

# 低 MHD 效应的双液相混合流态氚增殖剂研究

徐 坤<sup>1</sup>, 张丽霞<sup>2</sup>, 李俊格<sup>1</sup>, 王 波<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 新能源材料与技术研究所, 北京 100124)

(2. 中国航天科工集团 201 研究所第三实验室, 北京 100863)

**摘 要:** 利用液态金属 GaInSn 合金实验模拟锂基液态氚增殖剂的流体行为, 与模拟液态弥散绝缘相的淬火油复合, 形成流态氚增殖材料。制备出了一种低电导率特征的金属流体, 液态金属 GaInSn 合金和液态弥散绝缘相淬火油混合成新型流体。研究了磁场、混合比例、温度对其粘度的影响规律, 测试了流体的电导率随加入态弥散绝缘相淬火油的变化。结果表明: 当磁感应强度超过一定数值后, 全液态金属的粘度显著大于添加淬火油复合材料的粘度, 说明添加淬火油能有效降低磁流体效应, 并且在强磁场下, 淬火油复合材料将具有更低的流动阻力; 电导率随淬火油的增加近似呈现指数型下降; 流态氚增殖剂电导率在静置一段时间后会突然增大, 随后在新的电导率水平再次趋于稳定。如果将其重新超声搅拌, 则可再次恢复到最初电导率, 这说明实际应用时可循环使用。

**关键词:** 液态金属; 磁流体; 电导率; 弥散; 绝缘相

中图分类号: TL28

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)12-4164-07

随着社会经济的快速发展, 煤炭、石油等不可再生资源的消耗导致越来越严重的环境问题。核聚变能源以其安全、清洁、燃料资源丰富等优点成为未来的首选能源<sup>[1]</sup>。在聚变反应堆中, 巨大的能量是由氘(D)和氚(T)核的核聚变产生的。氚是 D-T 聚变反应堆的燃料之一, 在地球上非常丰富。然而, 氚由于其放射性(半衰期 12.3 年), 因此氚在自然界中含量稀少, 需要锂基材料用中子辐照产生<sup>[2-4]</sup>。为了使 D-T 聚变反应消耗的氚通过其产生的中子与含锂材料反应得到补偿以实现聚变堆“氚自持”, 通常在聚变堆或聚变-裂变混合堆中设计有氚增殖包层, 含锂材料是包层中重要的产氚材料, 即氚增殖剂。氚增殖剂分为液态和固态 2 种, 液态氚增殖剂主要为液态锂及液态锂合金, 如 Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>、Li<sub>2</sub>BeF<sub>2</sub>、Li<sub>25</sub>Sn<sub>75</sub> 等<sup>[5-6]</sup>。常用的固态氚增殖剂材料有硅酸锂(Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>)、钛酸锂(Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>)、酸锂(Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>)和氧化锂(Li<sub>2</sub>O)等<sup>[7-10]</sup>。

液态氚增殖剂具有高氚增殖比、锂原子含量高、无需中子倍增剂、无辐照损伤、氚输运和导热及载热集于一体、包层结构简单的优点<sup>[11]</sup>。然而液态氚增殖剂存在致命性问题, 磁流体动力学效应(magnetohydrodynamics, MHD)就是其中的关键问题之一, 即导电的流体在磁场中运动时会产生感应电动势, 进而产生感应电流, 感应电流与磁场相互作用产生反方向的洛伦兹力, 阻碍流体

运动, 即 MHD 效应出现<sup>[12-13]</sup>。MHD 效应形成巨大的流动阻力, 严重影响液态氚增殖剂的流动特性, 并且腐蚀包层结构材料。而固态氚增殖剂具有高化学稳定性、安全性、无腐蚀性及无磁流体效应的优点<sup>[14-15]</sup>。但其存在的问题包括锂密度较低、氚释出和传热性能较差、氚输运载气通道阻塞以及包层结构复杂等。

为了解决液态和固态增殖剂的问题, 本研究制备了一种低电导率特征的新型流态氚增殖剂, 解决了液态金属增殖剂面临的强 MHD 效应问题和固态氚增殖剂的释氚和传热问题。新型流态氚增殖剂主要是通过液态金属基体与液态弥散绝缘相的复合, 形成一种可以流动的氚增殖剂双相复合材料。目前许多研究人员采用 GaInSn 合金开展磁流体压降研究: 在液态金属流体的磁流体物理学研究方面, 美国加州大学 Abdou 教授团队<sup>[16]</sup>以液态金属 GaInSn 为流动介质, 开展了大量实验和数值研究, 研究表明在磁场的作用下, 液态金属 GaInSn 会受到 MHD 阻力的影响; Platadis 等<sup>[17]</sup>开展了强极向磁场对 GaInSn 液态金属影响的试验研究, 结果表明在流体出口分布均匀的前提下能够实现稳定的液态金属流动; 核工业西南研究院基于已建成的液态金属回路开展了液态金属 GaInSn 在平板和曲线板面试验, 表明磁场存在会促进 GaInSn 与固壁的润湿<sup>[18]</sup>。综上所述采用液态金属 GaInSn 合金模拟液态锂是合理且依据的。之前探讨了液态金属

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51571003)

作者简介: 徐 坤, 女, 1992 年生, 博士, 北京工业大学新能源材料与技术研究所, 北京 100124, E-mail: xukun188@emails.bjut.edu.cn

基体与固态弥散绝缘微粉复合材料的情况,证明了固态弥散绝缘相的掺入可显著改善液态氚增殖剂在强磁场下的流动性。这样的液固两相混合而成的流态氚增殖材料既可抑制现有的液态金属或熔盐氚增殖剂的磁流体动力学阻力效应,又可以消除固体氚增殖材料氚释出效率低、传热性低、易碎以及锂挥发造成载气通路阻塞等问题。本研究则进一步探讨了掺入液态弥散绝缘相的情况。以淬火油为液态弥散绝缘相,并且淬火油随温度升高粘度降低,这有利于制备的流态氚增殖剂在高温时流动性好,有利于氚运输。利用液态金属 GaInSn 合金<sup>[19-22]</sup>试验模拟锂基液态氚增殖剂的流体行为,与液态弥散绝缘相复合,形成流态氚增殖材料。利用磁场粘度测试装置和电导率测试仪,重点研究了淬火油的添加量对复合材料电导率和在磁场中粘度的影响规律。

### 1 实 验

首先将一定体积的淬火油(恒鑫 THIF-511)加入到含有液态金属 GaInSn(镓 68.5%, 铟 21.5%, 锡 10%)的烧杯中,然后利用细胞粉碎机在功率为 800 W 时作用 20 min,让淬火油充分分散并与 GaInSn 合金混合。经过细胞粉碎机破碎,然后将混合液体进行 30 min 搅拌。经过粉碎和搅拌,形成均匀的流态氚增殖剂。

磁场粘度测试装置参考 Mctague 等人<sup>[23]</sup>测试铁磁流体粘度随外加磁场的变化规律而搭建的实验装置,可测量不同磁感应强度下的粘度。如图 1 中所示毛细管处于磁场中,外加磁场由励磁线圈产生并可调节,目前本装置可达到的最高磁感应强度为 0.2305 T。粘度计采用标准平氏粘度计,通过测量一定体积的液体在自身重力作用下流经毛细管所需的时间,根据粘度的相对测量公式

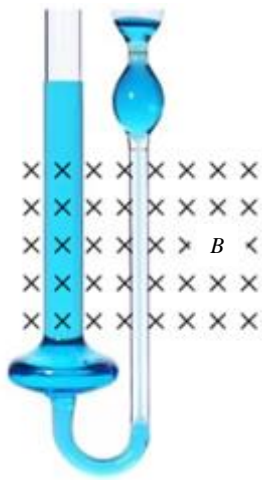


图 1 磁场粘度测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic field viscosity measuring device

计算运动粘度( $\eta$ )<sup>[24]</sup>。其计算公式如下:

$$\eta = \frac{\pi R^4 g h}{8VL} t \tag{1}$$

式中,  $\frac{\pi R^4 g h}{8VL}$  可视为常数  $c$ , 则运动粘度和时间  $t$  成正比, 计算流经时间则可得流体运动粘度。根据实测情况, 本实验中平氏粘度计选用内径为 0.4 mm。

保持外加磁感应强度不变,在温度 20 °C 下,对加入不同体积分数淬火油的流态氚增殖剂的粘度变化进行测试;改变电压测试不同磁感应强度下,不同体积分数淬火油的流体随磁感应强度的变化;测试同一种体积分数淬火油的流体,测试流体在不同温度下、不同磁感应强度下的粘度变化;测试不同体积分数淬火油的流体电导率的变化,从而研究其磁流体效应。

### 2 结果与分析

#### 2.1 淬火油体积占比对流态氚增殖剂粘度的影响

流态氚增殖剂中的淬火油含量用淬火油体积占比来表征: 淬火油的体积与流态氚增殖剂总体积之比, 即:

$$\varphi_1 = \frac{V_1}{V} \tag{2}$$

式中,  $\varphi_1$  是淬火油体积分数,  $V_1$  是固体粉末体积,  $V$  是流态氚增殖剂的总体积。

本研究利用液态金属 GaInSn 合金模拟锂基液态氚增殖剂的流体行为,与淬火油复合,形成流态氚增殖材料。实验测量了温度为 20 °C 时,  $\varphi_1$  分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40% 的流态氚增殖剂的粘度。图 2 为流态氚增殖剂分别在 0、0.0942、0.1351、0.1896、0.2305 T 磁场中的粘度随淬火油体积分数的变化关系。测量结果表明: 本装置条件下, 样品的流动可产生明显的 MHD 效应。无磁场时, 添加淬火油的流态氚增殖剂的粘度明显大于全液态金属的粘度, 并且随着

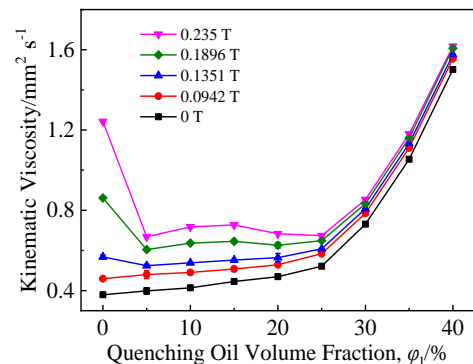


图 2 流态氚增殖剂粘度随淬火油所占体积分数的变化关系

Fig.2 Variations of kinematic viscosity of tritium proliferator in flow state with the volume fraction of quenching oil

淬火油体积分数的增大而增大。产生这种现象的原因可能是：在液态金属中添加了淬火油，淬火油粒子之间以及淬火油与液态金属合金分子之间相互碰撞和摩擦，表现为整个流态氘增殖剂的粘度增大；淬火油分数越大，则碰撞和摩擦损耗的能量越大，粘度增加越大<sup>[25]</sup>；当有磁场作用时，随着磁感应强度的增大，各成分的粘度都普遍随之增大，但其中全金属样品的粘度随磁场增大的幅度最显著，并在 0.2305 T 时远超掺淬火油样品的粘度。这个现象揭示了淬火油的掺入对粘度同时产生了相反的两方面作用：一是增加了流动时的碰撞和摩擦，从而产生增大粘度的作用；二是在磁场中降低了磁流体动力学效应，从而降低磁场中的粘度。结果显示，在 0.2305 T 时含 25% 淬火油的样品具有最低粘度，说明上述 2 种作用在 25% 时达到最佳综合效果。

为了深入了解磁感应强度对 GaInSn 合金加入淬火油后的影响，测试了不同体积分数淬火油在不同磁感应强度下的粘度（见图 3）。结果表明全液态金属和添加淬火油复合材料的粘度都随着磁感应强度单调增大。随着磁感应强度的增加，全液态金属的粘度增加趋势远远快于添加淬火油复合材料的粘度增大速率，且随着淬火油添加比例的增加，粘度随磁场增加的趋势逐渐减缓。可以发现当磁感应强度超过一定数值后，全液态金属的粘度显著大于添加淬火油复合材料的粘度，说明添加淬火油能有效降低磁流体效应，并且在强磁场下，淬火油复合材料将具有更低的流动阻力。从图 3 中可以看出，添加淬火油复合材料的粘度远远小于添加 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 粉末复合材料的粘度，说明添加绝缘流体相比添加 Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 粉末更有利于降低磁流体效应。

### 2.2 温度对流态氘增殖剂粘度的影响

温度是影响流体粘度的重要因素，理论上，粘度是温度的函数，关系一般符合安德雷德通用表达式<sup>[26]</sup>：

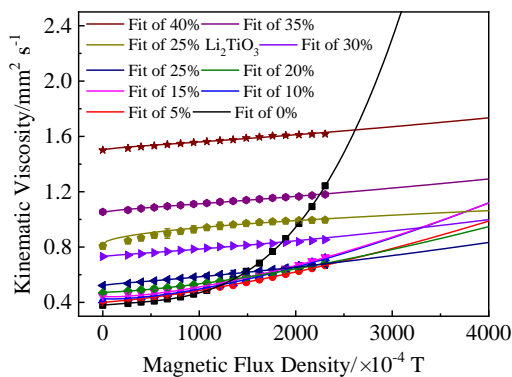


图 3 不同淬火油体积分数下运动粘度和磁感应强度的拟合曲线  
Fig.3 Fitting curves of magnetic kinematic viscosity and magnetic flux density under different quenching oil volume fractions

$$\eta = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中， $A$  是实验常数，在不同的温度下试验求得， $R$  是理想气体常数（8.3144 J/(mol K)）， $T$  是绝对温度， $E$  是粘流活化能，表示分子由一个位置迁移到另一位置所需的能量。一般对于一定的液体， $A$ 、 $R$  和  $E$  都是已知的常数，所以粘度和温度是指数关系。试验中所用流体也应满足这种关系。

实验测量了流态氘增殖剂  $\phi_1$  为 20% 时温度从 293~333 K 时无磁场时粘度的变化关系。如图 4 所示，随着测试温度的升高，粘度呈下降趋势，符合安德雷德粘度与温度关系通用表达式。通过 origin 软件对温度-粘度关系进行回归，利用公式  $y=A \exp(B/x)$  进行拟合得到  $\eta = 0.221 \exp\left(\frac{220}{T}\right)$ ， $R^2=0.994$ 。从拟合的相关系数  $R^2$  来看，高于 0.99，说明相关性较强，比较符合安德雷德温度-粘度关系，能较好地反映出粘度随温度的变化关系。流态氘增殖剂有随温度升高而粘度下降的特性，这主要是因为温度升高导致分子热运动加剧，运动能力增加，分子间摩擦力减小，流动阻力降低，而且范德华力和氢键作用减弱，从而减少了分子间的缠结点，表现为粘度随温度的升高而降低。

为了更深入了解温度对流态氘增殖剂粘度的影响，测试了  $\phi_1$  为 20% 时不同温度在不同磁感应强度下的粘度（见图 5），结果表明随着磁感应强度的增加，不同温度的流态氘增殖剂粘度均升高；并且随着温度的升高，粘度增加趋势减弱。由此说明当温度高时，流态氘增殖剂能有效降低磁流体效应，将有更低的流动阻力。这种现象可能是由于液态金属粒子在温度较高时热运动。在温度较高时，液态金属粒子的热运动比温度低时剧烈，其热运动的惯性也较大，因此当外加磁感应强度相同时，磁场对金属粒子磁矩的定向作用在温度较高时

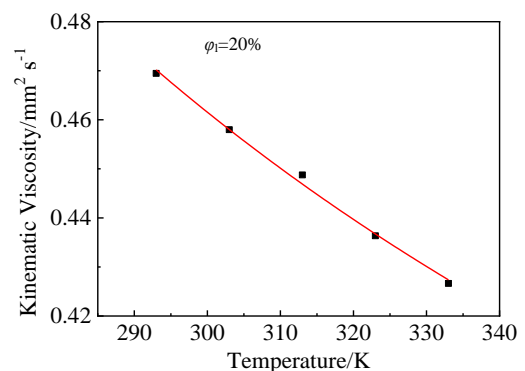


图 4 不同温度下无磁场时流态氘增殖剂粘度的变化  
Fig.4 Variations of kinematic viscosity of tritium breeder at different temperatures without magnetic field

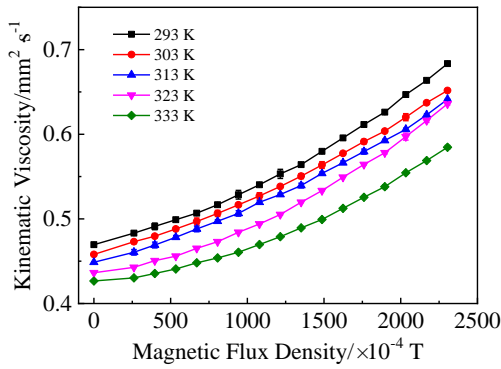


图 5 不同温度下粘度和磁感应强度的关系以及拟合曲线  
Fig.5 Fitting curves of kinematic viscosity and magnetic flux density at different temperatures

相对较难, 从而温度高时流体随磁感应强度变化粘度比温度低时变化幅度小<sup>[27]</sup>。

为了更深入研究温度对粘度的影响, 图 6 为磁场不变时, 粘度增长率随温度变化的变化情况和拟合曲线。粘度增长率  $\psi = \frac{\eta_h - \eta_{i_0}}{\eta_{i_0}}$ , 其中  $\eta_{i_0}$  和  $\eta_h$  分别表示无磁场作用和磁感应强度为 0.2305 T 时流体的粘度, 并对其拟合, 可得:

$$\psi = 0.469 - 1.41 \times 10^{-7} \exp(0.0404T) \quad (4)$$

可以得出, 温度越高其粘度增长率越小, 当达到了一定温度  $T_0$  时, 粘度增长率  $\psi$  将趋于 0, 即温度对粘度的影响几乎为 0。这说明  $T_0$  以后, 粘度的增加情况主要受外加磁场影响较大, 与温度的关系较小。

### 2.3 磁场强度和温度对粘度的作用关系

外加磁场条件下流体粘度  $\eta_H$  可表示为<sup>[28-29]</sup>:

$$\eta_H(P, H) = \eta_{i_0} + K_1 \Delta \eta \quad (5)$$

式中,  $\eta_{i_0}$  为无磁场作用时的流体粘度,  $\Delta \eta$  为外加磁场作用下流体的粘度增量,  $H$  代表磁场强度,  $P$  代表压强。

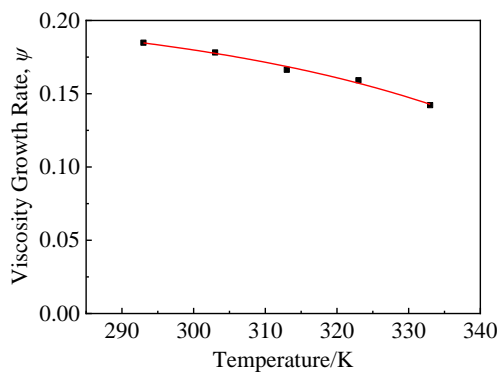


图 6 粘度增长率  $\psi$  随温度变化的拟合曲线  
Fig.6 Fitting curve of changes of viscosity growth rate  $\psi$  vs temperature

此粘度计算公式只考虑到磁场对其影响, 若加上温度对其影响, 则公式 (6) 可修改为:

$$\eta_H(T, P, H) = \eta_{i_0} + (K_H K_T) \Delta \eta \quad (6)$$

式中,  $K_H$  为只考虑磁场时的比例系数,  $K_T$  为只考虑温度时的系数, 可通过实验获得 (本研究中液体压强一致, 因而不考虑压强影响)。当只考虑磁场对其粘度的影响时, 根据磁场变化对粘度变化率的定义另外需要考虑不同体积分数  $\phi_1$ , 可以得出:

$$K_{iH} = \frac{\eta_{iH} - \eta_{i_0}}{\Delta H} \quad (7)$$

其中,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ , 取平均值为其磁场影响系数 (温度取其在室温下 20 °C), 可得:

$$K_H = \frac{K_{1H} + K_{2H} + K_{3H} + \dots + K_{nH}}{n} \quad (8)$$

此外, 还测试了一组磁场和温度都变化的粘度试验, 根据公式 (6) 求得  $K_H K_T = 0.02345$ 。将求得  $K_H$  代入其中, 可得  $K_T = 0.03523$ 。综上可得出, 磁感应强度对粘度的增加起积极作用, 温度对粘度的增加起到的是消极作用, 和得到的实验结果一致; 并且从  $K$  值大小可以看出, 磁感应强度对其影响较大, 温度对其影响较小。

为了更深入研究磁感应强度和温度对粘度的影响, 根据安德雷德粘度-温度通用表达式, 得到粘度和温度的关系式:

$$\ln \eta = \frac{E}{RT} + \ln A \quad (9)$$

利用  $\ln \eta$  作为纵坐标,  $1/T$  作为横坐标, 对曲线进行拟合, 得到如图 7 所示拟合曲线, 从中可计算得到不同磁感应强度下的反应活化能 (见表 1), 发现当磁感应强度越大时, 反应活化能先增大再减小, 在磁感应强度为 0.1487 T 时, 活化能最大, 反应最困难。根据拟合曲线显示当磁感应强度为 0 T 时, 反应活化能最小, 磁感应强度对其影响最小。根据拟合曲线计算, 不同温度的活化能分别为 1.76、1.82、1.95、2.07、2.20 kJ/mol, 与不同

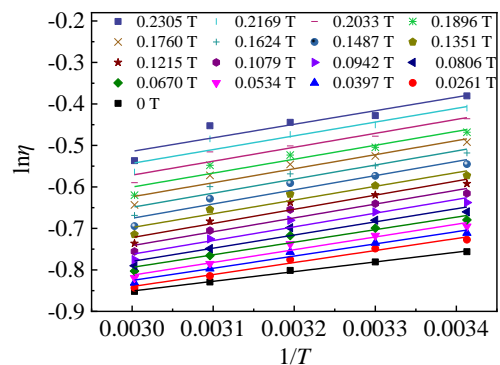


图 7  $\ln \eta$  和  $1/T$  拟合关系分析  
Fig.7 Analysis of fitting relationships between  $\ln \eta$  and  $1/T$



表 1 不同磁感应强度下的反应活化能

Table 1 Activation energy of reaction under different magnetic flux densities

Magnetic flux density/ $\times 10^{-4}$ T	$E_a/\text{kJ mol}^{-1}$
0	1.94
261	2.41
397	2.44
534	2.55
670	2.52
806	2.64
942	2.74
1079	2.77
1215	2.83
1351	2.75
1487	2.85
1624	2.82
1760	2.81
1896	2.79
2033	2.79
2169	2.75
2305	2.71

磁感应强度的反应活化能对比，发现磁感应强度对流体粘度作用更大。

### 2.4 不同比例淬火油的添加量对流态氩增殖剂电导率的影响

绝缘弥散相对 MHD 效应的影响也许可以从它对电导率影响的角度去理解，磁流体压降公式比较复杂，根据 Yang 等人<sup>[30]</sup>的理论推导公式简化如下：

$$\Delta P_{\text{MHD}} = k_p \sigma_f \nu B^2 \quad (10)$$

式中， $k_p$  为常数， $\sigma_f$  为电导率， $\nu$  为流动速度， $B$  为磁感应强度。

电导率  $\sigma_f$  大小与  $\Delta P_{\text{MHD}}$  大小成正比，降低液态氩增殖剂的电导率显然是减小 MHD 的最有效的方法<sup>[31]</sup>。如图 8 所示，实测数据表明，电导率随淬火油的添加而迅速降低，加入淬火油，电导率降低遵从一定的电导率模型。不少学者对具有弥散分布第二相的复合材料电导率进行过研究，导出了电导率的计算公式，如式 (11) ~ 式 (13)：

Maxwell 电导率方程<sup>[32]</sup>：

$$\sigma_M = \frac{2\sigma_2 + \sigma_1 - 2(1-\varphi)(\sigma_2 - \sigma_1)}{2\sigma_2 + \sigma_1 + (1-\varphi)(\sigma_2 - \sigma_1)} \sigma_2 \quad (11)$$

Wiener 公式<sup>[33]</sup>：

$$\sigma_M = \sigma_1(1-\varphi) + \sigma_2\varphi \quad (12)$$

Scarbrick 公式<sup>[34]</sup>：

$$\sigma_M = \sigma_2\varphi\varphi^{\varphi^{-2.3}} C^2 \quad (13)$$

以上公式中  $\sigma_M$  为复合材料电导率， $\sigma_1$  为绝缘体相电导

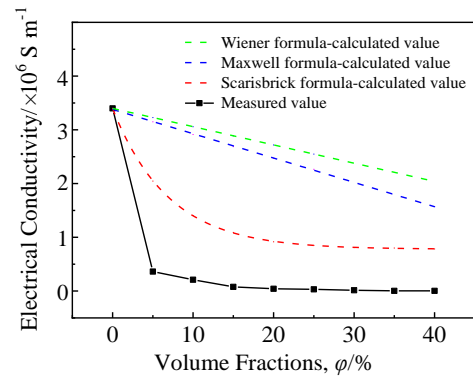


图 8 淬火油体积分数和电导率的变化关系

Fig.8 Relationships between quenching oil volume fractions and electrical conductivity

率， $\sigma_2$  为导体相电导率， $\varphi$  为导体相体积分数， $C$  为公式 (13) 几何因子， $\varphi = 3C^2 - 2C^3$ 。

根据公式 (11) ~ (13) 计算的电导率如图 7 中计算值所示，随淬火油分数增大而减小，但计算值大于实测值。公式 (11) ~ (12) 适用于导电基体中添加弥散绝缘颗粒的情况，公式 (13) 主要应用于绝缘基体中添加导体颗粒的情况，但基本上适用于添加占比较小的情况。而这里是导电基体中添加绝缘流体并且添加量较大的情况，因而通过以上公式计算得到的电导率偏大。通过添加淬火油，流态氩增殖剂的电导率迅速降低，说明添加绝缘淬火油对降低电导率的作用效果远远大于公式 (11) ~ (13) 所描述的效果，近似呈指数关系。本试验中的淬火油掺入量较大，存在大量的淬火油与液态金属的界面，因此界面对载流子的散射起着重要的作用，公式 (11) ~ (13) 仅考虑导电粒子间接触和导电粒子电导率的贡献，未考虑淬火油粒子和界面效应的作用，因而通过以上公式计算得到的电导率偏大。

### 2.5 流态氩增殖剂的稳定性评价

在本研究中提出了采用测量流体电导率随时间的变化来作为判断流体分散均匀稳定性的判据。若流体中不同时间内电导率相等，则说明流体处于稳定状态，若电导率出现变化，则认为发生了沉降。新型流态氩增殖剂是通过液态金属和淬火油混合而成的，可能会逐渐分离，因而可通过测试电导率测试其稳定性，图 9a 为添加不同体积分数淬火油的电导率随时间的变化关系。当  $\varphi_1$  为 0 时，全液态金属电导率无变化，说明无添加淬火油时液态氩增殖剂很稳定。当  $\varphi_1$  为 5% 时，电导率在 60 min 内一直保持稳定然后有一定增长随后又保持稳定，说明淬火油可在 60 min 内和液态金属保持良好的混合状态，超过这个时间后有一定程度的分离，随后保持稳定状态，说明有一定量的淬火油析出，但剩余淬火油可和液态金

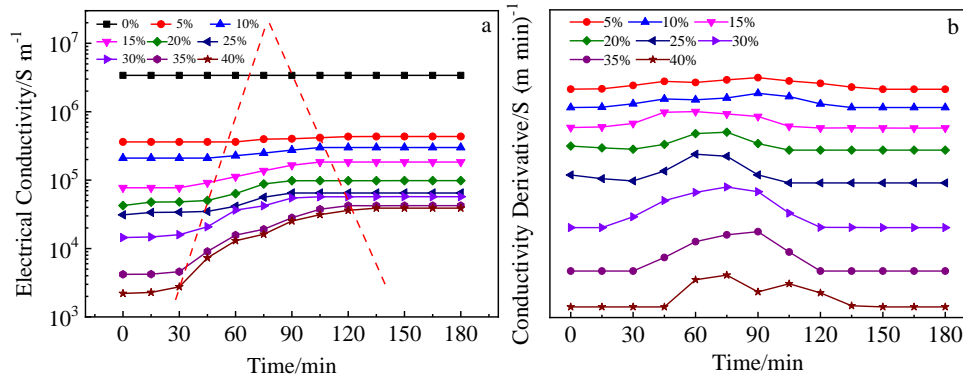


图 9 不同体积分数下电导率随时间的变化关系及电导率导数随时间变化关系

Fig.9 Variations of electrical conductivity with time (a) and conductivity derivative with time (b) under different quenching oil volume fractions

属保持良好的混合状态；而当  $\varphi_1$  大于 15% 时，发现电导率维持 30 min 后有大幅度增加然后保持稳定；而当  $\varphi_1$  大于 25% 时，需要 90 min 以上电导率才保持稳定，说明当掺杂淬火油含量较大时，混合液体不稳定。但将混合液体继续搅拌超声，混合液体可继续达到乳液状态，又能达到最初电导率，这说明实际应用时可循环使用。对电导率求导，得到电导率随时间的变化趋势，如图 9b 所示。当掺杂量比较小时，一阶导数比较平稳，当掺杂量比较大时，一阶导数在 30~120 min 之间形成峰，说明在此时间内电导率变化较大。

### 3 结 论

1) 测试了不同体积分数淬火油在不同磁感应强度下的粘度，可以发现当磁感应强度超过一定数值后，全液态金属的粘度显著大于添加淬火油复合材料的粘度，说明添加淬火油能有效降低磁流体效应，并且在强磁场下，淬火油复合材料将具有更低的流动阻力。添加淬火油复合材料的粘度远远小于添加  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  粉末复合材料的粘度，说明添加绝缘流体相比添加  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  粉末更有利于降低磁流体效应。

2) 测量了流态氙增殖剂  $\varphi_1$  为 20% 时，温度从 293~333 K 时无磁场时粘度的变化关系。随着测试温度的升高，粘度呈下降趋势，符合安德雷粘度与温度关系通用表达式。

3) 通过比较磁感应强度和温度对粘度的作用关系，磁感应强度相比温度对磁场粘度的作用更大，这说明强磁场对复合材料影响更大，添加淬火油有效地降低了强磁场下的磁流体粘度。

4) 添加淬火油，流态氙增殖剂电导率迅速降低；并且当掺杂淬火油含量较小时，流态氙增殖剂比较稳定；当掺杂淬火油含量较大时，流态氙增殖剂不稳定。在放置一段时间后会突然增高，随后在新的电导率水平再次

趋于稳定。如果将其重新超声搅拌，则可再次恢复到最初电导率，这说明实际应用时可循环使用。

5) 液态氙增殖剂中添加淬火油可有效降低磁流体效应，形成在强磁场下具有低流动阻力的流态氙增殖剂，为氙增殖材料的研发提供了一种新思路。

### 参考文献 References

- [1] Rieth M, Dudarev S L, Gonzalez De Vicente S M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 432(1-3): 482
- [2] Raffray A R, Akiba M, Chuyanov V *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2002, 307-311(1): 21
- [3] Roux N C, Johnson C, Noda K *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1992, 194(191): 15
- [4] Roux N, Hollenberg G, Johnson C *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 1995, 27: 154
- [5] Morgan L, Pasley J. *Fusion Engineering and Design*[J], 2013, 88(3): 107
- [6] Wong C P C, Salavy J, Kim Y *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2008, 83(7-9): 850
- [7] Roux N, Tanaka S, Johnson C *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 1998, 41(1-4): 31
- [8] Van der Laan J G, Fedorov A V, Van Til S *et al. Comprehensive Nuclear Materials*[J], 2012, 4: 463
- [9] Li Guangbin(李光彬), Wang Man(王 曼), Tan Guangfan(谭广繁) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(8): 2663
- [10] Johnson C E, Noda K, Roux N *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258-263: 140
- [11] Tas H, Malang S, Reiter F *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1988, 155-157: 178
- [12] Butterworth G J. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1991, 184(3): 197

- [13] Zhang Gaowei(张高伟), Han Wentuo(韩文妥), Wan Farong(万发荣). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 9
- [14] Agostini P, Benamati G. *Fusion Engineering and Design*[J], 1991, 17: 193
- [15] Schiller P, Ehrlich K, Nihoul J. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1991, 181(179): 13
- [16] Narula M, Abdou M A, Ying A *et al. Fusion Engineering & Design*[J], 2006, 81(8): 1543
- [17] Platacis E, Flerov A, Klukin A *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2014, 89(12): 2937
- [18] Zhang Xiujie(张秀杰), Pan Chuanjie(潘传杰), Xu Zengyu(许增裕) *et al. Nuclear Fusion and Plasma Physics*(核聚变与等离子体物理)[J], 2017, 37(1): 52
- [19] Liu Han(刘 韩), Liu Huiqiang(刘辉强), Lin Zuoye(林左叶) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(9): 7
- [20] Li X K, Li M J, Shou Q H *et al. Advanced Materials*[J], 2020, 32(43): 2003 553
- [21] Wang H, Xing W K, Chen S *et al. Advanced Materials*[J], 2021, 33(43): 2 103 104
- [22] Wu P C, Wang Z W, Yao X H *et al. Materials Horizons*[J], 2021, 8(7): 2006
- [23] Mctague J P. *The Journal of Chemical Physics*[J], 1969, 133(51): 10
- [24] Fox J A, Lessen M, Bhat W V *et al. Physics of Fluids*[J], 1968, 11(1): 1
- [25] Rosensweig R E. *Ferrohydrodynamics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 389
- [26] Andrade E N da C. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*[J], 1934, 17(112): 497
- [27] Cheng H, Yeung Y, Tong H. *Progress in Natural Science*[J], 2008, 18(1): 91
- [28] Wang J M, Kang J F, Zhang Y J *et al. Tribology International*[J], 2014, 75: 61
- [29] Liu Y, Liu Z, Wen S Z *et al. Tribology International*[J], 2000, 33(12): 837
- [30] Yang Z Y, Zhou T, Chen H L *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2010, 85(10-12): 2059
- [31] Hua T Q, Gohar Y. *Fusion Engineering and Design*[J], 1995, 27: 696
- [32] Maxwell J C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1981: 295
- [33] Groza J R, Gibeling J C. *Materials Science and Engineering A*[J], 1993, 171(1-2): 71
- [34] Scarisbrick R M. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 1973, 6(17): 2098

## Research on Low MHD Effect of Dual-Liquid Phase Mix Liquid Tritium Breeder

Xu Kun<sup>1</sup>, Zhang Lixia<sup>2</sup>, Li Junge<sup>1</sup>, Wang Bo<sup>1</sup>

(1. Institute of Advanced Energy Materials and Devices, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. No.3 Laboratory, 201 Research Institute, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100863, China)

**Abstract:** Flowable behavior of lithium-based liquid tritium breeder was simulated through the liquid GaInSn alloy. The liquid metal GaInSn and quenching oil combine together to simulate the liquid dispersion insulation phase, thus forming the flowable tritium breeder. A flowable metal with low conductivity characteristics was prepared. The liquid metal GaInSn alloy and liquid dispersed insulation phase quenching oil were mixed to form a new fluid. The influence of magnetic flux, mixing ratio, and temperature on the viscosity of new fluid was studied, and the conductivity change of fluid with the addition of dispersed insulation phase quenching oil was tested. Results show that when the magnetic induction intensity exceeds a certain value, the viscosity of the fully liquid metal is significantly higher than that of the composite material with quenching oil, indicating that the addition of quenching oil can effectively reduce the MHD effect, and the composite material with quenching oil has lower flow resistance under a strong magnetic field. The conductivity is approximately exponentially decreased with increasing the addition of quenching oil. The conductivity of the flowable tritium breeder increases abruptly after standing for a period of time, and then stabilizes again at the new conductivity level. If the breeder is re-mixed ultrasonically, the conductivity will reduce to its original level, suggesting that this material can be recycled in practical applications.

**Key words:** liquid metal; magnetic fluid; electrical conductivity; dispersion; insulation phase

Corresponding author: Wang Bo, Ph. D., Professor, Institute of Advanced Energy Materials and Devices, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: wangbo@bjut.edu.cn