



拉伸荷载条件下新型NPR锚杆韧性材料宏观变形特征分析

陶志刚 隋麒麟 丰于翔 孟志刚 姚旭龙 何满潮

Macroscopic analysis of deformation characterization of a novel NPR bolt ductile material under tensile action

TAO Zhigang, SUI Qiru, FENG Yuxiang, MENG Zhigang, YAO Xulong, HE Manchao

在线阅读 View online: [http://lks.xml-](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/ff5b31919a24b8d671d4a856e8ce60d4592187061bcd0394422896f238b5427a)

[journal.net/article/shaid/ff5b31919a24b8d671d4a856e8ce60d4592187061bcd0394422896f238b5427a](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/ff5b31919a24b8d671d4a856e8ce60d4592187061bcd0394422896f238b5427a)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿巷道随钻探测及锚固支护关键技术

Key technology of detection while drilling and anchoring support in coal mine roadway

绿色矿山. 2025, 3(1): 37-43.

深地砂岩铀矿溶浸开采体系孔裂渗流透明表征与定向干预研究进展

Advances in transparent characterization and targeted intervention for fracture-seepage in deep sandstone uranium leaching systems

绿色矿山. 2024, 2(4): 381-396.

煤矿采动导水裂缝带高度的预测及探测方法进展

Progress of prediction and detection methods for the height of fractured water-conducting zone in coal mines

绿色矿山. 2025, 3(1): 1-13.

岩体力学参数旋切钻进测试方法研究进展

Research progress on rotary cutting drilling testing method for rock mechanics parameters

绿色矿山. 2024, 2(4): 333-343.

宁东涉煤产业区煤电化场地特征与分区管控

Characteristics and zoning control of coal-electricity sites in the Ningdong coal-related industrial zone

绿色矿山. 2024, 2(4): 408-423.



关注微信公众号，获得更多资讯信息

拉伸荷载条件下新型 NPR 锚杆韧性材料宏观变形特征分析

陶志刚^{1,2,3}, 隋麒麟^{1,2}, 丰于翔^{1,2}, 孟志刚⁴, 姚旭龙³, 何满潮^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083; 3. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 4. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:岩土工程在受到复杂地质条件的综合作用时极易产生大变形灾害响应, 传统金属支护材料因不能够忍受大变形而发生失效破坏现象。为应对大变形灾害, 研发了新型 NPR 锚杆韧性材料 (Negative Poisson's Ratio bolt)。为了探索新型 NPR 锚杆韧性材料的宏观变形特征, 开展了 NPR 锚杆室内拉伸对比试验。采用 NPR 锚杆专用试验机, 并利用相机进行全过程变形特征记录。结果发现: NPR 锚杆具有更好的均匀变形特性, 且在拉伸变形失效全过程早期阶段就开始发生均匀变形; 对不同钢筋进行失效断口分类: 主要分为“分层型断口”和“纤维-基体之间的界面破坏类断裂型断口”; 通过力学机制分析 NPR 锚杆均匀变形特性及颈缩现象不显著的原因: 发现 NPR 钢在拉伸变形失效后的颈缩处曲率半径更大, 使其颈缩现象不明显, 这是由于其最大均匀应变与最大应变差值相对较小所致; 通过 LS-DYNA 算法对螺纹肋结构和光圆结构对于钢筋变形的影响进行数值模拟分析, 结果证明螺纹肋结构使得钢筋在拉伸过程中能够更好地均匀变形, 吸收变形能。综上所述, 通过对新型 NPR 锚杆韧性材料的变形特征的宏观分析, 有助于更好地揭示其静力拉伸性能, 为准静态工程实践提供了有价值的参考。

关键词: 韧性材料; NPR 锚杆; 拉伸试验; 变形特征; 宏观分析

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-3357(2025)01-0044-07

Macroscopic analysis of deformation characterization of a novel NPR bolt ductile material under tensile action

TAO Zhigang^{1,2,3}, SUI Qiru^{1,2}, FENG Yuxiang^{1,2}, MENG Zhigang⁴, YAO Xulong³, HE Manchao^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo TechUniversity, Ningbo 315100, China)

Abstract: According to the research, geotechnical engineering is easy to produce large deformation disasters when subjected to complex geological conditions, and the conventional support materials are unable to tolerate the large deformation and failure damage occurs. To cope with the large deformation disaster, the author's team developed a novel ductile material NPR (Negative Poisson's ratio) bolt. In this paper, in order to explore the macroscopic deformation characteristics of

收稿日期: 2025-01-10 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.26940/j.cnki.10-1912/TD.2508

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42377154); 中央高校基本科研业务费(中国矿业大学(北京) 博士研究生拔尖创新人才培养基金资助项目)(BBJ2024093); 宁波市甬江人才工程资助项目(2022A-231-G)

作者简介: 陶志刚(1981—), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: taozhigang@cumtb.edu.cn

通讯作者: 隋麒麟(1996—), 男, 吉林辽源人, 博士研究生。E-mail: suiqiru@163.com

引用格式: 陶志刚, 隋麒麟, 丰于翔, 等. 拉伸荷载条件下新型 NPR 锚杆韧性材料宏观变形特征分析[J]. 绿色矿山, 2025, 3(1): 44-50.

TAO Zhigang, SUI Qiru, FENG Yuxiang, et al. Macroscopic analysis of deformation characterization of a novel NPR bolt ductile material under tensile action[J]. Journal of Green Mine, 2025, 3(1): 44-50.



移动阅读

the novel ductile material NPR bolts, indoor tensile comparison experiments of NPR bolts were carried out. The experiment adopts a universal testing machine for NPR bolts, and utilizes a camera to record the deformation characteristic of the whole process. The experimental results found that: NPR bolts have better uniform deformation characteristics, and uniform deformation begins to occur in the early stage of the whole process of tensile deformation failure; The failure fractures classification of different steel bars, which were mainly divided into “delamination-type fracture surfaces” and “fracture-type fracture surfaces” where the interface between the fibers and the matrix breaks down; Analyzing the uniform deformation characteristics of the NPR anchors through the mechanical mechanisms and the reason for the insignificant necking phenomenon: it is found that the radius of curvature of NPR steel is larger at the necking place after tensile deformation failure, so that the necking phenomenon is not obvious, which is due to the relatively small difference between the maximum uniform strain and the maximum strain; Numerical simulation of the effects of the threaded-rib structure and the light-circle structure on the deformation of the steel bars is carried out by the LS-DYNA algorithm: the analysis results show that the threaded-rib structure makes the steel bars better deformed during the tensile process, which is the result of the numerical simulation. The results show that the threaded rib structure makes the steel better deformed uniformly and absorbs the deformation energy in the tensile process. In summary, the macroscopic analysis of the deformation characteristics of the novel NPR bolt ductile material helps to better reveal its static tensile properties, which provides a valuable reference for quasi-static engineering practice.

Key words: ductile materials; NPR bolt; tensile testing; deformation characterization; macroscopic analysis

0 引 言

在岩土工程领域中, 预应力锚杆(索)作为一种重要的支护和加固材料, 往往发挥着重要的主动控制作用。无论是在隧道工程^[1]、能源工程^[2-3], 还是在边坡工程^[4-6]等重要领域, 锚杆(索)都得到了广泛的工程应用。众所周知, 岩土工程往往面临着极为复杂的综合地质作用, 在这样的环境作用下, 岩土体大变形灾害^[7-10]常有发生。传统钢筋作为锚杆(索)的主要制作材料之一, 属于小变形材料, 延伸率较低, 因无法有效忍受岩土体大变形而出现颈缩、拉断等失效现象, 从而发生“锚索炸弹”的次生事故^[11-13]。

因此, 2009—2014年, 笔者团队基于“理想塑性材料”的理念研发出 2 代具有恒阻大变形特性的新型预应力支护材料, 称之为结构型韧性材料和材料型韧性材料。结构型材料是通过恒阻套筒与恒阻体的精密几何组合, 实现其在准静力拉伸荷载作用下发生内部摩擦滑移而产生恒定阻力的韧性材料^[14-15]。该结构的巧妙之处是不通过改变传统金属材料的属性, 而是利用恒阻套筒与恒阻体之间的几何设计, 实现摩擦滑移恒阻力低于传统材料屈服强度的 92%~95%, 最终实现保障传统金属材料不被拉断破坏的目标^[16]。结构型材料完美实现了材料在轴向拉伸过程中径向变粗, 是一种具有负泊松比 (Negative Poisson's ratio, NPR) 效应的新材料。因此, 研发的新材料也称为 NPR 韧性材料。结构型 NPR 材料是一种成熟的韧性材料, 但其并非材料自身力学特性的提升, 而是通过

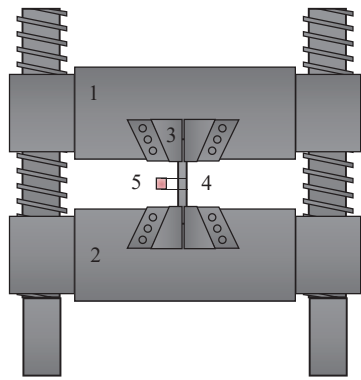
结构弥补了材料属性的小变形瓶颈。基于此, 2014 年笔者团队通过改变冶金技术, 研发了材料本身具有一定负泊松比特点的新型材料型 NPR 韧性材料^[17]。本文所探索的新型 NPR 锚杆韧性材料就是上述材料型韧性材料。韧性材料在岩土体发生大变形时吸收变形能, 从而控制岩土体变形, 实现无损控制岩土体大变形。

目前, 对于 NPR 锚杆(索)的研究已取得了一定成果, 现有研究大多集中在 NPR 锚杆的力学性能和工程应用方面, 如静力拉伸特性^[18]、动态拉伸特性^[19]、拉剪特性^[20]、轴向落锤冲击特性^[21]、径向落锤冲击特性^[22]以及其锚固岩体的剪切力学特性^[23-27]研究。新型韧性材料 NPR 锚杆具备传统锚杆所无法比拟的优良特性, 如更高的抗拉强度、更好的延展性、韧性以及抗冲击性等。在拉伸作用下, 其性能表现对于保障工程结构的稳定性和安全性至关重要。现有研究在分析 NPR 锚杆变形特性时主要聚焦在微观层面^[27-29], 缺乏从宏观角度进行分析和研究。拉伸是锚杆在工程服役过程中最常面临的受力状态, 对新型韧性 NPR 锚杆在拉伸作用下的变形特征和响应规律进行宏观分析, 不仅有助于揭示 NPR 锚杆的工作机理和临界失效模式, 还能为工程设计和施工提供重要的理论依据与技术支持, 继而采取有效的预防措施和改进方法, 提高 NPR 锚杆的可靠性和耐久性, 确保工程的安全与可持续发展。

1 试验设备与材料

本文是基于文献^[21]中的试验结果开展的深入系

统分析。试验材料分别采用 NPR400 钢、NPR800 钢、HRB400E 钢、45 号钢以及 A3 钢。拉伸试验采用 100 t 的 NPR 锚杆试验机对钢筋进行拉伸试验 (图 1)。试验系统包含移动端、固定端、夹具、试样以及引伸计。将不同钢筋的应力-应变数据进行整理 (图 2)。NPR 钢的最大应变超过 0.35, 而传统钢筋中表现最优的 HRB400E 钢最大应变约为 0.2, 说明 NPR 钢相比传统钢筋最大延伸率为 1.7 倍以上。在抗拉强度方面, NPR800 和 NPR400 表现最优, 均为 900 MPa 左右。NPR 钢有明显的准“理想塑性材料”特点, 表现出双折线本构关系。



1—移动端; 2—固定端; 3—夹具; 4—试样; 5—引伸计

图 1 拉伸试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of tensile test device

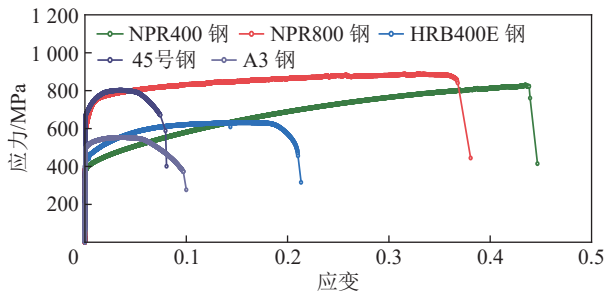


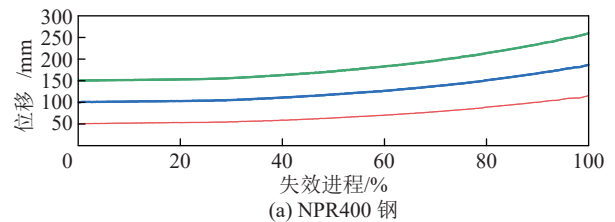
图 2 不同钢筋的应力-应变曲线示意

Fig.2 Schematic stress-strain curves for different steel bars

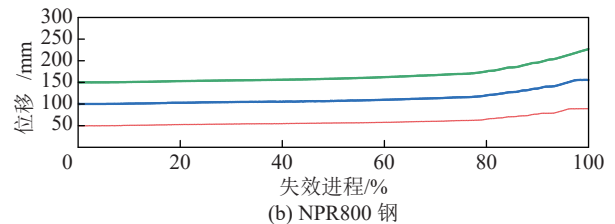
2 拉伸变形失效全过程的分段位移

在开展钢筋拉伸试验前, 试样上标记了 3 个标距点, 间距设定为 50 mm。对不同钢筋在拉伸变形失效全过程中标距点的位移情况进行分析。试验过程中, 采用相机对钢筋拉伸失效的全过程进行拍摄。运用 Tracker 软件进行分析, 该软件通过先建立模板图像, 然后搜索指定帧数图像中与该模板匹配分数最高的图像。匹配分数与模板和匹配图像之间的 RGB(Red、Green、Blue) 差异平方和呈反比。通过确定最佳匹配点, 进行监测位置的数值插入, 从而实现连续的位移监测。

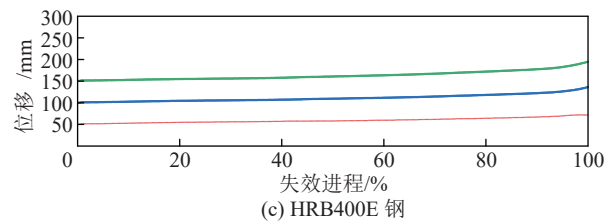
不同钢筋拉伸变形失效全过程的分段位移如图 3 所示。分析结果表明, NPR400 钢的标距位移最大, 但其初始标距点在拉伸过程中也产生了较大位移。45 号钢和 A3 钢的标距位移较小, 说明它们在拉伸过程中变形较小。值得注意的是, NPR400 钢在拉伸失效进程达到 30% 以后便有明显的各分段的位移, 且 NPR800 钢在拉伸变形失效进程达到 80% 时有明显的分段位移突增。然而, 其他钢筋在拉伸变形失效进程达到 90% 以后才开始有明显的位移突增, 其中 45 号钢和 A3 钢基本无明显位移突增, 仅在失效前呈现位移增长趋势。分段位移的突增说明钢筋开始发生明显的均匀变形或颈缩。由于 NPR 钢的颈缩现象不显著, 证明 NPR400 钢在拉伸全过程均具有良好的均



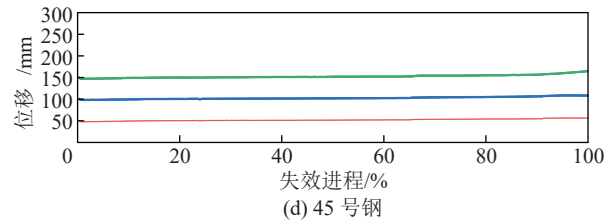
(a) NPR400 钢



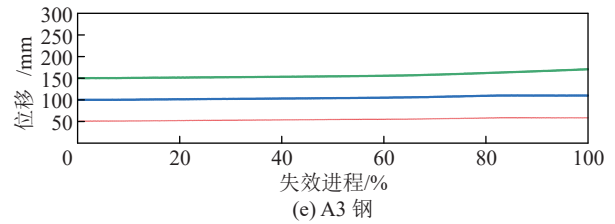
(b) NPR800 钢



(c) HRB400E 钢



(d) 45 号钢



(e) A3 钢

图 3 不同钢筋拉伸变形失效全过程不同标距点位移变化对比
Fig.3 Comparison of displacement changes at different gauge points throughout entire process of tensile deformation failure of different steel bars

匀变形能力。传统钢筋与之相反, 变形能力较差。

上述试验结果表明, NPR 钢在拉伸过程中全尺寸产生较大变形, 进而使得标距点在拉伸过程中也出现了位移。证明了 NPR 锚杆在拉伸失效过程中, 随着锚杆全尺寸的变化, 锚固段会发生部分位移, 从而导致在监测时标距点位置会发生变化。充分说明了 NPR 钢充分发挥了材料自身的优良性能。

3 拉伸失效后的断口对比

将不同钢筋在拉伸失效后的断口进行对比分析, 如图 4 所示。依据文献[21]可知, NPR 钢在拉伸失效后颈缩现象不明显。45 号钢和 A3 钢作为典型的碳素结构钢, 在拉伸过程中产生了大量的塑性变形, 断裂前有明显的颈缩现象。



图 4 不同钢筋拉伸失效后断口对比及简要分类

Fig.4 Comparison and brief classification of fracture after tensile failure of different steel bars

如图 4a 和图 4b 所示, 45 号钢的断裂面较为整齐, 呈现出材料内部的层状结构, 断口由许多微小的纤维状组织组成; A3 钢也呈现出类似的分层现象, 但断口表面有一些不规则的突起, 这可能是由于材料内部的不均匀性导致的。如图 4f 所示, 为上述钢筋的典型断面图, 显示了材料在拉伸过程中发生了层间分离, 形成分层型断口。而其他 3 种钢, 如图 4c、图 4d 和图 4e 所示, NPR800 钢断口显示出材料在拉伸过程中发生了纤维拔出和基体断裂, 断口表面有许多纤维的末端露出, 显示出纤维增强复合材料的特征; NPR400 钢也有类似的纤维拔出现象, 但断口表面有一些不规则的突起和凹陷, 可能是由于纤维和基体之间的界面强度不均匀导致的。值得强调的是, 在 NPR400 钢筋的拉伸过程中, 由于其均匀变形的特点, 可能使得试验机夹具处受力不均匀, 图中所示断口位置为钢筋与夹具接触的夹持段; HRB400E 钢断口显示出较为整齐的纤维拔出和基体断裂的断裂型断口, 断口表面有一些纤维的末端整齐排列, 显示出材料内部的纤维排列较为有序。图 4g 展示了上述钢筋的断口特点, 材料在拉伸过程中发生了纤维和基体之间的界面破坏, 显示了纤维拔出和基体断裂的内部结构。

4 宏观变形机制探讨

以 NPR800 钢和 HRB400E 钢为代表, 分析不同钢筋在拉伸失效后的颈缩现象的差异。陈麓^[30]通过大量试验数据分析发现, 单轴拉伸颈缩过程中颈部外形更符合双曲线的特征, 且在拉伸颈缩过程中, a/R 与 ε 之间的线性关系必然符合式 (1), 如图 5a 所示。

$$a/R = k(\varepsilon - \varepsilon_u) \quad (1)$$

式中: a 为钢筋颈缩部位的半径; R 为钢筋颈缩部位的曲率半径; ε_u 为最大均匀应变; k 为经验系数。

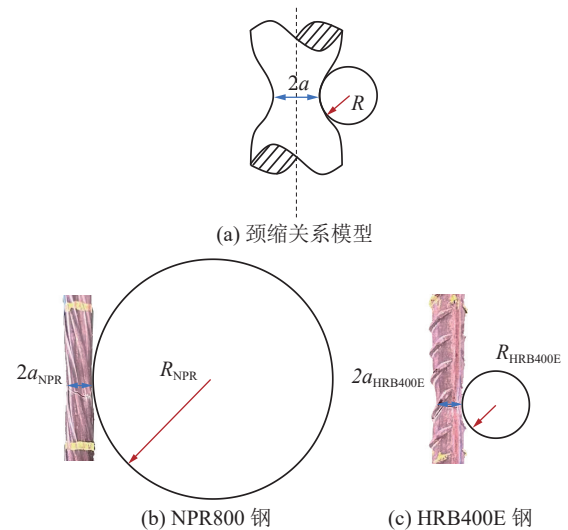
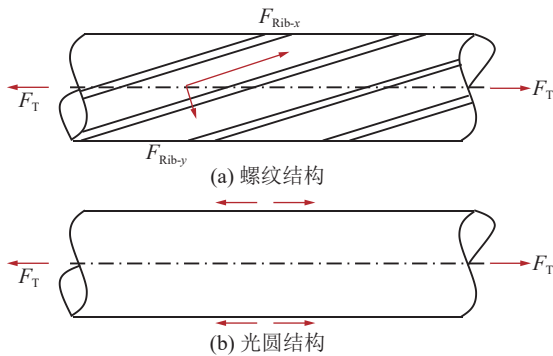


图 5 拉伸情况下颈缩部位关系

Fig.5 Relationship diagram of necking part under tension

通过失效后钢筋断口分析可知, 钢筋颈缩部位的曲率半径越大, 则钢筋在拉伸失效时断口处的颈缩现象就越不明显。也就是说, 当钢筋在拉伸失效时, a/R 的值越小, 则钢筋的颈缩现象就越不明显。当 a/R 无限接近于 0 时, 则钢筋可以视为无颈缩。从应力-应变的角度分析, 当拉伸失效的最大应变和最大均匀应变越接近时, 则钢筋颈缩现象越不明显。钢筋颈缩部位的半径为一个恒定大于 0 的常数, 所以钢筋颈缩部位的曲率半径越大, 则颈缩现象就越不明显。在本文试验中, 选取 NPR800 钢和 HRB400E 钢作为代表进行对比, 如图 5b 和图 5c 所示, NPR800 钢和 HRB400E 钢在拉伸失效后的颈缩部位的半径相差不大, 但 NPR800 钢在颈缩部位的曲率半径远远大于 HRB400E 钢。同时, 在应力-应变曲线中, 当以抗拉强度对应的应变为最大均匀应变时, NPR800 钢的最大均匀应变与最大应变差值比 HRB400E 的小。因此, 验证了 NPR800 钢相比于 HRB400E 钢颈缩现象不明显的宏观因素。

NPR 钢之所以具有更好的均匀变形能力,除了材料的微观结构之间的相互作用外,其宏观结构也使得 NPR 钢在拉伸过程中能够更好地利用材料自身的性能。如图 6 所示,NPR 钢的特殊螺纹结构存在几何形状突变的地方,在拉伸过程中,这些地方会产生应力集中。这使其在拉伸过程中,钢筋表面的力沿着螺纹肋进行分解,使其能够均匀地沿着肋进行变形。而圆钢的表面结构使其不可避免地在表面某一位置发生应力集中,并快速发展,最终发生明显的颈缩现象,直至失效。



注:图中红色箭头表示受力情况。
图 6 不同表面结构钢筋在拉伸情况下的受力示意
Fig.6 Schematic diagram of forces on steel bars with different surface structures under tension

为了验证 NPR 钢的螺纹结构是其具有均匀变形特征的原因之一,采用显示动力学 LS-DYNA 软件对上述两种表面结构进行数值模拟。模型的直径为 18 mm,中部试验段长度为 300 mm,采用带肋与光圆两类计算模型。螺纹肋钢筋参数设定基于文献[27],其肋宽为 3.15 mm,肋高为 0.25 mm,螺距为 15 mm,

螺纹肋与轴向角度之间夹角为 20°。模型一段固定,另一端采用恒定速率拉伸,拉伸速度为 2.5 mm/s,模型结构如图 7 所示。

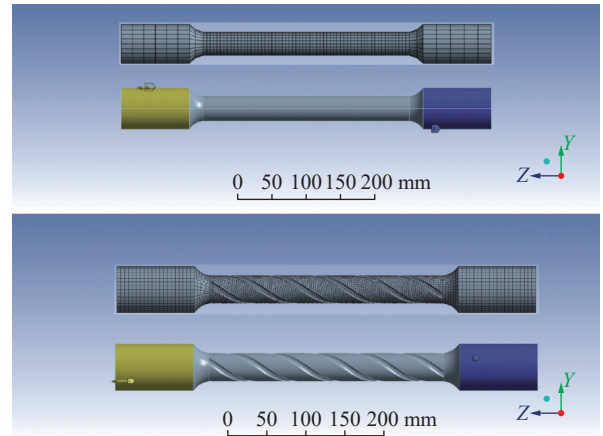


图 7 2 种钢筋模型约束方式及网格形式
Fig.7 Two types of steel bar model constraints and mesh patterns

对两种结构的 Mises 等效应力云图进行分析,如图 8 所示。在拉伸失效前,光圆结构应力分布相对均匀;当达到极限强度开始失效时,应力集中在断裂部位。这表明在拉伸初期,光圆钢筋能够较为均匀地承受拉力。而螺纹肋钢筋在失效前,应力集中在螺纹肋根部,这是因为螺纹肋的存在改变了钢筋的应力分布;当螺纹肋钢筋失效后,应力同样集中在断裂部位。然而,在拉伸过程中,螺纹肋的存在使得钢筋在达到极限强度前,应力分布较为复杂。螺纹肋能够在一定程度上阻碍应力的快速发展,因为螺纹肋本身相当于在钢筋上增加了一些“局部加强点”,延缓了螺纹肋钢筋的失效过程。

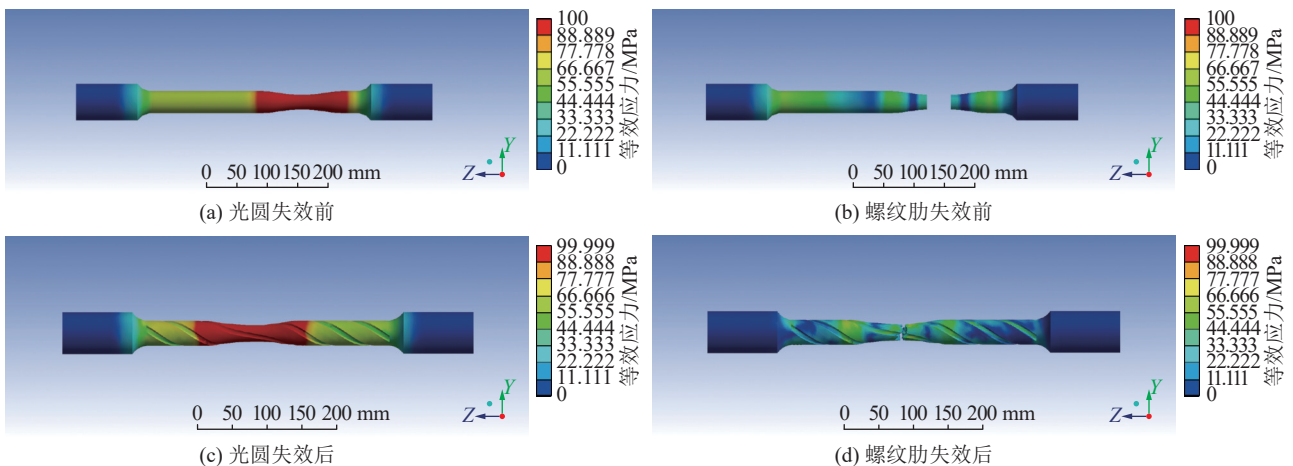


图 8 不同钢筋结构的 Mises 等效应力云图
Fig.8 Mises equivalent stress clouds for different steel structures

统计 2 种结构的颈缩量, 如图 9 所示。观察曲线可知, 两者最大颈缩数值基本一致, 但螺纹肋钢筋颈缩范围明显高于光圆钢筋, 后者主要集中于断口附近, 杆体颈缩分布长度约为 100 mm, 而螺纹肋钢筋的分布长度则约为 200 mm。螺纹肋钢筋在 275~350 mm 仍保持了约 1 mm 的颈缩。结果表明, 螺纹肋钢筋在颈缩角度上变形范围更大, 这也是其颈缩现象不明显的侧向体现。从拉伸长度来看, 光圆钢筋伸长量为 10.96 mm, 伸长率为 3.65%, 而螺纹肋钢筋伸长量为 36.84 mm, 伸长率为 12.28%。综上所述, 螺纹肋是 NPR 钢具有均匀变形特性, 且颈缩现象不明显的宏观原因之一。

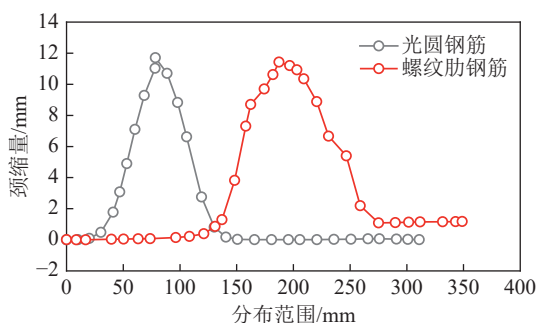


图 9 2 种结构钢筋沿纵向颈缩量

Fig.9 Necking along longitudinal direction for two types of steel bars' structures

5 结 论

1) 通过对不同类型钢筋拉伸变形全过程进行监测, 发现 NPR400 钢在拉伸变形失效进程到达 30% 以后就有明显标距分段位移, 揭示了 NPR400 钢在变形过程中可以持续承受大变形特性; 而其他钢仅在变形失效进程的 90% 以后出现, 主要原因是发生明显颈缩。

2) 通过对比不同钢筋的失效断口, 可总结为 2 类: 45 号钢和 A3 钢为分层型断口; NPR400 钢、NPR800 钢以及 HRB400E 钢为纤维和基体之间的界面破坏得断裂型断口。

3) 试验证明相同钢筋的最大均匀应变越大, 则颈缩部位的曲率半径越大, 颈缩现象越不明显。不同钢筋的最大均匀应变与最大应变的差值越小, 则颈缩部位的曲率半径越大, 颈缩现象越不明显。NPR 钢相比于传统钢筋颈缩现象不明显。并且通过 LS-DYNA 软件模拟证明, NPR800 钢的螺纹肋是其均匀变形且颈缩现象不明显的宏观原因之一。

参考文献(References):

[1] 赵东平, 王卢伟, 喻渝, 等. 隧道系统锚杆研究现状与发展方向[J].

土木工程学报, 2020, 53(8): 116-128.

ZHAO Dongping, WANG Luwei, YU Yu, et al. Research status and development direction of tunnel system bolt[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(8): 116-128.

[2] 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.

KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.

[3] GHORBANI M, SHAHRIAR K, SHARIFZADEH M, et al. A critical review on the developments of rock support systems in high stress ground conditions[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(5): 555-572.

[4] 张爱社, 祝介旺, 高翠兰, 等. 顺层岩质边坡锚杆拉剪作用力学性能[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4574-4582.

ZHANG Aishe, ZHU Jiewang, GAO Cuilan, et al. Mechanical analysis of rock bolts under action of tension and shearing in bedding rock slopes[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4574-4582.

[5] DU Y, LI H, CHICAS S D, et al. Progress and perspectives of geotechnical anchor bolts on slope engineering in China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 928064.

[6] 吴顺川, 高永涛, 金爱兵. 失稳高陡路堑边坡桩锚加固方案分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3954-3958.

WU Shunchuan, GAO Yongtao, JIN Aibing. Study on reinforcement of micro-pile and rockbolt for an unstable high-steep road cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3954-3958.

[7] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417.

HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417.

[8] VICK L M, BÖHME M, ROUYET L, et al. Structurally controlled rock slope deformation in northern Norway[J]. Landslides, 2020, 17(8): 1745-1776.

[9] TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China—Lessons learned from decades of research[J]. Engineering Geology, 2019, 261: 105267.

[10] 陶志刚, 谢迪, 隋麒麟, 等. 复杂地质条件下隧道围岩大变形负泊松比锚索主动支护方法及控制效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 275-286.

TAO Zhigang, XIE Di, SUI Qiru, et al. Study on active support method and control effect of NPR anchor cables for large deformation of tunnel surrounding rock under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 275-286.

[11] 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.

WANG Weijun, YUAN Chao, YU Weijian, et al. Control technology of reserved surrounding rock deformation in deep roadway under high stress[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2156-2164.

[12] LI G, MA F S, GUO J, et al. Study on deformation failure mechan-

- ism and support technology of deep soft rock roadway[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105262.
- [13] 姜鹏飞, 康红普, 王志根, 等. 千米深井软岩大巷围岩锚架充协同控制原理、技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1020–1035.
JIANG Pengfei, KANG Hongpu, WANG Zhigen, et al. Principle, technology and application of soft rock roadway strata control by means of “rock bolting, U-shaped yielding steel Arches and back filling” in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1020–1035.
- [14] 何满潮, 冯吉利. 恒阻大变形锚杆: CN201010196197.2[P]. 2011–10–12.
- [15] 何满潮, 陶志刚, 张斌. 恒阻大变形缆索及其恒阻装置: CN102296604A[P]. 2011–12–28.
- [16] 何满潮, 吕谦, 陶志刚, 等. 静力拉伸下恒阻大变形锚索应变特征实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 213–220.
HE Manchao, LYU Qian, TAO Zhigang, et al. Experimental study of strain characteristics of constant-resistant large deformation anchor cable under static stretching condition[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 213–220.
- [17] SUI Q R, HE M C, HE P F, et al. State of the art review of the large deformation rock bolts[J]. *Underground Space*, 2022, 7(3): 465–482.
- [18] 陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等. 微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(3): 808–818.
TAO Zhigang, GUO Aipeng, HE Manchao, et al. Static characteristics and engineering applications of micro negative Poisson’s ratio bolt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 808–818.
- [19] TANG J, HE M C, QIAO Y F, et al. Dynamic tensile behavior and constitutive model of a novel high-strength and high-toughness plate steel[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 163: 108449.
- [20] REN S L, TAO Z G, HE M C, et al. Numerical simulation study on shear resistance of anchorage joints considering tensile–shear fracture criterion of 2G-NPR bolt[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, 10(1): 58.
- [21] SUI Q R, HE M C, TAO Z G, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of a novel high-strength-and-high-toughness steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 220: 108862.
- [22] WANG Q, XU S, HE M C, et al. Dynamic mechanical characteristics and application of constant resistance energy-absorbing supporting material[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(3): 447–458.
- [23] 陶志刚, 任树林, 何满潮, 等. 地下工程微观 NPR 锚杆钢静力拉伸及锚固抗剪力学特性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 683–694.
TAO Zhigang, REN Shulin, HE Manchao, et al. Static tensile and bolting shear mechanical properties of micro-NPR bolt steel in underground engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 683–694.
- [24] 黄曼, 郭志炜, 洪陈杰, 等. 微观负泊松比锚杆锚固结构面峰前循环剪切疲劳损伤特性研究[J/OL]. *岩石力学与工程学报*, 1–14[2024–12–08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.O3.20241126.1610.001.html>.
HUANG Man, GUO Zhiwei, HONG Chenjie, et al. Study on the pre-peak cyclic shear fatigue damage characteristics of 2G-NPR bolted rock joints[J/OL]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1–14[2024–12–08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.O3.20241126.1610.001.html>.
- [25] HE M C, REN S L, XU H T, et al. Experimental study on the shear performance of quasi-NPR steel bolted rock joints[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(2): 350–362.
- [26] HE M C, REN S L, GUO L J, et al. Experimental study on influence of host rock strength on shear performance of Micro-NPR steel bolted rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 159: 105236.
- [27] LUO G M, QI S W, ZHENG B W, et al. Shear performance of quasi-NPR steel bolted rock joints at different shear rates[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: 105542.
- [28] WU W T, LIU S Q, FAN W J, et al. Micromechanism insights and constitutive modeling for deformation in a novel high manganese austenitic steel[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 164: 108703.
- [29] XIA M, WU W T, XUE Z J, et al. Dynamic tensile properties of a novel high strength and high toughness bolt steel: Constitutive models and microstructures[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 6430–6440.
- [30] 陈箴. 金属断裂研究文集[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978.