

仿生非光滑理论在钻探(井)工程中的应用与前景分析

仲崇梅^{1,2} 孙友宏² 徐 良² 高 科^{2,3} 任露泉⁴

(1. 长春工程学院 土木学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 中原石油勘探局 钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001; 4. 吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要:介绍了仿生工程学研究领域的重大发现,即自然界中,无论是陆地、海洋还是天空中的生物,为适应不同的生活环境需要进化而成的表面,都是非光滑表面,该非光滑表面具有减粘、脱附、减阻的特性。实践证明,有规律的非光滑表面还具有耐磨特性,用在发动机活塞表面和轧辊表面均能大幅度提高使用寿命。将仿生非光滑特性应用到金刚石钻头的设计上,研制出了JBD-75S仿生非光滑绳索取心金刚石钻头。现场试验证明,在同样的加工工艺和使用条件下,有规律的仿生非光滑表面金刚石钻头比普通金刚石钻头机械钻速提高 47%~83%,钻头寿命提高 2.43~2.61 倍。

关键词:仿生学;非光滑理论;金刚石钻头;机械钻速

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0890(2009)02-0022-04

当前,随着人类对油气资源需求量的不断增大,勘探工作量不断增加,而油气资源越来越少,勘探开发的难度越来越大,钻孔越来越深,钻进地层越来越复杂,对钻具的要求也越来越高。就目前的钻井施工而言,提高钻具的性能(包括钻头的寿命、钻杆和套管的强度和耐磨性等),将会大大降低钻井成本。仿生学是生物科学与技术科学之间发展起来的一门新兴边缘学科。将仿生学技术引用到钻井工程中,特别是将生物表面非光滑理论引用到破碎岩石的钻头中,将为钻井工程技术的发展提供创新的源泉。仿生工程技术与钻井工程技术结合起来,产生了一个新的研究方向——仿生钻井工程技术。

1 仿生非光滑理论

1.1 生物非光滑表面形态

自然界的动物经过亿万年的进化,优化出一身适应环境的本领,如穿山甲、蜈蚣、蚂蚁和蜥蜴等在潮湿的黏性土壤或粪土中活动自如而不粘附外物,无疑与这些动物的体表结构有一定关系。它们的体表结构都有一个共同的特点,即非光滑的体表形态,而这种体表结构有利于减阻、脱附和耐磨^[1]。生物非光滑表面普遍存在于自然界中,无论是陆地、海洋还是天空中的生物,其表面的不同形态往往都是为适应不同的生活环境需要而进化来的。天空中飞行生物的体表或翅膀并未进化为光滑的表面或翼膜,

而是由羽毛组成的低能量非光滑表面;水中生物的体表,尤其是行动敏捷的生物,其体表也是由鳞片或皮下结缔组织构成的非光滑表面;土壤中的动物在粘附最强的黏土条件下,活动自如而毫不粘土,这也与其特殊的非光滑体表形态有关。自 20 世纪以来,许多学者开展了对生物体表非光滑表面的研究,结果表明:生物体表存在着多种形态的几何非光滑结构,结构单元的形状有凸包形、凹坑形、波纹形和鳞片形等,同一动物体表各部位呈现的几何非光滑形态亦不完全相同^[2]。

所谓非光表面,是指在一光滑表面上至少在某一方向上存在引起非光滑效应的宏观区域的表面,它是存在于系统中影响切向阻力的各种因素。由于非光滑效应的不同而产生了几何非光滑表面、力学非光滑表面、化学非光滑表面和动态非光滑表面。生物非光滑表面的形态特征与其功能特征关系是工程仿生学研究的一个方向,对生物非光滑表面的研

收稿日期:2008-11-27;**改回日期:**2009-01-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“硬岩钻进用仿生金刚石复合钻头及钻进技术研究”(编号:2006AA06Z221)资助

作者简介:仲崇梅(1967—),女,吉林长春人,1989年毕业于吉林建筑工程学院工业与民用建筑专业,2005年获西安建筑科技大学建筑与土木工程专业硕士学位,在读博士研究生,主要研究方向为钻探工程。

联系电话:(0431)85711592

究,主要集中于非光滑表面的防粘、减阻和耐磨等方面^[3]。

1.2 生物非光滑表面防粘特性

蛭螂出入于黏性较大的粪便和泥土中,身体并未粘附粪便和泥土。它能自由行动,体表必然进化成与之相适应的结构,凹坑和凸包是构成非光滑表面的主要形态之一^[4]。

在切向粘附的场合,如果固体表面脱土,必须保证土壤与固体界面间的摩擦力小于土壤界面间的剪切阻力。蛭螂体表分布的小凸包和凹坑,在纵向剖面上表现为波纹体表,由于黏性土壤的片状结构和粘结性较大,当土在其上运动时,不断受到凸起部分的作用,极易使凹处形成无土区,即使对于含水量较多的黏性土,也会使水膜不易连续,使蛭螂体表的实际触土面积减小,从而降低土壤的粘附力。对于含水量较少的黏性土,蛭螂体表凹处不仅无土少水,使水膜不连续,并且易储存空气,使其体表与土壤表面存在空气膜,这样不仅使接触面积减小,也降低了摩擦系数,达到防粘的效果。

1.3 生物非光滑表面减阻特性

土壤动物非光滑体表在防粘的同时,也能减阻,其机理主要在于能产生非光滑效应,即在动态土壤粘附系统中,由于非光滑表面自身几何结构而产生使相对运动的土体对固体的阻力发生改变的效应。对仿生非光滑表面,由于等高的球冠使运动的土体前缘改变方向,产生有利于减少切向粘附力的法向微震动,由于球冠所形成的包络面不再是平面,更加大了这种非光滑效应。球冠还将破坏粘附界面水膜的连续性,从而降低毛细管(Laplace)力并有效减少真空负压。尽管静态下非光滑表面实际上增大了触土面积,但在动态下由于球冠背向运动方向一侧不触土而减少了实际触土的面积,也是其降阻的原因之一^[5]。

1.4 生物非光滑表面耐磨特性

按生物进化论,生物生长中会受到外力的作用或刺激,这些外力的刺激不可能是均匀地、全面地覆盖于其全部体表。依据生物“用进废退”学说,部分反复经受刺激作用的部位可能就会出现非光滑耐磨的凸起、凹坑、沟槽或鳞片,最终进化成形态各异的非光滑生物表面。基于同样的逻辑,生物非光滑耐磨体表也正是这些生物在其生存的自然环境中长期

经受不均衡外力刺激或作用的结果,如:穿山甲鳞片的非光滑表面能抵抗土壤和岩石的磨损;河滩贝壳非光滑表面,能承受海水和砂粒的冲刷作用;动物牙齿的非光滑表面,能嚼碎坚硬的食物;在海边岩缝中生长的鲭子,就是靠其外壳与缝壁的水动摩擦增大岩缝才渐渐长大。

2 仿生非光滑孕镶金刚石钻头的研制

孕镶金刚石钻头是钻进硬和坚硬岩石的主要工具。在实际钻进中,人们根据地层的不同性质,总结出不同的钻头底表面,对于一般硬岩层,常采用的底表面大都为平底状;而对于一些坚硬岩层,其底表面有阶梯状、锯齿状和尖齿状等非光滑形状,但是,人们并未从仿生非光滑理论的角度来设计钻头。笔者以雄蛭螂为生物原形^[6]来设计孕镶金刚石钻头的底表面,从而实现仿生钻头在碎岩时具有耐磨、减阻和防粘等特点。实际上,仿生孕镶金刚石钻头是将表镶金刚石钻头的宏观非光滑与孕镶金刚石钻头的微观非光滑结合起来、模拟生物表面非光滑特性的一种新型钻头^[7]。

2.1 钻头的设计与加工

根据钻头表面不同的非光滑度,设计了 $\phi 75$ mm 仿生孕镶金刚石绳索取心钻头 3 个,分别为仿生 1、2、3 号,非光滑表面结构如图 1 所示,其结构参数:外径 $\phi 75$ mm,内径 $\phi 49$ mm,钢体外径 $\phi 73$ mm,钻头高度 80 mm,8 个水道。另外,为了对比,还设计了普通金刚石钻头 1 个(普通 4 号)。

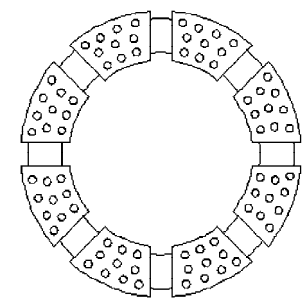


图 1 钻头非光滑表面结构

仿生钻头所用胎体配方为 63[#] 配方,胎体硬度(HRC)为 35~37,选择金刚石体积分数为 75%(400%制),粒度为 60/70 目的金刚石。仿生钻头的制造方法和普通孕镶金刚石钻头一样,只是增加了一套制作非光滑表面的工艺,在中频炉中进行热压烧结,然后加工水道和水槽,直至加工出成品钻头。

2.2 现场试验

2007 年 4 月 21 日—2007 年 4 月 26 日,在吉林市桦甸县夹皮沟金矿进行了现场生产性试验,从孔深 160.15 m 处开始钻进,钻孔深度 400 m。孔的设计倾角 85°,地层比较完整,属变质岩中的蚀变岩,石英含量较多,耐磨性强;但软硬夹层较多,岩石硬度 6~8 级,大部分约 8 级。

现场试验共钻进 136.7 m,其中 3 个仿生钻头钻进 116.9 m,平均进尺 38.97 m,最高机械钻速 4.63 m/h;而普通钻头进尺 19.80 m,机械钻速 2.52 m/h。由此可看出,仿生金刚石钻头在机械钻速和进尺上都较普通钻头有显著提高。该次现场试验的数据见表 1。

表 1 钻头机械钻速和进尺		
钻头类型	进尺/m	机械钻速/m·h ⁻¹
仿生钻头 1	17.1	3.90
仿生钻头 2	48.2	4.63
仿生钻头 3	51.6	3.71
普通钻头	19.8	2.52

通过仿生钻头的现场试验,其磨损后钻头非光滑底表面如图 2 所示,证明非光滑形态在与岩石接触的界面系统中,显示出了非光滑结构在岩石介质的界面系统中降阻、耐磨的优点,并且其效果更加明显。如在同样配方、同样加工流程、同样工艺烧结和同样钻进参数下,非光滑仿生钻头比普通钻头的钻进进尺提高接近一倍,机械钻速最大提高 80%^[8]。



图 2 磨损后仿生金刚石钻头表面

3 在钻井工程中的应用前景

仿生非光滑理论适用于一切具有相对运动的接触界面,具有非光滑效应,即具有减阻、防粘和耐磨特性,钻井领域也不例外。在钻井工程中,相对运动和摩擦的部件很多,部件的减阻、防粘和耐磨不但影

响着钻井的效率,还影响着钻井的安全,因此,仿生非光滑理论在钻井中有着广泛的应用前景。

3.1 耐磨特性的应用前景

钻头的耐磨性对钻头寿命的影响最为重要,以仿生钻头为例,其耐磨性较普通钻头至少提高 50%,对于深井钻井,少换一次钻头就意味着节省大量人力物力。提高钻头寿命的常规方法(如增加金刚石的强度和浓度、提高胎体的硬度等)不可能成倍提高钻头的寿命,而仿生学与钻井工程的结合为研制长寿命钻头提供了一种新思路。另外,钻杆接头是易损件,钻杆的报废很大程度上是钻杆接头的报废,因此,研究耐磨性好的仿生非光滑钻杆接头,可充分发挥非光滑结构的耐磨特性,提高钻杆的使用寿命,节省钻井成本。

提高钻井泵活塞与缸套摩擦副耐磨性能的传统方法主要是提高材料硬度和进行表面涂层,其耐磨性得到了一定的提高,但进一步提高其耐磨性有很大难度。早在 1999 年,Elsion I^[9]等在实验室内对水泵中的密封垫进行了对比试验研究,研究结果表明,光滑密封面可看到磨损痕迹,而非光滑表面丝毫无损。因此,研发具有仿生非光滑结构的钻井泵活塞与缸套,可大幅度提高其使用寿命。

3.2 防粘特性的应用前景

钻井过程中,遇到泥岩或者软地层的时候,经常出现钻头泥包现象。在石油钻探中,经常会钻遇泥质岩石,无论是采用金刚石钻头、硬质合金钻头、牙轮钻头,还是潜孔锤钻头,都会出现钻头泥包现象,其后果是,轻者大幅度降低机械钻速,重者堵塞钻井液通道,更有甚者产生卡钻等井下事故。在钻进泥质占较大比例的地层时,解决钻头泥包问题是钻井工程中遇到的难题。目前,如对于 PDC 钻头,提高 PDC 表面的光洁度是解决泥包问题的一种方法;另一种方法是改变钻进参数,如加大泵量、降低钻压等,这些不但增加了钻头成本,有时效果也不明显。钻头表面具有水化层是形成泥包的主要因素,要阻止钻头表面形成泥包,最好的方法是消除钻头表面的吸附水层。通过对穿山甲体表非光滑特性的研究发现,其鳞片体表的宏观凸凹不平及微观棱纹波形,使土壤中水膜不易连续,弱化了水化层,减小了实际触土面积,从而降低了土壤对其体表的粘附,故钻头体表面和切削刃表面应以非光滑结构为好。因此,研制具有仿生非光滑结构的 PDC 钻头,既可解决钻

头泥包问题,还能提高钻头的寿命,是今后发展的一个趋势^[10]。

3.3 减阻特性的应用前景

室内试验表明,仿生非光滑孕镶金刚石钻头与普通平底光滑钻头相比,功率消耗可降低 40%~80%;仿生非光滑的螺旋钻具功率消耗可降低 53.3%。

受蚯蚓、泥鳅等动物靠体表非光滑表皮细胞储存与分泌黏液来降低体表与土壤之间的摩擦阻力这一现象启发,任露泉等发明了内燃机非光滑活塞与缸套摩擦副的贮油润滑技术。通过试验验证,活塞表面的非光滑微坑有较强储存润滑油以及形成油膜的能力,活塞依靠其周期性惯性力的作用来晃动存贮在非光滑微坑里的润滑油,从而使润滑油飞溅到气缸套壁面,形成更好的润滑效果^[11],从而减少了功率消耗。同样仿生非光滑钻井泵活塞和缸套,不但能提高寿命,还能减少钻井泵的功率消耗。

4 结 论

1)生物非光滑表面的形态特征与其功能特征关系是工程仿生学研究的一个方向,对生物非光滑表面的研究,主要集中于非光滑表面的防粘、脱附和耐磨等方面。

2)通过对仿生非光滑金刚石钻头的试验可知,具有非光滑结构的钻头与普通钻头相比,耐磨性更强,钻速更快,钻进阻力更小。

3)仿生非光滑结构所具有的耐磨、防粘和减阻特性在钻探(井)工程中有广泛的应用前景,可用于提高钻头和钻杆接头的耐磨性,解决钻头泥包问题,降低钻机和钻井泵的功率消耗等。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 丛茜,任露泉,吴连奎,等.几何非光滑生物体表形态的分类学研究[J].农业工程学报,1992,8(2):7-12.
- [3] 高科.孕镶金刚石仿生钻头的研究[D].吉林长春:吉林大学建设工程学院,2006.
- [4] 王淑杰,任露泉,韩志武,等.典型生物非光滑理论及其仿生应用[J].农机化研究,2005(1):209-210,213.
- [5] 任露泉,李建桥,陈秉聪.非光滑表面的仿生降阻研究[J].科学通报,1995,40(19):1 812-1 814.
- [6] 程虹,孙久荣,李剑桥,等.臭蛱螂体表结构及其与减粘脱附功能的关系[J].昆虫学报,2002,45(2):175-181.
- [7] 徐良,孙友宏,高科,等.针对须家河组岩性特征选择仿生金刚石钻头参数[J].石油钻探技术,2008,36(5):43-46.
- [8] 孙友宏,徐良,赵乐涛,等.JBD-75仿生非光滑绳索取心金刚石钻头的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(增刊):291-294.
- [9] Etsion I, Kligerman Y. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces[J]. Trib Trans, 1996,42(3):511-516.
- [10] 任露泉,陈德兴,胡建国.土壤动物减粘脱土规律初步分析[J].农业工程学报,1990,6(1):15-20.
- [11] 杨洪秀,左文杰,李亦文,等.活塞表面仿生非光滑微坑贮油润滑机理的任意拉格朗日-欧拉法有限元模拟[J].吉林大学学报(工学版),2008,38(3):591-594.

[审稿 孙明光]

Application and Prospect of Non-Smooth-Skin Bionics Theory in Drilling Engineering

Zhong Chongmei^{1,2} Sun Youhong² Xu Liang² Gao Ke^{2,3} Ren Luquan⁴

(1. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin, 130012, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin, 130026, China; 3. Institute of Drilling Technology, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China; 4. MOE Key Laboratory of Terrain-Machine Bionics Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin, 130022, China)

Abstract: A remarkable discovery in bionics engineering is introduced in this paper. Namely, all creatures in nature living on land or in ocean have non-smooth skins evolved naturally in order to accustom to various living environments. Their non-smooth skins are helpful to decrease viscosity, to remove adhesion and to reduce drag, etc. In addition, regular non-smooth skin is abrasion-proof, and can be used on the surface of generator piston and roller to improve using time. A diamond core bit JBD-75S was developed using this bionics theory. The field tests demonstrate that diamond bits with regular non-smooth bionics surface improve the drilling speed up to 47%~83% and the bit life 2.43~2.61 times compared with conventional diamond bit manufactured at the same conditions.

Key words: bionics; non-smooth theory; diamond bit; penetration rate