

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

| | | | |
|--------|----------------------|-------|-----|
| 项目名称： | 液态纳米金属芯片液冷技术实验研究 | | |
| 项目负责人： | 乔昱文 | 学号： | |
| 联系电话： | | 电子邮箱： | |
| 专业集群： | 工科实验班 (智能装备) | 辅导员： | 张思秋 |
| 指导教师： | 吴健 | 职称： | 教授 |
| 联系电话： | | 电子邮箱： | |
| 学院及专业： | 能源科学与工程学院 动力工程及工程热物理 | | |

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期：2020 年 11 月 1 日

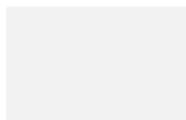
一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

| 姓名 | 性别 | 所在专业集群 | 学号 | 联系电话 | 本人签字 |
|-----|----|-------------|----|------|------|
| 乔昱文 | 男 | 工科试验班（智能装备） | | | |
| 韩博 | 男 | 工科试验班（智能装备） | | | |
| 邸力轩 | 男 | 工科试验班（智能装备） | | | |
| 苏鹏宇 | 男 | 工科试验班（智能装备） | | | |

二、指导教师意见

该项目选题源自于重要的应用，关注于学科前沿的进展对高热流密度芯片”卡脖子”难题提供新的思路。报告调研了相关文献，撰写较规范，时间规划合理，依托团队有已定的科研基础。建议立项！

签 名：



2020 年 11 月 18 日

三、项目专家组意见

批准经费： 元

组长签名： （ 学部盖章 ）

年 月 日

四、立项报告

液态纳米金属芯片液冷技术实验研究

目录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 研究背景与研究意义 | 4 |
| 1.1 研究背景 | 4 |
| 1.2 现状与研究趋势 | 5 |
| 1.3 项目基础 | 7 |
| 2. 研究内容及实施方案 | 7 |
| 2.1 研究内容 | 7 |
| 2.1.1 液态金属散热能力及其限度的探究..... | 7 |
| 2.1.2 纳米金属颗粒对液态金属散热效率的影响..... | 7 |
| 2.1.3 微尺度下液态纳米金属的散热情况探究..... | 8 |
| 2.2 实施方案 | 8 |
| 2.2.1 在介尺度下通过模拟实验探究液态金属的散热能力..... | 8 |
| 2.2.2 液态金属耦合纳米金属颗粒散热能力测定实验.. | 11 |
| 3. 进度安排 | 11 |
| 4. 中期及结题预期报告 | 13 |
| 5. 经费使用计划 | 13 |
| 6. 参考文献 | 13 |

1. 研究背景与研究意义

1.1 研究背景

随着电子工业和半导体行业的迅猛发展，各类电子芯片不断向小型化发展，集成度越来越高。同时，芯片功能的增加和性能的增强使芯片功耗提升。20 世纪 60 年代，英特尔公司创始人之一戈登·摩尔就提出预言：“半导体芯片上集成的晶体管数量每隔 18 个月将增加 1 倍”，也就是著名的“摩尔定律”。图 1 给出了在摩尔定律下单个芯片晶体管数量的发展情况。从现实状况来看，“摩尔定律”已经成功主导了电子工业近 50 年的发展。^[1]

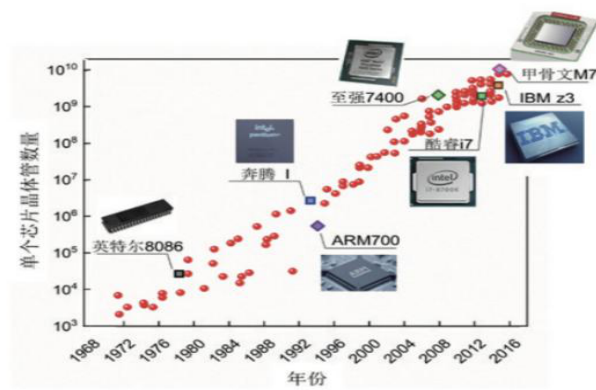


图 1. “摩尔定律”下单个芯片晶体管数量的发展^[1]

然而，芯片高度集成化发展使得芯片的发热问题日益严峻。图 2 给出了过去 20 年时间内高性能微处理器中芯片功率与热流密度发展情况的预测。在芯片工作过程中，部分电能会转化为热量，这些热量如果不能被及时散出，芯片温度将持续升高。一般而言，要维持芯片安全高效工作，其温度应该控制在 85℃ 以下。^[1]高温会导致芯片性能衰退，故障率提高，寿命衰减甚至引发安全事故。对芯片进行有效的冷却对于保障其安全高效运行及延长其使用寿命至关重要。飞机作高速飞行时因气动加热而引起的结构和材料上的“热障”困难，也同样出现在了芯片散热领域。现在，“热障”问题已经成为阻碍高端电子芯片和光电器件向更高性能发展的重要挑战，发展更高性能芯片冷却和热管理技术迫在眉睫。

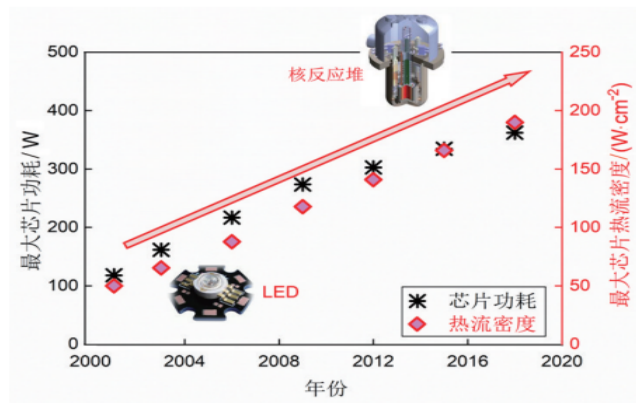


图 2. 高性能微处理器芯片功率和热流密度发展预测^[1]

(注：数据来自 2004 年国际电子制造计划技术路线)

与此同时，空间技术的快速发展，更是对航天电子设备和元器件的高热流密度散热能力提出了要求，如 CCD 相机、激光高度计、光谱仪等。同时，由于其使用环境的特殊性，需要在温度剧烈波动的环境下保持恒定的工作温度，且对散热器有体积和重量上的限制，这些都进一步加大了其散热难度。此外，还有很多电力电子器件或设备同样面临高功率高热流发热问题，如图 3 中所示高功率 LED、聚光太阳能电池、高功率激光芯片、X 射线球管、发动机等。由此可见，高性能冷却技术的发展是保障这些器件安全高效工作和向更高性能发展的重要前提。^[1]

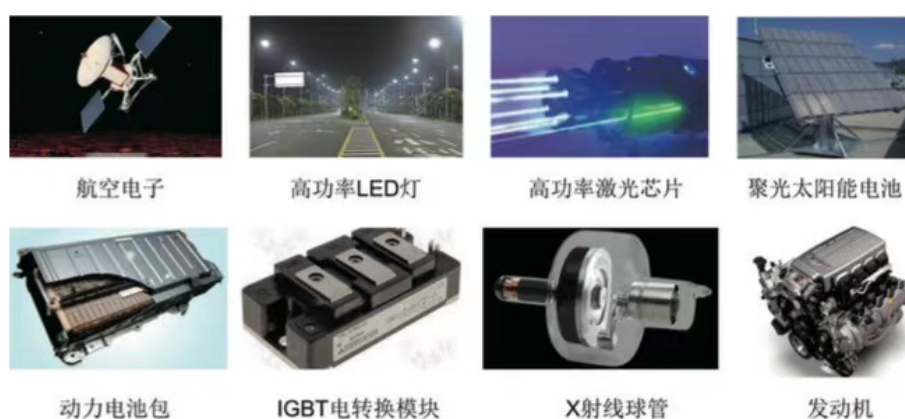


图 3. 典型高热流率器件^[1]

1.2 现状与研究趋势

当前现有的冷却方式分两种：被动散热和主动散热。其中被动散热的代表方式是风冷散热与热传导散热。而主动散热的代表方式就是液冷散热。

(1) 风冷（包括空气自然对流冷却和强制对流风冷）是目前很多低功耗电子器件采用的散热方式，具有简单、可靠、成本低的优势，但其散热能力十分有限。

(2) 热管散热器是一种具有很高导热性能的传热元件，它通过在全封闭真空管内的液体的蒸发与凝结来传递热量。该类散热器大多数为“风冷+热管”性，兼具风冷和热管优点，具有非常强的散热能力。

(3) 液冷散热通过液体在泵的带动下强制循环带走散热器的热量，与风冷相比具有安静、降温稳定、对环境依赖小等优点。而自 1981 年由 Tuckerman 和 Pease 提出以来^[4]，以水为主要冷却物质的微小流道液冷越来越成为研究者们关注的热点，特别是添加了纳米颗粒以强化其传热能力的纳米流体微小流道对流冷却技术。^[1]

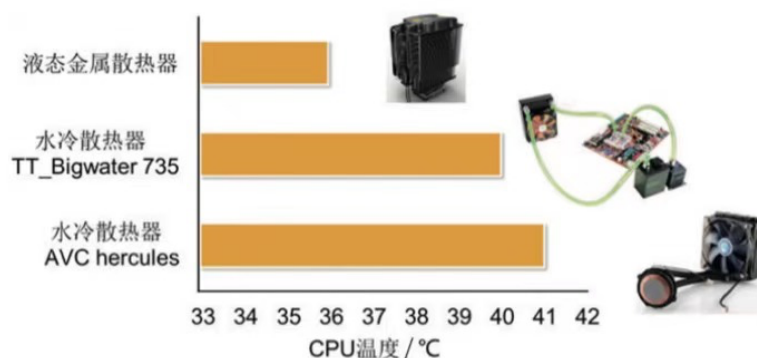


图 4. 液态金属散热器与水冷散热器性能对比^[1]

目前，微小通道液冷用到的冷却工质主要是水。水具有获取容易，物性稳定，与结构材料相容性好等优点。但是，水冷的一个最大的不足在于其热导率低（约 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ），这严重限制了其导热能力。尽管微流道结构可以有效地弥补这一不足，但是会带来一个问题：用于冷却电子芯片的微型散热片（热沉）的流动阻力会急剧增加。通过添加高热导率纳米颗粒来增强水的等效热导率并强化其导热能力，这是目前广泛研究的一种改善方法，但其效果仍然有限。^[3]

作为一类新兴的功能材料，室温液态金属在近年来备受关注，基于液态金属的芯片冷却技术也被广泛研究。液态金属最大的特点在于其热导率高，一般在 $10^1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，是水的数十倍，这使得其具有很好的导热能力。因此，开发基于液态金属的微流道结构技术对于满足高功率密度芯片的散热需求十分重要。图 4 中对比了液态金属散热器与水冷散热器的性能差异。这里所说的液态金属不同于传统的汞及碱金属材料，主要是指镓及其合金（如镓铟合金、镓铟锡合金等）以及铋基合金（如铋铟锡合金），是一类安全无毒的低熔点金属材料，熔点在室温附近。将以镓为代表的室温液态金属引入电子器件冷却是一种观念上的根本性突破，改变了人们对于传统液态金属材料的认识，并由此开启了液态金属在消费电子冷却领域的大门。^[1]

2013 年，美国阿贡国家实验室研制出加速器中子散射源液态金属散热原型机，将液态金属镓引入冷却系统，取代传统的钠钾合金。2014 年，美国国家航空航天局（NASA）将液态金属冷却技术列为未来前沿研究方向。可以看到，这项诞生并发展于中国的技术已经吸引了美国这一科技强国的极大关注，而双方就此展开的竞赛也在近年来越演愈烈，同时也警示着我们需要在此领域继续作出新的突破。^[1]

1.3 项目基础

基于液态金属在电子元件散热领域的成功试验，以及科学家对通过添加纳米颗粒以强化传热能力的纳米流体微小流道对流冷却技术的研究，我们构想将具有高导热率的纳米颗粒与液态金属耦合，以求得混合金属导热率和换热能力的进一步提升，从而得到极大散热的能力。

如果我们可以实现以上设想，则可以有效保障芯片的安全有效运行，并延长其使用寿命，进而为芯片“热障”问题提供新的解决思路，推动高性能芯片冷却和热管理技术的发展。

2. 研究内容及实施方案

2.1 研究内容

2.1.1 液态金属散热能力及其限度的探究

通常情况下，电子设备在工作时温度低于 70°C ，当超过这个限度时，温度每升高 2°C ，系统的可靠性就会降低 10%。^[2] 由于水的导热系数较低，传统的空气冷却和水冷已难以满足高热通量和大功率热管理的需求，所以我们急需开发一种导热性良好的介质来达到更好的散热效果。

本实验计划采用镓铟锡液态金属作为液态金属冷却液，镓铟锡液态金属是一种室温液态金属（RTLM），它结合了流体固有的水力性质和金属的优点。汞和钠钾合金是比较常见的液态金属。与汞和钠钾合金相比，镓铟锡液态金属无毒，无放射性且化学稳定，故选用镓铟锡液态金属作为金属冷却液。

镓铟锡液态金属的导热性大概是水的 30 倍。Miner 和 Goshal^[7] 分析比较了镓铟锡液态金属相对于水管中的水的传热强化效果。结果表明，镓铟锡液态金属的层流换热系数较水增强了 65 倍。^[2] 因此，对液态金属镓铟锡液态金属的散热性能进行进一步研究有一定的重要性。

本小组计划通过实验对液态金属的优良散热能力进行验证，并与水比较，得出液态金属所具有的优势。

2.1.2 纳米金属颗粒对液态金属散热效率的影响

基于张旭东，杨小虎在等人《基于镓铟锡液态金属小型通道的高热通量和大功率热管理的实验研究》一文中的实验结论：1. 通过使用镓铟锡液态金属作为冷却剂，小通道散热器可以实现高热通量（ 300 W/cm^2 ）和大热功率（ 1500 W ）的热管理。2. 热容量热阻是基于镓铟锡液态金属的微通道热性能的重要因素，这是由于镓铟锡液态金属的高导热率和较低的热

容量。3. 在相同的散热能力下，基于镓铟锡液态金属的微通道散热器的压力损失远低于基于水的微通道散热器。^[2]

近期，马坤全等人还首次提出了液态金属纳米流体的概念。^[6]众所周知，更好的热物性和更强的冷却能力是热管理领域永无止境的追求，特别是高热导率的冷却工质更是炙手可热。将高热导率纳米颗粒掺混进液态金属可以进一步提升其热导率和换热能力。可以说，液态金属纳米流体是目前自然界能找到的拥有最高热导率的“终极冷却剂”。这一概念的建立不仅可用于指导基于液态金属的高导热对流冷却工质的研发，也为后来高性能液态金属热界面材料和相变材料的研制提供了指导思路。^[1]

本项目拟通过物理或化学方法，实现纳米金属颗粒与液态金属的耦合，并通过测定具体实验数值来定性确定纳米颗粒和液态金属耦合程度与液态金属散热效率变化的关系。

2.1.3 微尺度下液态纳米金属的散热情况探究

由于计算机芯片尺寸一般不大于 1cm^2 ，所以需将液态纳米金属散热通道的尺寸缩小到微尺度才能实现其实际意义。微通道散热器的传热表面积大，水力尺寸小，可以获得大的对流传热系数。由于微通道散热器的通道较小（其特征尺寸为几十微米到几百微米），因此使用其作为散热结构可以获得更大的传热效果。

塔克曼和皮斯首先提出了微通道冷却技术，实现了 $790\text{W}/\text{cm}^2$ 的散热能力，且芯片的最大温升控制在了 71.1°C ^[4]。并且通过使用有利的几何形状，可以进一步提高微通道冷却的传热能力^[1]。另外值得一提的是，镓铟锡液态金属在微通道中相对于水的优势更加突出。与基于水的微通道冷却相比，基于镓铟锡液态金属的微通道冷却可以获得更大的传热增强，压力损失也要低的多。然而在微尺度下也会出现一些新的问题，如虽然压力损失比水低，但在较小尺寸下还是会产生较大的压力损失，从而导致较大的泵浦功率耗散。^[2]

本部分实验计划验证上述在微通道中镓铟锡液态金属的优势，探究镓铟锡液态金属与纳米金属颗粒耦合后在微尺度下的散热效果，并且探寻上文所提及问题的解决方法。

2.2 实施方案

2.2.1 在介尺度下通过模拟实验探究液态金属的散热能力

（1）构建实验台：如图 5 所示组装实验台：连接泵、热源及热沉、散热器，电磁流量计，压力传感器，液冷散热器等仪器设备。

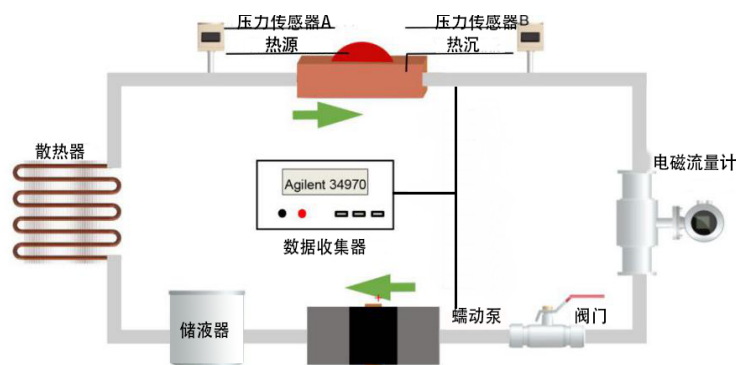


图 5. 测试回路示意图^[2]

设备选取及理由：

- 泵的选取：张旭东等人所使用的电磁泵的流量范围在 0-420 L/h，最大压强 84Kpa，我们所选择的蠕动泵的流量范围和压强满足介尺度实验要求。在 Xia 等人的微尺度热沉散热工作中，液体介质为水。保持热沉温度为 45℃时，最大压降为 60Kpa。此泵能提供的最大压强为 200Kpa。
- 电磁流量计的选取：相比于涡轮流量计，电磁流量无压力损失，测量范围大，能够满足更多的测量需求。我们所选用的流量计最大 1700 L/h 的量程也与泵的选择相匹配。缺点是测量的最小流量为 140 L/h，因此实际使用时可以适当调高流量。考虑到蠕动泵泵能够提供较大压强的特点，这点应该可以满足。
- 压力传感器的选取：压力传感器在热沉进出口处安装，用来测压差。根据张旭东等人^{错误！未找到引用源。}的测量，在介尺度下，泵够提供的压力大约是 0-100 Kpa，因此在入口处流量计的量程范围需要在 0- 100 Kpa. 根据张旭东等人^{错误！未找到引用源。}的介尺度结果，镓铟锡液态金属在热沉中的压降在 8Kpa 左右，而水的压降在 2Kpa 左右。因此，出口压力计的量程需选择在 0-90Kpa. 目前此压力计的范围可以满足需求，但是如果需要提高精度，可能需要根据届时测量结果重新购买搭配。

根据 Tuckerman^[4]等人微尺度下的结果，水在微通道的压降大约是 218Kpa。此压力计无法满足，届时可能需要补充购买。

不一次性采购的原因是目前液态金属在微尺度下所需要的压强尚不清楚，如果盲目买大量程，可能会精度不达标。

- 微通道散热器的设计：根据杨小虎等人对比不同流动结构下压降和热源温升的实验数据，我们选择如下结构散热器：

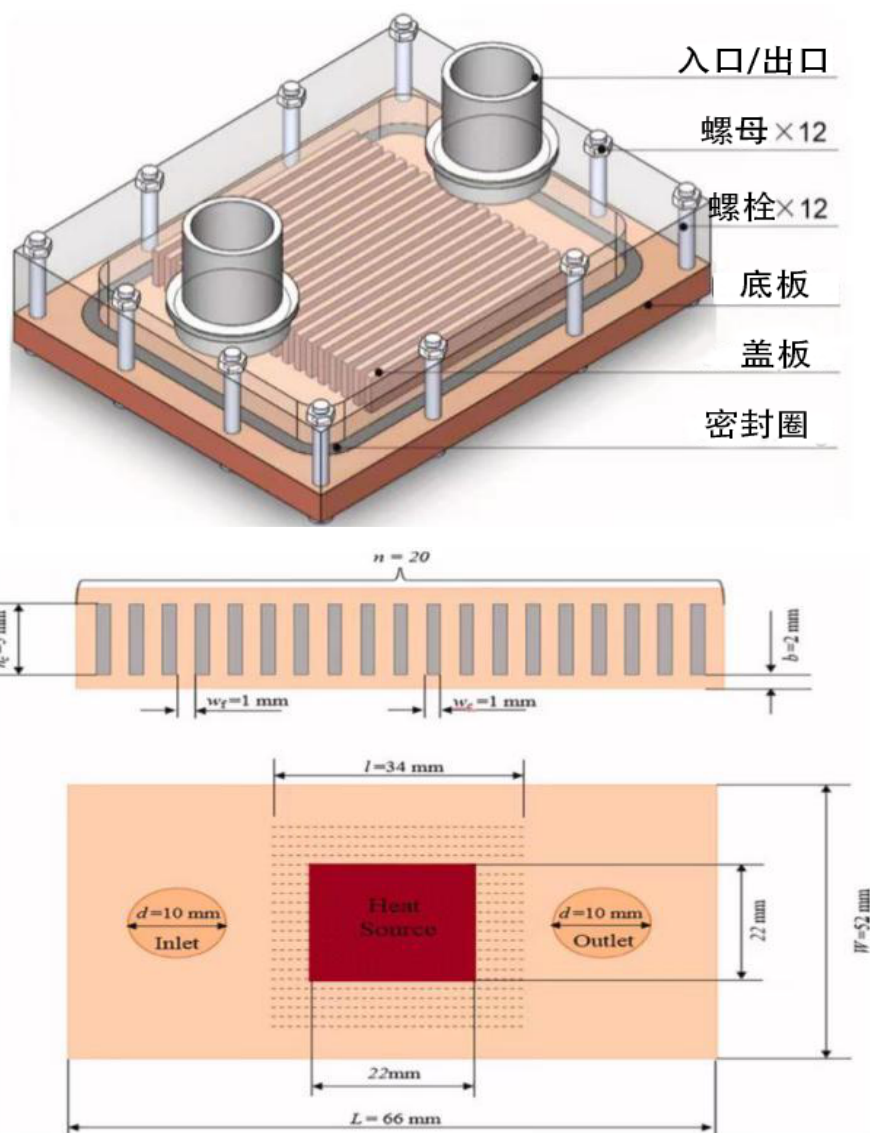


图 6. 微小通道散热器的结构与尺寸^[2]

- 液冷散热器设计：根据所能购得的水浴锅尺寸，决定设计以下液冷散热结构：通过蛇形通道使液态金属与冷却液充分均匀接触，并通过电子控温装置控制出口液态金属温度（在 20–80℃ 左右），从而保证流经热沉的液态金属的温度稳定。

（2）实验原理及流程：先以水为导热介质进行实验，测试实验台组装是否完善。确认无误后再使用蠕动泵提供动力，使液态金属流过热沉，通过压力传感器和热电偶测温器测定其压降和热源的温升，再流经散热器使液态金属温度降低到初始温度，多次实验得出若干组数据。

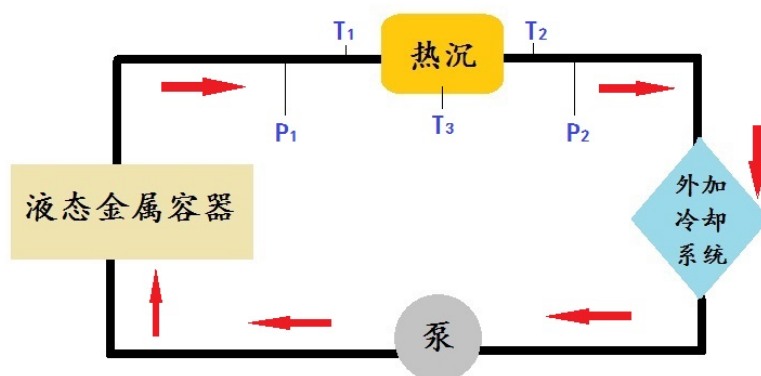


图 7. 实验装置示意图

(3) **得出结论：**通过温升来计算液态金属单位接触面积的散热数值。对得出的多组数据进行分析比较，最终得出结论。

2.2.2 液态金属耦合纳米金属颗粒散热能力测定实验

(1) 液态金属与纳米金属颗粒的耦合

研究表明，想要将纳米颗粒掺混进液态金属并不是一件容易的事。液态金属密度大，表面张力大，且基本与非金属材料不亲和，很难实现掺混。经过多年的探索，汤剑波等学者^[5]发现，液态金属可在溶液环境中借助电场或化学物质的激励作用将微纳尺度金属颗粒吞入体内，如同细胞生物学界的胞吞效应，且吞噬效率极高。这一发现开辟了一条构筑高性能纳米金属流体材料的快捷途径。^[1]

本项目拟通过模拟还原以上方法，验证其实验可行性。并通过测定实验具体数值来确定纳米颗粒和液态金属耦合程度与液态金属散热效率变化的关系。

(2) 混合态金属散热能力实验测定

本部分实验设计同介尺度下散热能力测定实验设计相同，通过同一组实验台来测定不同条件下的压降和温升情况。接下来绘制表格，与纯液态金属组数据形成对比，从而判断混合态液态金属散热能力的变化。

3. 进度安排

2020 年 11 月 完成立项报告及 PPT，采购设备，进行初期准备

2020 年 12 月 开始实验，分析数据，定期总结并改进

2021 年 1 月 继续实验，积累数据

2021 年 2 月 处理实验数据，小组讨论，总结创新

2021 年 3 月 优化实验设计，积累数据

2021 年 4 月 准备中期报告及 PPT，根据中期目标及阶段成果改进方案，适当调整

2021 年 5 月 继续实验，分析处理数据，检验改进方案

2021 年 6 月 根据阶段成果进行微调，反复实验，研究数据，步入收尾阶段

2021 年 7 月 准备结题报告及 PPT, 总结已有的成果以及亟待解决的问题和大体思路，并

对该项目未来发展做出畅想。如果有机会继续进行该项目，则设立下一个预期目标

详细安排见下表：

| 项目进度表 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----|--------------|-------------------------|---------------------------|----|----|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|------|
| 项目小组组长：乔昱文 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 阶段 | 序号 | 内容 | 输出 | 时间（2020年10月21日-2021年7月1日） | | | | | | | | | | | | 责任人 |
| | | | | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | |
| 项目初期：实验设计与实验台筹备 | 1 | 联系导师，拉取项目 | 立项目标，课题组成立 | ▲ | | | | | | | | | | | | 乔昱文 |
| | 2 | 成立项目小组 | 项目小组成员名细 | ▲ | | | | | | | | | | | | 乔昱文 |
| | 3 | 商讨项目规划 | 总体规划 | ▲ | | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 4 | 可行性分析与讨论 | | ▲ | | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 5 | 文献分析 | 实验目标参数 | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 6 | 确定实验台搭建所需设备 | 初始设备清单 | | ▲ | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 7 | 规划预算并购买设备 | 设备价目表 | | ▲ | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 8 | 相关理论知识学习 | | | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | | 全体成员 |
| | 9 | 撰写立项报告 | 立项报告及PPT | | ▲ | | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 10 | 立项答辩 | | | ▲ | | | | | | | | | | | 乔昱文 |
| 项目中期：实验进行，数据采集与对比，实验改进 | 11 | 实验台搭建 | 成型实验台 | | ▲ | ▲ | | | | | | | | | | 全体成员 |
| | 12 | 实验进行与数据测量 | 实验数据（温度，压强，流速，热效率等） | | | | ▲ | ▲ | | | | | | | | 全体成员 |
| | 13 | 分析数据，总结改进 | 优化后实验方案 | | | | | ▲ | | | | | | | | 全体成员 |
| | 14 | 实验进行与数据测量 | 实验数据（温度，压强，流速，热效率等） | | | | | | ▲ | ▲ | | | | | | 全体成员 |
| | 15 | 分析数据，总结改进 | 优化后实验方案 | | | | | | | ▲ | | | | | | 全体成员 |
| | 16 | 准备中期答辩 | 中期答辩PPT | | | | | | | ▲ | | | | | | 全体成员 |
| | 17 | 中期答辩 | | | | | | | | | ▲ | | | | | |
| | 18 | 实验进行与数据测量 | 实验数据（温度，压强，流速，热效率等） | | | | | | | | ▲ | ▲ | | | | 全体成员 |
| | 19 | 分析数据，总结改进 | 优化后实验方案 | | | | | | | | | ▲ | | | | 全体成员 |
| 项目后期：汇总数据，得出结论 | 20 | 进入收关阶段，停止实验 | 统计所有实验数据，总结分析，绘制数学与物理模型 | | | | | | | | | | | ▲ | | 全体成员 |
| | 21 | 结题报告撰写，总经费统计 | 经费汇总报告 结题报告 | | | | | | | | | | | | ▲ | 全体成员 |
| | 22 | 结题答辩 | | | | | | | | | | | | | ▲ | 全体成员 |
| 编制：乔昱文 | | | | 审查：全体成员 | | | | 核准：全体成员 | | | | | | | | |

4. 中期及结题预期报告

中期预期报告：温控系统能在外加条件下达成温控，当单一热源在恒定温度下产热，并且稳定地产热时能够完成对热源的温控。温控温度可以由实验者自由控制，且通过冷却流出液态金属来实现液金的循环利用。项目设备的体积可能依旧保持在宏观水平，需要先完成实验室层面上的宏观操作，并完成大部分的数据采集。

结题预期报告：在完成前中期目标的条件下，温控系统可以在不稳定热源条件下实现温控的自由调节，将项目设施向小型化，集成化，模块化，自动化发展。以前中期积累的数据为基础，加入外接电子系统的控制，完成在实验室条件下的小型化实际设备应用。

5. 经费使用计划

| 序号 | 名称 | 单价 (/元) | 数量 (/台) | 总价 (/元) | 用处简述 |
|----|--------|---------|---------|---------|-------------------------------------------|
| 1 | 蠕动泵 | 7300 | 1 | 7300 | 为液体在管道中流动提供动力，确保其顺畅流动以达到理想的散热效果 |
| 2 | 电磁流量计 | 1505 | 1 | 1505 | 测量监控管道中的液体流量，以便记录数据和调节流量 |
| 3 | 压力传感器 | 300 | 2 | 600 | 安装在热沉进出口，测量压差 |
| 4 | 液态金属 | 3800/kg | 待定 | 待定 | 实验的主体研究对象，用于为带走热源产生的热量使其温度维持在稳定工作的范围内 |
| 5 | 液冷散热器 | 待定 | 待定 | 待定 | 将流经热沉已经升温的液体冷却到原来的温度，确保液冷系统正常运行 |
| 6 | 微通道散热器 | 3000 | 待定 | 待定 | 为液态金属提供流动的通道、载体，作为媒介与热源相接触辅助液态金属带走热源产生的热量 |

6. 参考文献

[1]杨小虎，刘静，液态金属高性能冷却技术：发展历程与研究前沿，科技导报 2014，36（15）

[2]Xu-DongZhang, Xiao-HuYang, Yi-XinZhoua,WeiRao, Jian-YeGaoa,Yu-JieDing,

Qing-QingShua,JingLiu, Experiment investigation of galinstan based mini channel cooling for high heat flux and large heat power thermal management, Energy Conversation and Management 185（2019）248-258

[3]杨小虎，谭思聪，刘静．液态金属小流道热沉流动与传热性能研究[J]．工程热物理学报，2019，40(04):916-925.

[4] Tuckerman DB, Pease R. High-performance heat sinking for VLSI. IEEE Electr Device L 1981;2:126–9.

- [5] Tang J B, Zhao X, Li J, et al. Liquid metal phagocytosis: Intermetallic wetting induced particle internalization[J]. *Advanced Science*, 2017, 4(5). <https://doi.org/10.1002/advs.201700024>.
- [6] Ma K Q, Liu J. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(15): 4722-4729.
- [7] Miner A, Ghoshal U. Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants. *Appl Phys Lett* 2004;85(3):506–8.