

一种新型可降解压裂封隔器坐封球

张毅¹, 于丽敏², 任勇强¹, 杨东¹, 张宇³, 冯丹³

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062552

2. 中国石油华北油田科技信息处 河北任丘 062552

3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院 河北任丘 062552

通讯作者: Email: 381891552@qq.com

项目支持: 中国石油集团渤海钻探工程公司重大专项“可降解井下封隔器研制”(2016ZD01K-03)

引用: 张毅, 于丽敏, 任勇强, 等. 一种新型可降解压裂封隔器坐封球[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 53-58.

Cite: ZHANG Yi, YU Limin, REN Yongqiang *et al.* A new type of degradable setting ball for fracturing packers[J]. Well Testing, 2018, 27(2): 53-58.

摘要 在压裂管柱中使用液压类封隔器坐封时需要投入坐封球, 管柱内打压推动液压封隔器内部活塞运动完成坐封, 坐封球通过封隔器底部的球篮回收, 但压裂后测井温、测压力恢复时工具无法下入。通过对目前各类可降解材料进行优化、选材, 再经过金相、力学等实验验证, 制作了一种针对 Y531 型封隔器使用的新型可降解压裂封隔器坐封球, 并在安 105-1X 井以及宁 50-135X 井进行现场试验, 压裂结束后取出 Y531 型封隔器, 封隔器完好, 未见压裂坐封球, 说明其已溶解, 证明了可降解材料可以满足压裂坐封要求, 为进一步应用可降解材料制作射孔枪、桥塞、封隔器、压裂滑套等其它井下工具提供了发展方向。

关键词 可降解材料; 井下工具; 镁铝合金; 纳米复合; 坐封球; 应用方向

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.009

A new type of degradable setting ball for fracturing packers

ZHANG Yi¹, YU Limin², REN Yongqiang¹, YANG Dong¹, ZHANG Yu³, FENG Dan³

1. Downhole Operation Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Renqiu, Hebei 062552, China

2. Science and Technology Information Division of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

3. Engineering Technology Research Institute of CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: A setting ball is required to set a hydraulic packer in a fracturing string, by pressuring the string to push the piston inside the hydraulic packer, and then retrieved by the ball basket at the bottom of the packer. However, the use of the ball basket can cause tools for logging temperature and pressure recovery, etc. to fail to run in after fracturing. Based on optimization and selection of various types of degradable materials, and metallographic and mechanical experiments, a new type of degradable setting ball for Y531 packers has been developed. Field tests were performed in Wells 105-1X and 50-135X, and the result shows that the Y531 packers are intact, but no balls were found after fracturing, indicating the balls downhole were degraded and the degradable material is effective to the fracturing packer. The successful setting ball enlightens the application direction of biodegradable materials to perforating gun, bridge plug, packer, fracturing sleeve and other downhole tools.

Keywords: degradable material, downhole tool, Mg-Al alloy, nanocomposite, setting ball, application direction

可降解材料指在特定条件下的一段时间内, 在热力学和动力学意义上均可获得降解的材料^[1]。随着油气田开发技术不断发展进步, 可降解材料也发挥着越来越大的作用, 应用可降解材料制作的各类井下工具在完成作业后可降解并返排出井外, 节省了起下作业管柱工序, 而且还降低了下井工具被卡的风险, 显著提高了作业效率^[2]。

可降解材料种类众多, 目前在国外成功应用的主要有可降解镁铝合金、可降解纳米复合材料

(DNC)等^[3]。可降解镁铝合金以斯伦贝谢公司的产品为代表, 具有耐冲蚀、降解速率可控、无需化学添加剂和适于低 PH 值环境等优点, 适用于不同的井深、温度、压力和流体特性等条件, 该类合金工具的最大工作压差可达 70 MPa, 无需回收或钻磨作业, 其降解的副产品为微米级粉末, 不影响返排和油气生产^[4]。可降解纳米复合材料由贝克休斯公司研发, 主要由活性金属基质和增强部分组成, 采用粉末冶金工艺固化活性金属粉末, 并在表面覆盖

金属或陶瓷增强部分,具有低密度、高强度、降解速率可控和低成本的特点,抗压强度高达 830 MPa,破裂伸长率为 8%~12%^[5]。

液压类封隔器坐封时通常需要投入坐封球,之后打压推动内部活塞运动完成坐封,坐封球通常通过封隔器底部的球篮回收,但这样会影响压裂后其他工具的下入,为解决该问题引进了可降解材料。本文就成分为 Mg-8Al-0.7Zn-0.25Mn-1.0Ce 的可降解镁铝合金的加工工艺及其组织结构、力学性能、可降解性能和现场使用情况进行了探索和研究,为可降解坐封球的加工制作和现场使用提供相关技术依据^[6]。

1 可降解封隔器坐封球的研制

可降解封隔器坐封球的研制包括可降解材料的优选和可降解封隔器坐封球的低压铸造。

1.1 可降解材料的优选

可降解封隔器坐封球要求其具有一定的金属强度且压裂施工前,即封隔器坐封阶段(压裂施工前约 3 h)保证不会产生强度变化。为达到要求该坐封球采用基质内核加外包覆层的结构组成^[7]。基质选取低密度、高强度和耐氯离子腐蚀性的金属材料,包覆层采用起到有效控制基质腐蚀速率、减缓基质层氧化的材料^[8]。

可溶解材料的基质可以是木材或木质材料、高分子材料、纤维材料、多孔陶瓷材料、铝及其合金、镁及其合金材料。从材料的耐温性考虑,木材或木质材料、大部分高分子材料不能满足要求;从材料的强度考虑,木材或木质材料、大部分高分子材料也不能满足要求;从材料的可加工性能考虑,无机纤维材料、多孔陶瓷材料难以制备成复杂的形状,不能满足加工要求;从材料的可降解性能考虑,无机纤维材料、多孔陶瓷材料难以溶解^[9]。因此,综合考虑其基质材料为铝及其合金、镁及其合金材料^[10]。

外包覆层选用镍铜金属,该外包覆层可与基质形成固溶体或金属间化合物,既能提高其强度,又能与金属基质产生较高电位差,便于氯离子的扩散渗透,发生腐蚀,提高降解效果^[11]。

由此可见,该压裂坐封球的优选材料结构为铝镁合金基质外包镍铜金属

1.2 可降解封隔器坐封球的低压铸造

低压铸造是指在密闭保持炉的熔体表面施加

0.01~0.05 MPa 的空气压力或惰性气体压力,使熔体在升液管中上升,被压进与炉子连着的上方的模具内。溶液从型腔的下部慢慢开始填充,保持一段时间的压力后凝固。凝固是从产品上部开始向浇口方向转移,当铸件浇口处冷却至固相温度以下便可将模具从低压系统上取走,待冷却充分后将合金试样或产品从模箱中取出。

本次选用 Mg-8Al-0.7Zn-0.25Mn-1.0Ce 的可降解镁铝合金作为基础对象,通过微调稀土元素 Gd 的含量以期达到合金力学性能和低压铸造工艺性能的协调。低压铸造试验使用压力为 32 kPa,保压时间 240~400 s。

2 可降解封隔器坐封球室内试验

对优选出的可降解材料分别进行力学性能试验,硬度性能试验和降解性能试验,证明试验材料可以满足压裂坐封球降解性能要求。

2.1 力学性能试验

本试验采用电子万能材料试验机压铸成型的镁铝合金并用其加工成如图 1 所示尺寸的标准拉伸试验进行力学性能测试^[12]。

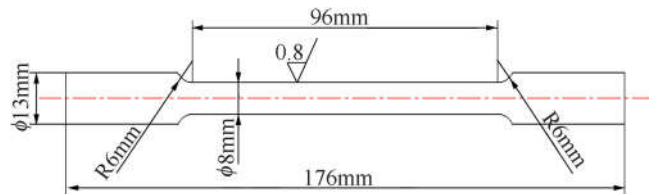


图 1 标准拉伸试验

Fig. 1 Standard tensile test

由图 1 可见,在力学性能测试过程中,采用匀速、单向拉伸,单向拉伸速率设置为 3 mm/min。为了保证拉伸力学性能的准确度,分别准备了 4 个压铸试样(Y-1、Y-2、Y-3、Y-4)进行拉伸试验。试验测得的应力应变曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出,该试验的抗拉强度为 257.8 MPa,屈服强度为 158.6 MPa,延伸率为 4.4%,满足压裂坐封球力学性能要求^[13]。

2.2 硬度性能试验

采用 HV-1000 显微硬度计、砝码载荷为 200 g。对直径 120 mm 的该类合金棒由表层到心部的硬度分布进行了测定,平均分布的 10 个点的硬度如图 3 所示^[14]。

由图 3 可知,该类可降解金属棒的硬度由表及里略有下降,但整体硬度变化不大,都保持在了 85 以上,说明该类组织的力学性能较为均匀。

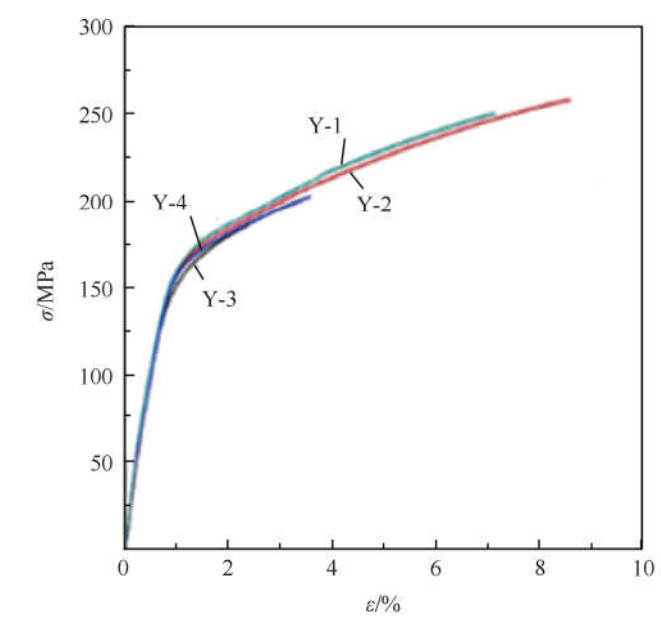


图 2 应力应变曲线
Fig. 2 Stress and strain curves

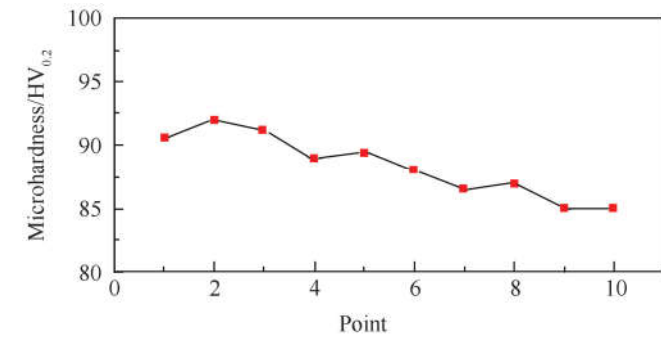


图 3 由表面到中心的显微硬度分布
Fig. 3 Surface to center microhardness distribution

2.3 降解性能试验

用优选的可降解材料制做了 2 个质量为 10 g 的圆棒状模拟试样(ZKRJ-L-D1、KRJ-L-D2),在浓度为 1%的 KCl 溶液、测试温度为 120 ℃下进行了溶解实验,测试结果如图 4、图 5 所示^[15]。

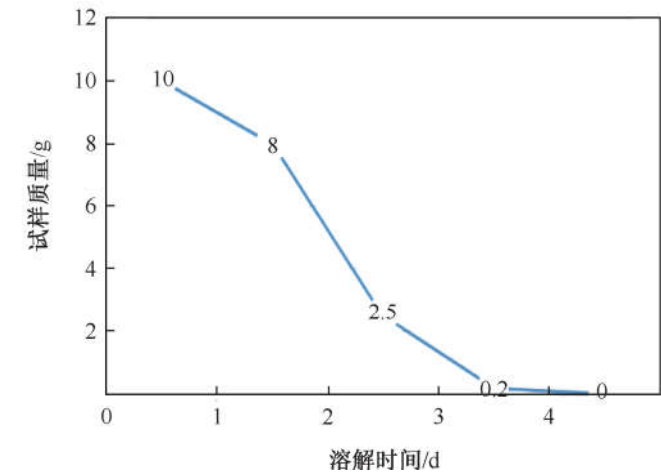


图 4 ZKRJ-L-D1 试样溶解曲线
Fig. 4 Dissolution curve of sample ZKRJ-L-D1

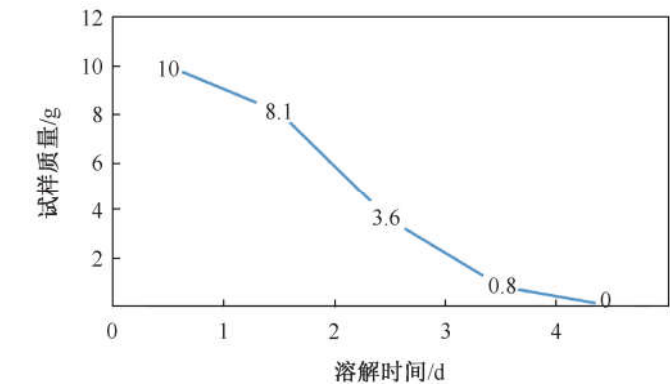


图 5 ZKRJ-L-D2 试样溶解曲线
Fig. 5 Dissolution curve of sample ZKRJ-L-D2

由图 4、图 5 可以看出,前 3 h 出现溶解现象但尺寸、质量没有变化。3 h 后开始出现质量上的变化至 96 h 完全降解,其稳定溶解速率为 0.25 g/h,以 ZKRJ-L-D1 试样为例说明降解情况(见表 1)。质量为 10 g 的圆棒状模拟试样在 120 ℃及 1%KCl 溶液中的质量变化^[16]。

表 1 在 120 ℃及 1%KCl 溶液中的质量变化
Table 1 Mass change of a 10 g sample in 1% KCl solution at 120 ℃

时间/h	质量/g
0	10.0
3	10.0
6	9.5
12	9.0
24	8.0
48	2.5
72	0.2
96	0

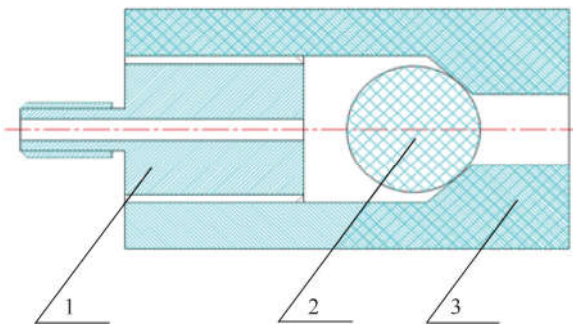
由表 1 可以看出,该实验材料在 6 h 内质量变化仅为 0.5 g,可以满足压裂封隔器坐封要求,6 h 之后开始稳定,降解至 96 h 完全降解完,可以保证该材料不会影响下步压裂后测井温、测压力恢复等工具的入井。

2.4 封隔器坐封球压力试验

应用上述优选材料制做了一枚直径为 45 mm 的封隔器坐封球,该坐封球可用于 Y531 型封隔器的坐封。

为验证该坐封球能否满足现场使用要求,设计了如下实验装置测试其密封性能(见图 6)。其中模拟球座的变径处安装有密封垫圈保证其密封性能,试压丝堵接高压水泵模拟封隔器坐封打压的过程^[17](见图 7)。

按照 Y531 型封隔器坐封要求模拟打压至 21 MPa,稳压 10 min,压降约为 0.33 MPa,证明该坐封球可以满足封隔器坐封的需求。



1-试压丝堵;2-可降解坐封球;3-模拟球座

图 6 测试坐封球密封性能的实验装置

Fig. 6 Experimental apparatus for testing the sealing performance of a setting ball

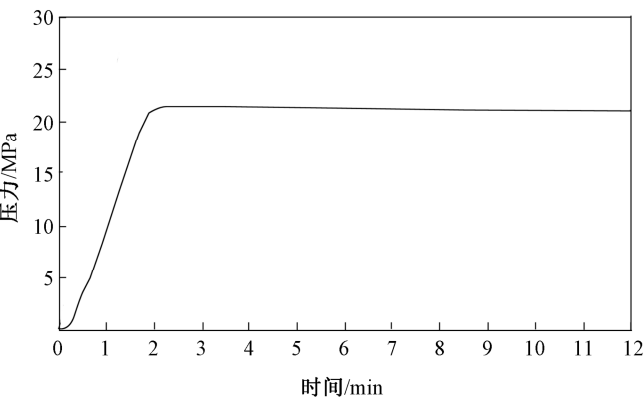


图 7 试压曲线图

Fig. 7 Pressure test curve

3 可降解封隔器坐封球现场试验

应用研制的 Y531 型封隔器坐封球于 2017 年 2 月 21 日在华北油田安 105-1X 井进行现场试验,为保证现场使用条件下降解速度可控,在此次研究采用的可降解金属材料球的外表面喷涂了一种特殊的包覆层,可以有效控制基质的腐蚀速率,减缓基质层的氧化^[18]。

安 105-1X 井位于冀中坳陷廊固凹陷河西务构造带安 105 断块,完钻井深 2 835.00 m,封隔器卡点:2 580.0 m。现场正打压 20 MPa 封隔器坐封。对套管正试压 20 MPa,经 30 min 压力不降认为验封合格。随后进行压裂施工,套管打平衡 8~15 MPa,施工排量 4~4.5 /min,施工泵压 40.5 MPa,压裂成功。2 月 22 日至 3 月 3 日,压后放喷求产。3 月 4 日,历经 12 d 取出 Y531 型封隔器,封隔器完好,未见压裂坐封球,说明其已溶解。其压裂施工曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出该井整体压裂施工及求产过程正常。

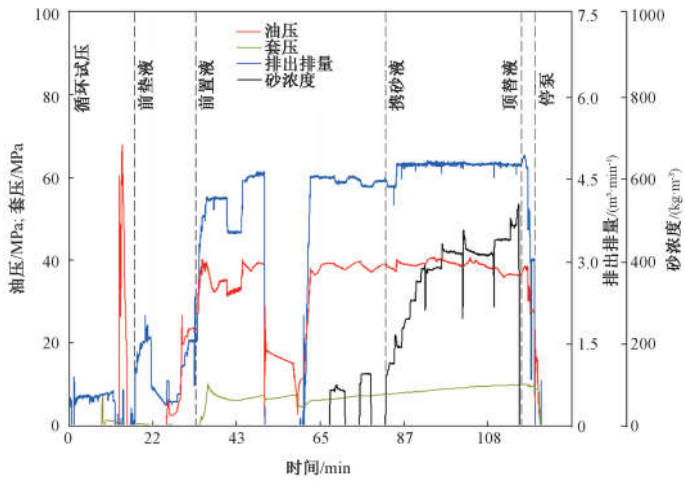


图 8 安 105-1X 井压裂施工曲线图

Fig.8 Fracturing operational curve of well An 105-1x

2017 年 3 月 24 日在华北油田宁 50-135X 井采用同样的可降解坐封球进行 Y531 型封隔器压裂施工。

该井完钻井深 3 523.00 m,封隔器卡点 3 050.0 m。现场正打压 20 MPa 封隔器坐封。并对套管正、反分别试压 20 MPa,经 30 min 压力不降,验封合格。随后进行压裂施工,套管打平衡 8~15 MPa,施工排量 4.5~4 m³/min,施工泵压 50.5 MPa,压裂成功。3 月 25 日至 3 月 26 日,放喷求产,3 月 29 日,取出 Y531 型封隔器,封隔器完好,未见压裂坐封球,说明其已溶解。其压裂施工曲线如图 9 所示。

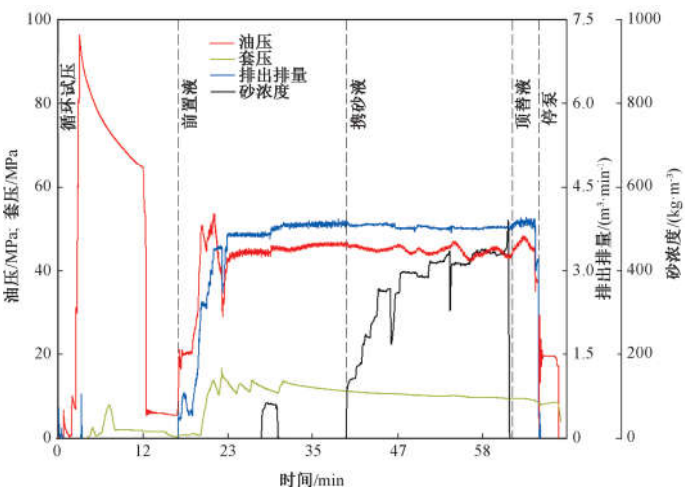


图 9 宁 50-135X 井压裂施工曲线图

Fig.9 Fracturing operational curve of well Ning 50-135x

由图 9 可以看出,该井整体压裂施工过程正常。实际井例现场试验表明,可降解封隔器坐封球使用的可溶金属材料组织均匀无缺陷,应用于压裂施工中,可简化施工工序,也为类似工具的研制提供有益借鉴^[19-24]。

4 结论

(1) 所优选的 Mg-8Al-0.7Zn-0.25Mn-1.0Ce 的镁铝合金材料制作的降解压裂坐封球具有质量轻、强度高、施工完毕后易返排等特点,在压裂施工中可以简化施工工序、降低施工成本。

(2) 采用压铸及固溶技术对熔炼后的 Mg-8Al-0.7Zn-0.25Mn-1.0Ce 的镁铝合金进行处理,获得了长度 1 000 mm、直径 120 mm 的可溶金属棒;

(3) 该可溶金属材料组织均匀无缺陷,主要由 α -Mg 和 β -Mg₁₇Al₁₂ 物相组成,平均晶粒度 <72 μm ,显微硬度 >80 HV0.2,材料的抗拉强度接近 335 MPa,断后延伸率为 15%;

(4) 经现场使用验证,采用该类材料制作的溶解球能够满足深度 3 000.0 m、施工泵压 50 MPa 的压裂作业需求,且施工后实现了自然降解,节省了起下作业管柱工序;

(5) 基于降解材料具有质量轻、强度高、施工完毕后易返排等特点,可以在射孔枪、封隔器、桥塞以及压裂滑套等工具方面进行推广应用。

致谢: 本次论文撰写,得到了渤海钻探井下作业分公司、工程技术研究院以及华北油田科技信息处的大力支持,该论文已经通过了保密审查,特别是井下作业公司技术专家徐克彬为论文给予了精心的指导,在此表示诚挚的感谢以及真心的祝福。

参 考 文 献

- [1] 董明键,郭先敏,李子良,等.降解材料在完井工具中的应用及发展趋势[J].石油机械,2015,43(3):31-34.
DONG Mingjian, GUO Xianmin, LI Ziliang *et al.* Application and future development of degradable materials in completion tools [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3):31-34.
- [2] 平恩顺,王林,邹鹏,等.分段压裂工具用降解金属材料降解性能研究[J].石油化工应用,2017,36(2):133-136.
WANG Enshun, WANG Lin, ZOU Peng *et al.* Research on degradation performance of degradable metal materials for staged fracturing tool [J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(2):133-136.
- [3] 魏辽,马兰荣,朱敏涛,等.大通径桥塞压裂用可溶解球研制及性能评价[J].石油钻探技术,2016,44(1):90-94.
WEI Liao, MA Lanrong, ZHU Mintao *et al.* Development and performance evaluation of dissolvable balls for large borehole bridge plug fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(1):90-94.

- [4] AVILES I, MARYA M, HERNANDEZ T R *et al.* Application and benefits of degradable technology in open-hole fracturing [C]. SPE 166528, 2013.
- [5] SALINAS B, XU Z, AGRAWAL G *et al.* Controlled electrolytic metallics - an interventionless nanostructured platform [C]. SPE 153428, 2012.
- [6] ZHAO B, ZHAO Z, BO L *et al.* Preparation and properties of pval/modified starch composite foaming materials [J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(10):103-107.
- [7] 许朋琛,陈宁,胡景东,等.降解清洁钻井液的研究及现场应用[J].钻井液与完井液,2017,34(3):27-32.
XU Pengchen, CHEN Ning, HU Jingdong *et al.* Study and field application of degradable clear drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(3):27-32.
- [8] 赵在忠,孙明炬.探讨油田井下作业清洁生产技术[J].中国石油和化工标准与质量,2013(21):89.
ZHAO Zaizhong, SUN Mingju. Oilfield downhole operation of cleaner production technology is discussed in this paper [J]. China petroleum and chemical industry standard and quality, 2013(21):89.
- [9] 郭有钢.生物降解聚乳酸基纳米复合材料的热性能和结晶动力学研究[D].开封:河南大学,2011.
GUO Yougang. Study on thermal properties crystallization kinetics of biodegradable polylactide based nanocomposites [D]. Kaifeng: Henan university, 2011.
- [10] 董志刚.水平井段内多缝分段压裂技术研究[D].成都:西南石油大学,2016.
DONG Zhigang. Research on multi seam subsection fracturing technique in horizontal well section [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [11] 姜涛. Al 基降解合金的制备及性能研究[D].西安:陕西科技大学,2016.
JIANG Tao. Research on the preparation and properties of degradable Al alloy [D]. Xi'an: Shanxi University of Science & Technology, 2016.
- [12] 管宝儒.生物降解镁基非晶合金的制备及电化学性能研究[D].南京:南京理工大学,2017.
GUAN Baoru. Preparation and electrochemical properties of biodegradable Mg-based amorphous alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Science Technology, 2017.
- [13] 陈国强.生物降解材料产业现状与趋势分析[J].新材料产业,2007(12):42-46.
CHEN Guoqiang. Biodegradable materials industry present situation and trend analysis [J]. The New Material Industry, 2007(12):42-46.
- [14] 曹燕琳,尹静波,颜世峰.生物降解聚乳酸的改性及其应用研究进展[J].高分子通报,2006(10):90-97.
CAO Yanlin, YI Jingbo, YAN Shifeng. Recent research advance in biodegradable poly (lactic acid) (PLA): Modification and application [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(10):90-97.

- tin, 2006(10):90-97.
- [15] 袁广银, 章晓波, 牛佳林, 等. 新型可降解生物医用镁合金 JDBM 的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10):2476-2488.
- YUAN Guangyin, ZHANG Xiaobo, NIU Jialin *et al.* Research progress of new type of degradable biomedical magnesium alloys JDBM [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10):2476-2488.
- [16] 周后俊, 程智远, 王海霞, 等. 新型压裂滑套水力喷射器的研制及应用[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(1):45-47.
- ZHOU Houjun, CHENG Zhiyuan, WANG Haixia *et al.* The development of the new type hydraulic ejector fracturing sliding sleeve and applications [J]. Oil Field Equipment, 2017, 46(1):45-47.
- [17] 赵效锋, 管志川, 张晗, 等. 压裂过程中射孔段水泥环力学响应规律[J]. 断块油气田, 2017, 24(5):695-699.
- ZHAO Xiaofeng, GUAN Zhichuan, ZHANG Han *et al.* Mechanical response of perforated cement sheath through hydraulic fracturing [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(5):695-699.
- [18] 魏耀武, 李楠, 刘春桃. 铝镁合金对 Al_2O_3 -SiC-Al 复合材料组成的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2008, 31(3):277-279.
- WEI Yaowu, LI Nan, LIU Chuntao *et al.* Effect of Al-Mg alloy on the composition of Al_2O_3 -SiC-Al composite [J]. 2008, 31(3):277-279.
- [19] 平恩顺, 王林, 邹鹏, 等. 分段压裂工具用可降解金属材料降解性能研究[J]. 石油化工应用, 2017, 36(2):133-136.
- PING Enshun, WANG Lin, ZOU Peng *et al.* Research on degradation performance of degradable metal materials for staged fracturing [J]. 2017, 36(2):133-136.
- [20] 王林, 平恩顺, 张建华, 等. 可降解桥塞研制及其承压性能试验[J]. 石油机械, 2017, 45(2):64-67.
- WANG Lin, PING Enshun, ZHANG Jianhua *et al.* Development and pressure bearing performance experiment of the degradable bridge plug [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2):64-67.
- [21] 陈美云. 可降解镁表面羟基乙叉二膦酸超薄涂层的腐蚀降解性能和生物相容性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- CHEN Meiyun. Corrosion controlling and bio-compatibility of a surface-immobilized ultrathin 1-hydroxyethylidene-1, 1-diphosphonic acid (HEDP) film on biodegradable Magnesium [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [22] 孙志超. 超长水平段压裂滑套工艺技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016(16):106-108.
- SUN Zhichao. A study of fracturing sliding sleeve technology in ultra long horizontal section [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016(16):106-108.
- [23] 麻惠杰, 李光祥, 杨延征. 多级滑套固井分段压裂技术研究与应用[J]. 化工管理, 2014(27):105.
- MA Huijie, LI Guangxiang, YANG Yanzheng. Research and application of multi-stage sliding sleeve cementing and staged fracturing technology [J]. Chemical Enterprise Management, 2014(27):105.
- [24] 秦金立, 陈作, 杨同玉, 等. 鄂尔多斯盆地水平井多级滑套分段压裂技术[J]. 试油钻探技术, 2015, 43(1):7-12.
- QIN Jinli, CHEN Zuo, YANG Tongyu *et al.* Technology of staged fracturing with multi-stage sleeves for horizontal wells in the Ordos basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1):7-12.

编辑 刘振庆

第一作者简介:张毅,男,1987年6月出生,2017年毕业于中国石油大学(华东)石油与天然气专业工程硕士,工程师,主要从事油气田试油试气的技术管理工作。电话:0317-2739291,18731770293;Email:381891552@qq.com。地址:河北省任丘市会战道渤海钻探井下作业分公司,邮政编码:062552。