

# 轻质磁性镓铟液态金属复合材料的制备及其性能研究

黄卓昉<sup>1</sup>, 李安敏<sup>1,2,3</sup>, 陆奔<sup>1</sup>, 徐飞<sup>1</sup>, 杨慧蓉<sup>1</sup>, 袁子豪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

<sup>2</sup>省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 广西 南宁

<sup>3</sup>有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 南宁

收稿日期: 2023年9月4日; 录用日期: 2023年10月4日; 发布日期: 2023年10月12日

## 摘要

通过机械混合的方式将共晶镓铟合金(EGaIn)、空心玻璃微珠、磁性纳米铁粉颗粒混合制备出一种轻质且具有一定磁性特征的复合材料。实验测试证明其具有低密度(最低可达液态金属的24.3%)、刚度变异性, 饱和磁化强度能够达到34.44 emu/g, 剩余磁化强度达0.033 emu/g, 使得液态金属复合材料更易在垂直结构上进行几何变化与空间变化, 强化了液态金属在立体空间的可控性, 以满足更多应用领域的需求, 更可以在一定程度上促进液态金属在流体力学、电磁学甚至是在航空航天领域的进一步发展。

## 关键词

共晶镓铟合金, 液态金属, 磁流体, 复合材料, 机械混合

# Preparation and Properties of EGaIn Liquid Metal Composite Material

Zhuofang Huang<sup>1</sup>, Anmin Li<sup>1,2,3</sup>, Ben Lu<sup>1</sup>, Fei Xu<sup>1</sup>, Huirong Yang<sup>1</sup>, Zihao Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures, Nanning Guangxi

<sup>3</sup>MOE Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metals and Materials, Nanning Guangxi

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

A lightweight composite material exhibiting specific magnetic characteristics was fabricated

文章引用: 黄卓昉, 李安敏, 陆奔, 徐飞, 杨慧蓉, 袁子豪. 轻质磁性镓铟液态金属复合材料的制备及其性能研究[J]. 材料科学, 2023, 13(10): 851-865. DOI: 10.12677/ms.2023.1310094

through the mechanical blending of eutectic gallium-indium alloy (EGaIn), hollow glass beads, and magnetic iron nanopowder particles. Empirical investigations have confirmed its reduced density (as low as 24.3% compared to that of liquid metal) and variable stiffness. Notably, the saturation magnetization strength can reach 34.44 emu/g, while the residual magnetization strength attains 0.033 emu/g. These attributes facilitate geometric and spatial alterations within the vertical structure of liquid metal composites, enhancing the controllability of liquid metal in three-dimensional space and addressing the requirements of diverse applications. Furthermore, this composite material holds the potential to advance the progress of liquid metal in the domains of fluidics, electromagnetics, and even aerospace to a certain extent.

## Keywords

Eutectic Gallium-Indium Alloys, Liquid Metals, Magnetic Fluids, Composite Materials, Mechanical Mixing

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

液态金属因其在室温下同时具有流体和金属特性而受到材料学者的青睐。作为一种流体，液态金属是所有导电材料中最柔软的，是一种典型的可扩展和可适应的兼容材料。液态金属可以承受非常显著的过冷，这使得它们在冷却到低于熔点时能够保持液态，这意味着在液体内部发生了一定程度的结构熔化[1]。此外，它还是一种优越的替代工作流体[2]，在保持金属导电性的同时，它可以变形，柔软和变形的能力赋予了液态金属独特的属性，在保证材料精度的前提下减少工序[3]。液态金属因其特殊性能而应用广泛，特别是在柔软和可伸缩的电子产品中[4]。

得益于其低熔点的特性，液态金属可以在室温范围内方便地实现固液相转变。作为柔性材料具有独特的自修复能力[5]，这在许多应用领域都是非常需要的。此外，研究人员制备出一种室温下的液态金属泡沫[6]，可以保持其作为金属的性质和作为液体的柔性性质。镓基室温液态金属合金近年来正成为新兴的功能材料，受到了学术界和工业界的广泛关注[7]，在开发软质和可变形电子器件方面取得了令人兴奋的进展，包括薄刚性导体和固有软液态金属(LMs)或离子水凝胶[8]。共晶镓铟合金(镓 75 wt%，铟 25 wt%)和镓铟锡合金(镓 68 wt%，铟 22 wt%，锡 10 wt%)等液态金属已被广泛应用于柔性电子、传感器、催化等领域，高性能机械柔性电子产品将会促进未来超薄可穿戴技术的发展[9]。液态金属在水环境中的迁移性和可变形性已被证实对发展各种应用具有重要意义，包括微机电机械执行器[10]、微尺度热交换器[11]等，在未来的医疗监测、智能治疗[12]、柔软和可伸缩的电子材料[13]方面也将有重要应用。

液态金属与空心材料的复合可获得通过控制材料温度和成分比调节的低密度、高延性、良好的成形能力和刚度变异性的轻质液态金属复合材料，在柔软和完全刚性状态之间拥有低密度和浮力性能以及良好的导热导电性和相变功能。到目前为止，轻质与磁性在液态金属中未被充分结合，受其高密度和高表面张力[14]的影响，磁性液态金属在多数时候只能在水平结构上实现几何变化与空间变化。这极大限制了液态金属在立体空间的功能表现。共晶镓铟合金(EGaIn, 75 wt% Ga, 25 wt% In)相比于纯镓或其他配比的镓铟合金，具有优越的机械、电气和化学性能，并且易于纳米制造。20°C时其导热系数为 28 W/(m·K)，更适合在室温下的应用。

综上所述,研究一种能够具有一定磁性特征的轻质液态金属复合材料可以解决许多难题,更可以在一定程度上促进液态金属在流体学、电磁学等领域的进一步发展。因此,本文通过研究一种轻质磁性镓铟液态金属复合材料的制备方法及其性能,对其进行电学、力学、磁性等性能的测试,证明了其应用于实际的可行性。

## 2. 实验材料制备

### 2.1. 原材料

本实验所用液态金属为共晶镓铟合金(EGaIn, 75 wt% Ga和25 wt% In,东莞市厚街鼎泰金属材料厂),熔点 15.7°C;磁性纳米铁粉颗粒(清河县兴业金属材料有限公司)为单质零价铁粉,粒径 100 nm;空心玻璃微珠(宿迁欧之景商贸有限公司)直径约为 50  $\mu\text{m}$ ,密度为 0.24  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,主要成分为钙钠的碳酸盐。按照表 1 的成分配比制备成 EGaIn 液态金属复合材料。

Table 1. EGaIn liquid metal composite composition ratio

表 1. EGaIn 液态金属复合材料的成分配比

样品编号	1#	2#	3#	4#	5#
1 ml EGaIn 质量/g	6.8188	6.9100	6.4577	6.7906	7.8424
磁性纳米铁粉颗粒质量/g	0.6819	1.0365	1.2915	1.0186	1.1764
空心玻璃微珠质量/g	0.4091	0.4146	0.3875	0.1358	0.7842
$m_{\text{Fe}}/m_{\text{EGaIn}}$ (%)	10	15	20	15	15
$m_{\text{GB}}/m_{\text{EGaIn}}$ (%)	6	6	6	2	10

### 2.2. 实验流程

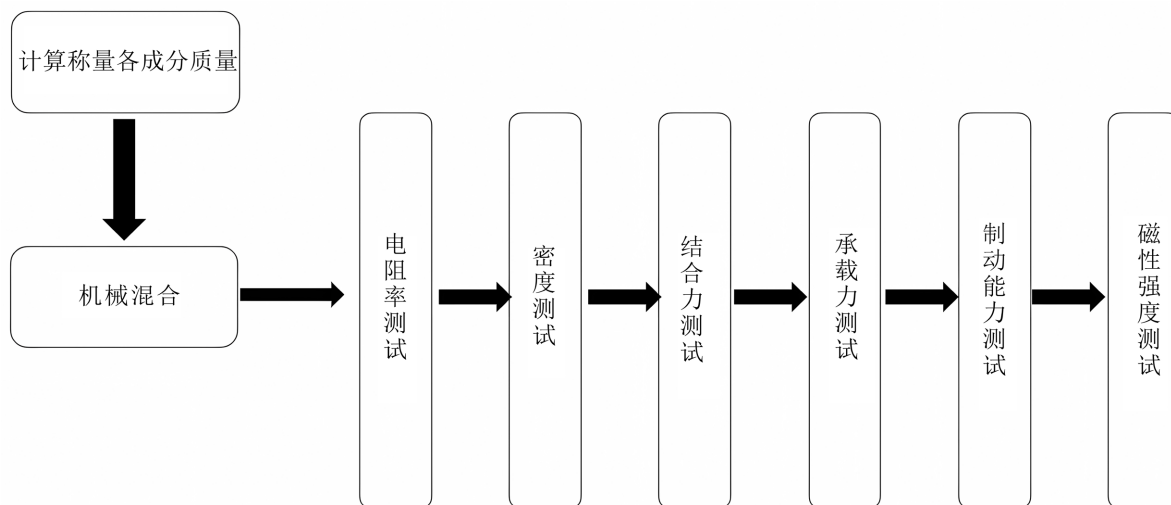


Figure 1. Schematic diagram of experimental process

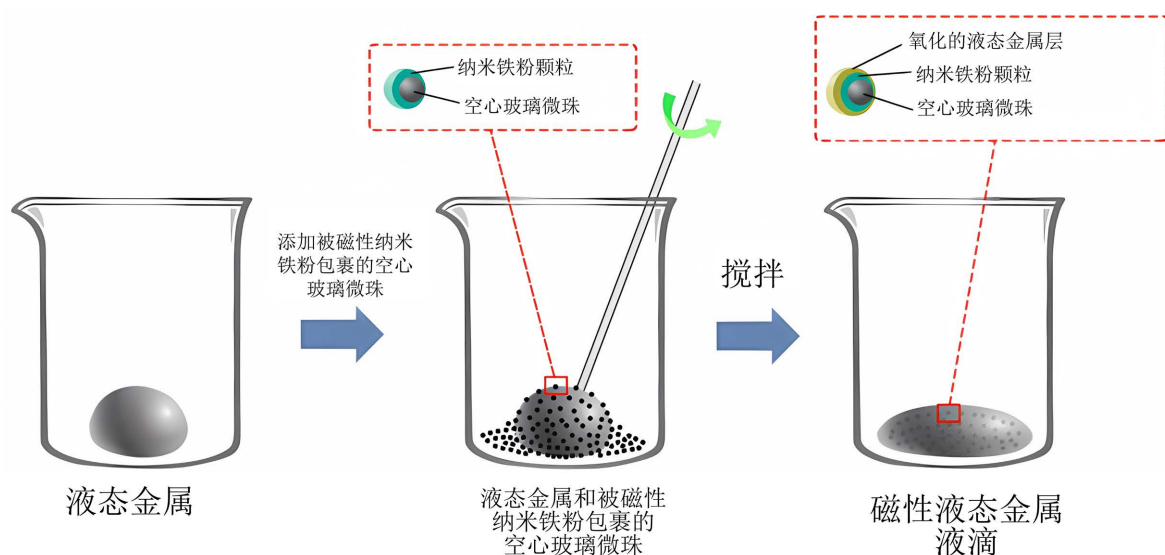
图 1. 实验流程简图

采用机械混合的方式,将定量的磁性纳米铁粉颗粒和玻璃空心微珠与 1 ml 的 EGaIn 进行混合,使其团簇,进而获得成分不同的五种样品。实验流程主要包括计算称量各成分质量、采用机械混合方式充分混合各成分、对不同成分的样品进行 X 射线衍射检测、密度、电阻率、结合力、迁移速率等性能测试,

分析磁性纳米铁粉颗粒和玻璃空心微珠的含量对样品性能的影响, 从而分析其实际应用情况。详细实验流程如图 1 所示。

### 2.3. 制备材料

将实验所需的玻璃棒、试管瓶、药匙、注射器等用无水乙醇进行超声清洗 10 min, 取出后用去离子水冲洗, 放入电热真空干燥箱中进行干燥, 使用天平称量 1 ml EGaIn 的质量, 将称好质量的磁性纳米铁粉颗粒和空心玻璃微珠倒入小烧杯, 混合均匀。待 EGaIn 微微氧化, 将混合均匀的磁性纳米铁粉颗粒和空心玻璃微珠粉体倒入装有 EGaIn 的试管瓶中, 用玻璃棒进行充分搅拌 3 min, 直至 EGaIn、磁性纳米铁粉颗粒和空心玻璃微珠三者充分混合, 在这个过程中 EGaIn 不断氧化, 黏度上升, 团簇形成可塑性较好的物质。重复上述操作五次, 制备五种成分比不同的轻质磁性液态金属复合材料样品。制备过程如图 2 所示。



**Figure 2.** The preparation process of EGaIn liquid metal composite sample  
**图 2.** EGaIn 液态金属复合材料样品制备过程

### 2.4. 实验设备

样品电阻率的测试使用 ST2258C 型多功能数字式四探针测试仪(苏州晶格电子有限公司), 同时使用 DT-9205A 型万用表(深圳斯耐科电子有限公司)进行数据校对。对样品进行相分析则使用 D max2500V X-射线衍射仪(Rigaku Corporation)。对样品的磁化强度进行测试采用 7410 VSM 振动样品磁强计(Lake shore)、TD8620 型特斯拉计(长沙天恒测控技术有限公司)。对各组分进行准确称量则使用 GL2004 型电子天平(上海佑科仪器仪表有限公司)。实验中还使用了 GW0303 型超声波清洗机(深圳市冠博科技实业有限公司)和 D2F-6050AB 型电热真空干燥箱(天津市宏诺仪器有限公司)。

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1. XRD 分析

图 3 为 EGaIn 液态金属复合材料样品的 XRD 图谱。经对比可以看出, 五种样品的衍射峰强度与磁性纳米铁粉颗粒和液态金属 EGaIn 的含量相对应。

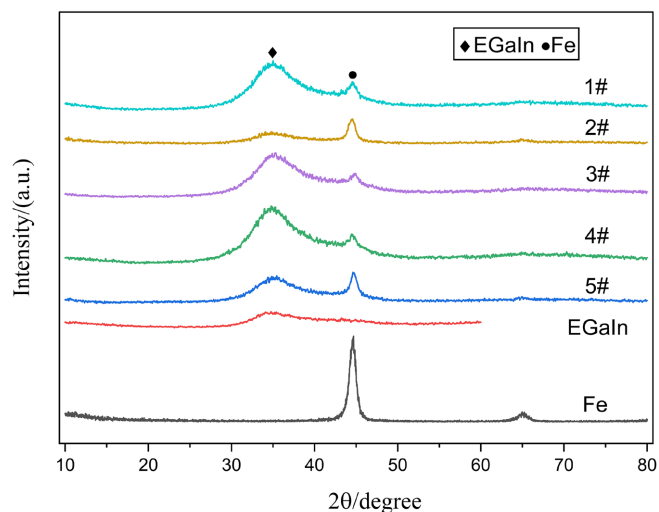


Figure 3. XRD pattern of liquid metal composite EGaIn

图 3. EGaIn 液态金属复合材料的 XRD 图谱

### 3.2. 试样密度

测量单个空量筒的质量，取适量样品放入试管中，用力压紧至 1 ml 处，从而获得 1 cm<sup>3</sup> 的样品块，连同量筒一起再次称重，通过计算获得 1 cm<sup>3</sup> 的样品的质量，从而计算出样品的密度。材料选自样品的不同位置，三次测量后取平均值，密度如图 4 所示。

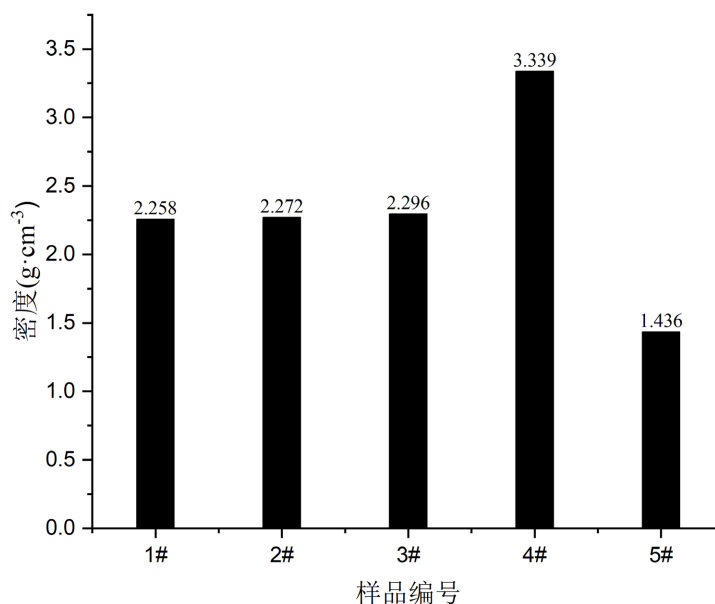


Figure 4. Density comparison of EGaIn liquid metal composite samples

图 4. EGaIn 液态金属复合材料试样密度对比

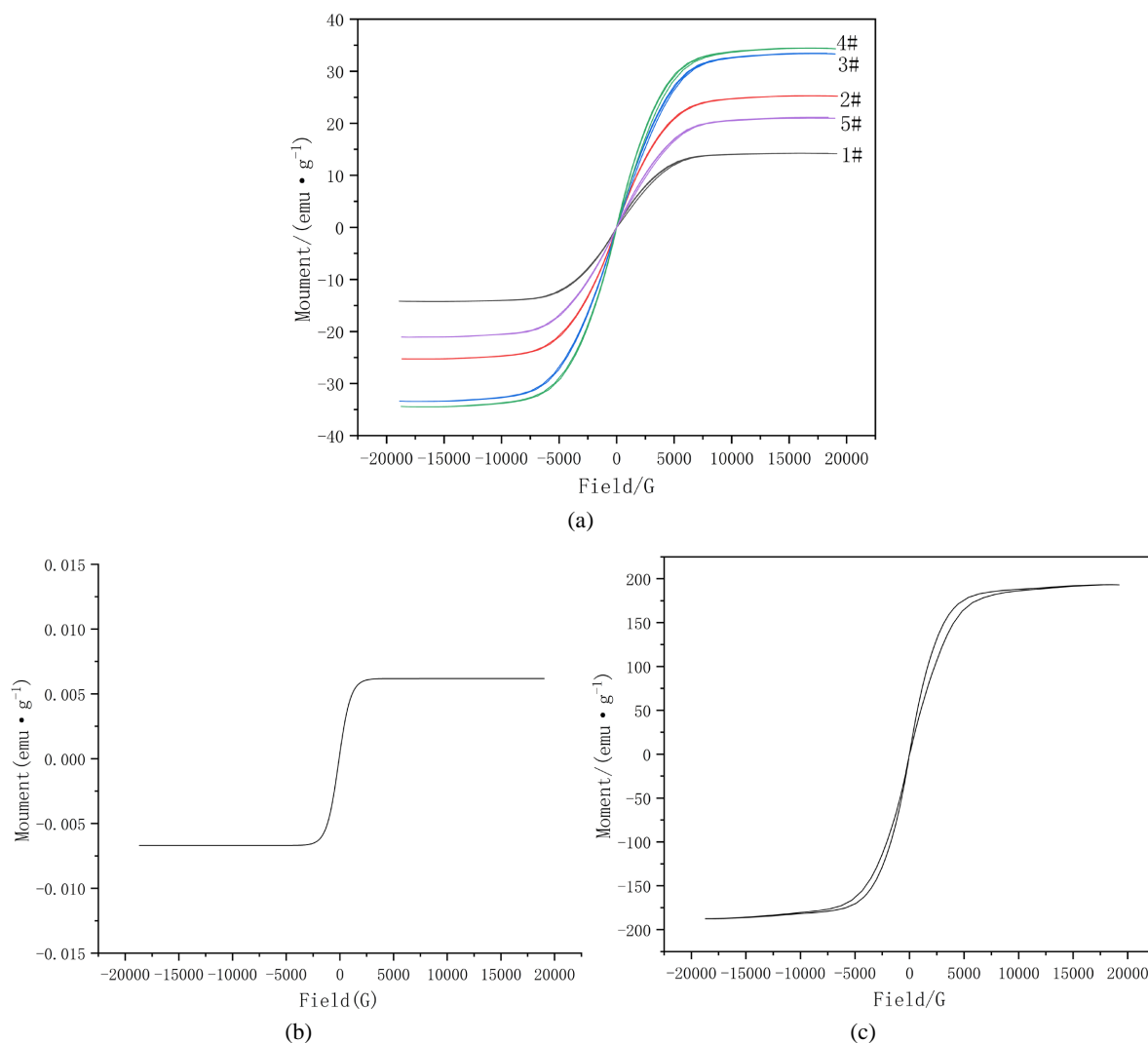
通过对比发现，五种试样的密度相较于 EGaIn ( $\rho = 5.904 \text{ g/cm}^3$ ) 均有较大程度的下降。空心玻璃微珠含量最高的 5# 试样密度下降了 75.7%；即使是空心玻璃微珠含量最少的 4# 试样，其密度也下降了超过 40%，可知：空心玻璃微珠的加入使得轻质化效果明显。

对比 1#、2#、3# 试样，三者的密度变化不大，但均呈上升趋势，这说明了在空心玻璃微珠含量一定

时, 磁性纳米铁粉颗粒含量的增加会小幅度提高样品密度, 对液态金属复合材料密度的影响较小; 对比 2#、4#、5#试样, 三者密度变化较大, 可以证明磁性纳米铁粉颗粒含量一定时, 空心玻璃微珠含量的增加使得样品密度大幅度下降, 空心玻璃微珠的气泡中空结构在轻质化中发挥了重要作用。

### 3.3. 磁性

磁滞回线是指在磁场强度周期性变化时, 强磁性物质表现出的磁滞现象所形成的闭合磁化曲线。它描述了强磁性物质在反复磁化过程中磁化强度(M)或磁感应强度(B)与磁场强度(H)之间的关系。试样的磁滞回线由图 5 所示, 从图中可以看出, 磁化强度由大到小依次是 4#、3#、2#、5#、1#试样, 磁化强度反映了样品的磁性大小, 即样品磁性由强到弱依次是 4#、3#、2#、5#、1#试样。4#试样的空心玻璃微珠含量最少, 磁性纳米铁粉颗粒占比较多, 磁性较大, 3#的磁性纳米铁粉颗粒含量最多, 空心玻璃微珠含量适中, 磁性也较强。对比 1#和 3#试样, 随着磁性纳米铁粉颗粒占比的增加, 样品的磁性逐渐增强, 符合客观事实。对比 2#、4#、5#试样, 磁性纳米铁粉颗粒含量相同时, 提高空心玻璃微珠的含量, 可导致相同体积下磁性纳米铁粉颗粒占比降低, 造成磁性减弱。



**Figure 5.** Hysteresis loop of liquid metal composite sample EGAIn (a) 1#~5#; (b) EGAIn; (c) Fe  
**图 5.** EGAIn 液态金属复合材料试样的磁滞回线(a) 1#~5#; (b) EGAIn; (c) Fe



外部磁场变化分为上升阶段和下降阶段，磁场范围是 $\pm 19,000$  G，经测试所得到的磁性参数如表 2 所示。样品的饱和磁化强度越高，磁性越强，撤去磁场后，剩余磁化强度也越高，两者呈正比关系，矫顽力反映了样品磁性的持久力，根据数据分析发现，五种样品的矫顽力均在 4 G 上下浮动，相差不大。

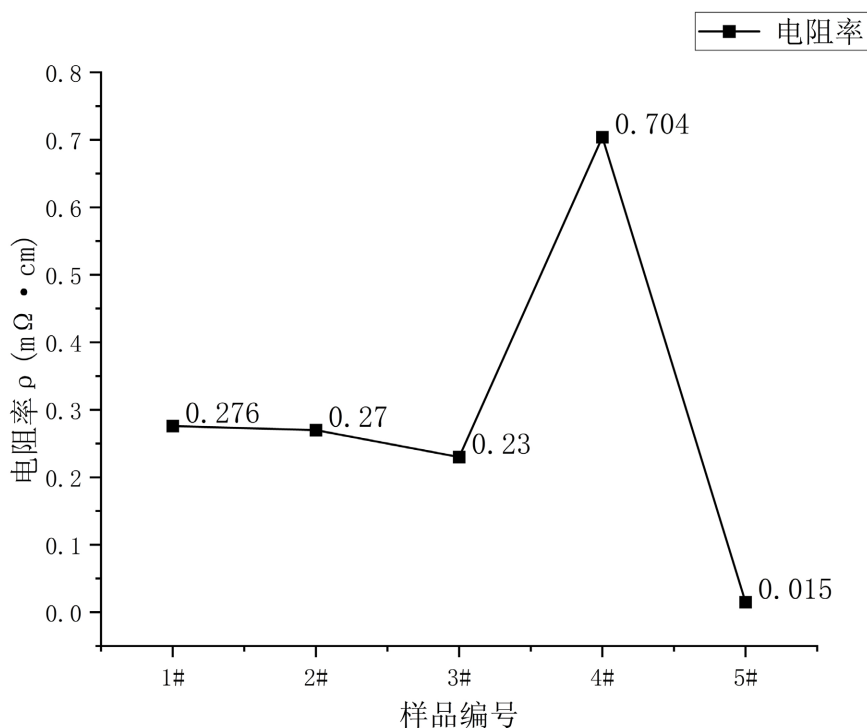
**Table 2.** Magnetic parameters of liquid metal composite sample EGaIn

**表 2.** EGaIn 液态金属复合材料试样的磁性参数

样品		1#	2#	3#	4#	5#
饱和磁化强度 (emu/g)	正向	14.24	25.29	33.40	34.44	21.01
	负向	-14.23	-25.27	-33.43	-34.47	-21.09
剩余磁化强度 (emu/g)	正向	0.011	0.025	0.029	0.033	0.015
	负向	-0.010	-0.027	-0.030	-0.032	-0.013
矫顽力(G)	正向	2.95	5.80	4.07	3.90	3.27

### 3.4. 导电性

采用四探针法对所制得的棱长 1 cm 的小方块样品的导电性能进行测试。将样品置于测试台上，将四探针测试仪测试端的四探针插入到样品中，闭合回路，完成对 1#~5#试样电阻率的测试；将四探针直接浸入 EGaIn 液滴中，闭合回路，测试出 EGaIn 的电阻率。对试样中不同位置材料制成的小方块试样重复测试电阻率，取平均值，得到 EGaIn 液态金属复合材料试样的电阻率如图 6 所示。



**Figure 6.** Resistivity of liquid metal composite sample EGaIn

**图 6.** EGaIn 液态金属复合材料试样的电阻率

从图 6 可以看出 EGaIn 液态金属复合材料的五种样品的电阻率均比 EGaIn 有不同程度的提高。对比

1#、2#、3#试样，空心玻璃微珠含量一定时，随着磁性纳米铁粉颗粒含量的提高，样品的电阻率逐渐下降，导电性逐步提高；对比2#、4#、5#试样，磁性纳米铁粉颗粒含量一定时，随着空心玻璃微珠含量的提高，样品的电阻率逐步提高，导电性逐渐降低。磁性纳米铁粉颗粒有助于提高样品的导电性，空心玻璃微珠对样品的导电性产生不利影响。

### 3.5. 结合力

为测试样品结合力大小，将两圆柱内开直径为2 cm的孔洞，下方圆柱与地面紧紧相连，上方圆柱与带有直径为1.2 cm孔的纸板紧紧相连，将样品放入孔洞中并压实，施加力F1，并通过定滑轮改变力的方向，当上下两部分被拉开时，记录力F1的大小，从而可计算出样品结合力的大小。

实际测量纸板上小圆孔直径为11.68 mm，通过拉力与断面横截面积的比值计算结合力F (mN/mm<sup>2</sup>)。

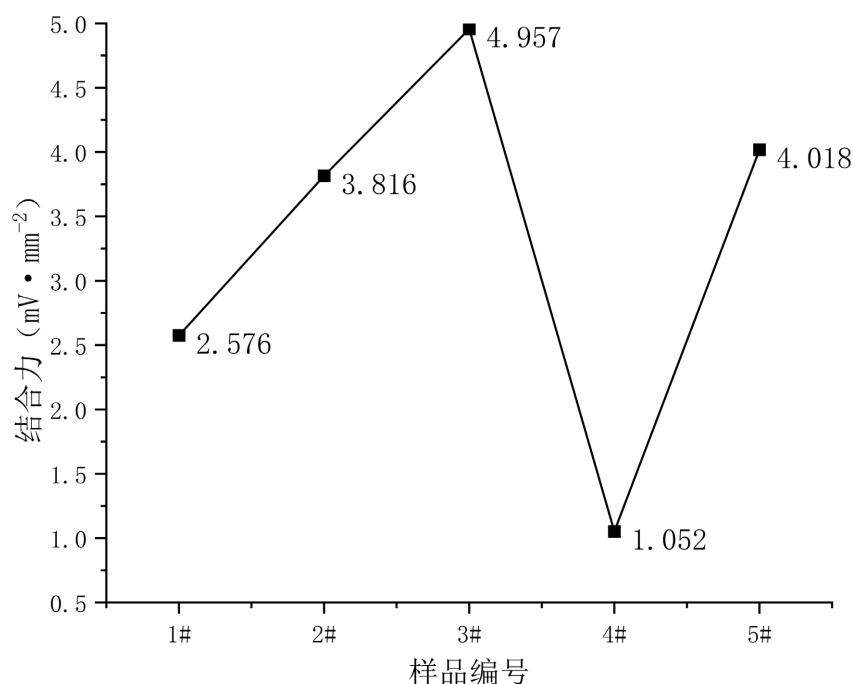


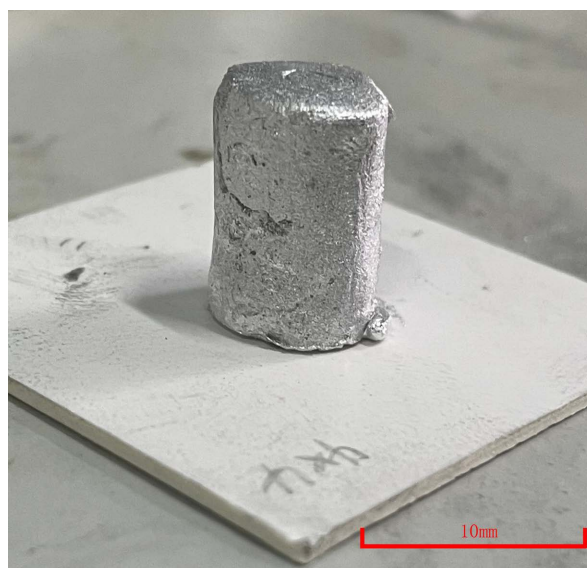
Figure 7. EGaIn binding strength of a liquid metal composite specimen  
图7. EGaIn 液态金属复合材料试样的结合力

图7是EGaIn液态金属复合材料试样的结合力测试结果，根据测试结果可以看出，4#试样的结合力最小，这是因为4#试样中粉体较少，EGaIn较多，混合后样品较软，流动性较高，导致其结合力较小。对比1#、2#、3#试样，空心玻璃微珠含量一定时，随着磁性纳米铁粉颗粒含量的提高，空心玻璃微珠倾向于形成更大的团簇，表现在样品的结合力逐步提高；对比2#、4#、5#试样，磁性纳米铁粉颗粒含量一定时，加入适量的空心玻璃微珠含量，样品的结合力有大幅增加，但超过一定限度，结合所得趋势，可认为当样品中粉体过多时，可塑性变差，结合力反而下降。

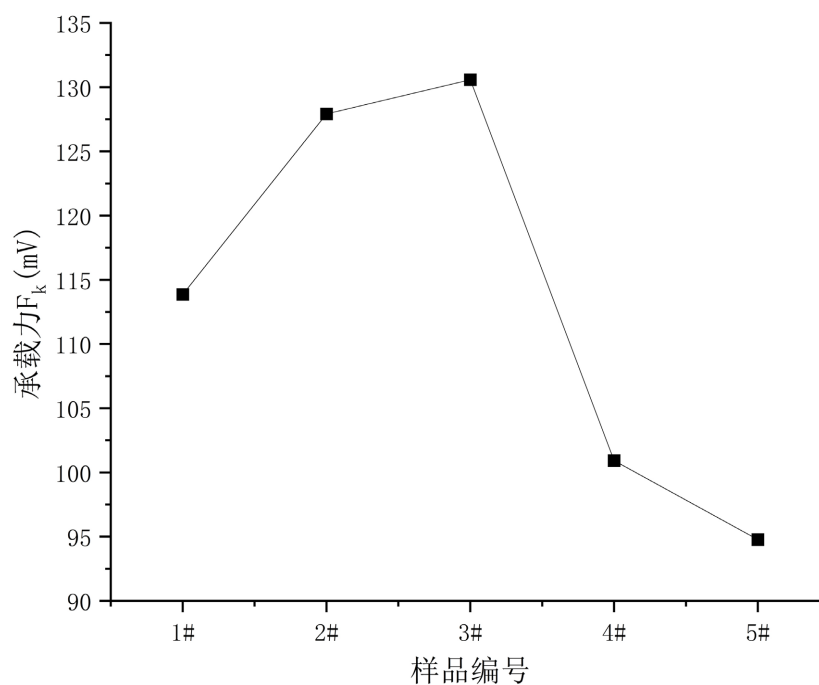
### 3.6. 承载能力

利用模具倒模成型制备小圆柱形样品，如图8(a)所示。用圆柱形磁铁吸附住小圆柱形样品，并横向放置，施加外力F2，当样品挣脱磁铁吸附，记录外力的大小，加上小圆柱形样品的重力，即为该样品的承载力Fk。





(a)



(b)

**Figure 8.** (a) small cylindrical sample; (b) EGaIn carrying capacity of a liquid metal composite specimen

**图 8.** (a) 小圆柱形样品; (b) EGaIn 液态金属复合材料试样的承载力

EGaIn 液态金属复合材料试样的承载能力测试结果如图 8(b)所示, 对比 1#、2#、3#试样, 随着磁性纳米铁粉颗粒的含量增加, 样品的磁性增强, 所受的磁力增大, 摩擦力增大, 承载力增大。4#粉体较少, 样品较为柔软, 容易变形, 所能抵抗的外力较小, 承载力较低, 5#空心玻璃微珠含量较高, 样品不易成型, 承载力较小。对比 2#、4#、5#试样, 磁性纳米铁粉颗粒含量一定时, 加入适量的空心玻璃微珠含量, 有助于团簇, 样品的易成型性增高, 空心玻璃微珠过多时, 样品团簇能力下降, 样品难以塑型, 承载力较低。

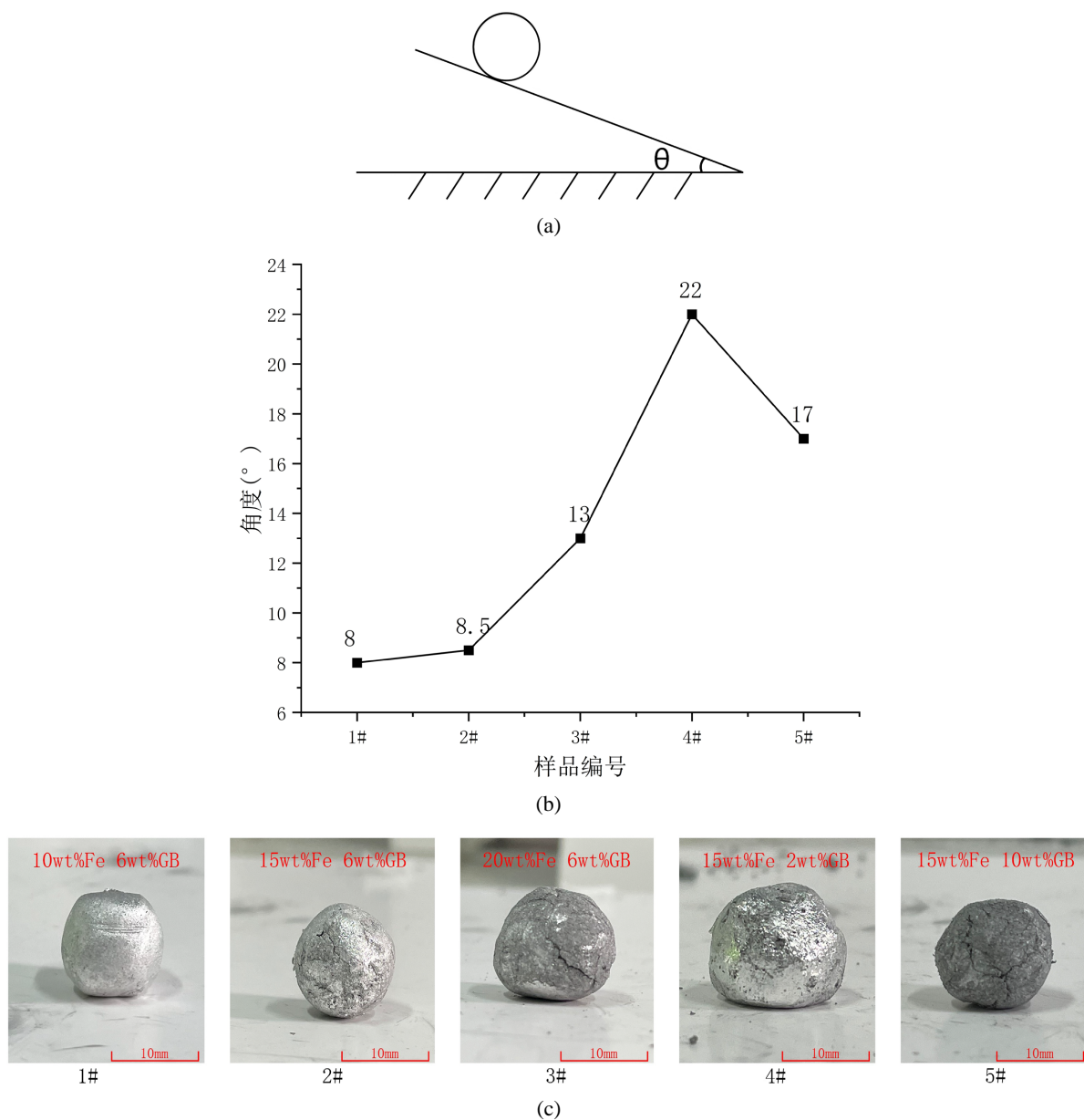
### 3.7. 运动性能

小球的运动性能可以用最小倾斜角以及固定倾斜角斜面的滚落速度来评价, 当最小倾斜角越小, 固定倾斜角斜面的滚落速度越快时, 小球的运动性能越好。

#### 3.7.1. 小球开始滚落的最小倾斜角

如图 9(a)所示, 将直径 15 mm 小球置于斜面上, 缓慢增大斜面的倾斜角度, 当小球开始向下滚落时, 测量并记录斜面的倾斜角度。

图 9(b)为测试 1#~5#样品小球的运动性能时, 样品小球开始滚落的最小倾斜角对比图, 样品小球如图 9(c)所示。



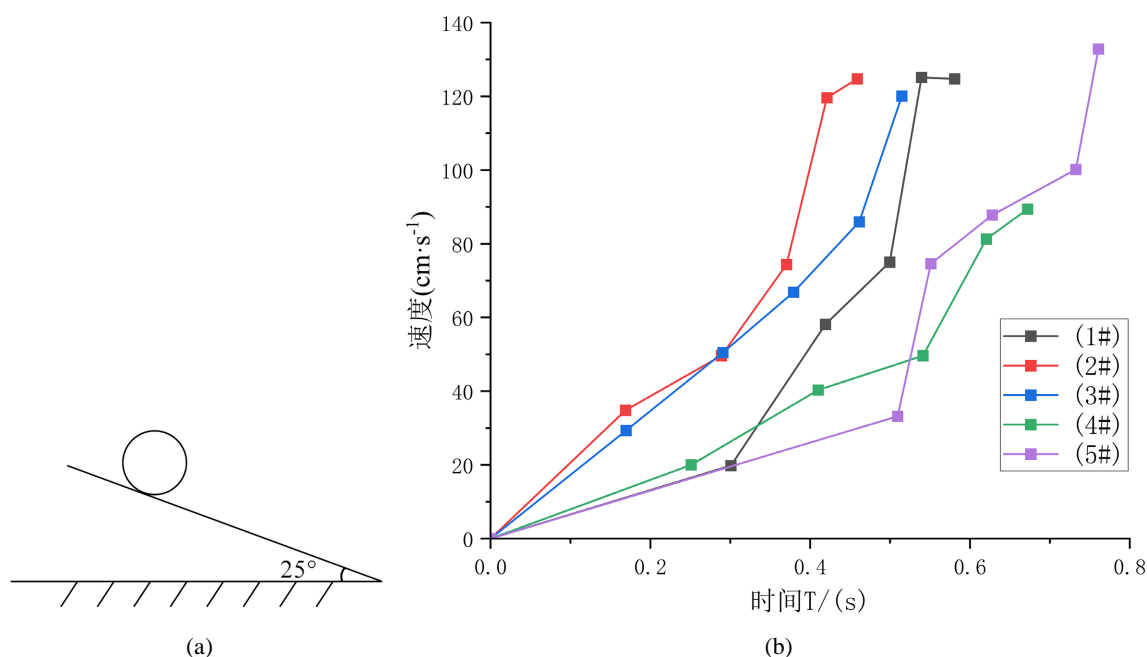
**Figure 9.** (a) Slope; (b) The minimum inclination angle at which the 1#~5# ball begins to roll off; (c) The sample ball  
**图 9.** (a) 斜面; (b) 1#~5#小球开始滚落的最小倾斜角; (c) 样品小球

经过详细的对比分析, 研究发现 1#样品小球在制动性能方面表现最为优异。具体来说, 在 1#、2#、3#三种样品小球中, 随着磁性纳米铁粉颗粒含量的逐渐增加, 小球的质量相应提高, 从而导致其开始下滑所需的初始倾斜角度也逐渐增大。与此相反, 在 4#样品小球中, 粉体含量显著偏低, 但黏度较高。这一特点不利于制动性能, 导致其在这一方面的表现较为不佳。进一步观察 5#样品小球, 尽管其粉体含量最高, 但由于成型困难, 它需要一个相对更大的初始倾斜角度才能开始下滑。

### 3.7.2. 小球在固定倾斜角的斜面上滚落速度

为保证 1#~5#直径 15 mm 小球均能滚落, 将斜面的倾斜角度固定为  $25^\circ$ , 如图 10(a)所示, 将小球从斜面顶端释放, 记录小球运动过程, 同时用秒表计时, 通过位移与时间计算出小球运动速度。

样品小球在在固定倾斜角的斜面上滚落速度与时间关系如图 10(b)所示。



**Figure 10.** (a) A slope with a fixed inclination of  $25^\circ$ ; (b) Relationship between the velocity and time of the ball 1#~5#  
**图 10.** (a) 固定倾角  $25^\circ$  斜面; (b) 1#~5# 小球从斜面滚落的速度与时间关系

对比发现, 4#样品小球的下滑速度最小, 由于其黏度较大, 导致其流动性较低, 1#、2#、3#样品小球最终速度相差不大, 但在下滑初期, 2#、3#样品小球速度明显大于 1#样品小球, 加速性能较好, 5#样品小球密度最小, 质量较轻, 下滑最终速度较大。

## 3.8. 磁可控性测试结果

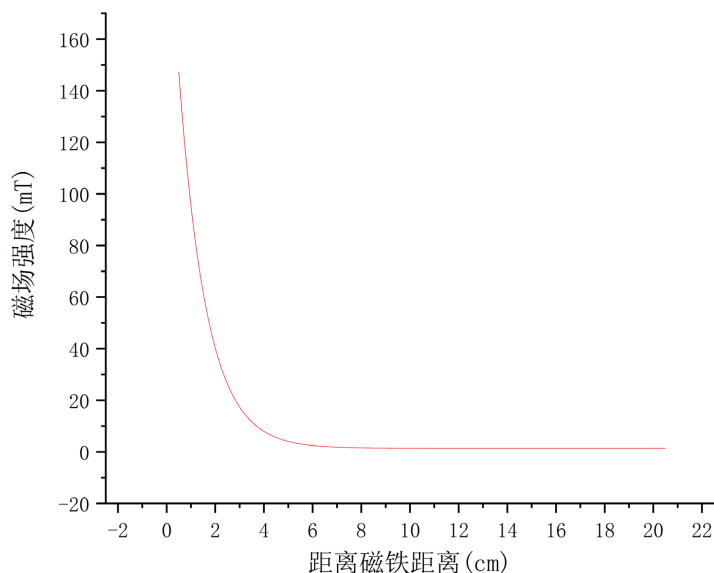
添加磁性纳米铁粉颗粒的液态金属复合材料具有一定的磁性, 可以通过外加磁场进行控制受到外加磁场作用后, 复合材料上的粒子会产生指向磁场梯度最大方向的磁力, 致使小球运动, 产生磁可控性。

### 3.8.1. 平衡单位体积重力的最小磁通密度

利用特斯拉计测量磁通密度与离开磁体的距离的关系如图 11 所示, 由图可知, 磁通密度随着离开磁体的距离的增加呈指数型下降。

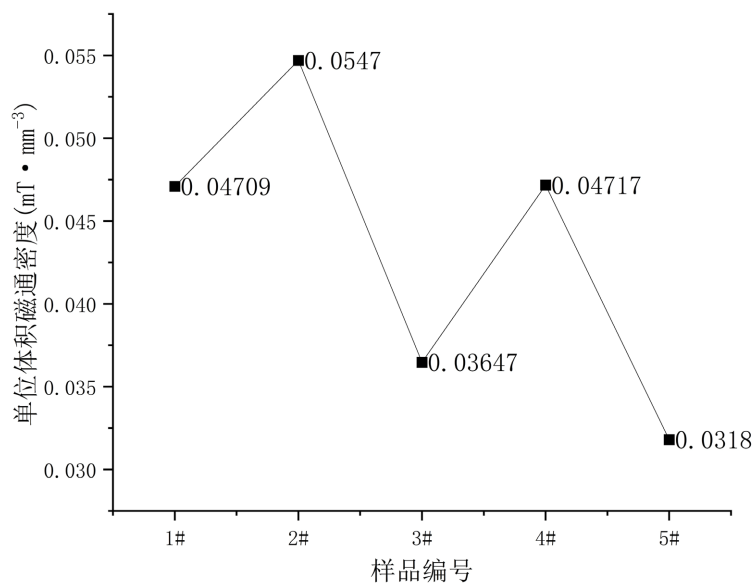
利用模具, 倒模成型制备小圆柱形样品。同时测得小圆柱形样品直径为 10 mm, 高为 13 mm。将磁铁从样品正上方缓慢靠近, 当样品被吸附上去时停止, 测量样品原位置处的磁通密度, 通过计算求得平

衡单位体积重力的最小磁通密度，测试结果如图 12 所示。



**Figure 11.** Magnetic flux density as a function of the distance from the magnet

**图 11.** 磁通密度与离开磁体的距离的关系



**Figure 12.** The minimum magnetic flux density per unit volume of gravity of a ball balancing 1#~5#

**图 12.** 1#~5#小球平衡单位体积重力的最小磁通密度

在对 1#、2#、3#试样进行分析后，发现当初添加少量磁性纳米铁粉颗粒时，小圆柱形试样的密度和自身重力明显增加，这一现象导致平衡单位体积重力所需的磁通密度相应提升。进一步增加磁性纳米铁粉颗粒含量，可以观察到材料内在磁性得到增强，从而引发平衡单位体积重力所需的磁通密度大幅下降。相较之下，在 4#试样中，由于其密度和质量达到最大值，该样品需要更大的磁力来抵抗其自身的重力，即需要较高的磁通密度。由于 5#试样密度最低和质量最轻，其平衡单位体积重力所需的磁通密度是所有样品中最小的。

### 3.8.2. 使小球开始运动的最小磁通密度

使用圆柱形磁铁做制动器测试小球的运动。将直径为 15 mm 小球置于直尺上，记录小球位置，使圆柱形磁铁缓慢靠近小球，当小球开始运动时，记录小球原位置处的磁通密度，结果如图 13(a)所示。拍摄小球运动过程，并用秒表计时，通过位移与时间计算出小球运动速度。

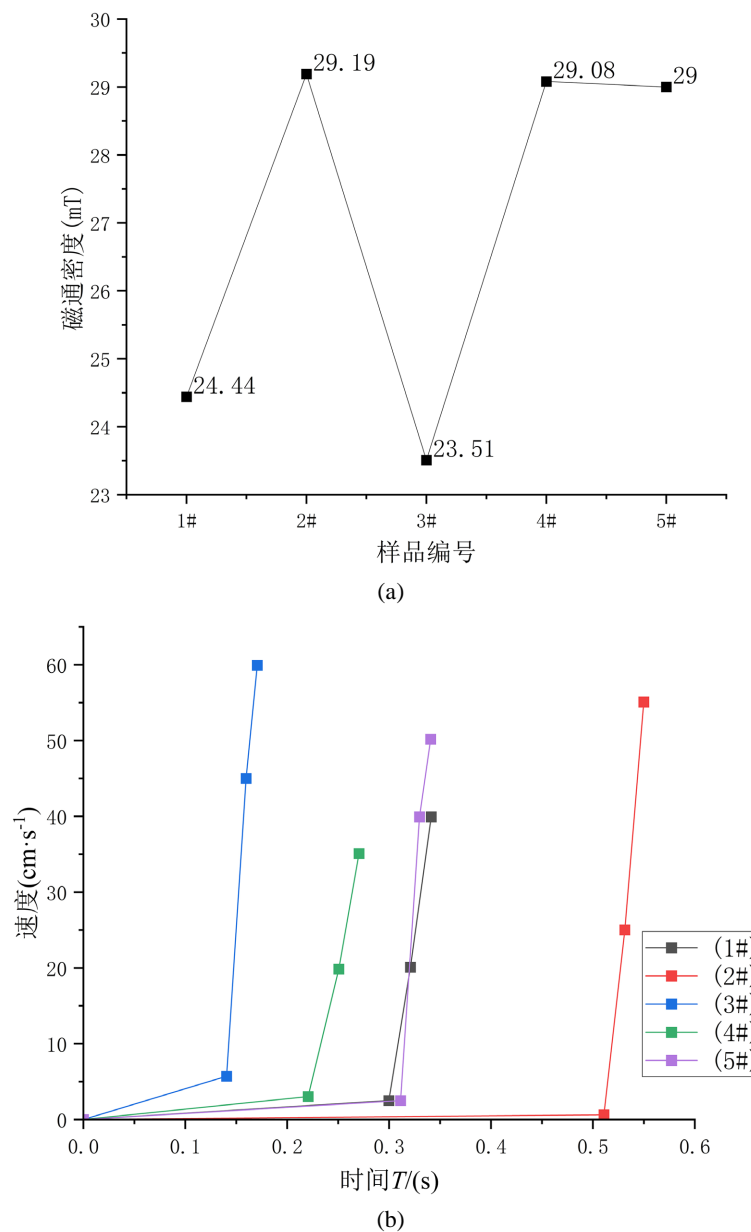


Figure 13. (a) The minimum flux density to start the ball moving; (b) The ball moving speed

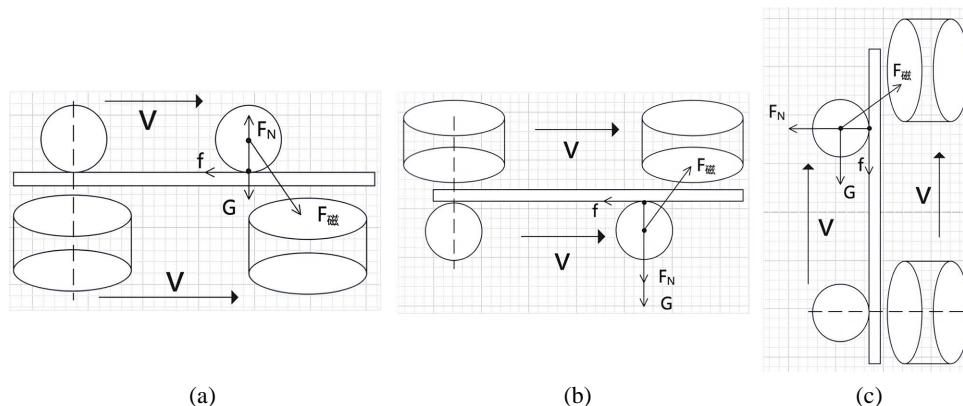
图 13. (a) 使小球开始运动的最小磁通密度; (b) 小球运动速度

添加磁性纳米铁粉颗粒后，在初始阶段小球的密度和质量增加，导致触发小球运动所需的磁通密度相应提升，进一步导致其初始运动速度出现减缓。然而，当磁性纳米铁粉颗粒的含量继续增加至某一阈值后，小球的磁性属性显著增强。这一增强效应显著减少了启动小球运动所需的磁通密度，从而加快了小球的初始运动速度。

另一方面，4#试样的黏度表现出较高的数值。这一物理特性不仅增加了触发小球运动所需的磁通密度，而且对小球的最终运动速度产生了负面影响，导致其显著减缓。

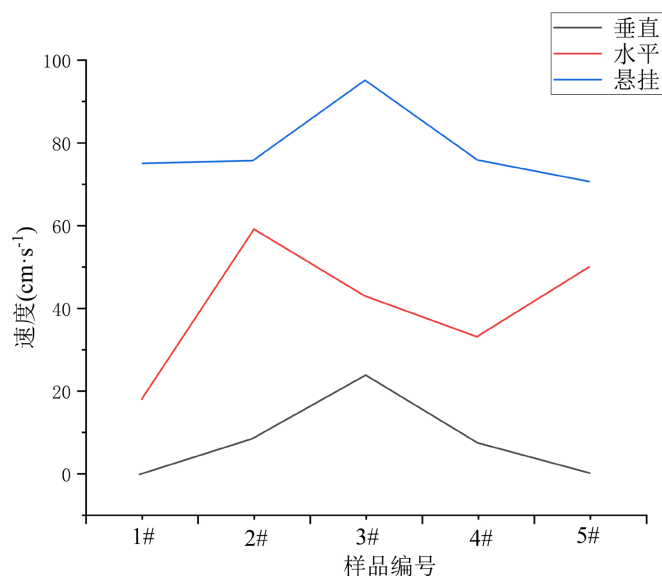
### 3.9. 迁移速率

为了测试小球被磁铁驱动能力的大小，设计如图 14 所示水平、悬挂、垂直三种测试方式。将磁铁快速移动，小球跟随磁铁共同运动，实验发现小球可以被磁力驱动，随着磁铁运动而运动，小球所处位置的磁通量密度约为 120 mT。用手机拍摄磁铁驱动小球运动过程，并用秒表记录时间，计算出五个小球分别在水平、悬挂、垂直情况下被磁铁驱动可控平均迁移速率的大小如图 15 所示。



**Figure 14.** (a) Horizontal; (b) Suspension; (c) Vertical test method and force analysis  
**图 14.** (a) 水平; (b) 悬挂; (c) 垂直测试方式及受力分析

通过下图小球在磁铁驱动下可控平均迁移速率对比发现，五个小球在悬挂的状态下，被磁铁驱动可控平均迁移速率大于垂直与水平状态，可以推断出，在悬挂状态下，向上的磁力大于小球自身重力，当重力抵消掉一部分磁力后，小球运动时对基底的压力减小，摩擦力减小，运动速率加快。在垂直状态下时，小球要在磁铁的驱动下，克服重力向上运动，速度自然较慢，在水平状态下，速度居中。



**Figure 15.** Average migration rate  
**图 15.** 小球平均迁移速率



## 4. 结论

本文制备了一种可调的低密度、高延伸、具有良好成型能力、刚度变异性以及高磁性的液态金属复合材料，使液态金属复合材料更易在垂直结构上进行几何变化与空间变化，强化液态金属在立体空间的可控性，以满足其在更多应用领域的需求。主要通过机械混合的方式将 EGaIn (75 wt% Ga, 25 wt% In)、空心玻璃微珠、磁性纳米铁粉颗粒混合制备出一种轻质且具有一定磁性特征的复合材料。实验测试结果表明，受空心玻璃微珠的气泡中空结构影响，该种复合材料的密度普遍只有原液态金属的一半，其中 5# 试样最低可达液态金属的 24.3%。该试样密度最小的同时，其所需要的平衡单位体积重力的磁通密度也最小，仅为  $0.0318 \text{ mT/mm}^3$ 。磁性纳米铁粉颗粒的加入，使得复合材料具有一定磁性，其相对占比越多，磁性也就对应越强。所有样品中，4# 的饱和磁化强度达  $34.44 \text{ emu/g}$ ，剩余磁化强度达  $0.033 \text{ emu/g}$ ，且样品的矫顽力均在  $4 \text{ G}$  上下浮动。空心玻璃微珠和磁性铁粉的加入也提高了复合材料的结合力，使得粒子间的团簇更为紧密，结合力最高可达  $4.5969 \text{ mN/mm}^2$ 。

## 基金项目

2021 年中央引导地方科技发展资金专项(桂科 ZY21195030); 2022 年广西科技基地和人才专项(桂科 AD21238010); 广西重点研发计划(桂科 AB22080015)。

## 参考文献

- [1] Daeneke, T., Khoshmanesh, K., Mahmood, N., *et al.* (2018) Liquid Metals: Fundamentals and Applications in Chemistry. *Chemical Society Reviews*, **47**, 4073-4111. <https://doi.org/10.1039/C7CS00043J>
- [2] de Castro, I.A., Chrimes, A.F., Zavabeti, A., *et al.* (2017) A Gallium-Based Magnetocaloric Liquid Metal Ferrofluid. *Nano Letters*, **17**, 7831-7838. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04050>
- [3] 姚飞. 液态金属的应用[J]. 科技视界, 2019(5): 129-131.
- [4] Lin, Y., Genzer, J. and Dickey, M.D. (2020) Attributes, Fabrication, and Applications of Gallium-Based Liquid Metal Particles. *Advanced Science*, **7**, Article ID: 2000192. <https://doi.org/10.1002/advs.202000192>
- [5] 尹富强, 赵玉辰, 李赵春. 镓基液态金属应用的研究进展[J]. 现代化工, 2022(5): 24-29.
- [6] 杨明轩. 镓铝合金液滴机器人制备及操作技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [7] Liu, T., Sen, P. and Kim, C.J. (2011) Characterization of Nontoxic Liquid-Metal Alloy Galinstan for Applications in Microdevices. *Journal of Microelectromechanical Systems*, **21**, 443-450. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2011.2174421>
- [8] Ren, L., Sun, S., Casillas-Garcia, G., *et al.* (2018) A Liquid-Metal-Based Magnetoactive Slurry for Stimuli-Responsive Mechanically Adaptive Electrodes. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1802595. <https://doi.org/10.1002/adma.201802595>
- [9] Nassar, J.M., Hussain, A.M., Rojas, J.P., *et al.* (2014) Low-Cost High-Quality Crystalline Germanium Based Flexible Devices. *Physica Status Solidi (RRL)—Rapid Research Letters*, **8**, 794-800. <https://doi.org/10.1002/pssr.201409257>
- [10] Bartlett, M.D., Kazem, N., Powell-Palm, M.J., *et al.* (2017) High Thermal Conductivity in Soft Elastomers with Elongated Liquid Metal Inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**, 2143-2148. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616377114>
- [11] García, M., Orozco, J., Guix, M., *et al.* (2013) Micromotor-Based Lab-on-Chip Immunoassays. *Nanoscale*, **5**, 1325-1331. <https://doi.org/10.1039/C2NR32400H>
- [12] Wang, X., Zhang, Y., Guo, R., *et al.* (2018) Conformable Liquid Metal Printed Epidermal Electronics for Smart Physiological Monitoring and Simulation Treatment. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **28**, Article ID: 034003. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aaa80f>
- [13] Dickey, M.D. (2016) Liquid Metals for Soft and Stretchable Electronics. In: Rogers, J., Ghaffari, R. and Kim, D.H. Eds., *Stretchable Bioelectronics for Medical Devices and Systems*, Springer, Cham, 3-30. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28694-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28694-5_1)
- [14] Yuan, B., He, Z.Z., Fang, W.Q., *et al.* (2015) Liquid Metal Spring: Oscillating Coalescence and Ejection of Contacting Liquid Metal Droplets. *Science Bulletin*, **60**, 648-653. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0751-x>