

文章编号:2095-6134(2016)06-0753-05

油井磁防蜡技术中的 Halbach 型磁场的设计^{*}

廖艳飞^{1,2}, 王晓东^{2†}, 那贤昭¹

(1 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081;

2 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2016 年 2 月 25 日收稿; 2016 年 4 月 26 日收修改稿)

Liao Y F, Wang X D, Na X Z. Design of Halbach-type magnetic field for paraffin control in oilfield[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(6): 753-757.

摘 要 设计用于油田开采防蜡技术中的两种永磁体磁场结构. 一般地, 好的磁场设计需具备两个特点: 结蜡区内的磁感应强度强和油路轴向上磁感应强度的梯度大. 为此, 以 Halbach 型永磁磁场为基础, 设计了两种“螺旋形”的防蜡磁场结构. 通过数值模拟研究它们的磁场分布特点. 结果表明: 两种磁场均具备上述两个特点.

关键词 Halbach 磁场; 磁防蜡; 磁感应强度; 油田

中图分类号: TE866 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2016.06.006

Design of Halbach-type magnetic field for paraffin control in oilfield

LIAO Yanfei^{1,2}, WANG Xiaodong², NA Xianzhao¹

(1 State Key Laboratory of Advanced Steel Processing and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Two structures of the permanent magnetic field have been designed for paraffin control in oilfield. Generally, the favorable design for such magnetic field meets the following two structural requirements. The magnetic flux densities in paraffin deposit zone in the cross-sectional direction are as strong as possible, and the gradients of magnetic flux density in the axial oil passage are as big as possible. Based on the concept of Halbach magnetic field, two structures have been designed and numerically analyzed to meet the above requirements for the purpose of the paraffin control. The results confirmed our conceivment and may serve as the application of the magnetic field construction for paraffin control in oilfield.

Key words Halbach magnetic field; magnetic paraffin control; magnetic field; oilfield

加拿大的亚伯达省和委内瑞拉的奥里诺科 西哥湾和中国东北等地区稠油的产量也在逐步
河地带是重要的现有高含蜡稠油生产基地, 墨 增加. 在稠油开采、运输过程中, 结蜡现象甚为

^{*} 中国科学院“百人计划”项目(111800M105)、国家自然科学基金(51374190, 51574091)和中国科学院空间科学先导专项(XDA04078400)资助

[†] 通信作者, E-mail: xiaodong.wang@ucas.ac.cn

严重,频繁的洗井作业影响了生产效率,甚至使油田不能正常生产^[1-2],各种防蜡措施应运而生.目前,磁防蜡技术是使用较多的防蜡技术之一,也取得了良好的应用效果^[3].虽然现在各国学者对磁防蜡的微观机理众说纷纭,但是总的来说,当原油以一定的流速经过特定的磁场,磁场可对原油具有一定的作用,使其一些化学物理性质发生改变,阻止蜡晶的形成,从而达到降黏防蜡的目的^[4-8].

根据磁场产生方式的不同,磁防蜡器主要分为永磁体式和电磁式两种.电磁式防蜡装置因电路的井下安装、操作、维护以及电能消耗等制约因素,很难达到预期的防蜡效果.随着永磁材料的快速发展,永磁防蜡技术受到青睐^[9],本文的研究对象即为永磁体式的磁场结构.

影响磁处理最重要的参量是磁感应强度,马忠合^[10]通过大庆油田的现场实验发现原油降黏率随磁感应强度的增大而上升,经过峰值后,降黏率随磁感应强度的增大而下降,具体的变化关系因原油含水率的不同而异.一般认为磁场的磁感应强度在 100~250 mT 范围内均具有显著的降黏效果^[11].另一个影响磁处理的参量为磁场的位型,汪仲清^[12-13]在实验中发现,在磁处理减阻、降黏过程中,多极阶梯峰效果最好,并认为磁感应强度的梯度越大,油分子运动时磁场变化引起的感应电场对分子中电子产生的作用力也越大,从而产生较强的抗磁性及抗磁各向异性,有利于分子的取向排列,从而抑制结蜡.

1979 年,美国学者 Klaus Halbach 在从事电子加速实验时,发现了一种特殊的永磁体排布结构,可获得特定方向上较为均匀的磁场,后被称为 Halbach 阵列.随着永磁体装置不断地小型化,其应用范围扩大到了诸如核磁共振、磁悬浮、永磁电机以及特种加工等领域.其中较常见 Halbach 磁场结构为由充磁方向连续变化的磁块构成的环形(亦称为磁魔环),可以在其中心的空腔内产生较为均匀的磁场,且单位重量磁材料产生的磁感应强度最高. Halbach 永磁魔环还具有以下优点:主磁场为横向,漏磁很小;结构简单、紧凑,构造鲁棒性强;生产工艺简单,加工成本较低^[14].

本研究是针对现有磁防蜡技术的不足,设计了两种油田用 Halbach 型磁场,利用特殊磁化方

向的小磁块经组合和堆砌产生特定空间分布的静磁场.

1 磁场搭建

1.1 Halbach 磁场单元

图 1 为 Halbach 磁场单元,其中组成磁场单元的小磁块为扇形永磁体,其尺寸为内径 69 mm,外径 89 mm,扇形夹角 $\pi/6$,厚度 20 mm.在周向上由 12 块小磁块围绕而成,每块小磁块的磁化方向都不同.以某一小磁块为起点,顺时针编号,则磁化方向从第 1 块小磁块到第 12 块小磁块每两块之间按顺时针旋转 30° .上述 12 块小磁块按序号顺时针用特种胶黏接首尾连接形成一个闭合圆环作为基本的磁场单元.

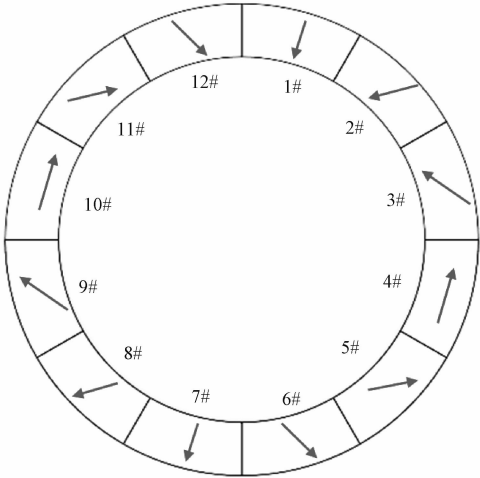


图 1 Halbach 磁场(磁魔环)及磁化方向

Fig. 1 Halbach-type magnetic field (magnetic magic ring) and its magnetization directions

1.2 两种磁场结构的搭建方案

我们设计的两种磁防蜡磁场如图 2 所示,其中图 2(a)为螺旋磁场体 A,4 组 Halbach 磁场单元依次旋转 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$,相邻磁场单元在轴向上间距为 20 mm.将上述磁场体同轴装配在油管内壁上.图 2(b)为螺旋磁场体 B,它包括 2 个 Halbach 磁场单元,依次旋转 $0, \pi$,分别为 B-1、B-2.其中 B-1 是相邻 2 个小磁块沿顺时针方向依次错开 $\pi/6$ 的水平角度,并在轴向上依次上升一个小磁块的厚度(20 mm);B-2 是相邻 2 个小磁块沿顺时针方向依次错开 $\pi/6$ 水平角度,并在轴向上依次下降一个小磁块的厚度(20 mm).图 2(c)示意出了螺旋磁场体 B 的一个组装实例.

B_r 为剩磁, mT. 在进行几何建模时,空气区域为半径 100 mm、高度为 220 mm (A 结构)和 600 mm (B 结构)的圆柱体区域,网格划分采用自由四面体,对永磁体区域通过控制最大网格尺寸的办法进行网格细化,在空气区域边界上施加磁绝缘的边界条件,然后在计算区域上求解式(1)^[15].

考虑到磁场强度越大,对永磁体的性能要求越高,但成本也越高,兼顾降黏效果和成本两方面的因素,选择剩磁为 1.22 T 的钕铁硼永磁体材料.

2.2 模拟结果

图 3 是 Halbach 单元在 xy 截面上的磁场分布图,其中图 3(a)为截面上磁体内部区域的磁感应强度的矢量图,图 3(b)为截面上磁体内部的磁感应强度的等值线分布. 图 3(a)中箭头大小与磁感应强度大小成正比,箭头方向表示磁感应强度方向. 从箭头分布可以看出 Halbach 单元的磁场方向为,从图 1 中 1 号小磁体出发,横穿整个截面,指向对侧 7 号小磁体;观察中间小箭头可以判断, Halbach 磁单元内部磁场均匀平行分布. 从图 3(b)中磁感应强度的等值线分布也可以看出内部磁场分布均匀,大部分区域磁感应强度在 140 ~ 700 mT,整体的磁感应强度场强度均较大.

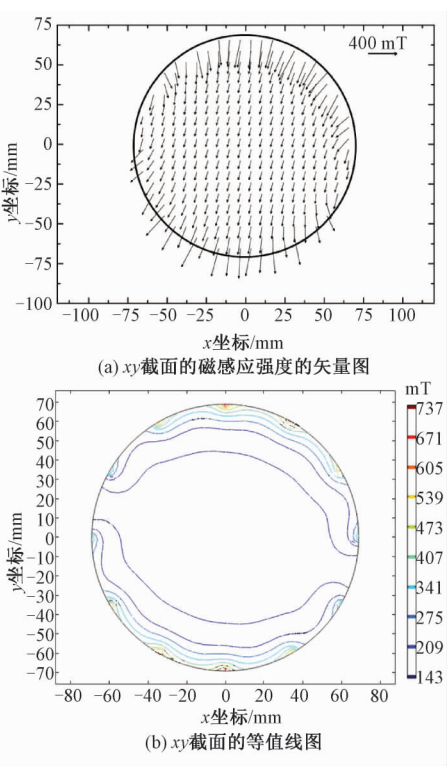


图 3 Halbach 磁场的分布图

Fig. 3 Magnetic field distribution in Halbach unit

两种螺旋磁场体布置方式在空间上都具有“螺旋”特征,使得过油通道上的磁感应强度幅值和梯度较大,利于防蜡效果.

2 数值模拟及结果

2.1 数值模型

为确认和定量分析我们设计搭建的磁场产生装置在空间上形成的磁场分布,采用 Comsol Multiphysics 多物理场软件对上述的磁场结构的静磁场进行数值模拟. 这里采用磁标量势 V_m , 根据麦克斯韦方程组、磁场的本构关系以及磁场守恒,有

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - B_r) = 0, \tag{1}$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $N \cdot A^{-2}$; V_m 为磁标量势, A;

图 2 两种用于磁防蜡的 Halbach 型螺旋磁场体
Fig. 2 Two spiral structures of Halbach-type magnetic field for paraffin control

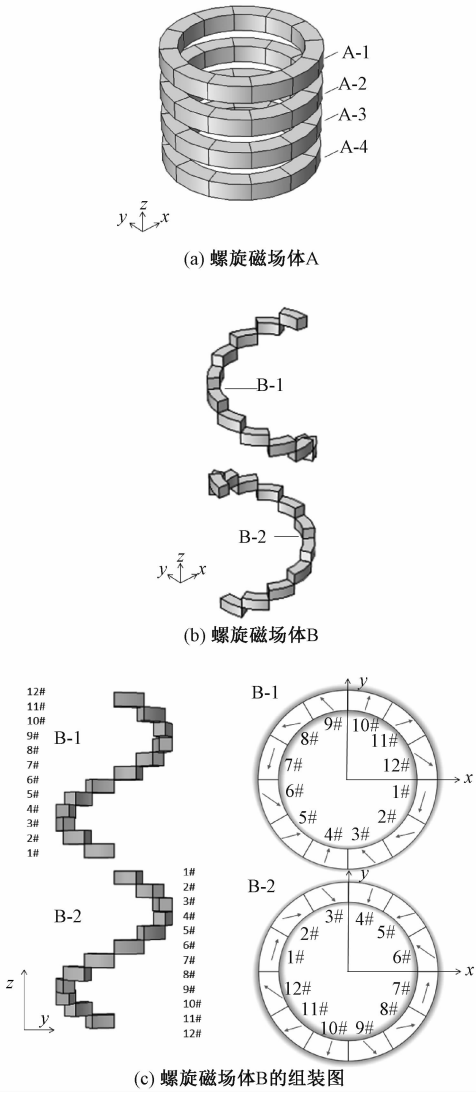


图 4 是 $x = -50\text{ mm}, y = 0\text{ mm}$ 处螺旋磁场体 A 和 B 的磁感应强度沿轴向的分布图,为便于比较两个螺旋磁场体,对轴向距离进行无量纲化处理,将 z 坐标进行了处理,即分别除以各自的螺旋磁场体的总高度,其中螺旋磁场体 A (如图 2 (a) 所示) 的总高度为 140 mm ,螺旋磁场体 B (如图 2 (b) 所示) 的总高度为 500 mm . 由选点位置可知,横截面上超过一半的面上的磁感应强度的值超过 100 mT . 图中用实心三角形和圆点分别给出图 5 图 6 中 xy 截面所处轴向的位置. 两种螺旋磁场体的磁场相比较,螺旋磁场体 A 在整个高度范围内磁感应强度都较高,均在约 80 mT 以上. 而螺旋磁场体 B 在整个高度范围内具有较大的磁场梯度,但磁感应强度总体上较螺旋磁场体 A 的低,这是由于同一高度上螺旋磁场体 B 中在周向上只有一块小磁块,而对于螺旋磁场体 A 而言则有 12 块. 进一步地,可以考虑设计多条结构代替目前的单条结构以获得更高的磁场强度.

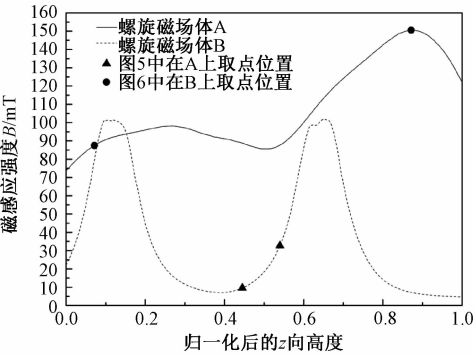


图 4 两种螺旋磁场体的磁感应强度沿轴向的分布图
($x = -50\text{ mm}, y = 0\text{ mm}$ 处)

Fig.4 Distributions of magnetic flux densities of two spiral magnetic field structures along z -axis
(point $x = -50\text{ mm}, y = 0\text{ mm}$)

图 5 是螺旋磁场体 A 在 $x = 0\text{ mm}$ 处 yz 截面和任取一点,如 $z = 122\text{ mm}, 10\text{ mm}$ 处 xy 截面的磁感应强度等值线图,图 6 是螺旋磁场体 B 在 $x = 0\text{ mm}$ 处 yz 截面和任取一点,如 $z = -27.5\text{ mm}, 20\text{ mm}$ 处 xy 截面的磁感应强度等值线图. 具体的取点位置随机选取,所在轴向位置见图 4. 图 5 (a) 表明心部约 $1/2$ 的区域内磁感应强度分布非常均匀,且磁感应强度均大于 40 mT . 从图 5 (b)、5 (c) 可以看出 xy 截面上磁场分布具有较高的均匀度. 因此可以推断螺旋磁场体产生的磁场在整个通道的空间上都比较均匀,且磁场强度足够强.

螺旋磁场体 A 对于油路截面面积较大的情况仍有足够强的磁场,这就意味着单位时间内可对更多的原油进行充分的磁处理^[16]. 同样也可以看到螺旋磁场体 B 的磁场分布在空间上具有不错的均匀度,如前面所分析的,磁感应强度则稍弱一些.

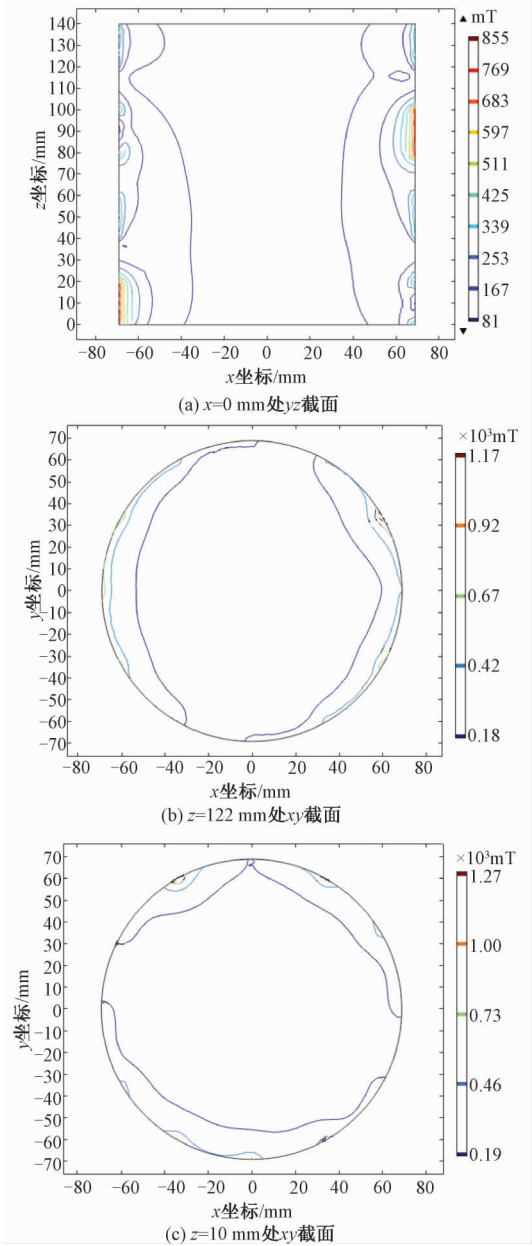


图 5 螺旋磁场体 A 的磁感应强度等值线图.

Fig.5 Magnetic flux density contour map of spiral magnetic field structure A

3 结论

为了获得更好的防蜡效果,使经过的原油得到更好的磁处理,本文设计的 Halbach 型磁场具

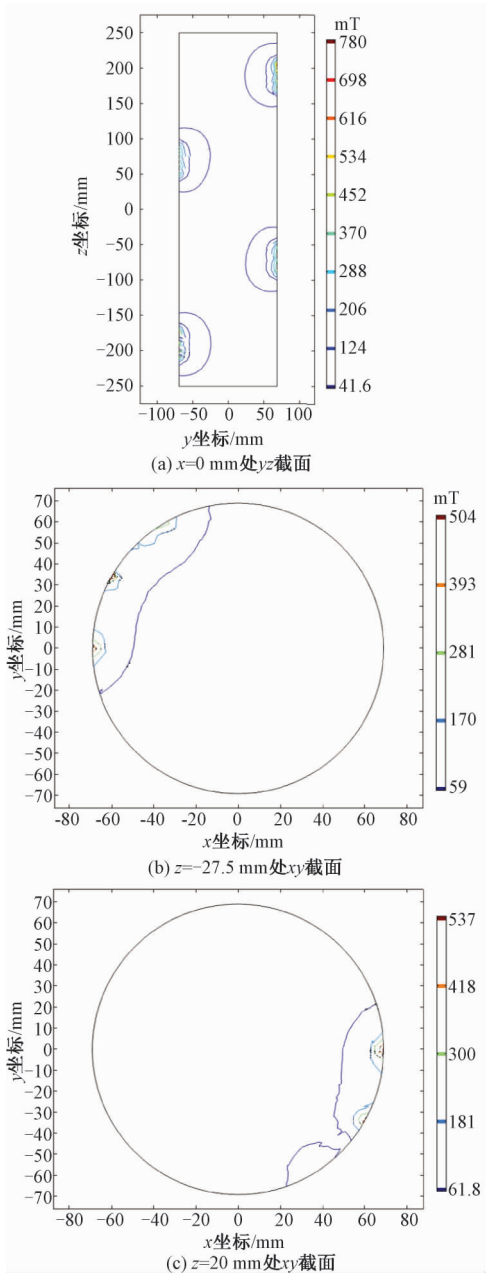


图 6 螺旋磁场体 B 的磁感应强度等值线图

Fig.6 Magnetic flux density contour map of spiral magnetic field structure B

有以下特点:

1)小磁块磁化方向采用磁魔环(Halbach)结构,保留了轴向磁场强度较强,径向上的磁场均匀度高的特点,可适应更大的油管横截面,就意味着允许单位时间内磁处理更多的原油.

2)特殊设计的旋转磁场体,可以获得轴向上更大的磁场梯度.

显然,未来的工作需要验证、优化上述的磁场

结构在油田的实际防蜡效果.包括:将上述的磁场结构根据油路的尺寸安装到磁防蜡器中;上述的磁场结构周期性地布置在油井中的易结蜡区;为达到防蜡效果和经济的双重目的,优化磁结构轴向的布置长度;以油田实际的洗井时间长短为优化依据,评判上述哪种磁场结构甚至上述两种混合的排列结构才能达到最优的防蜡效果.

参考文献

[1] 宋君. 油井结蜡影响因素及防蜡技术研究[J]. 当代化工, 2015,44(1):78-79,82.

[2] Martínez-Palou R, de Lourdes Mosqueira M, Zapata-Rendón B, et al. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011,75(3):274-282.

[3] 耿宏章,潘举玲,周开学. 原油磁化防蜡实验研究[J]. 油气地质与采收率,2003,10(4):61-63,8.

[4] Tao R,Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field[J]. Energy & Fuels,2006,20(5):2 046-2 051.

[5] 敬加强. 含蜡原油结构抑制机理研究[J]. 西南石油学院学报,2004,26(3):71-74,90.

[6] 陈佳莹. 原油磁化防结蜡技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

[7] 马秀波,郑海霞,尹教建,等. 磁处理原油防蜡降黏的机理[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2005,20(4):50-52,99.

[8] 叶亚中. 强磁防蜡应用试验[J]. 油气储运,1990,9(2):8-15,4.

[9] 韩志. 磁防蜡磁降黏技术在高升油田的应用[J]. 化工管理,2015,22(8):147.

[10] 马忠合. 磁防蜡作用效果分析[J]. 内蒙古石油化工, 2014,40(16):71-72.

[11] 朱林,熊滨莎,曲哲. 原油磁处理降粘减阻技术的研究[J]. 油田地面工程,1994,13(1):26-31,76-78.

[12] 汪仲清. 液态流体的粘度及磁处理降粘作用机理[J]. 石油学报,1995,16(4):154-160.

[13] 汪仲清. 磁场对液态物质分子的作用机制[J]. 石油大学学报:自然科学版,1998,32(4):119-122.

[14] Menzel K, Windt C W, Lindner J A, et al. Dipolar openable Halbach magnet design for high-gradient magnetic filtration[J]. Separation and Purification Technology, 2013,105:114-120.

[15] 张新德,王晓东,那贤昭,等. 一种用于驱动金属液的阿基米德型螺旋磁场[J]. 稀有金属材料与工程,2015,44(10):2 465-2 470.

[16] 中国科学院电工研究所. 永磁套管式井下采油降粘防蜡装置:中国,CN1884791A[P/OL]. 2006-12-27 [2016-01-20]. http://epub.cnki.net/kns/brief/default_result.aspx.