

脉冲磁场驱动液态金属变形的作用机理研究

雷彬, 张硕, 蔡旭帆

引用本文:

雷彬, 张硕, 蔡旭帆. 脉冲磁场驱动液态金属变形的作用机理研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 178-182.

您可能感兴趣的其他文章

1. 电磁场对液态金属的约束变形作用研究

引用本文: 雷彬, 张华祥, 吕庆敖, 等. 电磁场对液态金属的约束变形作用研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 1-5.

2. 电枢运动状态下轨道炮膛内磁场仿真分析

引用本文: 李峰, 李豪杰, 殷强. 电枢运动状态下轨道炮膛内磁场仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10): 61-65, 71.

3. 电磁轨道炮膛内磁场环境的数值仿真分析

引用本文: 朱嫣霞, 王志军, 范君健. 电磁轨道炮膛内磁场环境的数值仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 25-28.

4. 均匀度对船舶涡流磁场磁变模拟影响仿真分析

引用本文: 肖玉杰, 朱武兵, 罗荣, 等. 均匀度对船舶涡流磁场磁变模拟影响仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 1-4.

5. 圆膛多轨电磁炮身管的多场耦合有限元仿真

引用本文: 高硕飞, 李海元, 栗保明. 圆膛多轨电磁炮身管的多场耦合有限元仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(2): 54-58, 124.

脉冲磁场驱动液态金属变形的作用机理研究

张华祥¹, 雷彬², 张硕², 蔡旭帆²

(1. 中国人民解放军32578部队, 昆明 650000; 2. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要:为掌握脉冲电磁场驱动液态金属变形的作用机理,采用数值仿真方法,建立了线圈与液态金属的有限元模型,分析了电磁场作用下液态金属表面及内部的磁场强度、感应电流及电磁力随时间的变化规律,研究了液态金属凸起和凹陷部分的变形量。结果表明:液态金属中的磁感应强度、感应电流密度和电磁力密度分布均呈现明显趋肤效应,使得凸起部分的感应电流密度、磁感应强度及电磁力密度均大于凹陷部分的对应值;凸起和凹陷部分的电磁压力差驱动液态金属发生变形,使液态金属的直径更加均匀。

关键词:脉冲磁场;液态金属;电磁力;变形

本文引用格式:张华祥,雷彬,张硕,等. 脉冲磁场驱动液态金属变形的作用机理研究[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(03):178-182.

Citation format:ZHANG Huaxiang, LEI Bin, ZHANG Shuo, et al. Mechanism of Deformation of Liquid Metal Driven by Pulsed Magnetic Field[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(03):178-182.

中图分类号:TJ99

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)03-0178-05

Mechanism of Deformation of Liquid Metal Driven by Pulsed Magnetic Field

ZHANG Huaxiang¹, LEI Bin², ZHANG Shuo², CAI Xufan²

(1. The No. 32578th Troop of the PLA, Kunming 650000, China;

2. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of deformation of liquid metal driven by pulsed electromagnetic field, a finite element model of coil and liquid metal was established by numerical simulation method. The variation of magnetic field strength, induced current and electromagnetic force on the surface and inside of liquid metal under electromagnetic field was analyzed, and the deformation of liquid metal protrusion and concave part was studied. The results show that the distribution of magnetic induction intensity, induced current density and electromagnetic force density in liquid metals show obvious skin effect, which makes the induction current density, magnetic induction intensity and electromagnetic force density in the bulge part larger than the corresponding value in the depression part; The electromagnetic pressure difference between the convex and concave parts drives the liquid metal to deform, making the diameter of the liquid metal more uniform.

Key words: pulsed magnetic field; liquid metal; electromagnetic force; deformation

破甲弹被广泛用于对付敌方的坦克和装甲车辆,其侵彻威力与金属射流的有效长度成正比。研究发现,电磁增强技术可以提高金属射流飞行稳定性,延长金属射流断裂的时间,进一步增强破甲穿深能力。

Fedorov^[1-2]通过理论计算发现,在金属射流飞行过程中施加脉冲磁场作用,可以减少金属射流表面的扰动,抑制金属射流的颈缩、断裂过程;Littlefield^[3]结合线扰动理论分析了轴向磁场对金属射流稳定性的影响,当磁雷诺数越大和作

收稿日期:2019-02-27;修回日期:2019-05-25

作者简介:张华祥(1993—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事电磁发射理论与技术研究,E-mail:zhanghx0129@126.com。

用时间越长时,其飞行稳定性越好;秦承森^[4]推导了聚能射流断裂时间的近似公式,可定量表示屈服应力、粘度和径向收缩率等对射流断裂时间的影响规律,在特定参数范围内,推导的公式与实验数据点吻合较好;马彬^[5-7]、孟学平^[8-11]建立了脉冲磁场作用金属射流的理论模型,研究了时序控制和放电参数等对金属射流约束作用的影响规律,研究表明,在磁场强度足够大且金属射流产生与脉冲磁场施加时序匹配的情况下,电磁场可有效提高金属射流的飞行稳定性、增大有效长度,实现增强金属射流侵彻威力的目的。但由于脉冲电磁场作用金属射流的时间非常短,仅有几十微秒,实验方面难以观察和测量电磁场作用下金属射流的变形量,缺少脉冲磁场约束金属射流变形的直接证据。

高温状态的金属射流为塑性体,具有一定强度,但在飞行过程中,较大应变率情况下诱发的应力大大超过了射流材料的机械强度,可近似看作流体。基于金属射流和液态金属物理性质的相似性,且液态金属镓铟锡合金在常温下为液态,方便开展变形测量试验和数据验证,故选择镓铟锡合金作为研究对象,研究电磁场驱动液态金属变形的作用机理。本文建立了线圈磁场约束液态金属变形的模型,研究了磁场强度、感应电流密度和电磁力密度分布规律以及随时间的变化规律,分析了电磁力驱动液态金属变形的作用机理,给出了液态金属凸起和凹陷部分随时间的变形规律,为后续测量电磁场作用下液态金属的变形打下了理论基础。

1 仿真模型和参数设置

为了后续测量液态金属变形时便于观察和比较,将液态金属模型置于两内径相同螺线管线圈的轴向中央处,如图1所示。脉冲电流流经两串联的螺线管线圈后,形成作用于液态金属的脉冲磁场。液态金属和螺线管线圈都具有旋转对称性,故采用二维模型以降低仿真过程对运行内存的要求。

由于金属射流断裂时其直径 $\Phi_{\text{断裂}}$ 为1~3 mm^[12],取液态金属模型的最小直径 $\Phi_{\text{最小}}$ 为3 mm(简称凹陷处),最大直径 $\Phi_{\text{最大}}$ 为8 mm(简称凸起处),外形轮廓按照余弦函数 $a = 1.25 \times \cos(2 \times \pi / 5 \times z) + 2.75$ 变化,其中 a 代表液态金属半径, z 代表液态金属轴向尺寸,液态金属的轴向长度为15 mm,液态金属采用熔点为10.5℃的镓铟锡合金,具体成分为Ga₆₇In_{20.5}Sn_{12.5};两个串联的线圈均为铜线单匝密绕而成的螺线管线圈,每个线圈的长度 L 均为155 mm,内径 Φ 为31 mm,铜线横截面为2 mm×4 mm的矩形,考虑到铜线表面有厚度为0.5 mm的绝缘包覆层,设定单个线圈的匝数为31匝,两个线圈的距离为15.5 mm,刚好等于线圈的半径,因此两线圈中间区域将形成一定范围的均匀磁场,便于比较液态金属在同磁场强度下,不同半径处的电磁力大小及流动变形情况。

经过计算,两线圈的串联电阻 $R = 13.7 \text{ m}\Omega$,两螺线管线圈的电感 $L_{\text{总}} = 12.2 \text{ }\mu\text{H}$,脉冲放电电路的电路参数如表1所示,激励加载电路如图2所示。

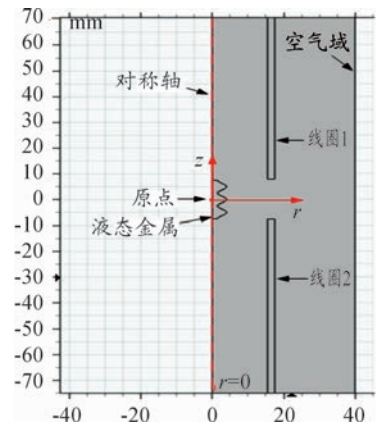


图1 电磁场约束液态金属流动变形的模型

表1 电路参数

充电电压/V	电阻/mΩ	电感/ μH	电容/ μF
7 000	13.7	12.2	250

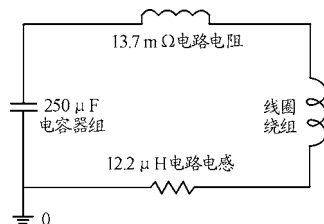


图2 激励加载电路

计算过程中作如下假设:① 液态金属是不可压缩的导电流体,其所有物性参数如密度、黏度、电导率和磁导率都是标量常数,其物理性质如表2所示;② 忽略金属液中的位移电流及导线的电阻,忽略感应电流欧姆热对液态金属的加热作用,认为液态金属的粘性和流场不受影响;③ 忽略金属液流动对电磁场的影响。施加的电流方向为正向,即垂直纸面向里,并认为电流平均分配在导线截面上。

采用电磁场-流场耦合仿真计算电磁场作用下液态金属的流动变形,由于液态金属流动变形中雷诺数较小,则流场为层流,将液态金属模型的网格设置为动网格,保证液态金属在电磁力作用下的流动变形。仿真计算总时间为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}$,步长为 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

表2 Ga₆₇In_{20.5}Sn_{12.5}的物理性质

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	6 360
比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	481
电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	3.1×10^6
热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	39
动力粘度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.002 162
相对磁导率	1

2 仿真结果及分析

2.1 液态金属的电磁场分析

2.1.1 磁感应强度分布

图3为磁感应强度分布规律,图3(b)中点1、点3表示液态金属的凸起处,点2表示凹陷处,与图3(a)中三点对应。从图3(a)可以发现,磁场强度在螺线管线圈端部急剧减小,沿线圈轴向呈梯度分布;由图3(b)可以发现,点1、点2和点3处的磁感应强度相差较小,磁场比较均匀,点2处的直径较小,受趋肤效应的影响,其磁感应强度的变化滞后于点1和点3处。

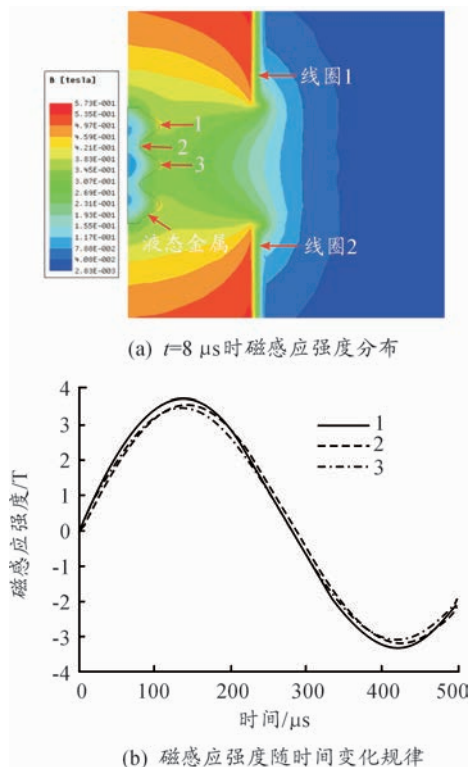


图3 磁感应强度的分布规律

2.1.2 感应电流密度分布

图4为 $t=16\ \mu\text{s}$ 时感应电流密度的分布,由图4可知,液态金属中产生的感应电流方向与线圈中通过的脉冲电流方向相反,因为通过的脉冲电流正处于上升沿,引起磁通量增加,根据楞次定律可知,感应电流的磁通将阻碍磁通量的增加,感应电流方向与激发磁场的电流方向相反。由于液态金属凸起部分首先对磁场变化做出反应,且凸起部分距离线圈内表面较近,因此凸起部分的感应电流密度整体大于凹陷部分。

图5为液态金属表面感应电流密度随时间变化规律。数值正负代表感应电流密度方向,图5中数字1、2和3分别代表图3中的3个位置(下同)。根据图5可知,在 $t \leq 142\ \mu\text{s}$ 、 $280\ \mu\text{s} \leq t \leq 426\ \mu\text{s}$ 时,由于感应电流的磁通阻碍线

圈电流引起的磁通量增加,感应电流密度方向与螺线管线圈电流相反;在 $142\ \mu\text{s} \leq t \leq 280\ \mu\text{s}$ 、 $426\ \mu\text{s} \leq t \leq 500\ \mu\text{s}$ 时,螺线管线圈电流减小,引起激发的磁通量减小,感应电流的磁通阻碍该磁通的减小,因此感应电流密度方向与螺线管线圈电流相同;由图5可知,凸起处的感应电流密度极大值为 $2.59 \times 10^8\ \text{A}/\text{m}^2$,凹陷处的极大值为 $9.26 \times 10^7\ \text{A}/\text{m}^2$,三个位置感应电流变化趋势一致,与磁感应强度的分布规律不同的是,感应电流密度大小与液态金属的直径和轴向位置有密切的关系;由于电磁力密度 $dF/dV = j \times B$ 、感应电流密度与磁感应强度互相垂直,且感应电流密度的数量级远大于磁感应强度的数量级,因此液态金属受电磁力作用的大小由感应电流密度大小决定。

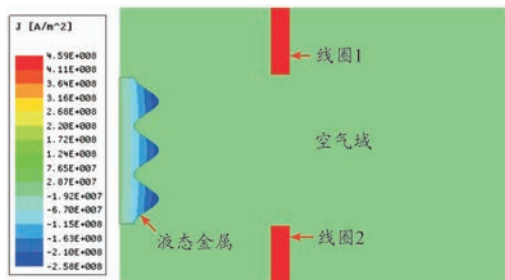


图4 $t=16\ \mu\text{s}$ 时感应电流密度分布

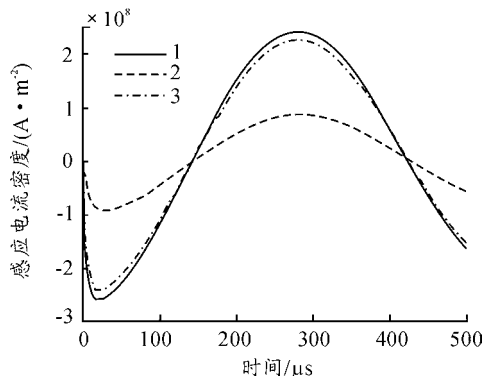


图5 液态金属表面感应电流密度随时间变化规律

2.1.3 电磁力密度分布

图6为作用于液态金属的电磁力分布规律,从图6可知,液态金属受到由表面指向内部的电磁压力作用,一方面,液态金属两端的凸起处由于更靠近螺线管线圈,电磁力大于中间凸起处的对应值,另一方面,凸起处的电磁力都明显大于凹陷处的对应值,凸起处与凹陷处形成电磁压力差,在压力差作用下,促使凸起处的液态金属流向凹陷处,使得液态金属的直径差减小,直径趋于一致。

图7为液态金属中电磁力径向分量在不同时刻的分布规律,由液态金属仿真模型绕对称轴旋转 270° 得到,图7中黑色实线代表液态金属初始时刻的形态,同样地,负值代表电磁力沿径向由表面指向内部,正值则为相反方向。由图7可知,电磁场作用下液态金属的直径差明显减小,直径趋于均匀,而电磁力径向分量对液态金属有压缩和拉伸的作用效果。

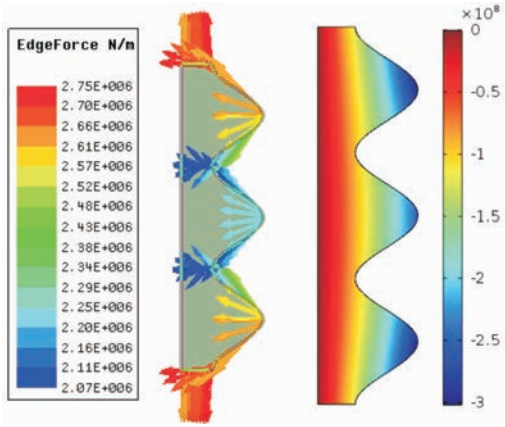


图6 电磁力的分布规律

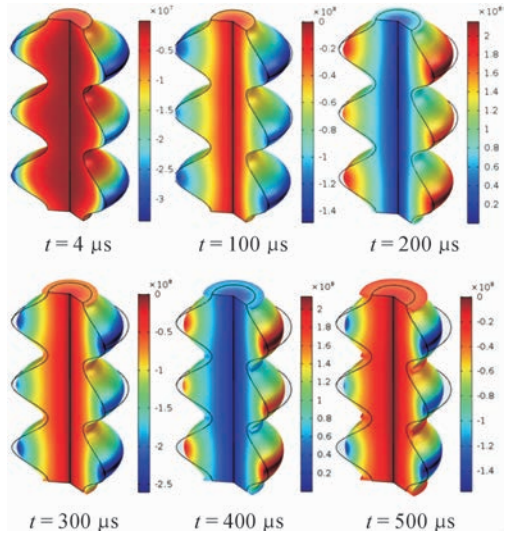


图7 液态金属中电磁力密度径向分量的分布规律

图8为液态金属中电磁力密度轴向分量不同时刻的分布规律,正值代表电磁力方向沿轴向向上,负值代表电磁力沿轴向向下。可以发现,轴向分量总成对出现,大小与液态金属的位置有关,方向相反;电磁力密度轴向分量与径向分量相比要小一些,也具有明显的趋肤效应,在线圈通电过程中,一直有利于液态金属减小直径差,使液态金属由凸起向凹陷处流动变形。

图9为液态金属表面电磁力密度随时间的变化规律,其数值的正、负分别代表对液态金属的拉力、压力作用。由图9可知,当点1、点2和点3处受压力作用时,电磁力密度的极大值分别为 $-5.18 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、 $-1.74 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 和 $-4.52 \times 10^8 \text{ N/m}^3$,点2处由于受趋肤效应的影响,达到电磁力密度极大值的时刻比点1和点3处晚 $4 \mu\text{s}$,液态金属凸起和凹陷处形成了较大的电磁压力差,根据最小阻力定律,在电磁力驱动作用下液态金属由凸起流向凹陷,液态金属的直径趋于一致;当电磁力表现为拉力作用时,由于电磁力为径向分量和轴向分量的合力,电磁力的方向与液态金属的径向呈一定角度,处于凸起弧面处的液态金属仍有流向凹陷处的趋势,且液态金属内部受电磁拉力作用过程中无气泡或空洞产

生,将抑制液态金属直径变大,因此电磁拉力的作用仍可在一定程度上减小液态金属的直径差,但变形较慢。

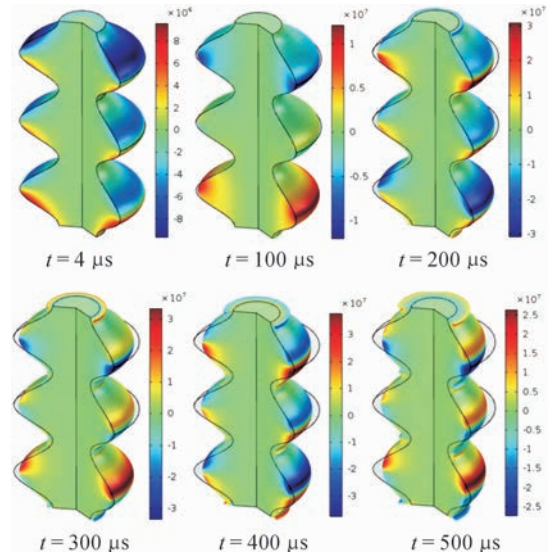


图8 液态金属中电磁力密度轴向分量不同时刻分布规律

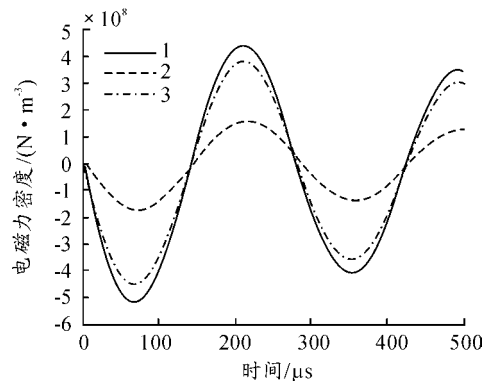


图9 液态金属表面电磁力密度随时间变化规律

2.2 液态金属的变形分析

图10为电磁场作用下液态金属不同时刻的变形速率,从变形速率结果可发现,凸起处的最大变形速率为 2.52 m/s ,其流动变形速率大小由电磁力决定,分布规律与电磁力分布规律类似,呈现明显的趋肤效应,大小与液态金属的轴向、径向位置有密切关系。比较电磁场作用前后的形状可发现, $t = 0 \mu\text{s}$ 时液态金属凸起处直径为 8 mm ,凹陷处直径为 3 mm ,最大直径与最小直径比为 2.67 ; $t = 500 \mu\text{s}$ 时凸起处直径为 7.29 mm ,凹陷处直径为 4.15 mm ,最大直径与最小直径比为 1.76 ,即液态金属在电磁场作用变形后,直径明显更加均匀。

图11为凸起、凹陷处液态金属的变形量随时间的变化规律,变形量指液态金属凸起处直径增大值和凹陷处直径缩小值。从图中可发现,凸起处的变形量一直大于凹陷处的对应值,是因为凸起处的直径大,电磁力的作用更明显。当 $t \leq 200 \mu\text{s}$ 时,电磁力凸起处的变形速率在整个通电过程中是最大的;当 $200 \mu\text{s} \leq t \leq 320 \mu\text{s}$ 时,由于电磁力方向改变,表现

为拉应力作用,造成凸起、凹陷处的变形量均较小,变形速率缓慢;当 $320 \mu\text{s} \leq t \leq 500 \mu\text{s}$ 时,电磁力再次改变方向后,约束凸起处的液态金属,液态金属则从凸起处流向凹陷处,相应地,凹陷处的直径增大。

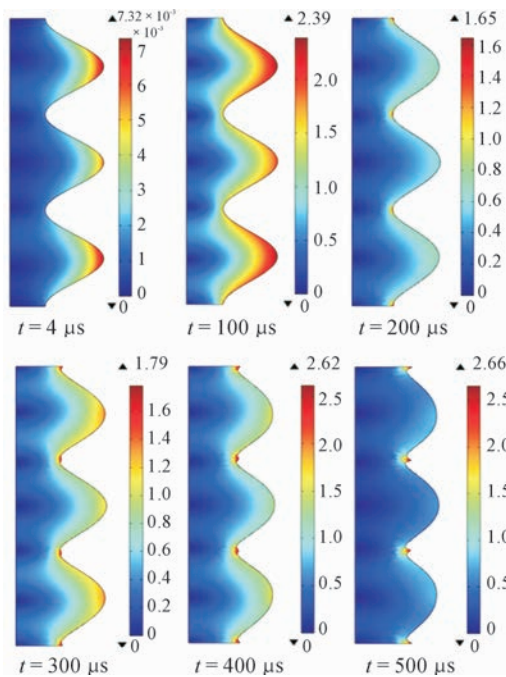


图10 液态金属在不同时刻的变形速率

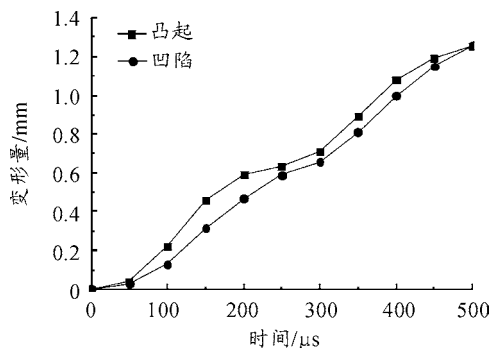


图11 凸起和凹陷处变形量随时间的变化规律

3 结论

1) 液态金属中磁感应强度、感应电流密度和电磁力密度均呈现明显趋肤效应,液态金属凸起部分和凹陷部分的磁感应强度值相差较小,而凸起部分的感应电流密度值明显大于凹陷部分的对应值,因此凸起部分和凹陷部分的电磁压力差主要由感应电流密度决定;

2) 液态金属凸起和凹陷部分的电磁压力差驱动液态金属发生变形,使得凸起部分直径减小,凹陷部分直径增大,减小了液态金属凸起和凹陷部分的直径差,使得液态金属直径趋于均匀;

3) 还需掌握各参数对液态金属变形的影响规律,为测

量电磁场作用下液态金属的变形量作准备。

参考文献:

- [1] FEDOROV S V, BABKIN A V, LADOV S V, et al. Possibilities of controlling the shaped-charge effect by electromagnetic actions[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2000, 36(6): 792-808.
- [2] FEDOROV S V, BABKIN A V, LADOV S V. Salient Features of Inertial Stretching of a High-Gradient Conducting Rod in a Longitudinal Low-Frequency Magnetic Field[J]. Journal of engineering physics and thermophysics, 2001, 74(2): 364-374.
- [3] LITTLEFIELD D L. Enhancement of stability in uniformly elongating plastic jets with electromagnetic fields[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1991, 3(12): 2927-2935.
- [4] 秦承森, 段庆生, 韩冰. 聚能射流的断裂时间[J]. 爆炸与冲击, 1997(4): 31-38.
- [5] MA B, HUANG Z X, ZU X D, et al. Experimental study on external strong magnetic fields coupling with the shaped charge jet[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 98: 88-96.
- [6] MA B, HUANG Z X, XIAO Q Q, et al. Effect of External Magnetic Field Loaded at the Initial Period of Inertial Stretching Stage on the Stability of Shaped Charge Jet[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(5): 875-881.
- [7] 马彬, 黄正祥, 祖旭东, 等. 时序控制对强磁场耦合聚能射流过程的影响[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2177-2184.
- [8] 孟学平, 雷彬, 向红军, 等. 励磁线圈磁场约束金属射流变形的作用机理研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 195-203+212.
- [9] 孟学平, 雷彬, 向红军, 等. 励磁线圈结构参数对金属射流箍缩特性的影响[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(4): 12-18.
- [10] 孟学平, 雷彬, 向红军, 等. 线圈脉冲电流对破甲弹金属射流箍缩特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 923-928.
- [11] 孟学平, 雷彬, 向红军, 等. 外磁场对金属射流的作用机理[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3042-3049.
- [12] SHVETSOV G A, MATROSOV A D. Qualitative Physical Model for the Disruption of Shaped-charge Jets by a Current Pulse[C]//Proc. of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando: Destech Publications, 2002.

科学编辑 程军胜 博士(中国科学院电工研究所副研究员)

责任编辑 周江川