

### 钻杆仿生技术研究进展与发展趋势

王传留 居培

引用本文:

王传留, 居培. 钻杆仿生技术研究进展与发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 213–223.

WANG Chuanliu, JU Pei. Biomimetic technologies for drill rods: Advances in research and development trends[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 213–223.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0644>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势

Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine  
煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 1–15 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0520>

##### 煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势

Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine  
煤田地质与勘探. 2023, 51(9): 10–19 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.05.0278>

##### 活动构造研究的关键环节与发展趋势

Critical links and development trends of research on active tectonics  
煤田地质与勘探. 2023, 51(12): 17–28 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.11.0772>

##### 基于单目视觉的钻杆位姿识别技术研究

Research on drill pipe pose recognition technology based on monocular vision  
煤田地质与勘探. 2022, 50(10): 171–178 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.01.0036>

##### 智能钻井装备与技术研究进展

Research progress of intelligent drilling equipment and technology  
煤田地质与勘探. 2023, 51(9): 20–30 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.06.0324>

##### 矿井电法勘探研究现状与发展趋势

Research status and development trend of mine electrical prospecting  
煤田地质与勘探. 2023, 51(1): 259–276 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.01.0031>



移动阅读

王传留,居培. 钻杆仿生技术研究进展与发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 213–223. doi: [10.12363/issn.1001-1986.24.10.0644](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0644)

WANG Chuanliu, JU Pei. Biomimetic technologies for drill rods: Advances in research and development trends[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 213–223. doi: [10.12363/issn.1001-1986.24.10.0644](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.10.0644)

# 钻杆仿生技术研究进展与发展趋势

王传留, 居 培

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 【意义】钻杆作为钻井工程中的核心工具, 其性能对钻井效率和安全性具有重要影响。近年来, 仿生技术在钻杆设计中的应用逐渐成为研究热点, 借助对自然界中生物出色的结构、形态以及材料特性的模仿, 为钻杆的创新性设计开辟了全新的思路与方法。【进展】从结构仿生设计、形态仿生设计和材料仿生设计 3 个方面总结了钻杆仿生技术的研究进展。在结构仿生设计方面, 通过模仿四足哺乳动物刚柔并济的脊柱结构特征, 开发了具有防掉钻和柔性结构特征的高韧性仿生钻杆; 在形态仿生设计方面, 通过模拟蜣螂、贝壳等生物体表的非光滑表面形态, 开发了具有凹凸不平表面特征的强耐磨仿生形态钻杆; 在材料仿生设计方面, 通过模拟毛蚶、甲壳等生物梯度复合材料特性以及竹子的生物纤维增强结构特性, 开发了具有梯度和纤维材料特征的高强度、抗腐蚀、耐磨性能优异的仿生材料钻杆。【展望】指出当前研究存在的不足: 理论与实践结合不足, 多功能集成设计不足。同时提出仿生钻杆的未来发展趋势, 未来钻杆仿生技术将朝着高强度和轻量化、耐磨、防腐、抗疲劳性能的集成化和结构与信息传输的智能化方向迈进, 最终为未来钻杆技术的创新和发展提供依据和指导。

**关 键 词:** 钻杆; 仿生技术; 信息传输; 发展趋势

中图分类号: TD41 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)12-0213-11

## Biomimetic technologies for drill rods: Advances in research and development trends

WANG Chuanliu, JU Pei

(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** [Significance] Drill rods are recognized as core tools in drilling engineering, and their performance exerts a significant influence on drilling efficiency and safety. Over recent years, applying biomimetic technologies to drill rod design has gradually emerged as a hot research topic. By imitating the remarkable structures, morphologies, and material properties of living organisms in nature, biomimetic technologies provide entirely new philosophies and approaches for the innovative design of drill rods. [Advances] This study summarizes the advances in research on biomimetic technologies for drill rods in terms of the biomimetic design of structures, morphologies, and materials. Regarding the biomimetic design of structures, highly resilient biomimetic drill rods that prevent drilling tool accidents and have flexible structures have been developed by imitating the spinal structural characteristics of quadruped mammals. Concerning the biomimetic design of morphologies, highly wear-resistant biomimetic drill rods with uneven surfaces have been developed by imitating the non-smooth surface morphologies of living organisms such as dung beetles and shells. For the biomimetic design of materials, high-strength, corrosion-resistant, and highly wear-resistant biomimetic drill rods with gradients and fiber material characteristics have been developed by imitating *Scapharca subcrenata* and *Crustacea* for their composite materials with biological gradients and bamboo for their biological fiber-reinforced structural characteristics. [Prospects] Nevertheless, current research has limitations in terms of the integration of theory and practice and in-

收稿日期: 2024-10-21; 接收日期: 2024-12-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42072345); 国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFC2900200)

第一作者: 王传留, 1983 年生, 男, 河南周口人, 博士, 研究员。E-mail: [wangchuanliu@cctegxian.com](mailto:wangchuanliu@cctegxian.com)

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

tegrated multifunctional design. Future biomimetic technologies for drill rods will develop toward the integration of high strength, light weight, and wear/corrosion/fatigue resistance, as well as intelligent structure and information transmission, ultimately providing a basis and guidance for the innovation and development of drill rod technology.

**Keywords:** drill rod; biomimetic technique; information transmission; development trend

钻杆作为石油和煤炭勘探开发过程中的核心工具之一,连接着钻头和钻机,负责传递扭矩和动力。在钻进过程中,钻杆需要应对多种复杂的地质条件,承受着给进力、起拔力、弯曲、振动等多种复杂交变载荷<sup>[1-3]</sup>。这些工况不仅要求钻杆具备足够的强度和刚度,以抵抗断裂和变形的风险,还要求其具有良好的耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳性,以保证在长时间、高强度的作业中保持稳定的性能。

为解决钻杆在石油和煤炭开采中面临的挑战,科研技术人员不断研发新材料、新工艺和新技术,以提升钻杆的性能和可靠性。例如,采用高强度、高韧性、耐磨损的合金材料制造钻杆,以提升其承受复杂载荷的能力<sup>[4-6]</sup>;通过优化钻杆的结构设计和表面处理技术,可以进一步提高其耐磨性、耐腐蚀性和抗疲劳性能<sup>[7-8]</sup>。在探索钻杆性能提升的道路上,科研人员还巧妙地将仿生学原理融入其中,以期从自然界中获得灵感,创造出更加卓越的产品。

仿生学,作为一门交叉学科,通过研究生物系统在不同空间和时间尺度上的行为和机制,并将这些生物原理、结构、材料、过程或系统应用于工程技术和设计创新中,以期获得更加高效的问题解决方案<sup>[9-11]</sup>。近年来,随着仿生学理论的逐步成熟,结构仿生、材料仿生、耦合仿生研究成果持续攀升,这不仅拓宽了科学的研究边界,也为工程技术和材料科学等多个领域带来了前所未有的创新机遇。笔者详细梳理了仿生技术在钻杆中的应用现状,探讨仿生技术对于提高钻杆性能和可靠性的应用效果,并指出未来研究方向和挑战,为钻杆技术的创新与发展提供参考。

## 1 结构仿生在钻杆中的应用进展

结构仿生设计以自然界生物体为灵感来源,通过模拟其独特的结构特征和功能机制,指导工程结构的设计和优化。

### 1.1 结构仿生设计原理

结构仿生设计选取具有特定优异性能的生物体作为研究原型,通常这些生物具有高强度、高韧性、轻量化和自适应性等特点。在自然界中,四足哺乳动物的脊柱具有高度的灵活性和强韧性。它们的脊柱由多个椎骨组成,椎骨之间通过关节和韧带相连,形成了一种既稳定又灵活的结构。

以猎豹为例,T. Kamimura<sup>[12]</sup>、M. Goto<sup>[13]</sup>等发现猎豹在奔跑过程中,其强健有力的脊柱肌肉与灵活多变的四肢协同作用,展现出两种特有的奔跑模式:聚集飞行步态模式和延展飞行步态模式(图 1)。当猎豹高速奔跑时,其脊柱肌肉紧密收缩,四肢收紧,形成“聚集飞行步态”奔跑方式,能够有效降低空气阻力,最大化速度并增强稳定性。当猎豹需要根据地形调整策略时,它会转而采用“延展飞行步态”,此时脊柱肌肉放松,四肢展开,从而能够以更大的步幅和更灵活的姿态穿越不同地形。猎豹的脊柱,通过其灵活的刚度调节机制和柔韧性的完美结合,成为了连接力量、速度与耐力的桥梁<sup>[14-15]</sup>。

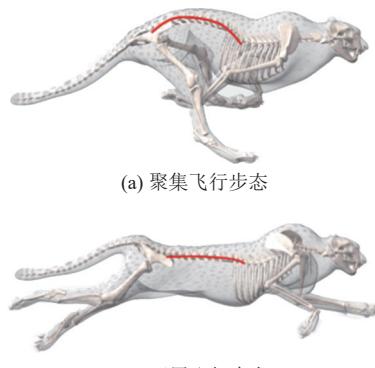


图 1 猎豹的两种步态  
Fig.1 Two gaits of a cheetah

基于上述结构特征,国内外学者研发了系列具有连续型和离散型脊柱特征的四足机器人,这些机器人采用柔性材料和部分刚性材料组合,实现了仿生脊柱的刚柔并济<sup>[16-18]</sup>。刚性材料提供必要的支撑力和精确的力矩传递,柔性材料则赋予脊柱被动柔韧性,有效缓解运动过程中的冲击力,使机器人运动更加平稳流畅,宛如自然界中生物的自由奔跑<sup>[19-23]</sup>。

### 1.2 钻杆的结构仿生设计与应用

在钻杆结构的仿生设计中,主要关注增强强度和刚度、提高韧性和抗冲击能力方面。

王传留等<sup>[24-25]</sup>运用伪刚体模型理论,参考猎豹椎骨与椎间盘之间的长度比等解剖结构参数,构建了高度仿生的猎豹脊柱数学模型,创造性地提出“以柔克刚”的设计理念,研发了具有脊柱结构特征的仿生钻杆公接头,如图 2 所示。

针对传统钻杆公接头根部因承受巨大扭矩而易于断裂的缺陷,预先在公接头根部进行精细切割,并充填

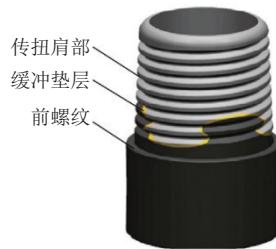


图 2 具有脊柱结构特征的仿生钻杆公接头  
Fig.2 Male connector of a biomimetic drill rod with spinal structure characteristics

缓冲垫层, 模拟猎豹脊柱中弹性软骨和韧带的柔韧与缓冲作用。一方面, 缓冲垫层的存在能够有效吸收一定的变形, 改善公接头螺纹根部的应力状态, 避免公接头根部的应力集中, 减少断裂事故发生; 另一方面, 缓冲垫层的受力方向顺应钻杆的弯曲方向, 并随钻杆弯曲方向的变化同步调整, 当钻杆弯曲变形达到临界状态, 导致公接头根部应力过大时, 缓冲垫层因其较低的力学性能会作为“牺牲层”首先被破坏, 由此将公接头断裂的风险点引导至预设的区域, 实现随机断裂到定点保护的转变; 再者, 仿生公接头实现了传扭功能和连接功能的巧妙分离, 即便在传扭能力失效的情况下, 连接功能依然稳固, 钻杆整体仍然保持着较强的抗拉能力, 可将钻杆全部提出孔外, 彻底解决因钻杆断裂导致的“掉钻”问题。

董昌乐<sup>[26]</sup>、王家乐<sup>[27]</sup>等根据猎豹脊柱刚柔并济的结构特性, 考虑钻杆公接头断裂防掉的连接特性与动物“骨断筋连”连接特性的相似性, 将公接头外螺纹视为“骨”, 同时在公接头内孔设置自锁连杆“筋”, 自锁连杆两端分别被公接头大端螺纹两侧轴向限位, 从而形成“筋骨”连接特性。“筋骨”特性仿生公接头如图 3 所示。

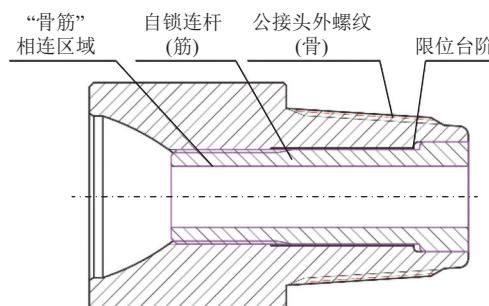


图 3 “筋骨”特性仿生公接头  
Fig.3 Biomimetic male connector with “bone-tendon” characteristics

图 4 为“骨筋”特性仿生公接头断裂防掉示意图。自锁连杆呈 T 型中空结构, 其左侧通过螺纹连接固定于公接头本体内壁, 右侧被公接头台阶孔轴向限位。若施钻过程中仿生公接头大端螺纹(骨)断裂, 在 T 型自锁连杆(筋)的连接作用下, 其小端螺纹部位仍与母接头内螺纹啮合形成连接体 1(图 4 中绿色框线部位), T 型自

锁连杆(筋)形成连接体 2(图 4 中红色框线部位), 断开的公接头小端螺纹不会脱离公接头, 仿生公接头仍能保持轴向连接, 实现“骨断筋连”的效果, 自锁连杆能够将断裂处以深的钻杆提出, 有效解决公接头断裂后的掉钻问题。

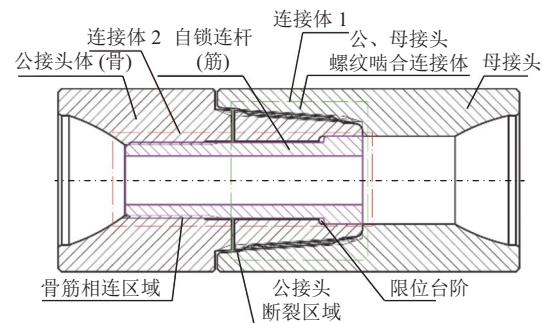


图 4 “骨筋”特性仿生公接头断裂防掉  
Fig.4 Prevention of drilling tool accidents caused by drill rod breaking for a biomimetic male connector with “bone-tendon” characteristics

王天琪等<sup>[28]</sup>针对传统刚性钻杆难以适应较大弯曲度井眼的问题, 开发了一种超短半径仿生柔性钻杆(图 5)。该钻杆以鳄鱼的脊骨结构为仿生原型, 将其独特的收缩和伸展机制应用于超短半径钻杆的设计中。在钻杆上设置 3 处连接轴, 通过这些轴将高压软管包裹在分段式的结构中, 并结合传动销、活动轴和转轴的设置, 大幅提升高压软管的柔性和弯曲能力。

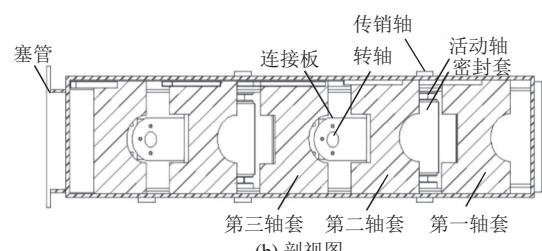
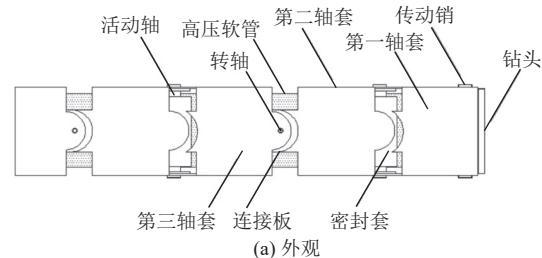


图 5 超短半径仿生柔性钻杆  
Fig.5 Biomimetic flexible drill rod with an ultrashort radius

具体设计中, 将高压软管套接于密封套的内部, 通过第一轴套与第二轴套之间的传动销、活动轴和固定板, 实现竖向方位的角度调节; 通过第二轴套与第三轴套之间的连接板和转轴的活动连接, 实现横向方位的角度调节。这样不仅能够有效传递扭矩和钻压, 还能满足柔性钻杆对曲率半径的要求, 使高压软管更容易适应井

眼的弯曲形态,尤其适用于复杂且弯曲的井眼钻探。

## 2 形态仿生在钻杆中的应用进展

形态仿生旨在通过模仿自然界中生物形态的结构和功能特点,以提高材料在复杂工况的适应性和性能表现。

### 2.1 形态仿生设计原理

根据“用进废退”学说,生物体在生长过程中会反复受到外界力量的作用或刺激,从而在其某些部位逐渐产生凸起、凹陷、沟槽或鳞片等非光滑且耐磨的表面形态。最终,这些形态通过漫长的进化过程形成了形态各异的非光滑生物表面<sup>[29-30]</sup>。鸟类的体表或翅膀并未遵循光滑或单一翼膜的进化路径,而是演化出由羽毛编织而成的低能量消耗、非光滑表面;鱼类的体表呈现由鳞片构建的非光滑形态,使得其能够克服水流阻力在水中游动自如;穿山甲等土壤动物之所以能在土壤中灵活穿行而毫不黏土,也归功于其独特的非光滑体表形态<sup>[31]</sup>。

以贝壳为例,其表面呈现棱纹、螺旋等非光滑面貌(图 6),这些结构在提升贝壳耐磨损性方面发挥了重要的作用。一方面,非光滑表面能够将滑动摩擦部分转变为滚动摩擦,从而降低摩擦阻力和磨损程度;另一方面,非光滑表面能够减少砂砾与贝壳体表的接触面积和接触时间,进一步减轻磨损<sup>[32]</sup>;再者,非光滑表面凹坑形成的“空隙”能够容纳大量的磨屑和空气,形成一系列微型“气垫”,从而有效减轻贝壳与砂砾之间的直接接触磨损<sup>[33-34]</sup>。



图 6 贝壳非光滑体表形态

Fig.6 Non-smooth surface morphologies of shells

M. Nakada<sup>[35]</sup>、A. Ronen<sup>[36]</sup>、G. Pyk<sup>[37]</sup>等通过对发动机的调查发现,活塞环和气缸套系统的摩擦损失最大,占总摩擦损失的 50%~60%,适当的润滑和优化表面粗糙度是减小活塞环和气缸套系统摩擦力的关键。R. Ashwin 等<sup>[38]</sup>通过销盘实验研究了仿生非光滑表面形态对不锈钢材料摩擦特性的影响,发现相比于光滑表面试样,仿生非光滑表面试样的摩擦因数降低了近 80%。丛茜<sup>[39]</sup>、刘婧<sup>[40]</sup>、孙艺文<sup>[41]</sup>等借鉴蚯蚓体表特征,设计加工了不同形态的仿生非光滑表面试样,在混合润滑状态下,相比于光滑表面试样,通孔形仿生非光

滑表面试样的耐磨损性提高了 90% 以上,摩擦因数降低了 60% 以上。

### 2.2 钻杆的形态仿生设计与应用

铝合金钻杆因其密度低、比强度高、耐腐蚀性好的优点,成为超深钻井、酸性油田以及高腐蚀钻井的新宠。但是由于其自身硬度低、耐磨损差,极大地限制了其优势的发挥。为了解决这一问题,Zhao Guoping 等<sup>[42-45]</sup>以蜣螂头部、贝壳壳体和蜥蜴表层的非光滑形态为仿生原型,采用激光熔凝的方法使铝合金表面熔化并快速凝固,制成均匀分布、晶粒组织细化的条状(图 7a)或网格状(图 7b)仿生非光滑单元体。

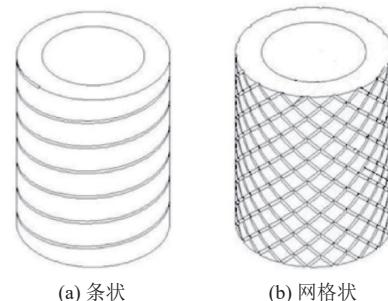


图 7 条状及网格状钻杆表面仿生单元体

Fig.7 Striped and gridded biomimetic units on drill rod surfaces

对比磨损后仿生试样的表面面貌(图 8),光滑表面试样的磨损形式为磨粒磨损和粘着磨损,磨粒磨损以显著的犁沟形式显现,粘着磨损则导致基体材料的剥落(图 8a)。在仿生试样中看到了上述情况的显著改善,对于条状单元体仿生试样,条状单元阻碍了磨粒磨损的进行,使得大多数犁沟终止于条状单元体附近,但是条状单元体周围依然会出现一定的粘着磨损(图 8b);对于网格状单元体仿生试样,他的表面犁沟数量明显减少,并且犁沟长度相对较短,说明其具有最佳的耐磨损性能(图 8c)。

针对松软煤层钻孔收缩严重,钻进阻力大,易发生

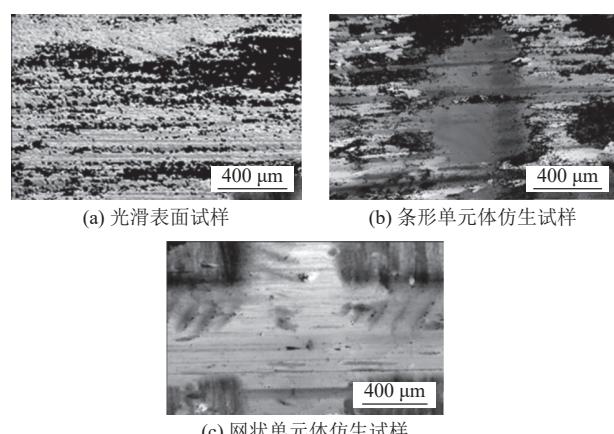


图 8 不同单元体形态仿生试样表面磨损形貌

Fig.8 Surface wear morphologies of biomimetic samples with different unit shapes

卡钻、断钻等事故, 成孔效率低的问题, 杨晓峰等<sup>[46]</sup>以蚯蚓体表为仿生原型, 发明了一种能够防抱死、易退杆的蚯蚓体表仿生形态钻杆(图 9)。在钻杆杆体圆周面上紧密缠绕由聚氨酯弹性体注塑而成的螺旋弹簧圈, 形成钻杆杆体的非光滑表面形态, 从而模仿蚯蚓体表的柔韧性和抓地力, 有效解决松软煤层钻进中钻杆抱死问题, 钻杆更容易推出, 从而提高钻井作业的效率和成功率。

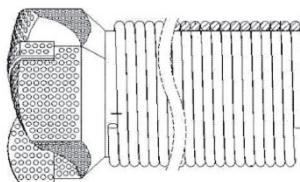


图 9 蚯蚓体表仿生结构钻杆

Fig.9 Biomimetic drill rod with an earthworm body surface

王永龙等<sup>[47-48]</sup>将钻杆表面设计成凹凸不平的仿生非光滑形态(图 10a)和变导程螺旋仿生流纹形态(图 10b), 有效降低钻杆与堵塞段接触面积, 从而减小钻杆钻进阻力, 提高钻进排渣效率, 实现松软煤层钻杆的护孔排渣和低阻钻进作业。

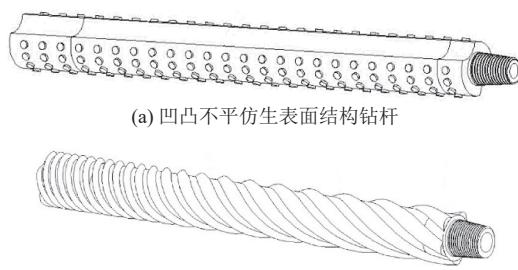


图 10 具有非光滑表面结构的仿生钻杆

Fig.10 Biomimetic drill rods with non-smooth surface structures

### 3 材料仿生在钻杆中的应用进展

传统钻杆材料在面对复杂多变的地质环境和日益严苛的工程要求时, 逐渐显露出一些局限性, 而材料仿生研发为钻杆的发展带来了新的曙光。将仿生理念引入钻杆材料的研发中, 有望突破传统材料的瓶颈, 赋予钻杆更优异的力学性能, 如更高的强度、更强的耐磨性、更好的韧性和抗疲劳性等。

#### 3.1 材料仿生设计原理

材料仿生研发需要从具备优异性能的生物体中汲取灵感, 选择那些拥有卓越性能如耐磨性、抗腐蚀性、高强度的生物体材料作为研究原型, 探索并开发新型高性能材料。

##### 1) 生物梯度复合材料特性

自然界中的生物材料, 如贝壳、甲壳等, 经过亿万年的演化, 融合了强韧性、高硬度和高耐磨性等优异性

能, 这些特性远远超越了传统金属材料。这些生物材料通常由软硬成分交替组成, 形成梯度复合结构, 显著提升了材料的机械性能<sup>[49-51]</sup>。

以目前广泛研究的天然生物复合材料毛蚶为例, 其内部结构主要由角质层、棱柱层和珍珠层组成(图 11)。角质层主要由硬蛋白构成, 相对较厚(图 11a); 棱柱层由垂直交错的柱状结构组成(图 11b), 在受到外力冲击时能够吸收大量能量; 珍珠层内部分布着大量孔状管道(图 11c、图 11d), 形成特殊的“多孔结构”, 具有应力缓释效应, 能够抑制裂纹萌生与扩展<sup>[52]</sup>。

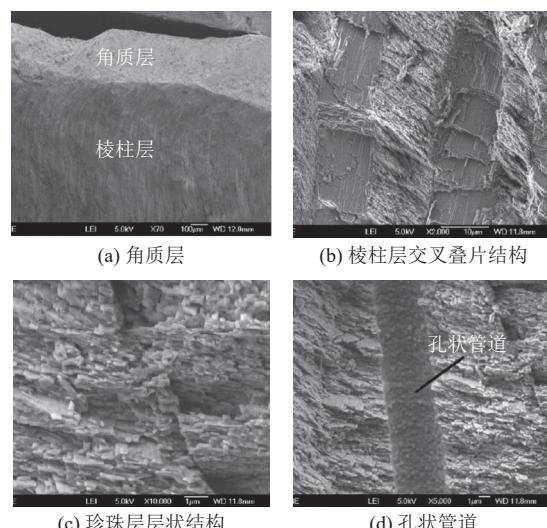


图 11 毛蚶壳体断面微观结构

Fig.11 Microstructures of shell sections of Scapharca subcrenata

基于上述生物梯度材料的特征, 国内外学者开展了大量仿生增材制造梯度复合材料的研究, 成功模拟了生物材料在化学成分和结构特征上的不同梯度分布<sup>[53-54]</sup>。闻章鲁<sup>[55]</sup>采用电弧增材制造技术, 制备出由高氮钢(作为硬相)和不锈钢(作为软相)交织而成的层状复合结构, 高压氮的引入增强了材料的耐磨性, 不锈钢则提升了整体结构韧性, 从而实现了性能上的优势互补。张天驰<sup>[56]</sup>以 45 号钢板作为基体材料, 采用激光增材制造工艺, 通过铺粉法制备出相邻层纹路互成角度的多种合金材料梯度组合, 从而显著提高了材料的硬度和耐磨性。

尽管受到当前技术水平的限制, 增材制造工艺制备的仿生结构件在微观上尚难以完全达到天然生物材料的精细结构, 但在宏观尺度上已经能够有效模拟生物材料的层次结构, 并取得了较理想的实验效果。

##### 2) 生物纤维增强结构特性

生物纤维是一类广泛存在于生物体内的纤维状结构物质, 它们以独特的增强结构赋予生物体各种优异的性能。从植物的细胞壁到动物的结缔组织, 生物纤维增强结构无处不在, 并且这些结构经过漫长的生物进化, 已达到了高度的优化。

以竹子为例,其力学性能优异,素有“植物钢铁”之称。它的纵向平均抗拉强度约为木材的两倍,比强度更是优质钢的2~3倍,横纹断裂韧性平均高达 $56.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,与铝合金相当<sup>[57-58]</sup>。从力学角度来看,竹子集高强度、高韧性、高延展性和适当的刚性于一身,堪称完美,这一切得益于竹子独特的纤维增强结构。

从微观结构来看,竹节间的竹壁是由竹纤维组成的维管束和薄壁细胞组成的基体构成(图12)<sup>[59-60]</sup>。在显微结构下,竹壁内可以分辨出两种不同形态的细胞:厚壁细胞和薄壁细胞。由薄壁细胞构成的基体组织主要负责载荷的传递,而由厚壁细胞构成的维管束则起着关键的承载作用,对于竹竿的弯曲强度等力学性能具有重大的贡献,可以将其视为竹子的“轴向加强筋”。

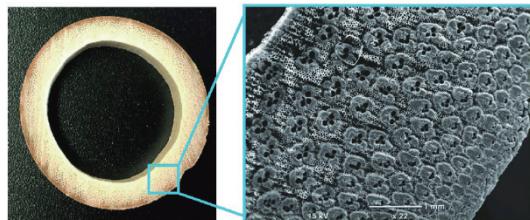


图 12 竹子截面微观组织形态  
Fig.12 Micromorphology of a bamboo section

受竹纤维多重性能优势的启发,杨光等<sup>[61]</sup>通过在铝基体中引入不同体积分数和尺寸的钛合金骨架结构,制备出强韧性可调控的仿竹纤维 Al-Ti 高强高韧纤维状复合材料;吉林大学“多点成形柔性制造”团队<sup>[62-63]</sup>研发了螺旋纤维正弦结构层合板、双螺旋纤维金属层压板、玄武岩纤维增强夹层结构复合材料等系列仿生纤维复合材料,实现了材料性能的显著提升。

生物纤维增强结构具有多种多样的特性,这些特性是生物在长期进化过程中适应环境的结果。通过深入研究这些生物纤维增强结构特性,汲取灵感,为工程材料的创新和发展提供新的思路和方法,从而开发出性能更优、功能更全、更加环保和可持续的工程材料。

### 3.2 钻杆的材料仿生设计与应用

#### 1) 具有梯度材料特征的仿生钻杆

钻杆在极端工况下需同时具备高强度、耐磨性和抗冲击性等多种优异性能,而传统金属材料往往难以在这几个方面实现平衡。通过借鉴自然界中生物材料的分层、梯度和多层次结构,为钻杆的性能优化提供创新解决方案。

寇斐凡等<sup>[64]</sup>以钛合金石油钻杆作为基体,采用等离子弧熔覆技术,以 $\text{TiB}_2$  和 Ti 混合粉末为原料,在 T47Z 钛合金表面制备 $\text{TiB}_x/\text{Ti}$  合金涂层,形成梯度复合材料,以提高钛合金钻杆的抗磨损性能。图 13 为试样的纵截面宏观形貌。涂层经腐蚀后,顶部黑色区域为涂层(Coating),

底部黄色区域为 T47Z 基材(Substrate),涂层熔合线(Bonding line)处无裂纹、气孔等缺陷,涂层与基体结合良好。

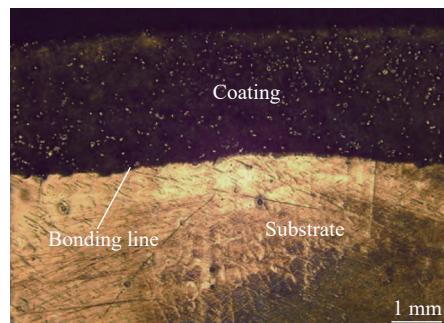


图 13 试样纵截面宏观形貌  
Fig.13 Scanning results of longitudinal section macroscopic morphology of sample

图 14 为原始试样和熔覆后涂层试样的磨痕轮廓。由图 14 可知,原始试样的磨痕高低不平、深浅不一,磨痕宽度为 $1406 \mu\text{m}$ ,磨痕深度为 $76 \mu\text{m}$ 。熔覆涂层后,磨痕的深度和宽度均减小,磨痕宽度减小为 $1338 \mu\text{m}$ ,磨痕深度减小为 $55 \mu\text{m}$ 。熔覆后的样品表面生成了大量的硬质增强相 $\text{TiB}$ 、 $\text{TiB}_2$ ,使得合金表面产生了第二相强化和固溶强化,硬度得到较大提升。

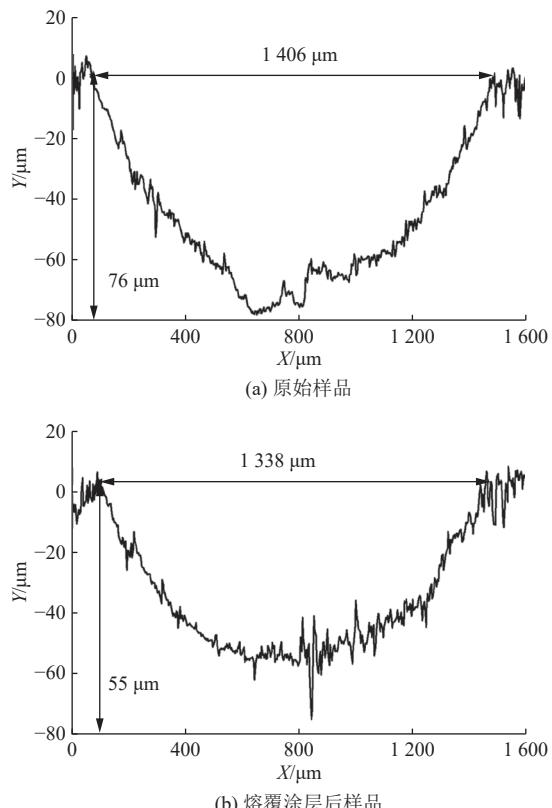


图 14 试样磨痕轮廓  
Fig.14 Wear marks profile of samples

张帅<sup>[65]</sup>针对铝合金钻杆在钻井环境中易腐蚀和不耐磨的缺点,通过微弧氧化(MAO)工艺在 2A14 基铝合

金钻杆表面制备 MAO 膜，并综合铈(Ce)转化密封及环氧树脂(EP)有机涂层密封这两种方法对 MAO 膜的缺陷进行封闭处理，新型 Ce 密封 MAO 膜作为预处理中间层，EP 涂层作为面漆，形成具有主动防护功能的梯度双涂层系统(图 15)，以提高 2A14 基铝合金 MAO 膜的耐腐蚀性和耐磨性。



图 15 2A14 基铝合金双梯度涂层

Fig.15 2A14 aluminium alloy with double-gradient coatings

对 EP 涂层与 Ce 密封 MAO 结合进行扫描电镜分析(图 16)，并综合拉拔试验研究 EP 涂层的附着强度。结果表明，EP 在 2A14 合金表面的附着强度仅为 11.02 MPa，明显低于任何一种 MAO 样品。这是由于铝合金基体只能为 EP 涂层提供支撑，但缺乏机械互锁作用，导致附着强度较差。相比之下，MAO 膜表面粗糙且含有微孔，大大增加了与 EP 涂层的接触面积。同时，Ce 密封处理还能对未被完全密封的微孔进一步填充，使得 Ce 密封 MAO 与 EP 涂层优劣互补，最终提升了铝合金钻杆的机械强度。

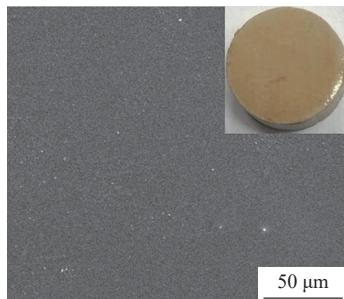


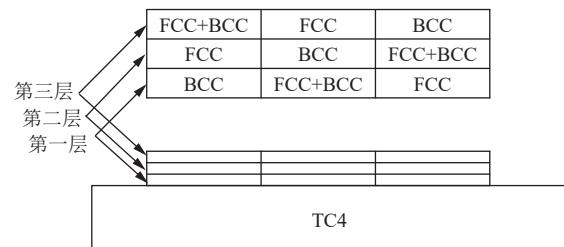
图 16 EP 涂层与 Ce 密封 MAO 结合样品扫描电镜

Fig.16 Scanning electron microscope image of a sample combined with an EP coating and a Ce-sealed MAO film

王世清等<sup>[66]</sup>针对钛合金钻杆表面硬度低、耐磨性差的缺陷，提出了通过激光熔覆高熵合金钴铬钛铌钒合金耐磨层来提高其耐磨寿命的方法。通过错位熔覆的方法，在钛合金钻杆接箍表面制备仿生组织耐磨层，形成滑移系统(BCC/FCC)的混合编织层次结构(图 17)，模拟不规则纹路及翅膀、叶脉结构的效果。该工艺在塑性变形的滑移路径上设置了“路障”，阻断滑移路径，形成多元滑移系统组合体，极大提升了耐磨层的使用寿命。

## 2) 具有纤维材料特征的仿生钻杆

具有纤维材料特征的仿生钻杆借鉴了自然界中生物的纤维结构，由高强度的纤维材料和韧性良好的基体材料组成。纤维材料如同生物体内的骨骼，提供了主要



注：BCC/FCC 为滑移系统，FCC 为面心立方(face centered cubic)，BCC 为体心立方(body centered cubic)，TC4 为钛合金 TC4 材料，组成为 Ti-6Al-4V。

图 17 垂直于熔覆方向试样截面  
Fig.17 Sample section perpendicular to the cladding direction

的强度支撑；基体材料则如同生物体内的软组织，起到传递载荷、保护纤维和增加韧性的作用。这种复合结构使得仿生钻杆具有出色的力学性能。

熊洪威<sup>[67]</sup>、谢雨凌<sup>[68]</sup>针对铝合金钻杆耐磨性和耐腐蚀性差的问题，以 7075 型铝合金作为基体，玄武岩短纤维作为增强体，利用真空热压烧结技术制备了玄武岩纤维增强型铝基复合材料。利用扫描电镜观察玄武岩纤维在铝合金基体中的分布特性(图 18)，可以清晰看到反应扩散层(箭头所指)。该扩散层均匀连续，和纤维紧密结合，呈现出同心圆状分布，未发生界面迁移或变形，表明在浸渗过程中，金属熔体能够充分浸渗纤维丝束内部单丝间的间隙。观察玄武岩纤维和铝基体的界面可以发现，界面反应产物以薄层形式附着在纤维表层，和基体金属直接接触，界面光滑平直，未见有害相的存在。

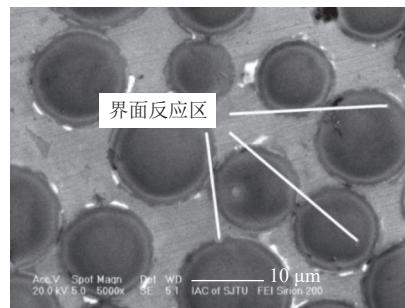


图 18 玄武岩纤维增强铝基复合材料扫描电镜分析  
Fig.18 Scanning electron microscopy of the basalt fiber-reinforced aluminum alloy matrix composite

观察玄武岩纤维增强铝合金基体复合材料光镜图像(图 19)，可以看到，纤维丝束之间的部分被金属液体充分浸渗，界面结合紧密，没有发现宏观缺陷和空洞。随着玄武岩纤维含量的增加，复合材料的维氏硬度显著提升，热处理态的数值更加均匀。

因此，结合玄武岩纤维优秀的力学性能和耐蚀性，以及其与铝合金基体之间良好的界面结合强度，为设计制造新型轻质高强铝合金钻杆提供了全新的思路，同时也为钻杆技术的发展开辟了新的道路。

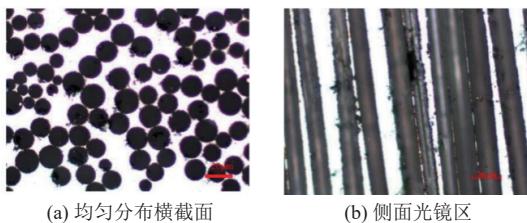


图 19 玄武岩纤维增强铝合金基体复合材料光镜图像  
Fig.19 Optical microscope images of the basalt fiber-reinforced aluminum alloy matrix composite

#### 4 存在的不足和发展趋势

随着全球能源需求的不断增长和勘探技术的不断创新, 钻杆作为石油、天然气等地下资源钻探的关键工具, 其性能和技术水平直接影响着勘探效率和成本。仿生钻杆技术作为一项具有巨大潜力的创新领域, 不仅为解决传统钻杆技术面临的诸多难题提供了全新思路, 也为钻杆行业带来了新的发展机遇和挑战。

##### 4.1 存在的不足

尽管仿生钻杆技术在理论和实验方面取得了一定进展, 但在实际应用中仍存在诸多不足。

###### 1) 理论与实践结合不足

目前, 仿生钻杆技术的研究大多停留在理论探讨和实验验证阶段。虽然许多仿生设计方案在实验室中取得了初步成果, 但将这些研究成果转化为实际工程应用仍面临较大挑战。钻井作业中, 钻杆需承受极其复杂的工况, 包括高温、高压、震动等。现有的仿生技术设计往往未能充分考虑这些工况, 导致许多研究未能实际应用到生产中。因此, 如何将仿生设计有效结合到钻井作业的实际需求中, 是一个需要解决的问题。

###### 2) 多功能集成设计不足

钻杆在作业中需要具备多种功能, 例如耐磨性、抗腐蚀性、抗疲劳性、柔性和高强度等。然而, 将多种功能融合到一个钻杆的设计中, 尤其是在高效能、长寿命的同时, 还要保证各项功能的兼容性和稳定性, 涉及的技术难度较大。目前, 大多数仿生设计研究集中在提高钻杆的某一特定性能上, 难以在一个钻杆上实现多重功能的有效集成。因此, 如何突破技术瓶颈, 实现多功能集成化设计, 是目前仿生钻杆技术研究的难题。

##### 4.2 发展趋势

未来钻杆仿生技术的发展主要关注以下 3 个方面:

###### 1) 高强度和轻量化

通过模拟生物体的轻质高强度结构, 如骨骼和筋腱, 对仿生钻杆设计合理的结构布局和连接方式, 在保证强度的同时减轻重量, 降低能耗。同时, 随着材料科学的不断发展, 新型高强度、耐腐蚀、轻量化材料的应用将成为仿生钻杆技术的重要趋势。例如, 碳纤维、陶瓷基、

高熵合金等新型复合材料的应用, 将显著提升钻杆的力学性能和耐久性。

自然界中的多尺度梯度结构, 如骨骼和壳体, 能够有效分散应力并减少局部损伤。未来仿生钻杆将更广泛地应用梯度结构设计, 在钻杆的不同区域实现不同的性能需求。例如, 外层具备高耐磨性, 内层保持良好的韧性和抗疲劳性, 这将显著延长钻杆的使用寿命。

未来仿生钻杆还可以采用更多的仿生表面技术, 例如自清洁表面和低摩擦结构。仿照鱼鳞或莲叶的表面设计, 减少钻杆与井壁或泥浆的黏附, 降低摩擦损耗, 提升钻井效率。

###### 2) 耐磨、防腐、抗疲劳性能的集成化

未来的仿生钻杆将不仅限于耐磨、防腐、抗疲劳等单一功能, 而是朝着多功能集成的方向发展。例如, 集成有温度感知、自修复、抗震防护等功能, 使钻杆在复杂地质环境下具备更强的适应性。同时, 仿生钻杆技术的发展还将越来越依赖跨学科协作。材料科学、工程力学、生物学、信息技术等领域的融合创新, 将为仿生钻杆的发展提供更加坚实的基础和广阔的应用前景。

###### 3) 结构与信息传输的智能化

智能化是仿生钻杆的另一个重要发展方向。随着物联网技术、人工智能和大数据分析的发展, 智能仿生钻杆将能够实现自主监测和智能调控。通过在仿生钻杆内部嵌入智能传感器, 实时监测钻井过程中的关键参数, 如温度、压力、振动和扭矩。通过无线通信技术将这些数据传送至地面设备, 帮助工程师实时调整钻井参数, 从而实现实时监测、自动调节和远程操控于一体, 提高钻探的精准度和安全性。

同时结合人工智能算法, 预测钻井过程中的潜在故障, 例如钻杆的过度磨损或疲劳裂纹等。通过自适应调整钻进参数, 智能钻杆能够优化钻井路径、调整钻速, 并预防潜在的设备损坏。

智能化不仅仅体现在数据监测方面, 还包括智能材料的应用。例如, 通过引入形状记忆合金和自修复材料, 使得仿生钻杆具备“自我修复”能力, 当钻杆表面出现微裂纹或磨损时, 材料能够自动愈合, 从而延长钻杆使用寿命。

##### 4.3 面临的挑战

仿生学的发展为钻杆的创新设计提供了新思路, 然而, 其发展道路并非一帆风顺, 面临着一系列严峻挑战。

###### 1) 制造工艺的复杂性

仿生钻杆的制造工艺相较于传统钻杆更为复杂。许多仿生设计涉及到微观甚至纳米级结构, 这就对材料的加工工艺和设备提出了更高的要求。仿生钻杆的制造工艺需要达到较高的精度和效率, 才能确保钻杆的质量和性能。然而, 目前制造工艺还存在一些瓶颈, 如加

工精度、表面质量、热处理工艺等方面的问题。

## 2) 钻杆成本与经济性

仿生钻杆的研发、材料与制造工艺的创新都伴随着高昂的成本。新型材料的采购成本、复杂制造工艺的设备投资与运行成本等都会使仿生钻杆的价格远高于传统钻杆。因此,如何降低生产成本,提升仿生钻杆的经济性,使其在市场上具有竞争力,是未来技术推广的一大难题。

## 5 结语

仿生钻杆技术的研究与发展为钻井设备的设计和制造带来了全新的思路。通过对自然界生物结构和功能的深入研究和模仿,钻杆仿生技术不仅在提高钻井效率、降低能耗、增强钻杆耐磨性、抗疲劳性、抗腐蚀性等方面取得了显著进展,还为解决传统钻杆技术中的诸多难题提供了新的思路和方法。

未来,钻杆仿生技术将继续朝着更高性能、更智能化的方向发展。一方面,随着材料科学和制造技术的不断进步,将研发出更多具有优异性能的新型仿生钻杆材料;另一方面,通过引入智能化技术,如传感器、控制系统等,实现钻杆的实时监测和自动调节,提高钻井作业的智能化水平。

尽管钻杆仿生技术取得了显著进展,但在实际应用中仍面临一定的挑战,如技术成熟度不够、材料成本较高、制造工艺复杂等问题。为应对这些挑战,需要加强多学科技术的融合与突破,持续研究和创新,以推动技术的成熟并降低成本,实现钻杆仿生技术的广泛应用,并为油气资源的高效开发提供强有力的技术支持。

## 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 参考文献(References)

- [1] 李欣业,高赫远,郭晓强,等.钻柱振动的主被动控制研究进展与展望[J].天然气工业,2024,44(6): 98–110.  
LI Xinye, GAO Heyuan, GUO Xiaoqiang, et al. Research progress and prospect in active and passive control of drill string vibration[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(6): 98–110.
- [2] RITTO T G, GHANDCHI-TEHRANI M. Active control of stick-slip torsional vibrations in drill-strings[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2019, 25(1): 194–202.
- [3] 金列俊,詹建明,陈俊华,等.基于一维卷积神经网络的钻杆故障诊断[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(3): 467–474.  
JIN Liejun, ZHAN Jianming, CHEN Junhua, et al. Drill pipe fault diagnosis method based on one-dimensional convolutional neural network[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(3): 467–474.
- [4] SHVETSOV O V, ALFIMOV A D, ERMAKOV B S, et al. Effect of microstructure on the fracture behavior and fatigue properties of drill pipes from aluminum alloys 1953 and 2024[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2024, 66(3): 130–136.
- [5] 冯春,张凯,张芳芳,等.固溶时效处理对钻杆用 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金组织及性能的影响[J].石油学报,2024,45(5): 866–874.  
FENG Chun, ZHANG Kai, ZHANG Fangfang, et al. Effect of solution aging heat treatment on microstructure and properties of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr alloy for drill pipe[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(5): 866–874.
- [6] SHEMYAKINSKIY B, LAMONOV A, YAKHIMOVICH V, et al. Tribotechnic and structure characteristics evaluation for light-alloy drill pipe coatings[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 30: 578–582.
- [7] 蒋开勇.主动钻杆公接头加工工艺技术研究[J].煤矿机械,2024,45(9): 100–102.  
JIANG Kaiyong. Research on processing technology of active drill pipe male joint[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(9): 100–102.
- [8] 陈峰,朱巍,狄勤丰,等.适合特深井的双台肩钻杆接头副台肩间隙的确定[J].天然气工业,2020,40(7): 90–96.  
CHEN Feng, ZHU Wei, DI Qinfeng, et al. Determination of secondary shoulder clearance of double-shoulder tool joints suitable for extra-deep wells[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7): 90–96.
- [9] 冯西桥,赵红平,李博.仿生力学前沿[M].上海:上海交通大学出版社,2020.
- [10] 高福聚,刘锡良.浅议空间结构仿生工程学研究中的特征标度问题[J].空间结构,2001,7(1): 44–50.
- [11] 孙荣军,谷拴成,谢晓波,等.仿生冲击挤密钻头的研究[J].煤田地质与勘探,2018,46(3): 174–178.  
SUN Rongjun, GU Shuancheng, XIE Xiaobo, et al. Research on bionic impact compacting bits[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 174–178.
- [12] KAMIMURA T, AOI S, HIGURASHI Y, et al. Dynamical determinants enabling two different types of flight in cheetah gallop to enhance speed through spine movement[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9631.
- [13] GOTO M, KAWAI M, NAKATA M, et al. Distribution of muscle fibers in skeletal muscles of the cheetah (*Acinonyx jubatus*)[J]. *Mammalian Biology*, 2013, 78(2): 127–133.
- [14] HILDEBRAND M. Further studies on locomotion of the cheetah[J]. *Journal of Mammalogy*, 1961, 42(1): 84.
- [15] BERTRAM J E A, GUTMANN A. Motions of the running horse and cheetah revisited: Fundamental mechanics of the transverse and rotary gallop[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2009, 6(35): 549–559.
- [16] 刘宁,江沛,柏龙,等.四足机器人柔性脊柱的仿生机理与结构研究综述[J].机械设计与研究,2018,34(5): 37–43.  
LIU Ning, JIANG Pei, BAI Long, et al. Review on bionics mechanism and structure of flexible spine for quadruped robots[J]. *Machine Design & Research*, 2018, 34(5): 37–43.
- [17] BROOKE M H. Investigation of an articulated spine in a quadruped robotic system[D]. Michigan: University of Michigan, 2011.
- [18] SIMON P. Military robotics: Latest trends and spatial grasp solu-

- tions[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4): 9–18.
- [19] KAWASAKI R, SATO R, KAZAMA E, et al. Development of a flexible coupled spine mechanism for a small quadruped robot[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Qingdao, China. IEEE, 2016: 71–76.
- [20] PUSETY J L, YOO J H. Validation and verification of a high-fidelity computational model for a bounding robot's parallel actuated elastic spine[C]//Unmanned Systems Technology XVI. Baltimore, Maryland, USA. SPIE, 2014: 90840G.
- [21] 张秀丽, 谭小康, 吴海波. 可变刚度的四足机器人被动柔顺脊柱设计与应用[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 111–118.  
ZHANG Xiuli, TAN Xiaokang, WU Haibo. Design and application of passive compliant spine of quadruped robot with variable stiffness[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 111–118.
- [22] 刘宁. 具柔性脊柱的可变步幅四足机器人设计与分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
LIU Ning. Design and analysis of variable stride quadruped robot with flexible spine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [23] 钱伟, 王志瑞, 苏波, 等. 变刚度四足机器人的连续型仿生脊柱设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(8): 3112–3121.  
QIAN Wei, WANG Zhirui, SU Bo, et al. Mechanical design of a variable stiffness continuous bionic spine for a quadruped robot[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(8): 3112–3121.
- [24] WANG Chuanliu, JU Pei. Design and performance research of flexible drill pipe joint based on bionic theory[J]. Geofluids, 2021, 2021: 9661388.
- [25] 王传留, 田东庄, 马少明, 等. 具有脊柱结构特性的仿生公接头及其加工工序: CN109944557B[P]. 2020-07-10.
- [26] 董昌乐. “骨筋”特性仿生钻杆公接头断裂防掉技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(10): 226–231.  
DONG Changle. Falling prevention technology after outside joint breaking of bionic drill pipe with “bone tendon” characteristics[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 226–231.
- [27] 王家乐, 杨虎伟, 居培, 等. 矿用仿生双连接钻杆设计及性能试验研究[J]. 煤矿机电, 2023, 44(4): 1–5.  
WANG Jiale, YANG Huwei, JU Pei, et al. Design and performance experimental study of mining biomimetic double connection drill pipe[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2023, 44(4): 1–5.
- [28] 王天琦, 沙兵兵, 林威, 等. 一种超短半径仿生柔性钻杆: CN118223800A[P]. 2024-06-21.
- [29] 高科, 孙友宏, 高润峰, 等. 仿生非光滑理论在钻井工程中的应用与前景[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 519–522.  
GAO Ke, SUN Youhong, GAO Runfeng, et al. Application and prospect of bionic non-smooth theory in drilling engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 519–522.
- [30] 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144–147.  
REN Luquan, YANG Zhuojuan, HAN Zhiwu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144–147.
- [31] 徐良, 高科. 仿生非光滑原理及其在金刚石钻头中的应用[J]. 超硬材料工程, 2024, 36(1): 14–20.  
XU Liang, GAO Ke. Bionic non-smooth principle and the application in diamond bits[J]. Superhard Material Engineering, 2024, 36(1): 14–20.
- [32] 傅舟渔, 沈潇, 孙朝阳. 基于仿生非光滑表面的采煤机滚筒设计[J]. 煤矿机械, 2013, 34(6): 8–11.  
FU Zhouyu, SHEN Xiao, SUN Zhaoyang. Design of coal mining machine's platen based on bionic non-smooth surface[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(6): 8–11.
- [33] 秦立果, 龚朝永, 孙红江, 等. 非光滑表面减阻研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 107–122.  
QIN Liguo, GONG Chaoyong, SUN Hongjiang, et al. Review of research on drag reduction of non-smooth surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 107–122.
- [34] 陶敏. 凹坑形仿生非光滑表面减阻和遗传优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
TAO Min. Study on drag reduction and genetic optimization of concave bionic non-smooth surface[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [35] NAKADA M. Trends in engine technology and tribology[J]. Tribology International, 1994, 27(1): 3–8.
- [36] RONEN A, ETSION I, KLIGERMAN Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components[J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 359–366.
- [37] RYK G, KLIGERMAN Y, ETSION I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4): 444–449.
- [38] RAMESH A, AKRAM W, MISHRA S P, et al. Friction characteristics of microtextured surfaces under mixed and hydrodynamic lubrication[J]. Tribology International, 2013, 57: 170–176.
- [39] 丛茜, 金敬福, 张宏涛, 等. 仿生非光滑表面在混合润滑状态下的摩擦性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(3): 363–366.  
CONG Qian, JIN Jingfu, ZHANG Hongtao, et al. Friction performance of bionic non-smooth surfaces with mixing lubrication[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(3): 363–366.
- [40] 刘婧, 高科, 徐小健, 等. 新型仿生 PDC 齿高效切削机理及试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 5–8.  
LIU Jing, GAO Ke, XU Xiaojian, et al. Efficient cutting mechanism of the new bionic PDC teeth and the experimental study[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(12): 5–8.
- [41] 孙艺文, 汝绍锋, 丛茜. 仿生凹坑形钻井泥浆泵活塞磨损寿命试验[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 234–240.  
SUN Yiwen, RU Shaofeng, CONG Qian. Wear-life experiment of drilling mud pump piston with dimple-shaped bionic surface[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 234–240.
- [42] ZHAO Guoping, YUAN Yuhuan, ZHANG Peng, et al. Effects of laser-processed unit distribution density on wear resistance of biomimetic 6082 aluminum alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 175–182.
- [43] YUAN Yuhuan, ZHAO Guoping, ZHANG Peng, et al. Effects of

- shapes of biomimetic coupling units on wear resistance of 7075 aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105786.
- [44] ZHAO Guoping, YUAN Yuhuan, ZHANG Peng, et al. Influence of orientations biomimetic units processed by laser on wear resistance of 6082 aluminium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106196.
- [45] YUAN Yuhuan, ZHANG Peng, ZHAO Guoping, et al. Effects of laser energies on wear and tensile properties of biomimetic 7075 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(3): 1361–1368.
- [46] 杨晓峰, 郑海舟, 巫世晶. 一种蚯蚓体表仿生结构的钻杆: CN103388456B[P]. 2016-03-02.
- [47] 王永龙, 孙玉宁, 王振锋, 等. 软煤层钻进多翼内凹开放式仿生降阻护孔钻杆及钻进方法: CN105545218B[P]. 2018-05-22.
- [48] 王永龙, 周福宝, 王振锋, 等. 复杂地质条件煤岩层钻进仿生流纹降阻钻杆及钻进方法: CN106761451B[P]. 2019-08-13.
- [49] LIU Zengqian, ZHU Yankun, JIAO Da, et al. Enhanced protective role in materials with gradient structural orientations: Lessons from Nature[J]. *Acta Biomaterialia*, 2016, 44: 31–40.
- [50] ZHAO Zilong, SHU Tao, FENG Xiqiao. Study of biomechanical, anatomical, and physiological properties of scorpion stingers for developing biomimetic materials[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2016, 58: 1112–1121.
- [51] MEYERS M A, MCKITTRICK J, CHEN Poyu. Structural biological materials: Critical mechanics-materials connections[J]. *Science*, 2013, 339(6121): 773–779.
- [52] 田喜梅. 典型贝类壳体生物耦合特性及其仿生耐磨研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
TIAN Xime. Study on biocoupling characteristics and biomimetic wear resistance of typical shellfish shells[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [53] STUDART A R. Biological and bioinspired composites with spatially tunable heterogeneous architectures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(36): 4423–4436.
- [54] FANG T H, LI W L, TAO N R, et al. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper[J]. *Science*, 2011, 331(6024): 1587–1590.
- [55] 闻章鲁. 基于贝壳珍珠层特征的金属仿生设计和电弧增材制造研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
WEN Zhanglu. Research on metal bionic design and arc additive manufacturing based on the characteristics of shell nacre[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [56] 张天驰. 基于仿生贝壳的激光增材制造梯度材料研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.  
ZHANG Tianchi. Study on gradient materials made by laser additive based on bionic shells[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [57] AMADA S, UNTAO S. Fracture properties of bamboo[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32(5): 451–459.
- [58] OBATAYA E, KITIN P, YAMAUCHI H. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber–foam composite structure[J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41(5): 385–400.
- [59] CHEN Chaoji, LI Zhihan, MI Ruiyu, et al. Rapid processing of whole bamboo with exposed, aligned nanofibrils toward a high-performance structural material[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5194–5202.
- [60] LI S H, ZENG Q Y, XIAO Y L, et al. Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials[J]. *Materials Science and Engineering C*, 1995, 3(2): 125–130.
- [61] 杨光, 马一鑫, 赵朔, 等. 仿生竹纤维五系铝基复合结构强-韧性调控与界面显微组织研究(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(10): 195–203.  
YANG Guang, MA Yixin, ZHAO Shuo, et al. Strength-toughness modulation and interfacial microstructure of bionic bamboo fiber-like aluminum-based composite structures(invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10): 195–203.
- [62] HAN Qigang, SHI Shaoqian, LIU Zhanhang, et al. Study on impact resistance behaviors of a novel composite laminate with basalt fiber for helical-sinusoidal bionic structure of dactyl club of mantis shrimp[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107976.
- [63] HAN Qigang, QIN Hanlin, HAN Zhiwu, et al. Study on mechanical properties of multi-structure dactyl-inspired sandwich honeycomb with basalt fiber[J]. *Composite Structures*, 2020, 247: 112467.
- [64] 寇斐凡, 岳赟, 杜志浩, 等. TiB<sub>x</sub>/Ti 合金涂层组织及摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(11): 140–149.  
KOU Feifan, YUE Bin, DU Zhihao, et al. Effect of TiB<sub>x</sub> content on microstructure and tribological properties of TiB<sub>x</sub>/Ti alloy coatings[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(11): 140–149.
- [65] 张帅. 铝合金钻杆材料微弧氧化膜的封闭处理及其耐蚀机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.  
ZHANG Shuai. Sealing treatment of micro-arc oxidation film on aluminum alloy drill pipe material and its corrosion resistance mechanism[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [66] 王世清, 史冰园, 张一, 等. 钛合金表面仿生高熵合金组织耐磨层及其制备方法和应用: CN114807928A[P]. 2022-07-29.
- [67] 熊洪威. 钻杆用玄武岩纤维增强铝基复合材料制备和性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
XIONG Hongwei. Study on preparation and properties of basalt fiber reinforced aluminum matrix composites for drill pipe[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [68] 谢雨凌. 玄武岩纤维增强铝基复合材料的制备及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
XIE Yuling. Preparation and properties of basalt fiber reinforced aluminum matrix composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

(责任编辑 郭东琼)