

新型仿生 PDC 齿高效切削机理及试验研究

刘 婧, 高 科, 徐小健, 李 梦

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:利用仿生耦合理论,根据贝壳和蜈蚣等动植物的非光滑形态结构研制了一种新型的仿生 PDC 齿,并利用有限元软件 abaqus 对单个齿磨损前后的运动过程进行分析,与普通 PDC 齿的应力分布状态进行对比,可以看出,在同等条件下,非光滑 PDC 切削齿的应力大小及分布情况要明显优于普通的 PDC 切削齿,具有良好的碎岩效果。此外还对这 2 种切削齿进行了磨耗比试验,试验结果进一步证明了仿生 PDC 齿具有一定的优越性。

关键词:仿生耦合;abaqus;非光滑;PDC 切削齿;磨耗比

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)12-0005-04

Efficient Cutting Mechanism of the New Bionic PDC Teeth and the Experimental Study/LIU Jing, GAO Ke, XU Xiao-jian, LI Meng (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Based on the bionic coupling theory and according to non-smooth morphology of shells, mole cricket and other animals & plants, a new kind of bionic PDC tooth is developed. The analysis is made on the single tooth motion process before and after the wear by abaqus finite element software and the comparative analysis is made with the stress distribution state of the common PDC teeth. It can be seen that under the same conditions, the non-smooth PDC cutting teeth have better stress value and distribution state than the common PDC ones with good rock breaking effect. In addition, the abrasion ratio test is also made on these 2 kinds of cutting teeth; the test results also prove that the PDC bionic PDC teeth have some superiority.

Key words: bionic coupling theory; abaqus; non-smooth; PDC cutter teeth; abrasion ratio

0 前言

近年来,在国内外钻探领域,聚晶金刚石复合片(PDC)钻头的应用越来越受到青睐,但在使用过程中也存在着一些不足,如 PDC 齿随着齿刃的不断磨损破岩效率急剧下降,磨损加速,严重影响钻头的使用效果。针对此不足,为了更好地发挥 PDC 钻头的性能,专业研究人员针对 PDC 钻头的 PDC 材料、布齿、切削角和结构等方面进行了很多研究,取得了长足进步,但目前仍然没有得到彻底解决,性能方面还有很大的提升空间。

PDC 齿的性能提升对有效提高 PDC 钻头的钻进效率、增加使用寿命、缩短钻井周期和节省钻井成本意义重大。其中最有效的方法之一是引入仿生学,采用相应的仿生技术实现对 PDC 齿的表面改形和整体改性,使其既能持续保持快速破岩效果又能减缓磨损速度。

同时本文利用 ABAQUS 模拟在对 PDC 齿计算机有限元数值分析方面,相关文献很少。目前国内

有几位专家进行了这方面研究:邓敏凯^[2]利用 ABAQUS 模拟了结构场下 PDC 齿破岩过程,对比试验结果,确立了用 ABAQUS 模拟结构场下 PDC 齿破岩的可行性;龙巾帼^[3]利用 ABAQUS 模拟了热-结构耦合场下 PDC 齿破岩过程,对比理论计算结果,确立了利用 ABAQUS 模拟热-结构耦合场下 PDC 齿破岩过程的可行性。但是上述大部分的研究尚处于保密阶段,无法了解其具体研究过程。

本文以贝壳和动物爪趾为仿生原形,设计了一种新型的仿生 PDC 切削齿,利用 ABAQUS 进行单个 PDC 齿与岩石接触的受力状态有限元数值模拟,并进行磨耗比对比测试。

1 仿生 PDC 齿设计与数值模拟

1.1 仿生原形选择

1.1.1 贝壳

贝壳(图 1)是软体动物的外套膜,是一种钙化物。我们知道,贝壳具有的力学性质十分优异,附着

收稿日期:2013-10-08

基金项目:深部探测技术与实验研究专项“深部探测关键仪器装备研制与实验”之“深部大陆科学钻探装备研制项目”(SinoProbe-09-05)、国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新研究项目(OSR-04-04)、国家自然科学基金青年科学基金(51004052)

作者简介:刘婧(1988-),女(汉族),辽宁北票人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,从事岩土钻凿工艺及机具的研究工作,吉林省长春市西民主大街 938 号,825011753@qq.com。

在岩石表面,能够牢固在岩石上不被巨浪冲走和击碎,其体表的独特非光滑结构具有很好的减阻和分解冲击力的功能,值得借鉴。



图1 贝壳

1.1.2 螻蛄

螻蛄(图2),是地栖性节肢动物。生活在地下,湿土中可钻15~20 cm深。前足进化为粗短结构,宜于快速挖掘,顶角以圆弧过度(爪趾头部为凸包形),此结构在土壤中受力和应力集中小、易于掘土且磨损小。因其具有的优异特性正是PDC齿应该具备的性能,故将其作为PDC的仿生原型。



图2 螻蛄及爪趾

1.2 仿生PDC齿设计

根据优选的仿生原型,在PDC齿表面设置2种非光滑形态,凸包形非光滑形态和波纹形非光滑形态。设计如仿生PDC齿,具体思路如下:

凸包形非光滑:使其与岩石的拉接触面上呈现出一种二维几何意义上的非光滑形态,目的是提高

PDC破岩效率和耐磨性,如图3。

波纹形非光滑:在PDC与岩石接触面垂直面上呈现出一种三维几何意义上的非光滑结构,可避免表面非光滑层磨损后不能继续产生非光滑形态,可保持钻头连续的高钻速和长寿命,使平面非光滑形态像土壤的爪趾一样具有自再生功能,如图4。

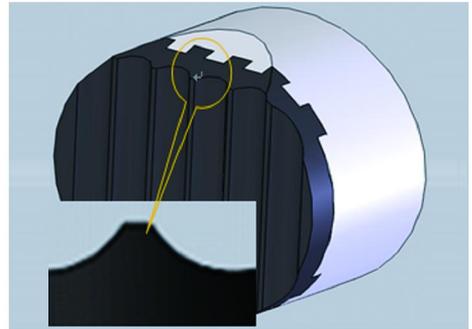


图3 凸包形非光滑形态

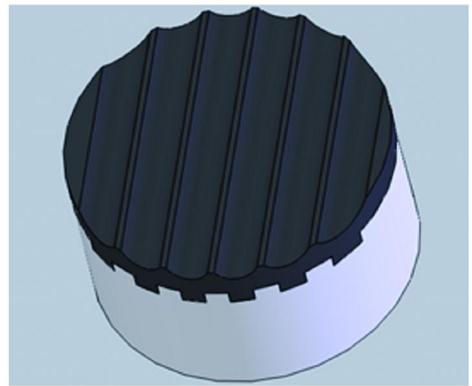


图4 波纹形非光滑形态

1.3 数值分析

利用ABAQUS软件对仿生PDC齿和普通PDC齿进行动态仿真数值分析。对PDC齿进行磨损前和磨损后2种状态下进行分析。

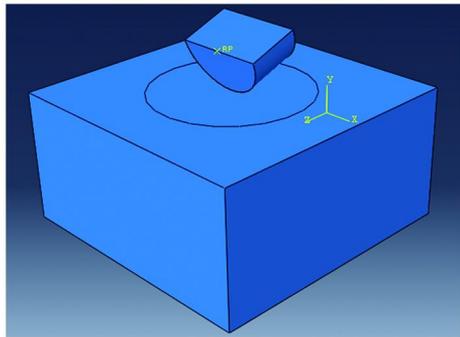
1.3.1 有限元仿真模型的建立

用ABAQUS/CAE建立PDC齿切削岩石的运动模型,将普通PDC齿和仿生PDC齿单元形状选择Tet,默认为C3D10M,将岩石划分成若干个单元,单元形状选择Hex完全六面体,ABAQUS/CAE默认为C3D8R(8节点六面体线性减缩积分单元),基本网格尺寸一致,这样选择对位移的求解结果精确,在积分点上的应力结果也相对精确。

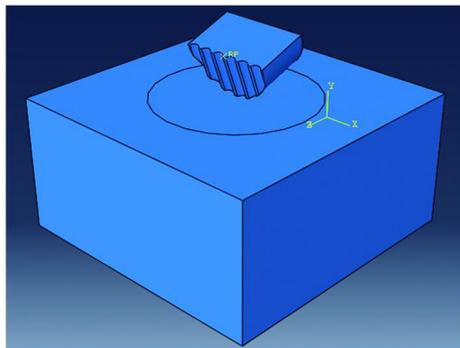
采用三维模型模拟切削齿斜压入岩石中心的过程,图5为磨损前PDC齿模型,图6为磨损后PDC齿模型,岩石几何模型为100 mm × 100 mm × 80 mm, PDC切削齿的直径为13.44 mm,长度为8 mm,由于建模的限制,切削齿采用一半模型,切削角度为

-20°。岩石采用花岗岩,岩石底面自由度被限制。模拟时间为 1 s,切向速度 2 mm/s,法向速度 1 mm/s,法向施加集中力 10 kN。

PDC 齿和常规 PDC 齿的对岩石作用产生的 Mises 应力分布云图,如图 7、图 8 所示。

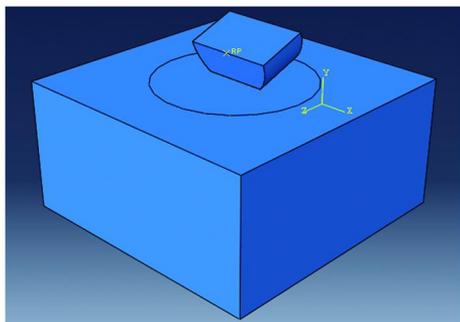


(a) 光滑PDC齿

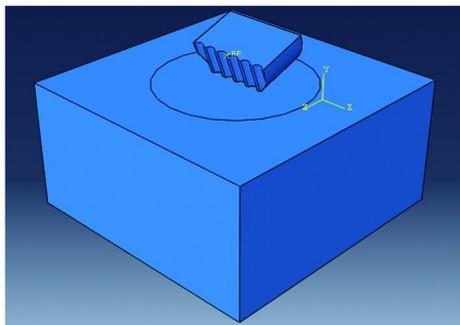


(b) 非光滑PDC齿

图 5 磨损前 PDC 齿压入岩石的几何模型

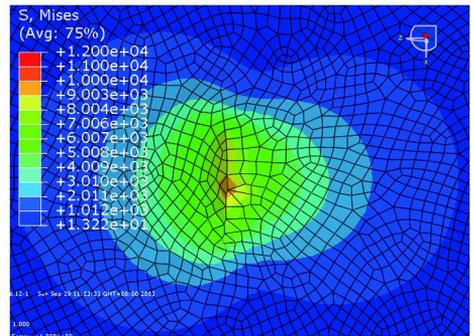


(a) 光滑PDC齿

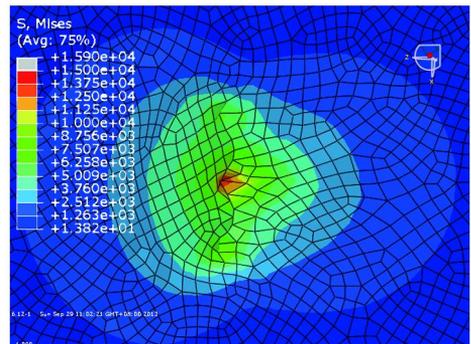


(b) 非光滑PDC齿

图 6 磨损后 PDC 齿压入岩石的几何模型

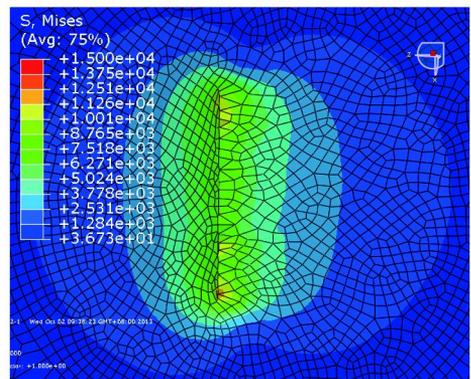


(a) 常规PDC齿

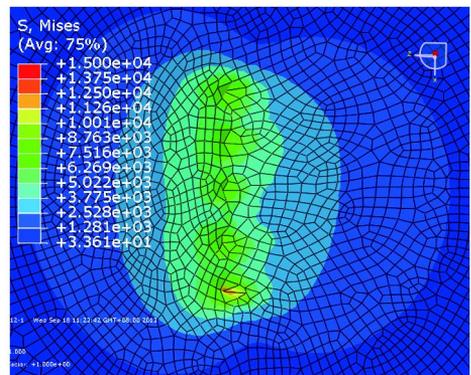


(b) 仿生PDC齿

图 7 磨损前 PDC 齿压入岩石的 Mises 应力云图



(a) 常规PDC齿



(b) 仿生PDC齿

图 8 磨损后 PDC 齿压入岩石的 Mises 应力云图

1.3.2 结果与分析

将上述模型进行有限元分析,分别得到仿生

1.3.2.1 磨损前 PDC 齿应力云图分析

由图7可知,2种切削齿与岩石的接触方式均为由最初的点接触逐渐变为线接触,两种切削齿的应力分布结构相对一致。非光滑齿的应力要明显大于普通PDC齿,针对碎岩来说,均已达到了岩石的破坏强度,同时可以看出随着切削深度的增减,非光滑PDC切削齿的破碎穴数量有增多的趋势,其破岩面积也将大于普通的PDC切削齿。

1.3.2.2 磨损后PDC齿应力云图分析

由图8可知,两种切削齿的运动过程,随着PDC切削齿的磨损,仿生非光滑齿的应力略大于普通齿,都已大于岩石的破碎强度,能够有效碎岩,同时可以看出,随着非光滑表面的出露,破碎穴的数量明显增多,非光滑PDC齿的应力分布面积与普通PDC齿相近,可以看出非光滑PDC齿的碎岩效果要好些。

2 磨耗比对比试验

磨耗比是表征材料耐摩擦、耐磨损性能优劣的重要指标,它是在规定的条件下(压力、转速和时间)使材料试块与80目粒度的专用碳化硅陶瓷磨耗比砂轮平行对磨,以砂轮的磨耗量 M_s (g)和摩擦材料的磨耗量 M_f (g)之比为耐摩擦材料的磨耗比 E 值,见公式(1)。磨耗比试验既可以通过试件,也可以通过原件来进行试验。

$$E = M_s / M_f \quad (1)$$

分别对5块直径相同的仿生非光滑PDC齿(图9)和常规PDC齿进行磨耗比比较,测试值见表1。

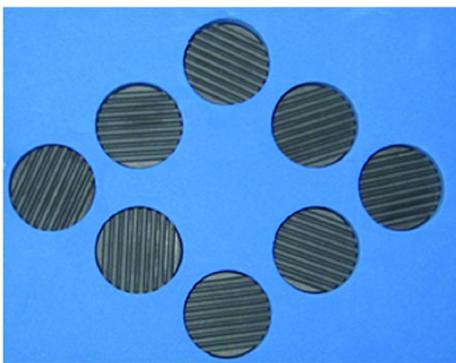


图9 仿生非光滑PDC齿实物

从表1可以看出,非光滑复合片磨耗比要比普通复合片磨耗比高,提高约18.4%。

3 结论

(1)本文从贝壳和蜈蚣爪趾的表面特征受到启发,结合仿生非光滑理论,研制了一种新型的仿生PDC切削齿,为PDC钻头领域的研究提供了一个

表1 两种PDC齿的磨耗比值

复合片	编号	砂轮硬度	砂轮失重量 M_s/g	复合片失重量 M_f/g	磨耗比 $Q/万$	磨耗比平均值
非光滑PDC复合片	1	3.7	68.4	0.00021	32.6	
	2	3.7	75.8	0.00020	37.9	
	3	3.7	80.7	0.00022	36.7	34.92
	4	3.7	72.4	0.00022	32.9	
	5	3.7	75.8	0.00022	34.5	
常规PDC复合片	1	3.7	70.8	0.00021	32.6	
	2	3.7	70.4	0.00020	37.9	
	3	3.7	73.1	0.00022	36.7	29.50
	4	3.7	67.0	0.00022	32.9	
	5	3.7	55.4	0.00022	34.5	

新的方向。

(2)针对研制的仿生PDC切削齿,利用abaqus软件进行有限元数值分析,对比其与常规PDC齿的碎岩过程,可以看出,仿生PDC齿的应力大小与应力分布面积与普通PDC齿相近,均能达到岩石破碎强度,但是非光滑齿的产生的破碎穴数量要多于普通PDC齿,随着破岩过程的深入,更有利于碎岩。

(3)对两种PDC齿进行了磨耗比测试,测试发现,非光滑PDC齿的磨耗比要比普通PDC齿的磨耗比提高约18.4%,具有一定的优越性。

参考文献:

- [1] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 张建华,丁磊. ABAQUS基础入门与案例精通[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [3] 邓敏凯. PDC钻头切削齿破岩效果优选研究[D]. 四川成都:西南石油大学,2011.
- [4] 任露泉,佟金,李建桥,等. 生物脱附与机械仿生——多学科交叉新技术领域[J]. 中国机械工程,1999,10(9):984-986.
- [5] D. S. 哈拉西. 仿生学[M]. 北京:科学出版社,1975.
- [6] 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).
- [7] 李勇,邓嵘,刘全胜. 基于ABAQUS的PDC钻头切削齿温度场分析与仿真[J]. 现代制造技术与装备,2012,(2).
- [8] 伍开松,邓敏凯,杨迎新. 椭圆形与圆形PDC齿破岩有限元仿真对比分析[J]. 石油机械,2011,3(5).
- [9] 伍开松,柯行,龙巾幅. 热-结构耦合PDC齿破岩温升规律研究[J]. 石油机械,2013,41(4).
- [10] 李田军,鄢泰宁, P. K. 波格丹诺夫. 复合片切削刃的工作机理[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(2).
- [11] 王镇全,周悦辉. PDC钻头切削齿切削角度对破岩效果影响规律的研究[J]. 煤矿机械,2009,30(8).
- [12] 李田军. PDC钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学,2012.
- [13] 李小洋,孙友宏,王传留,等. 仿生耦合孕镶金刚石钻头底唇面非光滑形态的优化[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):75-77.
- [14] 王建强,李国民,汤小仁,等. 凸包型仿生耦合金刚石钻头模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):77-79,84.