

文章编号:1673-5005(2012)03-0098-04

含砾岩样中切削齿冲击载荷变化规律试验

林英松¹, 孔栋梁², 黄名召³, 邹德永¹, 单清林¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 长城钻探工程有限公司钻井一公司, 盘锦 124010;
3. 中国石油海洋工程有限公司钻井事业部, 天津 300280)

摘要:通过直径为 19 mm 的单齿切削含砾岩样试验, 研究砾石直径、胶结强度、切削深度、切削齿后倾角等对切削齿所受冲击载荷的影响规律, 分析 PDC 钻头钻进砾石层的损坏机制。结果表明: 切削齿受到的冲击力随着砾石层胶结强度、砾石直径的增加而增大, 随切削齿切削深度的增加呈指数增加; 相同切削面积下, 切削齿受到的冲击力随着后倾角的增大而增大; 当冲击载荷大于切削齿的极限冲击强度时, 切削齿将直接产生碎裂; 即使冲击载荷不能达到切削齿的极限冲击强度, 周而复始的冲击载荷达到切削齿的冲击韧性时, 切削齿将发生冲击疲劳损坏。

关键词:砾岩; PDC 钻头; 冲击载荷; 变化规律; 试验

中图分类号: TE 921 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.016

Experiment on impact forces on single PDC cutter in cement sample with gravels

LIN Ying-song¹, KONG Dong-liang², HUANG Ming-zhao³, ZOU De-yong¹, SHAN Qing-lin¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. No. 1 Drilling Company of Great Wall Drilling Engineering Limited, Panjin 124010, China;
3. Drilling Department of China Petroleum Offshore Engineering Limited, Tianjin 300280, China)

Abstract: By making cutting experiments on single PDC cutter with a diameter of 19 mm in cement samples containing gravels, the laws of some factors such as gravel diameter, cementing strength, cutting depth, cutter back rake angle affecting the impact force on PDC cutter were studied. The damage mechanism on PDC bits drilling the gravel layer was analyzed. The results show that the impact forces on cutting teeth increase with the bond strength of the gravel and the gravel diameter increasing. With the increase of cut depth of cutting teeth, the impact force increases exponentially. Under the same cutting area, the impact force increases as the back rake angle increases. When the impact load is greater than the limit of impact strength, the cutting teeth will produce fragmentation. Even if the impact load is not to the limit of impact strength of the cutting teeth, the cycle of impact loading reaching the impact toughness of the cutting teeth, the cutting teeth will occur the fatigue damage.

Key words: conglomerate; PDC bits; impact forces; change rule; experiment

由于 PDC 钻头对地层性质和工作条件比较敏感, 其在砾岩地层的应用一直未能取得良好效果, 因此有必要针对砾岩层的地层性质来研究 PDC 钻头的损坏机制。由于 PDC 钻头在砾石层中钻进时, 切削齿易受到大的冲击载荷作用而发生崩齿或剥落, 导致钻头失去切削能力, 进而造成机械钻速严重降

低^[1-4]。为了设计出适合于砾石层中钻进的 PDC 钻头, 笔者通过制作含砾岩样, 在室内进行单齿切削模拟试验, 研究切削齿在砾岩中的冲击损坏机制, 分析切削齿所受冲击载荷的变化规律, 从而为砾石层 PDC 钻头设计与应用提供依据。

收稿日期: 2011-06-22

基金项目: 中海油公司科技项目(N0902108)

作者简介: 林英松(1964-), 女(汉族), 山东乳山人, 教授, 博士, 主要从事岩石力学在石油工程应用方面研究。

1 试验设计及测力数据处理

试验装置如图1所示。在车床上进行单齿切削含砾岩样试验,同时测量切削齿受到的切向力及轴向力。

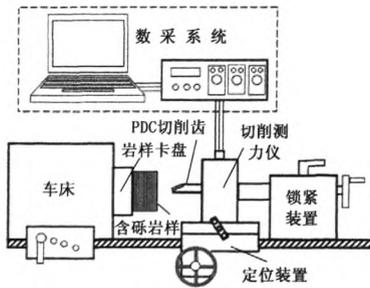


图1 模拟切削试验装置

Fig.1 Simulative cutting test device

试验岩样是以水泥、漂珠胶结砾石来模拟地层中的砾岩,岩样设计规格为 $\Phi 260\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的圆盘。采用4种胶结强度(通过加入不同配比的水泥及漂珠调整岩样胶结强度)及4种砾石直径(1.5~3 mm, 4.5~5.5 mm, 7~8 mm, 9.5~10.5 mm)的砾石制成了16种岩样。为方便试验数据记录,将岩样进行编号,编号由两位数字组成:十位上数字表示岩样砾石直径(1~4号砾石直径逐渐增大),个位上数字表示岩样胶结强度(1~4号强度逐渐增大)。例如:岩样23代表砾石直径编号为2、胶结强度编号为3的岩样。

表1为含砾石岩样在常温常压养护50 d后的单轴抗压强度测试结果。

表1 岩样单轴抗压强度

Table 1 Uniaxial compressive strength of cement sample

岩样编号	抗压强度 σ_c /MPa	岩样编号	抗压强度 σ_c /MPa
11	10.80	31	9.60
12	26.00	32	23.73
13	34.05	33	29.60
14	43.10	34	36.60
21	11.14	41	7.80
22	24.15	42	23.80
23	28.50	43	25.60
24	41.70	44	32.40

由于试验结果数据量大,又很离散,单独分析某一个波动切削齿的峰值和谷值不具有代表性,为此对数据做以下处理:每100组数据(试验每1 ms测一个数据)作为一个周期进行分析,并对这一周期内的所有峰值取平均值作为切削齿受到的冲击载荷。

2 试验结果分析

2.1 胶结强度的影响

用岩样抗压强度代表岩样的胶结强度。表2是切削砾石直径为7~8 mm岩样的试验结果,其中的峰值为切削砾石时的受力,谷值为切削胶结物时的受力。

由表2可以看出,切削齿受力的波动幅度很大,且随着胶结强度的增加而增大,峰值载荷甚至能达到谷值的3倍,而且切削齿的切向、轴向受力变化规律是一致的。由此可知,钻头在砾岩中受力极不均衡,切削砾石时受到的轴向力和切向力要远大于切削胶结物时受到的力。

将表2中的切向力均值、轴向力均值与抗压强度的关系绘制成曲线,如图2(a)所示,将切向、轴向冲击力(即切向力峰值均值和轴向力峰值均值)随胶结强度变化的趋势绘制成曲线,如图2(b)所示(砾石直径7.5 mm)。

表2 不同胶结强度下切削齿受力数据

Table 2 Data of forces on cutting tooth under different cementing strength

岩样抗压强度 σ_c /MPa	数据类别	侧向力 F_1 /N	切向力 F_2 /N	轴向力 F_3 /N
9.6	全部均值	-48.4707	610.91438	535.0552
	峰值均值	22.8758	1480.67295	1171.1489
	谷值均值	-100.9560	591.70635	480.9977
	峰谷差值	123.8318	888.96660	690.1512
23.73	全部均值	-63.6009	1569.5350	1486.6036
	峰值均值	14.3119	2031.3450	2005.2495
	谷值均值	-173.4530	675.4884	696.8931
	峰谷差值	187.7649	1220.5632	1308.3564
29.6	全部均值	-61.4685	1233.16190	1161.4300
	峰值均值	42.0275	2244.87600	2247.6435
	谷值均值	-170.2723	785.18310	767.0778
	峰谷差值	212.2998	1286.41665	1480.5656
36.6	全部均值	-87.9935	1380.83380	1305.24790
	峰值均值	23.5401	2460.66000	2460.66000
	谷值均值	-212.2515	816.73035	869.41335
	峰谷差值	235.7525	1340.70735	1556.50350

由图2可以看出,切削齿受到的切向与轴向冲击力随胶结强度的变化趋势基本一致,均随着胶结物强度的增加而增大,当岩样抗压强度由9.6 MPa增加到36.6 MPa时,切向及轴向冲击力分别增加了66.2%和112.6%。

分析原因:当胶结物强度较低时,砾石与胶结物之间结合力较弱,切削齿可以比较容易地将砾石从胶结物中直接剥离出来,此时切削齿受到的冲击力较小。随着胶结物强度增大,切削齿剥离砾石所需

的力会增大,因而切削齿受到的冲击力也会随之增大。当胶结物强度与砾石强度相近时,切削齿只能

直接切削砾石而无法剥离,此时切削齿所受的冲击力达到最大。

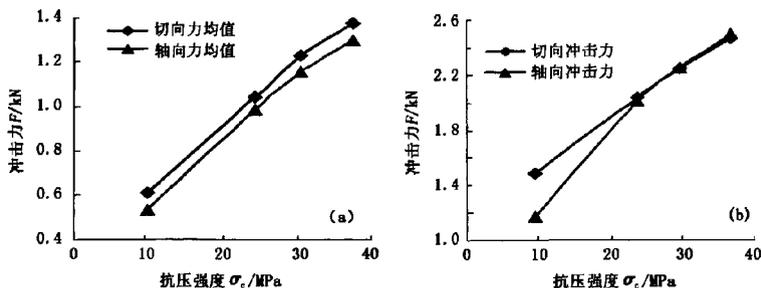


图2 切削齿受力均值及冲击力与岩样抗压强度的关系

Fig.2 Relation of average forces versus compressive strength and impact forces versus compressive strength

2.2 砾石尺寸的影响

采用直径 19 mm、后倾角 13°的切削齿,吃入深度均取 2.5 mm,选用相同胶结强度不同砾石直径的岩样。所得到的关系曲线见图3(胶结强度4)。

由图3可以看出,切削齿受到的切向、轴向冲击力随着砾石直径的增加而增大,当砾石直径由 2.25 mm 增加到 10 mm 时,切向及轴向冲击力分别增加了 37.7% 和 63.9%。

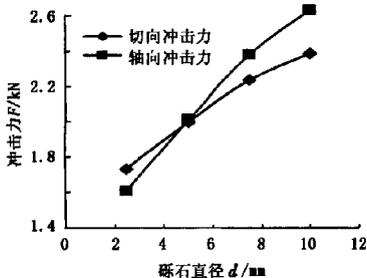


图3 冲击力与砾石直径的关系

Fig.3 Relation between impact forces and gravel size

分析原因:当砾石直径较小时,砾石与胶结物接触面积小,容易剥离,因而切削齿受到的冲击载荷很小。随着砾石直径的增大,切削齿切削到砾石的几率增加,导致切削齿受到的冲击载荷随之增大。

2.3 切削深度的影响

用 19 mm、后倾角 13°的切削齿,选取岩样 22、24、32、34 进行试验。设计切削深度分别为 1.5、2.5、3.5、4.5 mm。

通过单齿切削含砾岩样试验分析切削深度的变化对切削齿受冲击力的影响。图4是岩样22得到的试验结果。

将各点图进行曲线拟合,得到切向冲击力拟合公式为

$$F = 239.13 \exp(0.514h), R^2 = 0.9877;$$

轴向冲击力公式为

$$F = 258.05 \exp(0.422h), R^2 = 0.9915.$$

由图4可知,对于一定尺寸的切削齿,其受到的冲击力随着切削深度的增加呈指数增长,当吃入深度由 1.5 mm 增加到 4.5 mm 时,切削齿受到的轴向冲击载荷增加了 4 倍。原因是:切削齿吃入深度增大,切削齿与砾石的接触面积增加,从而使得切削齿受到的冲击力增大。

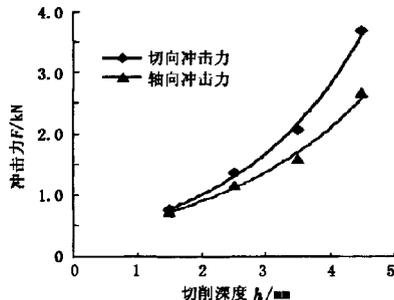


图4 冲击力与切削深度的关系

Fig.4 Relation between impact forces and cut depth

2.4 切削齿后倾角的影响

试验采用 19 mm 切削齿,设计了 7°、13°、19° 和 25° 四种后倾角,分别在岩样 12、14、42、44 上进行单齿切削试验,采用相同的切削面积和相同的破岩速度。图5是岩样42的试验结果。

由图5可以看出,切削齿受到的冲击力随着后倾角的增大而增大。一方面,后倾角的增大,改变了刃前岩石的受力状态,使砾石剥离的阻力增大;另一方面,当切削面积相同时,切削齿与岩样的接触面积将随着后倾角的增大而增大,因此切削齿所受的力也会随之增大。

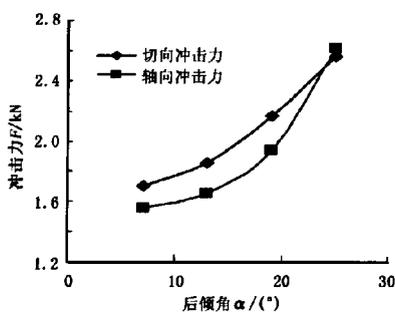


图5 冲击力与后倾角的关系

Fig. 5 Relation between impact forces and back rake angle

3 PDC 钻头钻进砾岩冲击损坏机制

通过试验研究及理论分析可知,PDC 钻头在砾石层钻进时,切削齿将以较高的速度碰撞砾石,由于聚晶金刚石层与砾石脆性大,砾石强度高,变形很小,切削齿瞬间加载将形成很大的冲击载荷,当冲击载荷大于切削齿的极限冲击强度时,切削齿将直接产生碎裂。即使冲击载荷不能达到切削齿的极限冲击强度,由于切削齿在砾石层中经常钻遇砾石,受到周而复始的冲击作用,当达到切削齿的冲击韧性时,切削齿将发生冲击疲劳损坏。

4 结论

(1) 切削齿受到的冲击力随着砾石层胶结强度、砾石直径的增加而增大,并随切削齿切削深度的增加呈指数增加;相同切削面积下,切削齿受到的冲击力随着后倾角的增大而增大。

(2) 当冲击载荷大于切削齿的极限冲击强度时,切削齿将直接产生碎裂;即使冲击载荷不能达到切削齿的极限冲击强度,周而复始的冲击载荷达到切削齿的冲击韧性时,切削齿将发生冲击疲劳损坏。

参考文献:

[1] 杨丽,陈康民. PDC 钻头的应用现状与发展前景[J]. 石油机械,2007,35(12):70-72.

YANG Li, CHEN Kang-min. PDC bit application situation and development prospect[J]. China Petroleum Machinery, 2007,35(12):70-72.

- [2] 高绍智,张建华,李天明,等. 适用于砾石夹层钻进的 PDC 钻头[J]. 石油钻采工艺,2006,28(4):20-21.
GAO Shao-zhi, ZHANG Jian-hua, LI Tian-ming, et al. PDC bit suitable drilling into the gravel intercalations [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(4):20-21.
- [3] 孙明光. 新型 PDC 钻头设计与现场试验[J]. 石油钻采工艺,2006,28(2):21-24.
SUN Ming-guang. Design and test of PDC bit with new structure [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(2):21-24.
- [4] MORTIMER Laurence. Innovative design features on PDC bit result in record run in orenburg region [R]. SPE 135881,2010.
- [5] RODRIGUEZ Carlos Solano, MONTEJO Carlos, RICARDO Yam, et al. Enhancements in PDC bit design and drilling optimization tackle hard conglomerate rock drilling in northern Mexico [R]. SPE 102640, 2006.
- [6] SINOR L A, POWERS J R, WARREN T M. The effect of PDC cutter density, back rate, size, and speed on performance [R]. SPE 39306, 1998.
- [7] 邹德永,曹继飞,袁军,等. 硬地层 PDC 钻头切削齿尺寸及后倾角优化设计[J]. 石油钻探技术,2011,39(6):91-94.
ZOU De-yong, CAO Ji-fei, YUAN Jun, et al. Optimization design of the cutter size and back rake for PDC bit in hard formation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(6):91-94.
- [8] FOUCAULT Hubert, MALAGON Raul, ALIKO Enis, et al. Latest PDC technology and optimization process enable replacement of multiple impregnated and roller cone bits with one PDC bit run [R]. SPE 128562,2010.
- [9] ISBELL Matt, SCOTT Dan, FREEMAN Mark, et al. Application-specific bit technology leads to improved performance in unconventional gas-shale plays [R]. SPE 128950, 2010.

(编辑 沈玉英)