

一种用于驱动金属液的阿基米德型螺旋磁场

张新德^{1,2}, 王晓东², 那贤昭¹, 王松伟¹, 倪明玖²

(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, 北京 100049)

摘要: 采用小块单元永磁体堆积的方式搭建了永磁螺旋磁场, 并研究了其所驱动的金属液流动模式。首先, 通过实验测量和数值模拟的方法分析了螺旋磁场的空间分布特点: 螺旋磁场可视为由旋转磁场和行波磁场在空间上叠加而成; 其次, 实验测量和数值模拟的结果表明: 理想螺旋磁体与采用单元永磁体堆积所形成的实际磁场的分布与强度较一致; 最后, 采用超声多普勒测速仪(UDV)对永磁螺旋磁场所驱动的金属液流进行了定量的速度测量研究, 发现永磁螺旋磁场在一定参数条件下能驱动全域的螺旋流。

关键词: 螺旋磁场; 永磁体; 数值模拟

中图分类号: TQ171

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)10-2465-06

永磁体因产生磁场的磁密度大、电磁能利用率高等优点被广泛用于电工电气和材料加工工程领域, 并且通过磁体排布方式的设计, 可以获得很多新型磁场结构。早在1980年, K. Halbach就首次提出了Halbach永磁阵列, 并从电磁理论上解析分析了磁场的分布特点^[1]。Halbach永磁阵列是将不同磁化方向的永磁体按照一定的顺序排列得到的一种磁场结构^[2], 常用的Halbach阵列有直线型和圆环型。直线型是最基本的组成形式, 它可以看成是一种径向阵列与切向阵列的组合体; 圆环型可以看成是将直线型阵列弯曲然后首尾相接组合而成, 可分为单对极和多对极Halbach圆环型阵列^[3]。Halbach永磁阵列具有很多优点, 如直线的Halbach阵列在一侧的磁场很强, 具有理想的正弦分布, 而在另一侧磁场则很弱; 圆柱型的Halbach阵列中心区域磁场分布均匀且强度高。张炜等^[4]在研究诊疗微机器人外磁主动驱动时提出了通过永磁体圆周阵列且同步转动的方法在阵列中心区域产生旋转磁场, 也发现采用Halbach磁阵列其磁感应强度较均匀。Halbach直线阵列现已成功地应用于永磁直线电机^[5-7], 多对极Halbach圆柱型阵列广泛应用于永磁电机^[8]、直流无刷电机^[9]和永磁轴承中^[10-12]。

阿基米德螺旋线数学上有着优美特性, 在工程也有着广泛的应用。如螺栓的螺纹、麻花钻头、弹簧以及某些建筑物的楼梯都是采用阿基米德螺旋线型设计的。在自然界中, 很多高分子聚合物的结构都是螺旋

型的, 如DNA就是双螺旋结构; 在生活中, 螺旋结构也随处可见, 如田螺和蜗牛的甲壳等。

在材料的电磁过程(EPM)领域, 1993年Vivès提出了采用AlNiCo永磁体构建的螺旋磁场搅拌金属熔体和第二相SiC颗粒的混合物来制备金属基复合材料, 但对永磁螺旋磁场的分布特点及驱动金属熔体并没有给出理论和定量的数值分析, 其研究的侧重点也只是加入SiC颗粒的属性对金属基复合材料微观结构的影响^[13]。同样使用永磁体圆周阵列, Wang等^[14]采用磁体周向均布径向磁化、且相邻磁极磁化方向相反的多块永磁体设计和制造了Ω形的电磁泵, 并进行了数值解析。

本研究采用永磁体搭建了阿基米德型螺旋磁场, 简称永磁螺旋磁场。通过这种特定的磁体阵列排布, 获得空间上分布的螺旋磁场, 用于驱动金属液体获得三维螺旋流动。

1 永磁螺旋磁场的搭建

1.1 阿基米德螺旋线的数学表达

在数学上空间螺旋线被定义为沿圆柱表面一动点绕圆柱轴线做匀速圆周运动的同时又沿圆柱轴线方向做匀速直线运动所形成的轨迹。动点旋转一周沿轴线移动的距离称为导程, 用 L 表示。螺旋线的切线与垂直其轴线的平面所成的夹角称为螺旋线的升角, 见图1a中 α , 其余角称为螺旋角。

收稿日期: 2014-09-27

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFA71660); 中国科学院“百人计划”项目(111800M105); 国家自然科学基金(11125212)

作者简介: 张新德, 男, 1986年生, 硕士, 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, 电话: 010-62181302, E-mail: zhangxinde07@163.com

螺旋线在柱坐标系 (r, θ, z) 和相对应的直角坐标系 (x, y, z) 下的数学关系为:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta = r \cos(\omega_R t) & (1) \\ y = r \sin \theta = r \sin(\omega_R t) & (2) \\ z = \frac{L}{2\pi} \theta = \frac{1}{k} (\omega_R t) & (3) \end{cases}$$

其中, ω_R 为周向的角速度, rad s^{-1} ; t 为时间, s ; k 为波数, mm^{-1} 。

1.2 永磁螺旋磁场的搭建

图 1a 是构成螺旋磁场的永磁体结构。图 1a 所示的理想螺旋永磁体加工难度大且磁化方向不易获得, 因而本研究采用永磁体单元沿空间螺旋线堆积的方式实现螺旋磁场的构建, 如图 1b 所示。永磁体块采用磁性材料 38UH 系列, 其剩磁为 $B_r=1.22 \text{ T}$ 。下面将以由两条螺旋磁体构成的螺旋磁场为例来说明永磁螺旋磁场的搭建。图 2 是永磁螺旋层单元及整体构建示意图。图 2a 所示扇形的永磁体单元的内径 $R_1=40 \text{ mm}$, 外径 $R_2=70 \text{ mm}$, 厚度 $h=7 \text{ mm}$, 扇形夹角为 $\pi/6$, 扇形磁体的磁化方向沿其径向。作为支撑体的铝盘的内径 $R_1=55 \text{ mm}$, 外径 $R_0=90 \text{ mm}$, 厚度 $h=7 \text{ mm}$ 。将永磁体单元嵌入铝盘中即形成所谓的层单元结构, 如图 2a 所示。图 2b 中 n 为层单元编号, 依次将 12 块层单元同轴叠放, 且上下相邻两个层单元中的永磁体块沿逆时针方向依次转动 $\pi/12$ (如图 2b 所示) 后固定, 永磁螺旋体的总高 $H=84 \text{ mm}$, 此时 $k = \frac{\pi}{H} = 0.037 \text{ mm}^{-1}$, 升角

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H}{\pi R_2}\right) = 0.12。$$

2 数值模拟和实验过程

2.1 数值模拟

为了确认和定量分析所搭建的磁场在空间上形成螺旋磁场, 采用 Comsol Multiphysics 多物理场软件基

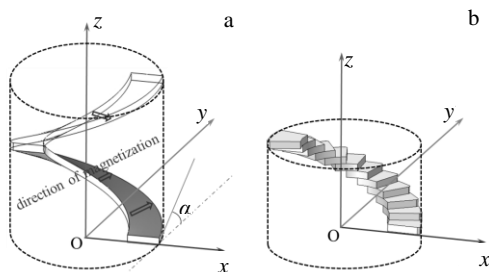


图 1 构成螺旋磁场的永磁体结构

Fig.1 Comparison between the structure of ideal helical permanent magnets (a) and the actual helical magnets constructed upon permanent magnet units (b)

于有限元法对永磁螺旋产生的磁场进行了模拟。这里只计算静磁场, 采用磁标量势 V_m , 由麦克斯韦方程组、磁场的本构关系以及磁场守恒, 整理得

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mathbf{B}_r) = 0$$

式(1)中, μ_0 为真空磁导率, N A^{-2} , V_m 为磁标量势, A , \mathbf{B}_r 为剩磁, mT 。

在进行几何建模时, 空气区域为半径 300 mm 、高度为 184 mm 的圆柱体区域, 网格划分采用自由四面体, 但对永磁体区域通过控制最大网格大小的办法进行了网格细化, 然后在空气区域边界上施加磁绝缘的边界条件即可求解式(1)。现以图 2 中所示的两条螺旋 N-S 磁极排布形式 ($k=0.037 \text{ mm}^{-1}$, $\alpha=0.12$) 为例数值计算其磁场分布。

2.2 实验过程

2.2.1 磁场测量

采用北京翠海科技有限公司生产的 CH-Hall 3600 高斯计对搭建的永磁螺旋工作区域内的静磁场进行了测量, 高斯计对直流磁场的测量精度可达 0.0001 mT , 测量范围为 $R=20 \text{ mm}$ 、 $0 \leq z \leq 84 \text{ mm}$ 的圆柱面。

2.2.2 速度测量

实验金属为 $\text{Ga}^{67}\text{In}^{20.5}\text{Sn}^{12.5}$ 合金, 其熔点为 $10.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 常温下即为液态。采用超声多普勒测速仪 (UDV) 测量合金液的流动速度。UDV 测速的原理是多普勒效应, 其超声探头测量的是沿探头方向的速度分量, 且流向探头为正, 反之为负。周向速度的测量参数为: GaInSn 合金液的高度 $H_a=40 \text{ mm}$, 型腔内径 $D=40 \text{ mm}$, 测量位置为高度 $z=20 \text{ mm}$ 、距直径 5 mm 的一条弦上的速度, 永磁螺旋转速 $\omega=8\pi \text{ rad/s}$; 轴向速度的测量条件为: 合金液的高度 $H_a=35 \text{ mm}$, 测速型腔内径 $D=70 \text{ mm}$, 轴向速度测量位置为 $r=15, 18.75, 22.5, 26.25, 30 \text{ mm}$ 5 个不同半径处, 径向速度测量位置为 $z=5, 11.25, 17.5, 23.75, 30 \text{ mm}$ 5 个不同高度, 永磁螺旋转速

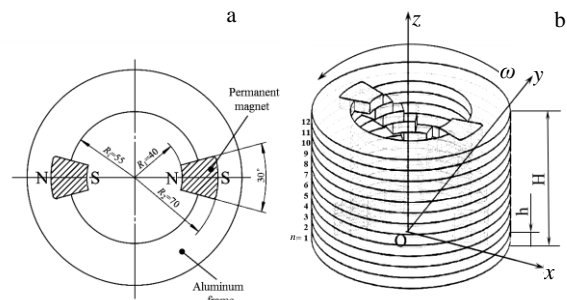


图 2 永磁螺旋层单元及整体构建示意图

Fig.2 Schematic of permanent magnets spiral's layer unit (a) and integral structure (b)

$\omega=8\pi$ rad/s; 测速的相关原理及具体测量方法参见文献[15]。

3 结果与讨论

3.1 磁场分析

图 3 是螺旋磁场旋转分量 1/4 周期内磁场运动情形, $\theta=0、\pi/6、\pi/3、\pi/2$ 这 4 个不同极角分别对应 $n=1, 3, 5, 7$ 层单元。从图中可以明显地看出: 磁体内部和靠近磁体区域的磁场较强, 远离磁体的区域磁场较弱, 并且随着角度 θ 的增加, 该平面处的磁场可视为沿逆时针方向旋转。同理, 当极角减小时, 永磁螺旋磁场就可相应地视为顺时针旋转。

图 4 是过永磁螺旋旋转至不同极角处中心纵截面的磁场分布, 当 $\theta=0$ 时, 纵截面内磁场最强处为 $z=3.5$ mm 处(对应第 1 层单元), 磁极分布情况见图 4a, 当 $\theta=\pi/4$ 时, 纵截面内磁场最强处为 $z=24.5$ mm 处(对应第 4 层单元), 当 $\theta=\pi/2$ 时, 纵截面内磁场最强处为 $z=45.5$ mm 处(对应第 7 层单元), 当 $\theta=3\pi/4$ 时, 纵截面内磁场最强处为 $z=65.5$ mm 处(对应第 10 层单元), 当 $\theta=\pi$ 时, 与 $\theta=0$ 时的情况一样, 纵截面内磁场最强处又回到 $z=3.5$ mm 处, 但是磁极是相反的, 说明永磁螺旋磁场在 z 轴方向上前进了 π 相位角。如图 4 所示: 当永磁螺旋体逆时针旋转的时候, 磁场具有向下移动的分量, 即行波磁场分量。当纵截面顺时针转动时, 行波磁场分量的运动方向向上。

综上, 永磁螺旋体旋转时, 沿周向具有旋转磁场分量, 沿轴向具有行波磁场分量, 由此可见, 永磁螺旋磁场可视为这 2 种磁场在空间叠加而成。

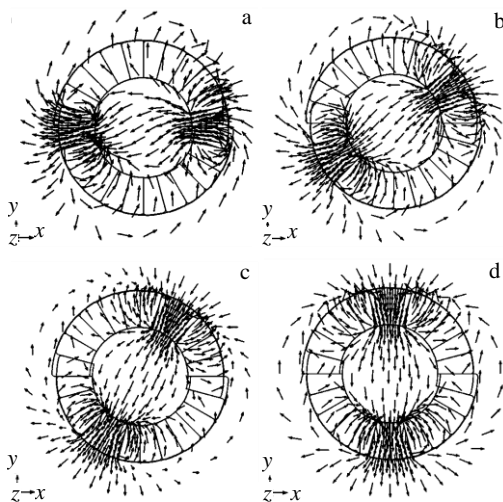


图 3 螺旋磁场旋转分量产生示意图

Fig.3 Schematic of rotating component of helical magnetic field: (a) $\theta=0$, (b) $\theta=\pi/6$, (c) $\theta=\pi/3$, and (d) $\theta=\pi/2$

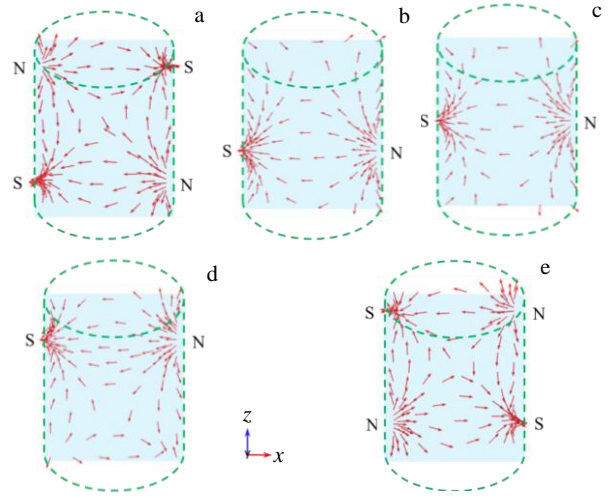


图 4 永磁螺旋磁体转动至不同角度时 $y=0$ 垂直平面内的磁场分布

Fig.4 Magnetic field distribution in vertical plane ($y=0$) when permanent magnets rotate to different angles: (a) $\theta=0$, (b) $\theta=\pi/4$, (c) $\theta=\pi/2$, (d) $\theta=3\pi/4$, and (e) $\theta=\pi$

3.2 数值模拟与实验测得磁场的比较

图 5 比较了采用永磁体单元堆积的螺旋磁场(图 1b)与理想的阿基米德线型的整体的螺旋磁场(图 1a)的差异。其中, 选取了圆柱面 $R=20$ mm, $0 \leq z \leq 84$ mm 上的磁场分布进行了比较。图 5a 为理想螺旋永磁体产生磁场(如图 1a)的数值模拟结果, 图 5b 为数值模拟采用小单元堆积的永磁体产生磁场(如图 1b)的数值模拟结果, 图 5c 为实验测量采用小单元堆积的永磁体磁场(如图 1b)的结果。由图 5 可见: 这 3 种结果磁场在空间上均呈螺旋分布, 磁感应强度分布范围为 18~95 mT, 且在相同坐标处 B 值差异不大。另外, 值得说明的是图 5a 和图 5c 的结果很接近表明用小块永磁单元堆积的永磁螺旋结构来替代理想永磁螺旋体是合理的。

3.3 流动分析

3.3.1 周向速度

永磁螺旋旋转时会产生变化的磁场, 由电磁感应原理, 金属液会产生感应电流, 磁场与感应电流相互作用会产生电磁力, 这种电磁力是三维的体积力, 因此阿基米德型螺旋磁场所驱动的金属液流动也是三维的, 图 6 为测量的 $z=20$ mm 平面处距直径 5 mm 的弦

上各点液体金属流动的周向速度分量图。图 6a 为当永磁螺旋按图 2b 所示的方向旋转时测量的 $z=20\text{ mm}$ 平面处液体金属流动的周向速度分量矢量合成图，液体

周向流动方向与永磁螺旋转动方向一致。周向速度分量大小分布范围如图 6b 所示，由图可见，施加磁场后

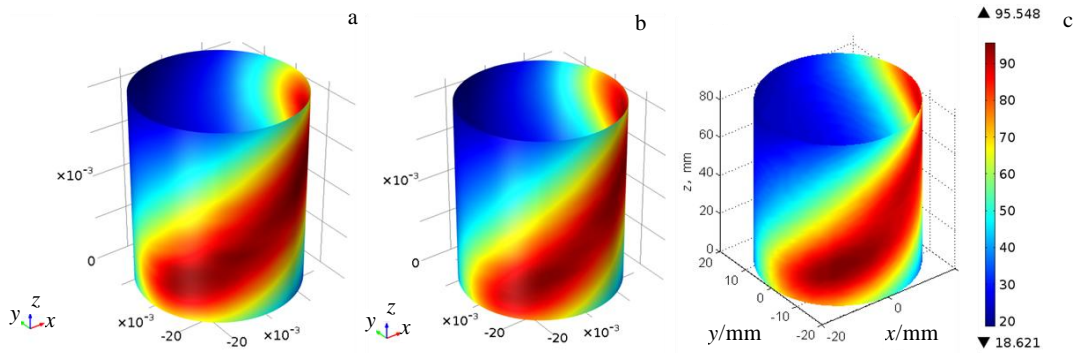


图 5 实验测量和数值模拟圆柱面($R=20\text{ mm}$, $0 \leq z \leq 84\text{ mm}$)位置上的磁感应强度分布

Fig.5 Distribution of magnetic field of experimental measurements and numerical simulations on the cylindrical surface ($R=20\text{ mm}$, $0 \leq z \leq 84\text{ mm}$): (a) the numerical simulation of ideal helical permanent magnets, (b) the numerical simulation of the actual helical magnets constructed upon permanent magnet units, and (c) the experimental measurement of the actual helical magnets constructed upon permanent magnet units

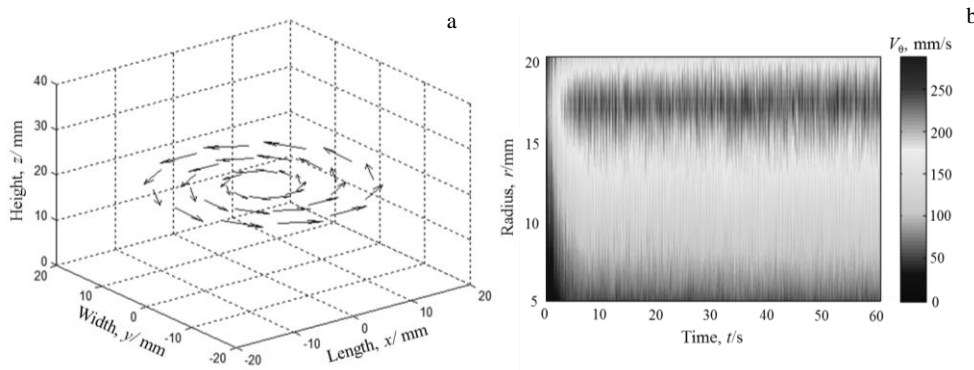


图 6 周向速度分量矢量合成与伪彩图

Fig.6 Vector composition (a) and the pseudo-color map (b) of azimuthal velocity ($\omega=8\pi\text{ rad/s}$, $z=20\text{ mm}$)

经过短暂的瞬变过程，流动就达到稳定状态，且随着半径的增大，周向速度分量增大，由于黏性流体的壁面效应，周向速度分量最大值出现在 $r=17.13\text{ mm}$ ，值为 223.58 mm/s 。显然，该金属液的周向流动是螺旋磁场周向分量产生的周向电磁力、重力和黏滞力共同作用的结果。

3.3.2 $\theta=\theta_0$ (θ_0 为常数)处速度

旋转磁场下柱形容器内金属液一方面会产生与旋转磁场方向相同的旋转涡流，也称为主要初生流，与此同时在离心力的作用下金属液有向外运动的趋势，但是由于容器壁面的限制作用，会在轴向的顶部和底

部产生 Bödewadt 或 Ekman 型的边界层。并且动量在这类边界层中会损失，因此会引起离心力和径向压力的不平衡，进而驱动微弱二次流的发生。二次流的形态表现为轴向上对称的方向相反的两个漩涡，并且其流动方向不随旋转磁场方向的改变而改变^[16]。行波磁场驱动柱形容器内金属液的流动相对简单，在轴线方向上形成单个环形涡流，有的也称轴向大环流，因为在子午面上，因此也称之为子午线流。在螺旋磁场中，柱形容器内金属液的轴向流动可以是旋转磁场分量驱动的二次流，也可以是行波磁场分量驱动的轴向环流。为了考察一定量柱形容器内金属液的轴向流动情况，对垂直面内的轴向速度分量和径向速度分量进

行了细致测量。选择合适的实验条件，能获得轴向的大环流流动。根据 2.2.2 中所述的测量方法，测量了 $\theta_0=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 平面不同半径和不同高度处的速度分量，选取了 $\theta_0=0, \theta_0=\pi$ 两个截面然后通过矢量合成的办法获得了轴对称的垂直方向的涡流流动模式，如图 7a 所示，这意味着所获得的流动模式为轴向的大环流流动。

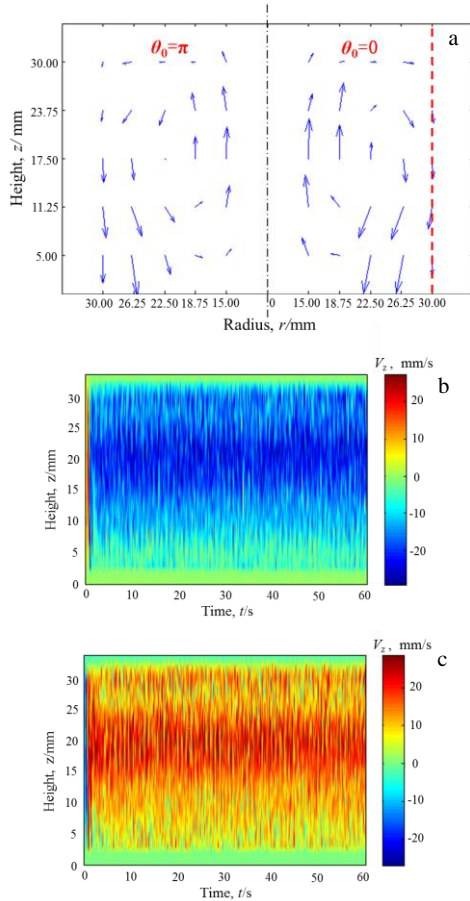


图 7 轴向与径向速度分量矢量合成以及轴向速度伪彩图正反转

Fig.7 Vector composition (a) and the pseudo-color map of axial velocity under FWD (b) and REV (c) ($\omega=8\pi$ rad/s)

为了清楚地示出轴向速度分量大小，将图 7a 中虚线标记处的轴向速度分量作伪彩图，如图 7b, 7c 所示。图 7a 中横坐标为半径，纵坐标为高度，箭头大小代表速度值大小。图 7b, 7c 中横坐标代表时间，纵坐标代表高度，颜色深浅代表速度值大小。由图 7b, 7c 可见，随着永磁螺旋旋转方向改变，轴向速度随之改变。在材料的电磁过程研究中，金属熔体运动方向可控对凝固过程极为重要，涉及采用电磁场控制凝固前沿溶质再分配过程及改善宏观偏析，这方面的讨论已超出本研究范围，参见文献[17]。因此本研究通过改变螺旋

磁场旋转方向，来观察流体沿轴线方向的流动是否也随之改变(二次流不改变)，图 7b, 7c 的结果确认了上述分析。

4 结 论

1) 采用小单元堆积的方式搭建了永磁螺旋磁场，并比较了数值模拟的理想螺旋永磁体磁场、采用小单元堆积的永磁体磁场和实验测量的采用小单元堆积的永磁体磁场分布，结果表明这 3 种磁场在空间上均呈螺旋结构且在相同的坐标处磁感应强度 B 大小差异不大，表明了用小块永磁单元堆积的永磁螺旋来替代理想永磁螺旋结构在实验中是合理的。

2) 永磁螺旋磁场的空间分布可视为由旋转磁场分量和行波磁场分量在空间的叠加。由于电磁感应原理，金属液中会产生感应电流，磁场与感应电流相互作用，产生的洛伦兹力也是三维的，它可分解为周向和轴向分布的洛伦兹力，该体积力驱动金属液形成三维流动。

3) 搭建的永磁螺旋磁场能明显地驱动流体流动。定量测量分析表明，在一定条件下，在水平方向上形成旋转流，在 θ 等于常数的垂直截面内形成纵向的大环流，即在空间范围内形成了螺旋流，并且流动方向能响应 B 方向的变化。

参考文献 References

[1] Halbach K. *Nuclear Instruments and Methods*[J], 1980, 169: 1
 [2] Zhou Gan(周 贛), Huang Xueliang (黄学良), Zhou Qinbo(周勤博) et al. *Small & Special Electrical Machines*(微特电机)[J], 2008, 36(8): 52
 [3] Zhang Yiming(张一鸣), Qiao Dezhi(乔德治), Gao Junxia(高俊侠). *Analytical Instrumentation*(分析仪器)[J], 2010, 2: 5
 [4] Zhang Wei(张 炜), Huang Ping(黄 平), Meng Yonggang(孟永钢). *Journal of Engineering Design*(工程设计学报)[J], 2008, 15(3): 191
 [5] Mao Junhong(毛军红), Luo Junhang(罗俊航), Jiang Qiang(姜强) et al. *Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 2007, 41(3): 353
 [6] Wang J B, Jewell G, Howe D. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1999, 35(3): 1986
 [7] Trumper D, Kim W, Williams M. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1996, 32(2): 371
 [8] Jack A, Mecrow B, Haylock J. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1996, 32(4): 889
 [9] Zhu Z, Howe D, Bolte E et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1993, 29(1): 124
 [10] Yonnet J. *IEEE Transactions on Industry Applications*[J],

- 1981, 17(1): 1169
- [11] Guo Desen(郭德森), Li Hui(李辉). *Journal of Magnetic Materials and Devices*(磁性材料及器件)[J], 2005, 4: 31
- [12] Ooshima M, Chiba A, Fukao T *et al.* *IEEE Transactions on Industry Applications*[J], 1996, 43(2): 292
- [13] Vivès C, Bas J, Beltran G *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 1993, 173: 239
- [14] Wang X D, Yurii K, André T. *Measurement Science and Technology*[J], 2012, 23(4): 1
- [15] Wang Songwei(王松伟), Wang Xiaodong(王晓东), Ni Mingjiu(倪明玖) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(5): 544
- [16] Stiller J, Koal K, Nagel W *et al.* *The European Physical Journal Special Topics*[J], 2013, 220: 111
- [17] Wang X D, Ciobanas A, Baltaretu F *et al.* *Materials Science Forum*[J], 2006, 508: 163

An Archimedean Helical Magnetic Field Used for Driving Molten Metal

Zhang Xinde^{1,2}, Wang Xiaodong², Na Xianzhao¹, Wang Songwei¹, Ni Mingjiu²

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

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An Archimedean helical magnetic field was constructed upon small permanent magnet units and the flow pattern of molten metal driven by helical magnetic field was researched. First, the distribution of helical magnetic field was analyzed by experimental measurements and numerical simulations: helical magnetic field could be considered as the superposition of rotating magnetic field and traveling magnetic field; second, the results of experimental measurement and numerical simulation show that the distribution and strength of magnetic field between the ideal helical magnets and actual magnets constructed upon permanent magnet units is consistent; finally, the velocity of molten metal flow driven by permanent magnet helical magnetic field was measured by Ultrasonic Doppler Velocimetry (UDV) quantitatively and the results indicate that the permanent magnet helical magnetic field can drive molten metal in a flow pattern of a global helical flow under certain experimental parameters.

Key words: helical magnetic field; permanent magnets; numerical simulation

Corresponding author: Wang Xiaodong, Ph. D., Professor, College of Material Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, P. R. China, Tel: 0086-10-88256639, E-mail: xiaodong.wang@ucas.ac.cn