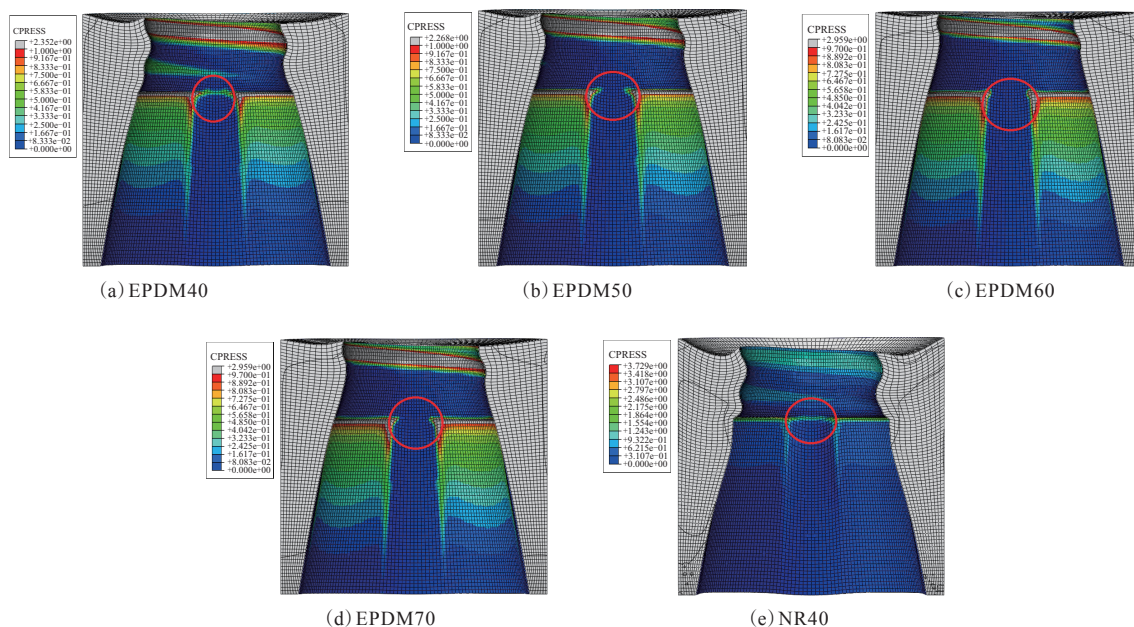


图9 砂浆压力1 MPa下止浆塞外塞与内塞和锚杆接触应力分布

Fig. 9 Contact stress distributions between outer parts and inner parts of stop-grouting plugs and anchor rods under mortar pressure of 1 MPa

1.506和1.014, 1.510和1.003 MPa, 可见外塞胶料力学性能对外塞与内塞和锚杆的最大接触应力最小值影响不大, 并且约等于砂浆压力。而随着外塞胶料硬度增大, 外塞与内塞、锚杆的最大接触应力的最大值呈减小趋势。从图9还可以看出, 当砂浆压力为1 MPa时, 外塞内表面与锚杆间的接触应力都大于1.0 MPa, 因此外塞内表面与锚杆的接触决定了外塞内表面的密封性能。

从图8和9还可以看出, NR40外塞内表面的最大接触应力位于内塞上表面与外塞内表面的接触线, 最大接触应力最大值和最小值分别为3.729和1.126 MPa, 在内塞上表面以上的外塞内表面部分, 最大接触应力位于外塞与锚杆的接触位置, 均大于1.0 MPa, 对砂浆的密封应该在外塞内表面与锚杆的接触位置。外塞内表面的下部的接触应力为零, 表明外塞内表面与内塞没有建立有效的接触。

外塞与内塞和锚杆的高度方向最大接触应力大于外塞与砂浆孔的最大接触应力, 说明外塞与内塞和锚杆间的密封更可靠。

止浆塞外塞与内塞和锚杆的最小接触应力随砂浆压力的变化曲线如图10所示。

从图10可以看出, EPDM40, EPDM50, EPDM60和EPDM70外塞与内塞和锚杆的最小

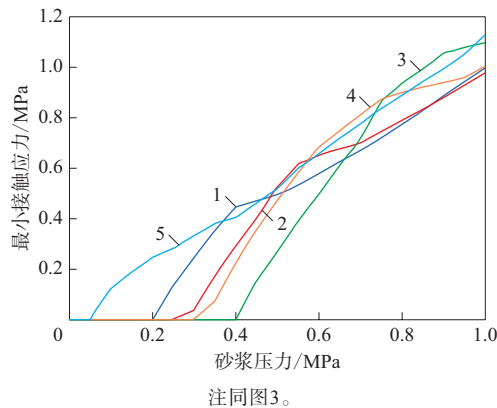


图10 止浆塞外塞与内塞和锚杆最小接触应力随砂浆压力的变化曲线

Fig. 10 Curves of minimum contact stresses between outer parts and inner parts of stop-grouting plugs and anchor rods as variation of mortar pressures

接触应力开始大于零时的砂浆压力分别为0.20, 0.25, 0.31和0.40 MPa, 即当砂浆压力小于以上值时, 外塞内表面还没有建立完全有效的接触, 排气孔没有封闭, 可以实现排气。EPDM40外塞止浆塞排气孔在砂浆压力达到0.9 MPa时封闭, 其他胶料止浆塞排气孔直到砂浆压力达到1 MPa也没有封闭(见图8)。随着砂浆压力的增大, 外塞与内塞和锚杆的高度方向最小接触应力的差值逐渐减小, 说明砂浆压力增大与密封增强作用相近。对

于NR40内塞,当砂浆压力小于0.05 MPa时,内塞内表面的最小接触应力为零;当砂浆压力达到0.3 MPa时,内塞上的排气孔才完全封闭;当砂浆压力大于0.05 MPa时,内塞内表面的最小接触应力随着砂浆压力的增大几乎呈线性增大,内塞内表面的最小接触应力(y)与砂浆压力(x)的拟合关系式为:

$$y=0.83x-0.06$$

3 结论

(1) 止浆塞外塞的内表面上最大接触应力大于外表面上最大接触应力,止浆塞的密封性能取决于外塞外表面与砂浆孔的接触应力。

(2) 胶料硬度小的止浆塞外塞与砂浆孔间的最大接触应力分布于外塞外表面的上部,对应外塞内表面与锚杆的接触位置;胶料硬度大的止浆塞外塞与砂浆孔的最大接触应力位置下移到外塞外表面的中上部,对应外塞内表面与内塞上表面的接触线位置。说明最大接触应力除了由锚杆与外塞接触挤压产生,还由内塞上表面与外塞内表面接触线位置挤压产生。

(3) 随着止浆塞外塞胶料硬度的减小,决定止浆塞外塞与砂浆孔间密封性能的接触应力增大,主要是因为外塞变形受限,硬度越小,变形越大,体积应变和偏应变分量越大。考虑到成本,外塞宜选用邵尔A型硬度为40度的NR胶料。

参考文献:

- [1] 薛利兵. 浅谈锚杆支护[J]. 科技与创新, 2014(13):31.
XUE L B. Talk about bolt support[J]. Science and Technology & Innovation, 2014(13):31.
- [2] 孟建兵, 谭江江, 杨家华. 沿空掘巷锚杆支护[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001, 8(3):23-24, 26.
MENG J B, TAN J J, YANG J H. Bolt supporting in gob-side driving entry[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2001, 8(3):23-24, 26.
- [3] 刘洪斌. 锚杆支护技术的应用与优化[J]. 矿业装备, 2023(2):37-39.
LIU H B. Application and optimization of anchor rod support technology[J]. Mining Equipment, 2023(2):37-39.
- [4] LI Z, WANG Y L, LI X, et al. Experimental investigation and constitutive modeling of uncured carbon black filled rubber at different strain rates[J]. Polymer Testing, 2019, 75:117-126.
- [5] WEI Y, YIN Z, GU Z, et al. Constitutive equation for description of stress-strain behaviors of rubber in the whole strain range[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2018, 34(3):81-86.
- [6] ZHAO Z H, MU X H, DU F P. Modeling and verification of a new hyperelastic model for rubber-like materials[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019(13):1-10.
- [7] KIM B, LEE S B, LEE J, et al. A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(5):759-764.
- [8] 王新宇, 岳冬梅, 杨海波, 等. 炭黑填充天然橡胶超弹性本构方程的适用性分析[J]. 橡胶工业, 2021, 68(7):491-497.
WANG X Y, YUE D M, YANG H B, et al. Applicability analysis of superelastic constitutive equation of carbon black filled NR[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(7):491-497.

收稿日期:2023-12-16

Design and Optimization of Compound for Outer Part of Stop-grouting Plug

XIAO Mingqing¹, WANG Kejin², CUI Haocheng³, YANG Haibo³

(1. China Railway Siyuan Survey & Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, China; 3. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A new type of stop-grouting plug with sealing and exhausting functions was designed, and numerical simulation analysis of the actual working state of the stop-grouting plug was carried out using the finite element method to optimize the compound of the outer part of the stop-grouting plug. The results showed that as the hardness of the compound for the outer part of the stop-grouting plug decreased, the sealing performance of the stop-grouting plug was improved. Taking into account both sealing performance and cost, it was determined that the outer part of the stop-grouting plug was made of NR compound with a Shore A hardness of 40 degrees.

Key words: stop-grouting plug; out part; compound; sealing performance; optimization design; finite element analysis