

参赛队员姓名： 陈昭融 余星瑶 胡馨元

中学： 南京市金陵中学

省份： 江苏

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 蒋霖峰 熊波

论文题目： 葡萄 Plasma——燃烧还是放电

葡萄 Plasma——燃烧还是放电

陈昭融 余星瑶 胡馨元

摘要

将两颗合适大小的葡萄组成二聚体放进微波炉中，会激发出来炫酷的 plasma 现象。2019 年，加拿大康考迪亚大学的几位科学家利用 Mie 共振理论解释了这种 plasma 现象产生的原因。但是，在我们对于该课题的实验探索过程中，**我们发现了一些神奇的现象，并得出了一些和他们不尽相同的结论。**

现有的研究认为，Mie 共振的相互作用，使得二聚体连接处形成一个很强的电场局域点；由于水在工作波长下具有一定的吸收作用，而这种吸收作用在强局域点下会被放大，因此，二聚体连接处的温度将迅速提升，从而燃烧起来。

但是，在我们的预实验中。我们利用改造过后的家用微波炉，在复现 plasma 现象的同时，观察到了一个非常独特的现象：**在出现 plasma 的同时，伴随有非常清晰的“滋滋滋”类似于电火花声音。**对于这一现象目前还没有文献报道。我们猜想，**plasma 现象本身也有可能是一种高压放电效应。**当在二聚体连接处形成强局域点时，此处对应的电场强度也将迅速提高，当达到可以击穿空气的阈值时，即可形成电火花。带着这样的疑问，我们展开了一系列实验探索。

首先，我们利用时域热场分布分析，引入了时间的测量，得到了 plasma 产生过程中任一时刻葡萄上的温度场分布，从而明确了 plasma 现象与微波炉的正常加热模式是两种物理机制，其具有明显的时间先后顺序。同时我们还发现，利用 plasma 现象，微波炉的加热效率有一个明显提升，可以实现加热两杯水比加热一杯水还快的神奇现象。

随后，我们精心设计了几个控制变量实验进行探索。其中，通过葡萄二聚体之间的距离，我们发现在 $gap = 1\text{ mm}$ 的情况下（量级估计不可能发生放电），依旧能产生 plasma 效应，这证明了燃烧现象的存在。同时，通过探索葡萄连接处导电性的作用，我们发现界面的导电性对于 plasma 现象能否产生至关重要，这证明了放电效应也是对其有贡献的。为了进一步验证这一结论，我们又对其他多种水果进行了尝试和优化，其和我们的理论预估吻合十分良好。最终，我们解答了我们最初的困惑，并在原有文献模型的基础上进行了适当的修正，得到了 plasma 完整的理论模型，即在 plasma 现象之中，既有燃烧的机制，又有放电的机制。随后，我们也总结出来产生这种现象的两个要素：**第一：需要小体积的燃烧质（燃烧所需）；第二，需要有稳定的小距离 gap 存在（燃烧、放电共同需要）。**

我们的发现完善了 plasma 产生的理论，这是本论文最大的创新之处。

在研究的最后，我们根据该理论做了有趣的试探性推广。我们发现冰葡萄似乎能够同时满足上述的两个要素，这是否意味着冰也能够产生 plasma？我们饶有兴趣地将该实验称之为冰与火之歌，并最终成功在微波炉中观察到了这一现象。在现有研究的基础上，我们的研究为葡萄 plasma 现象的物理本质给予了更为全面的解释和说明，也为后续的研究带了的更多的启发。

关键词：葡萄二聚体， 等离激元， Mie 共振， 红外热成像

诚信声明

丘成桐中学科学奖-学术诚信声明

本参赛团队郑重声明：

1. 参赛团队提交的参赛队员和指导老师信息完整且属实无误。
2. 所提交的研究报告是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
3. 尽本团队所知，除文中加以标注和致谢中所罗列的内容外，研究中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，不存在代写或其他违规行为。

以上，若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任，并服从丘成桐中学科学奖组织委员会的裁决。

参赛学生（签字）：

徐昆 潘 楠 胡馨元

本校指导老师（签字）：

陈 颖

学校名称（加盖学校或教务处公章）



外校指导老师（签字）：

单位名称（加盖单位公章）：

熊波

浙江大学信息与电子工程学院

（单位盖章）

信息与电子工程学院



目录

摘要.....	2
学术诚信声明目录.....	3
目录.....	3
1 引言与背景.....	5
2 预实验——葡萄激发 Plasma.....	5
2.1 改造家用微波炉.....	5
2.2 成功观测到 Plasma 现象.....	7
3 研究基础与时域热场分布分析.....	9
3.1 已有研究基础与验证.....	9
3.2 葡萄二聚体的时间响应.....	10
4 控制变量实验验证.....	14
4.1 改变葡萄二聚体的距离.....	14
4.2 导电性的作用.....	18
4.3 众多水果的尝试.....	20
4.4 完备的理论模型.....	22
5 冰与火之歌——ice plasma 存在的证明.....	23
5.1 冰球实验.....	23
5.2 冰葡萄实验.....	24
6 总结与讨论.....	25
参考文献.....	26
附录.....	27
致谢.....	27
参赛队员信息.....	31
指导老师信息.....	32

1 引言与背景

等离子体 (plasma) 是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态, 常被视为是物质的第四态, 即等离子态[1]。等离子体是由克鲁克斯在 1879 年发现的, 1928 年美国科学家欧文·朗缪尔和汤克斯 (Tonks) 首次将“等离子体” (plasma) 一词引入物理学, 用来描述气体放电管里的物质形态[2]。在自然界里, 不论是炽热的火焰, 还是夺目的闪电, 以及绚烂的极光等, 都是等离子体作用的结果。

但是, 等离子体也有可能就在我们每一个人的家中。当一对葡萄半球被放置在微波炉中并暴露在强烈的微波辐射下时, 其同样会激发非常强烈的 plasma。这一独特的现象近些年来一直饱受关注, 并被许多科学博客, 甚至是视频 up 主所重复出来。2019 年, 加拿大康考迪亚大学的几位科学家通过他们发表在 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 上的一篇文章[3], 详细解释了葡萄 plasma 现象产生的物理原因时源于 Mie 共振, 为这一现象的研究更是增加了热度[4-6]。

看到这样的新闻后, 我们对于这一现象产生了浓厚的兴趣, 我们想要自己也尝试将这种葡萄 plasma 现象在自己家中实现出来。同时, 期待能够有一些新的发现和思考。

2 预实验——葡萄激发 Plasma

为了验证葡萄 Plasma 这种现象是真实存在的, 且能够在家用微波炉中激发出来等离子体, 我们在家中搭建了实验平台, 并进行了初步的预实验验证。详细的平台架构、测量过程以及初步的实验现象如下。

2.1 改造家用微波炉

如图 2.1 左所示, 为所购买家用微波炉型号: 其使用波长为 122 mm、频率为 2450 MHz 的微波, 且功率由 100 w 到 900 w 可连续调节 (调节步长 100 w), 加热时间可由 1s 到任意时间 (调节步长 1 s), 有利于实现之后的控制变量实验和进一步探索。

同时其门由钢化玻璃与防辐射金属网组成, 且内置照明光源。当微波炉处于工作状态时, 门必须关闭, 但是此时内置照明光源打开, 透过金属网的小孔, 可以模模糊糊的观察到内部的状态。为了更好的观察到微波炉内的情况, 我们将微波炉中的防辐射金属网挖出 2 cm x 2 cm 的小孔, 即可以清楚的拍摄到微波炉内的葡萄, 其效果如图 2.1 右所示。需要说明的是, 由于微波炉工作波长为 122 cm, 所以这种孔径约为工作波长的百分之一, 其对应的辐射泄漏可以忽略不记。



图 2.1 (左) 家用微波炉型号。(右) 微波炉改造：金属网上打孔以方便观察。

在实际的测量过程中，我们利用如图 2.2 所示的手持式云台和相机，来实现 60 fps 的 1080p 视频拍摄。通过视频拍摄，我们可以实时记录葡萄在微波炉中加热过程中的现象。随后，我们可以将视频导入电脑软件中，对图像进行进一步分析。



图 2.2 手持式云台及组合拍摄系统。

我们猜想葡萄的尺寸可能会对实验现象有很大的影响，因此我们购买了一系列尺寸大小不同的葡萄，如图 2.3 左所示，这样可以很好的避免实验误差对于现象能否发生的影响。根据背景介绍中相关视频以及文献的启发，我们实验中首先选择大小适中的葡萄切开，形成两个半球并组成靠近的二聚体，如图 2.3 右所示，我们测量得到两个半球的直径约为 3.1 cm 和 2.8 cm，这种直径的差别来自于葡萄本身的不对称以及切开时候端面的不对称。在预实验中，我们控制两个半球之间是紧密链接的，甚至是中间还粘连有一层葡萄皮没有切断。而在之后的定量实验中，我们会进一步控制半球之间的距离，以探究距离对于实验现象的影响。

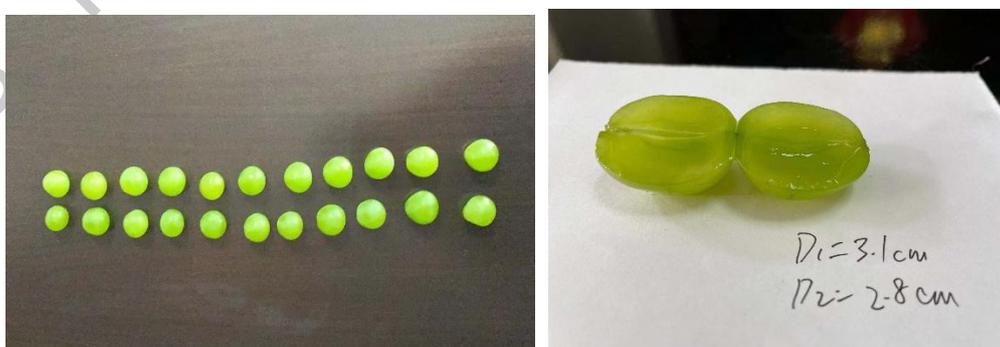


图 2.3 购买大小尺寸不同的葡萄 (左)。实验所用半球二聚体 (右)。

最终的测量过程如图 2.4 所示：一人负责操作微波炉完成实验，一人负责手持云台与拍摄，一人负责做数据记录和整理。更多细节请见补充视频 1。



图 2.4 实验测量过程。

2.2 成功观测到 Plasma 现象

实际预实验中，我们控制微波炉加热工作为 900 w，加热时间为 60 s。需要说明的是，这个时间只是为了保证能观测到完整过程，实际中大约记录只 20 s 左右即停止微波炉。如图 2.5 所示为我们的预实验结果，详情见补充视频 2，从中可以总结如下的变化情况：

1. 在 0-4 s 时间段内，葡萄二聚体之间没有发生明显的变化；
2. 在 4-6 s 时间段内，葡萄二聚体连接处，出现过热的情况，有沸腾的气泡产生，同时伴随有少量的水汽生成；
3. 在 6-10 s 时间段内，葡萄二聚体连接处会出现 plasma，爆发出明亮的火花，连接处开始烧黑，伴随有同时听到明显滋滋类似于电火花声音；
4. 在 10-12 s 时间段内，葡萄二聚体连接处被烧断，不再出现火花，但剩余的黑色灰烬还是会出现亮色斑点，如同火炭一般；
5. 在 13-15 s 时间段内，葡萄半球的中心开始沸腾，此时更接近于微波炉本身的功能，即整颗葡萄都已经被加热。
6. 15 s 之后，葡萄整个已经被煮开，都化成了水，不成形状。

从这样的时间演化过程中，我们明显的观测到了，仅仅利用家用的微波炉，正常的功率，普通的葡萄，即可实现明显 plasma 现象的产生。且 plasma 现象和微波炉本身的加热功能在时间上具有明显的先后顺序，这也充分说明了，plasma 现象的本质并不是来自于极性水分子对于微波的吸收，而是某种新的物理机制。

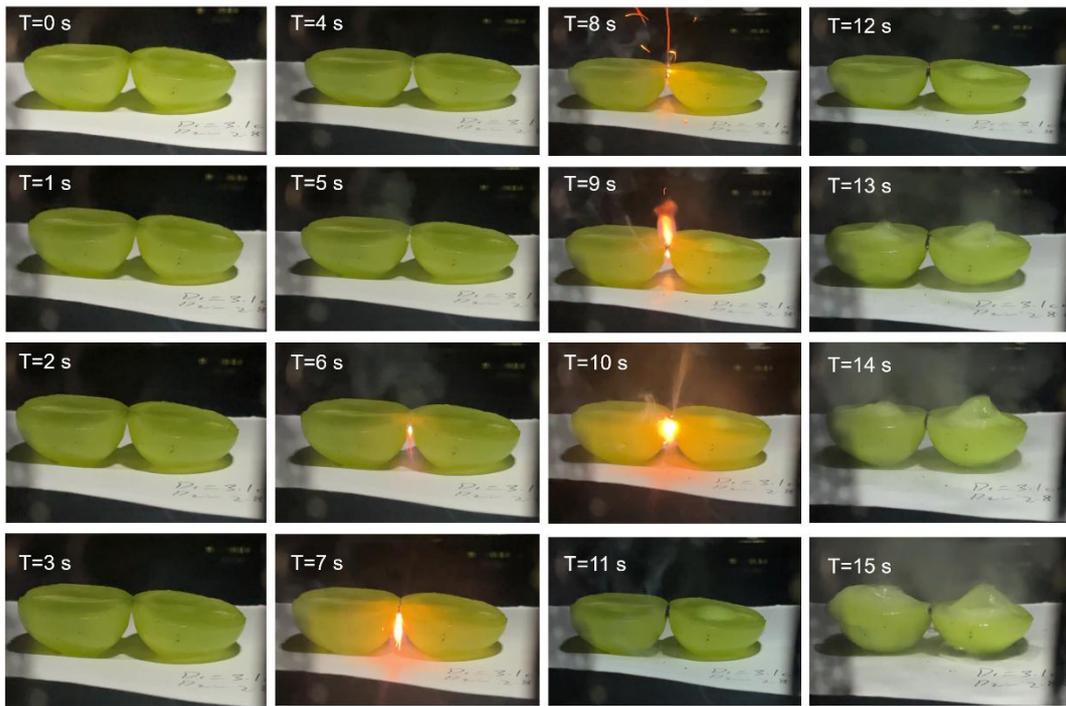


图 2.5 预实验结果，葡萄半球二聚体在微波炉中加热的过程，可以观察到明显的 plasma 现象，且与微波炉本身的加热功能具有不同的物理机制。

为了进一步说明 plasma 的存在，我们重新实验，但是在观察到火花发生的时候（约 T=6 s），即停止微波炉的工作，然后拍摄葡萄二聚体连接处的变化，其结果如图 2.6 所示。可以看到，在没有经过微波炉加热之前，葡萄二聚体连接处十分干净；但是，经过了微波炉加热且激发了火花之后，其连接处出现了明显的烧焦痕迹，且连接的葡萄皮已经被烧断。

这样两组预实验，充分证实了 plasma 是真实存在的，这为我们后面进一步在实验上研究 plasma 效应的理论和特性，提供了一个很好的平台和对象。

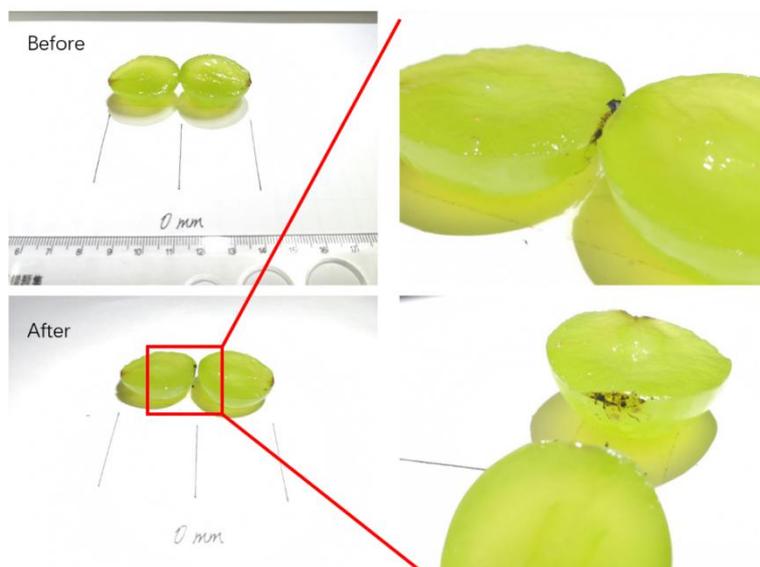


图 2.6 预实验结果，可以观察到，经过火花之后，葡萄二聚体连接处出现了明显的烧毁痕迹。

3 研究基础与时域热场分布分析

这一章，我们首先对现有的研究基础进行一定的总结与验证，以确保我们对于该现象的理解是正确的。随后，我们基于实验现象，指出已有研究和相关解释中的不足之处。为了更好的理解这个现象，我们提出了新的实验表征手段——时域热场分布分析，来加深对该现象的理解。最后，我们利用数值模拟进一步验证我们的结论。

3.1 已有研究基础与验证

对于葡萄 plasma 现象的解释，最为人所接受的是 2019 年发表在 Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 上的一篇研究工作，其在文章的简介部分中说到：

“By expanding this phenomenon to whole spherical dimers of various grape-sized fruit and hydrogel water beads, we demonstrate that the formation of plasma is due to electromagnetic hotspots arising from the cooperative interaction of Mie resonances in the individual spheres. The large dielectric constant of water at the relevant gigahertz frequencies can be used to form systems that mimic surface plasmon resonances that are typically reserved for nanoscale metallic objects.”

为了验证这一结论，作者利用红外热成像技术和有限元模拟对葡萄二聚体体系进行分析，其结果显示：在 2.45 GHz 的微波入射条件下，当两颗葡萄靠近时，确实可以在连接处激发出一个额外的 hotspot，即来自于 the cooperative interaction of Mie resonances in the individual spheres。同时，由于 Mie 共振的性质，这种相互作用非常依赖于葡萄的结构尺寸和共振单元之间的耦合距离，而这一性质也和实验与仿真的结果是吻合的。

这些实验和仿真结果，验证了这种 Mie 共振理论解释的正确性。但是 hotspot 这个概念的物理本质究竟是什么？我们还没有一个十分清晰的物理图像。目前文章中逻辑是这样的：

1. Mie 共振的相互作用，使得二聚体连接处形成一个很强的电场局域点，其尺寸约为电磁波工作波长的 1/100；

2. 由于水在工作波长下的折射率约为 $8.9 + i0.56$ ，具有一定的吸收作用，而这种吸收作用在强局域点下会被放大，因此，二聚体连接处的温度提升速度将远远比其他位置要快。

按照这样的逻辑，那么我们在预实验中观察到的 plasma（见图 2.5），其物理本质应该是**葡萄燃烧**：即随着加热的时间越来越久，二聚体连接处的温度逐渐升高，直到超过葡萄的燃点，从而将葡萄点燃，发出火光。

这个解释看似非常合理，但是预实验中，我们观察到一个非常独特但是一定存在的现象：那就是在出现火花的同时，伴随有非常清晰的“滋滋滋”类似于电火花声音。这使得我们不由得思考另外一种可能性，那就是我们所观察到的 plasma，其物理本质也有可能是**高压放电**：当在二聚体连接处形成强局域点时，此处对应的电场强度也将迅速提高，当达到可以击穿空气的阈值时，就会形成电火花，同时发出独特的“滋滋滋”声音。

关于这种声音的现象，PNAS 上的这篇工作没有给出任何的说明，因此，其结论很自然的偏向于“燃烧论”，如图 3.1 左所示。但是，根据我们的分析，“放电论”同样是可以是有道理的，如图 2.7 右所示。那么，究竟哪种说法才是正确的呢？现有的研究和文献不能告诉我们这个问题的答案，我们于是继续进一步探究。



图 3.1 葡萄 Plasma 的本质，究竟是燃烧（左图），还是放电（右图）。

3.2 葡萄二聚体的时间响应

如上节所述，目前的理论只能证明：在葡萄二聚体的连接处会由于 Mie 共振形成 hotspot，但是更本质一点讨论，究竟是燃烧带来的 plasma？还是放电现象带来的？目前还没有答案。

由于之前的研究只关注稳态的结果，因此，为了更好的看清这个问题，我们利用一个全新的维度，即时间，来重新探索这个现象。同时，我们以温度场分布数据作为实际测量值，也就是说，我们想要知道，在这个 plasma 现象发生的过程中任意时刻葡萄上的温度分布。

为了完成这个测量，我们借到了如图 3.2 左所示的红外成像仪，其测量范围从 -20°C 到 650°C ，测量精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。如图 3.2 右所示，为使用该仪器对室内进行红外热成像的测试结果。可以看到，其测量结果为最低温度 23.9°C ，最高温度 32.2°C ，这个结果和当日结果是十分吻合的，因此，我们可以认为该设备测量得到的数据是真实可信的。



图 3.2 红外成像仪（左图），及其拍摄效果（右图）。

随后，我们制定了如下的测量方案：

1. 将实验所用葡萄按照预计设计处理好，置于微波炉内；
2. 关上舱门，设定微波炉加热功率为 900 w，加热时间为 3 s，然后运行；
3. 运行结束之后，打开舱门，将红外成像仪置于舱内，进行数据测量；

4. 调整加热时间从 3 s 到 15 s, 重复步骤 2 与步骤 3;
5. 导出并处理数据。

当实验平台和测量方案确定下来之后, 我们首先对单个葡萄半球的加热过程进行测量, 以对这个体系有更清楚的认识, 其具体的测量结果如图 3.3 所示, 总结如下:

1. 在 0-3 s 时间段内, 单个葡萄半球的温度分布没有发生明显的变化;
2. 在 3-14 s 时间段内, 葡萄半球的温度逐渐升高, 且温度最高点出现在半球的中心;
3. 没有观察到 plasma 现象;

这样的结果说明单个葡萄半球只会存在正常模式的微波炉加热过程, 没有 plasma 现象的产生, 其主要的加热中心是在球心位置处。

为了更好的定量分析实验数据, 我们画出图 3.3 中温度与时间的关系, 其结果如图 3.4 所示。从中可以看到, 随着微波炉加热时间的增加, 葡萄半球的温度基本呈现线性增长的趋势。这是因为, 在加热过程中, 微波炉的功率保持稳定, 因此, 葡萄半球在时间 t 内的吸收的能量值为:

$$Q = \lambda pt \quad (1)$$

其中, p 为微波炉的功率 900 w, λ 为加热效率。

于此同时, 葡萄的含水量超过 99%, 因此我们用水的热容代替葡萄的热容, 可以得到:

$$Q = Cm\Delta T \quad (2)$$

其中, C 为 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, m 为葡萄的质量, ΔT 为葡萄的温度变化。已知我们所用葡萄的直径约为 3 cm, 则其重量为:

$$m = \rho V = 1 \times 10^3 \times \frac{2}{3} \pi \times (0.015)^3 \text{ kg} \approx 0.007 \text{ kg} \quad (3)$$

联立公式 (1) — (3) 可以看到:

$$\Delta T = \frac{\lambda p}{Cm} t \quad (2)$$

说明温度的变化基本是和时间呈现线性关系的。根据我们的数据评估, 该型号微波炉的加热效率为 10 %-20 %之间。

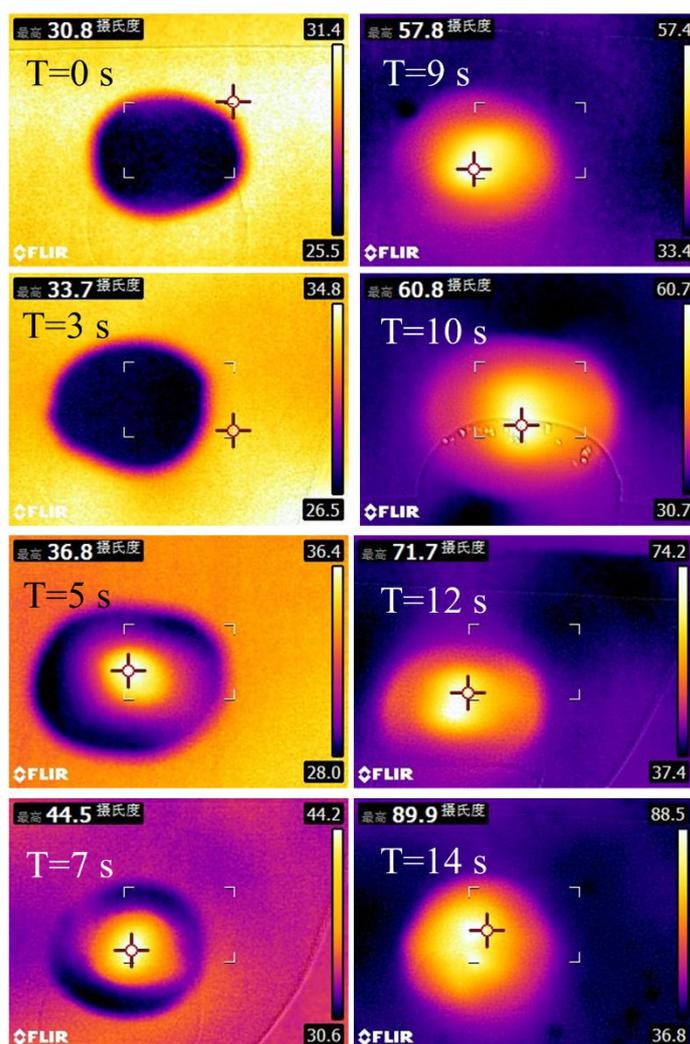


图 3.3 单个葡萄半球不同时刻红外热成像结果。

最高温度

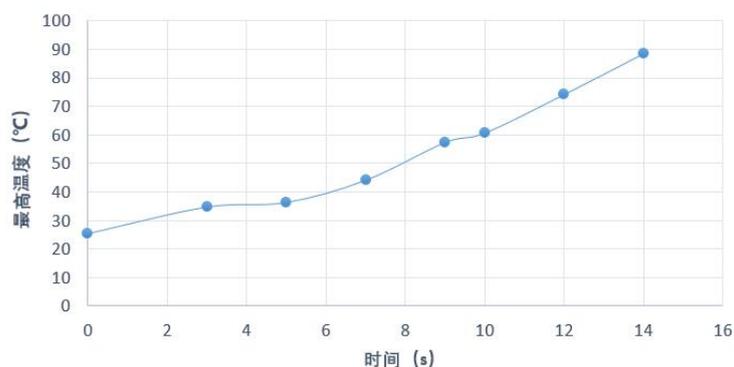


图 3.4 单个葡萄半球不同时刻温度。

这样的理论结果和实验观测到的现象吻合，也证明了我们所设计的测量平台和实验方案都是合理的，这为之后进一步研究 plasma 现象中的时域热场分布打下了坚实的基础。

随后，我们对葡萄半球二聚体进行了如上所述的测量，其具体的测量结果如图 3.5 所示，总结如下：

1. 在 0-3 s 时间段内，葡萄二聚体之间连接处的温度迅速升高，但其余位置包括球面中心的温度都基本保持不变，与单个球体加热性质无差，此时温度最高点在连接处；
2. 在 3-10 s 时间段内，葡萄二聚体连接处的温度急剧上升，同时球面中心的温度也开始缓慢上升，此时温度最高点在连接处。【plasma 持续时间大约为 6-10 s】；
3. 在 10-12 s 时间段内，葡萄二聚体连接处的温度变化缓慢，而球面中心的温度开始提升并超过连接处，此时温度最高点在球面中心。【二聚体连接处断开，plasma 消失】；

总结一下，对于葡萄半球二聚体而言，其大部分区域的加热过程与单个球面保持一致，尤其是球面中心，这证明了其存在正常模式的微波炉加热过程；与此同时，二聚体的连接处显示出来独特的加热过程，在 0-10 s 时间段内，其温度上升速度远远高于正常的加热模式，这对应于 plasma 现象的产生，而在随后的 10-12 s 时间段内，其由于 plasma 现象的消失，温度变化趋于缓慢，并最终被正常的加热模式所取代。

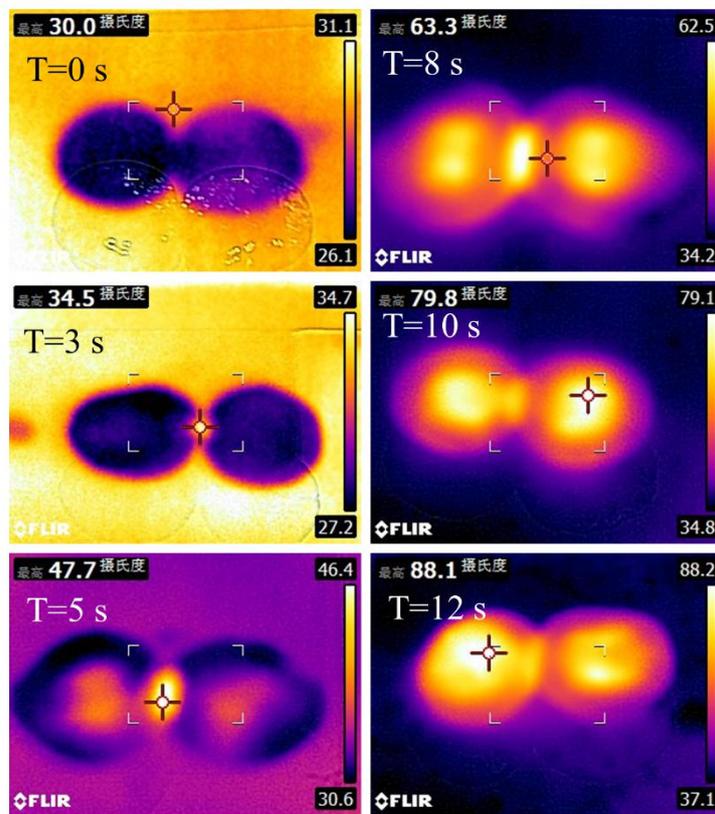


图 3.5 葡萄半球二聚体 (Gap=0 mm) 在不同时刻红外热成像结果。

我们同样画出图 3.5 中温度与时间的关系，其结果如图 3.6 所示。从中可以看到，其温度上升趋势比单个葡萄要更快，但是在最后趋于一致。这种时域上的对比，可以让我们清楚地知道：plasma 现象的产生，要快于正常的加热模式。而且这两种模式是相互独立的。

更为有趣的是，在不考虑葡萄被烧毁的情况下，plasma 现象可以极大地增加微波炉的加热效率。正如前文所示，在单个葡萄半球的时候，其加热效率为 10 %-20 %之间；而对于葡萄二聚体，在相同加热时间下，其质量变成了 2 倍，但是温度却更高了。此时重新估算加热效率，其值为 24 %-40 %之间。换一个形象的比例，两杯水放进微波炉中，其加热所需时间比一杯水还要短，这实在是非常的神奇。

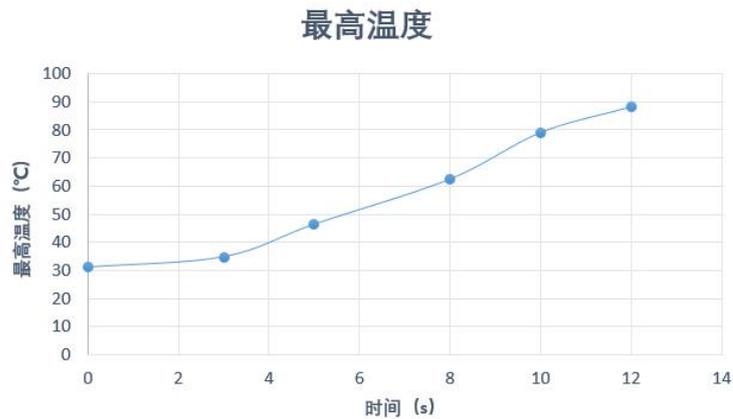


图 3.6 葡萄二聚体不同时刻温度。

总结一下，通过上述的**时域热场分布分析**，我们发现了在 plasma 现象产生的同时，也会伴随有正常的加热模式。而且，plasma 形成的 hotspot 出现在 5 秒左右，而正常的体加热极值在 12 秒左右，时间先后顺序非常的清晰。

但是这样的分析并不能解决 plasma 的本质是放电还是燃烧的问题。因为按照量级估计，在 plasma 形成的 5 秒附近，以 24 % 的微波炉 (900 w) 加热效率做估计，假设中间连接处的质量为整体质量的 1/10，则其温度会上升到 200°左右，或许还达不到燃点 (300-400°)；但如果连接处非常纤细，如中间连接处的质量为整体质量的 1/30，则其温度会超过 500°，即能够使得葡萄燃烧起来。

这说明连接处的性质是能够激发 plasma 的决定性因素，因此，我们安排新一轮的控制变量实验，来对燃烧和放电的本质进行进一步的确认。

4 控制变量实验验证

上一章中，通过引入时域热场分析，我们观察得到了 plasma 过程中任一时刻的温度场分布，从而对该现象的理解更加深入。但是对于最初的问题（燃烧还是放电），这样的分析依旧不能给我们满意的答复。因此，接下来，我们对其相关参数进行定量的分析与实验。

4.1 改变葡萄二聚体的距离

本小节重点在于，探究葡萄二聚体间的 gap 距离对于 plasma 现象的影响。具体的实验流程如下：我们控制 gap 距离由 0 mm 一直到 5 mm，步长为 1 mm，共计六组实验。在控制微波炉加热功率为 900 w 的情况下观察现象，其加热前后对比结果如图 4.1-图 4.6 所示。

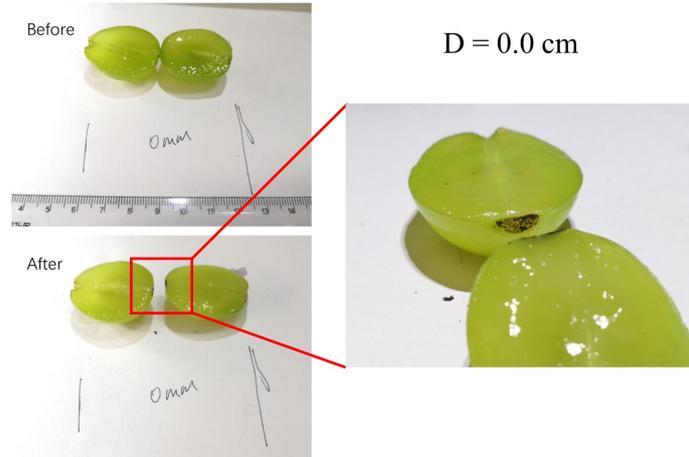


图 4.1 葡萄半球二聚体 (Gap=0 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到出现了明显的烧毁痕迹。

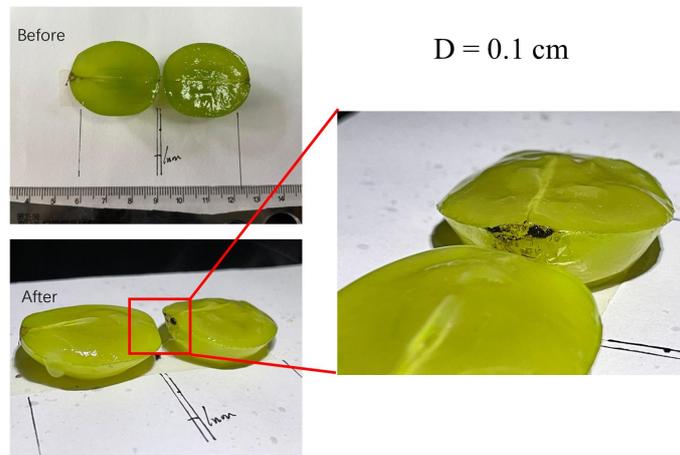


图 4.2 葡萄半球二聚体 (Gap=1 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到出现了明显的烧毁痕迹。

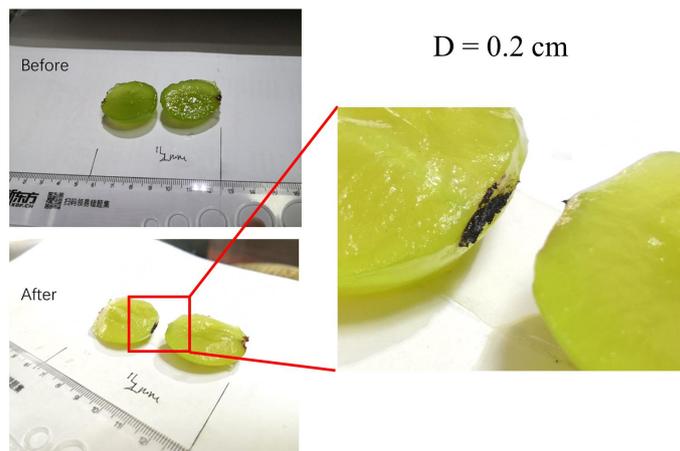


图 4.3 葡萄半球二聚体 (Gap=2 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到出现了明显的烧毁痕迹。

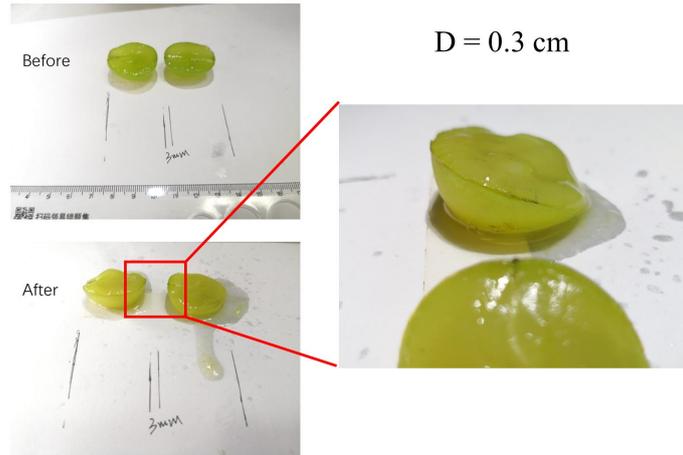


图 4.4 葡萄半球二聚体 (Gap=3 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到基本没有烧毁痕迹。

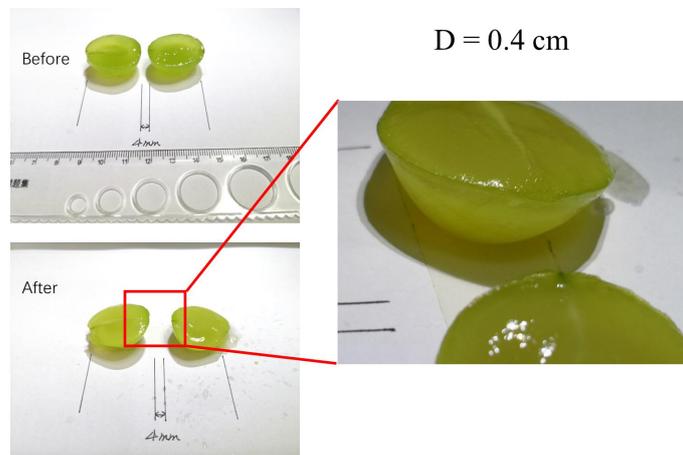


图 4.5 葡萄半球二聚体 (Gap=4 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到基本没有烧毁痕迹。

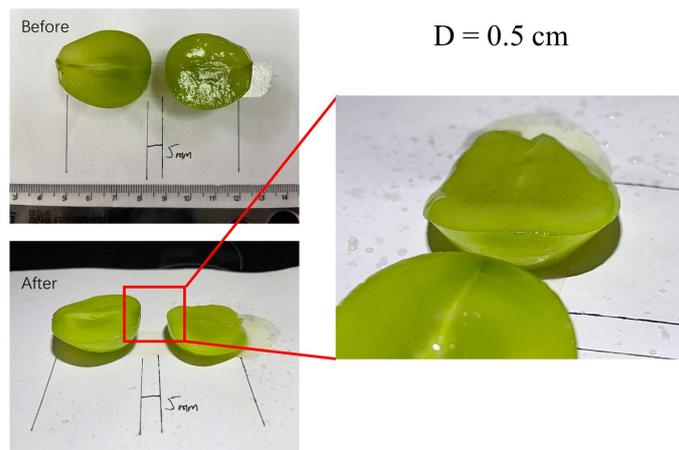


图 4.6 葡萄半球二聚体 (Gap=5 mm) 在加热前后连接处的对比, 可以看到基本没有烧毁痕迹。

从这些结果中可以看到: 当距离在 0-0.2 mm 之间的时候, 葡萄二聚体能够激发比较明显的 plasma 现象, 但是当距离超过 0.2 mm 的时候, 则难以再激发 plasma 现象。

需要特别指出的是, 当 gap 距离是在 0.1 mm 和 0.2 mm 的时候, 并不是葡萄直接产生

了 plasma，而是因为葡萄热膨胀之后，开始相互接触的时候才发生的，具体过程见图 4.7。从图中可以看到，在加热的一开始，葡萄之间并不会产生 plasma，只有一个正常的加热模式。但是当到了 T=8 s 到 10 s 之间的时候，由于葡萄内部已经被加热，因此葡萄受热膨胀，此时二聚体的 gap 距离开始变小，当到了 T=10 s 的时候，当距离缩小到一个极小的尺度时，plasma 现象瞬间被激发。更为详细的过程见补充视频 3。

这种动态变化有力地证明了：只有 gap 距离足够近的时候，才能激发 plasma 现象。

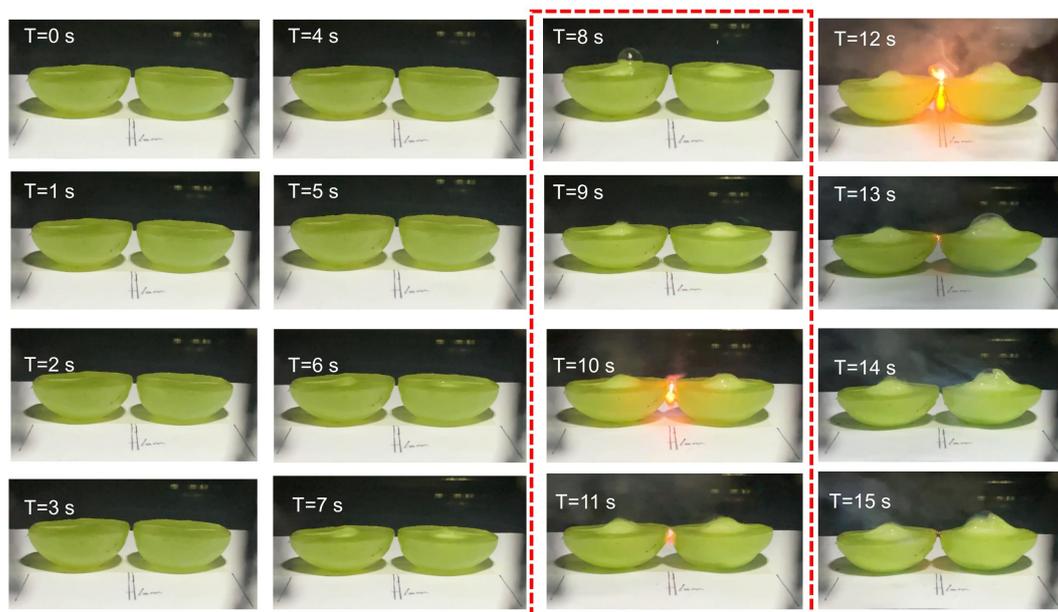


图 4.7 葡萄半球二聚体 (Gap=1 mm) 在微波炉中加热的过程，可以观察到明显的 plasma 现象。

此外，还有一个非常有意思的现象，在图 4.7 中 T=15 s 的时候，葡萄二聚体之间的连接处已经被完全烧断，gap 距离大约恢复到 1 mm，但是此时，连接处的黑色灰烬还是会呈现亮色斑点，如同火炭一般，我们将其放大，结果如图 4.8 所示。



图 4.8 葡萄半球二聚体 (Gap=1 mm) 在微波炉中加热后，连接处被烧毁，但残存火炭状灰烬。

图中的灰烬发亮告诉我们，此时葡萄灰烬的温度为 320-370 °C。且这种现象本身就是一种非常典型的燃烧。

至此，我们成功证明了，在葡萄 plasma 现象中，肯定存在着燃烧效应。

这一步看似回到了原点，我们得出了和原始论文相同的结论。但是，有没有可能放电和燃烧现象同是存在呢？我们需要更多的实验来回答这个问题。

4.2 导电性的作用

接下来，我们通过一个巧妙的实验，直接地证明了：在我们这个体系中，放电同样起到了非常重要的作用。

我们上一节已经证明了距离对于 plasma 现象十分重要。理论上来说，在其它参数相同情况下，当葡萄二聚体的距离一定时，其连接处形成的电场局域点的强度也是固定的，则由此带来的温度提升也是一定的。

为此我们设计了如图 4.9 所示的对比实验：我们分别利用导电的湿润 A4 纸和不导电橡胶膜对葡萄二聚体进行分隔。我们知道，A4 纸的厚度大约是 0.09 mm，而气球橡胶膜厚约为 0.04 mm。在实验中，我们控制 gap 厚度接近不变，分别在 gap 中填充进入不同层数的 A4 纸盒橡胶膜进而观察实验现象。因为材料的差异不会带来温度提升的变化，但是会极大程度提高放电的阈值吗，因此如果二者实验有所差异，则说明在 plasma 现象中，放电一样起到了重要的作用。



图 4.9 验证导电性实验。(左) 用导电的湿润 A4 纸隔离。(右) 用不导电橡胶隔离。

为了更好地完成这一项实验，我们首先选择 1 层 A4 纸和 1 层橡胶膜作为隔离层进行实验，其结果如图 4.10 和图 4.11 所示。可以看到，当二者都非常薄的时候，都能够发生明显的 plasma 现象。这证明了我们的实验体系是没有问题的。

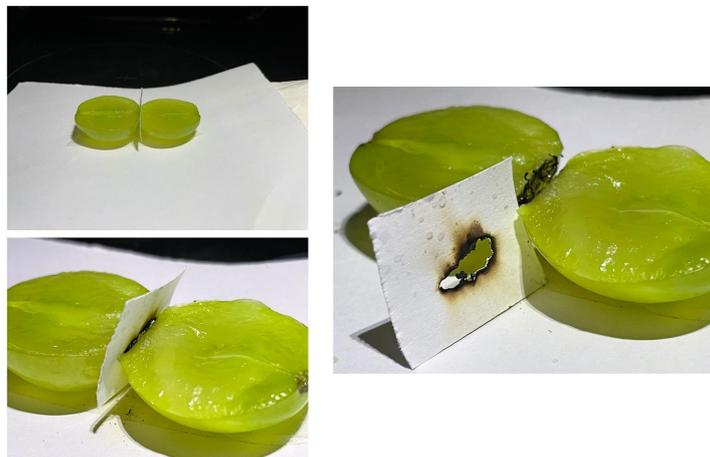


图 4.10 葡萄二聚体由 1 层 A4 纸隔开。可以看到明显的 plasma 现象的产生。



图 4.11 葡萄二聚体由 1 层橡胶膜隔开，同样可以看到明显的 plasma 现象的产生。

随后，我们为了使得二者 gap 距离相同，设计的 A4 纸层数为 4，而橡胶膜的层数为 8。进一步实验的结果如图 4.12 和图 4.13 所示。从中可以看到，当厚度相同时，具有导电性的 A4 纸可以产生 plasma，但是不导电的橡胶膜则无法产生 plasma。

这一结果有力地证明了：在葡萄 plasma 现象中，放电效应同样起到重要的作用。这也就解释了为什么我们能够在实验过程中听到“滋滋滋”类似于电火花声音。



图 4.12 葡萄二聚体由 4 层 A4 纸隔开。可以看到较为明显的 plasma 现象的产生。

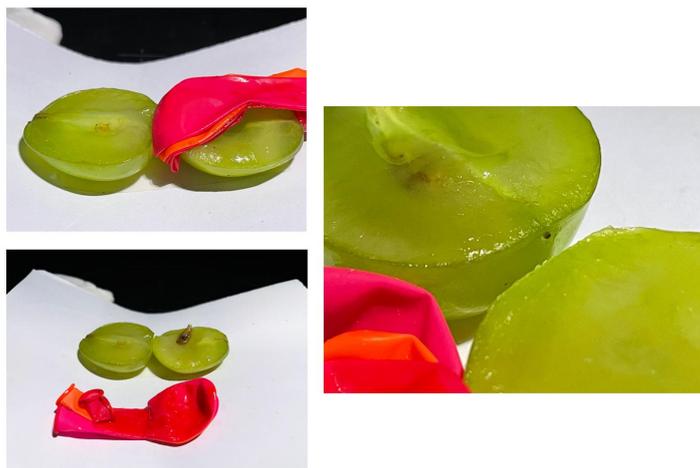


图 4.13 葡萄二聚体由 8 层橡胶模隔开，未观察到 plasma 现象的产生。

4.3 众多水果的尝试

基于我们前面两节的讨论，我们解开了我们最开始的疑惑：对于观察到的 plasma 效应，其本质既有燃烧的作用，也有放电的效应。我们弄清楚了这个效应的本质问题，则能够通过精心设计，在其他的水果体系中同样实现这种 plasma 效应。

如图 4.14 至图 4.17 所示，我们选择合适尺寸的蓝莓、西红柿、杏子甚至于苹果块，将其分别制备成二聚体，能够在同样的微波炉加热条件下，实现了 plasma 效应。

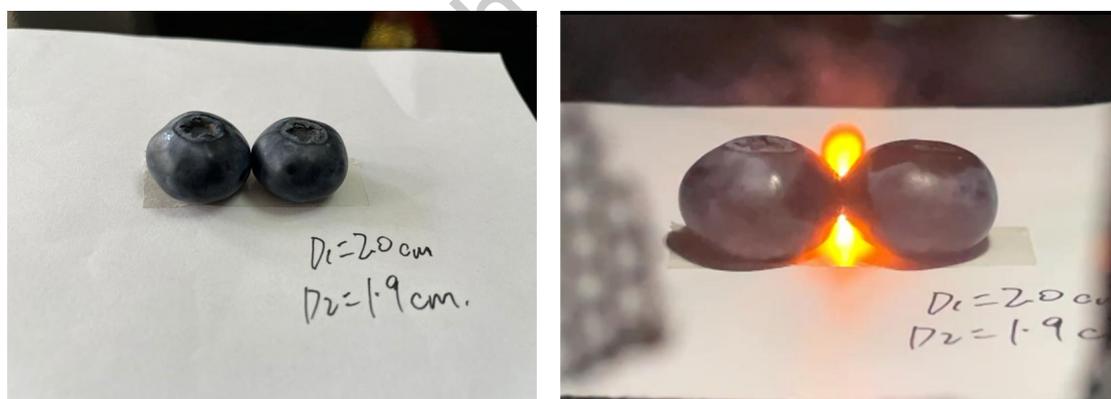


图 4.14 蓝莓二聚体实验，观察到明显 plasma 现象的产生。

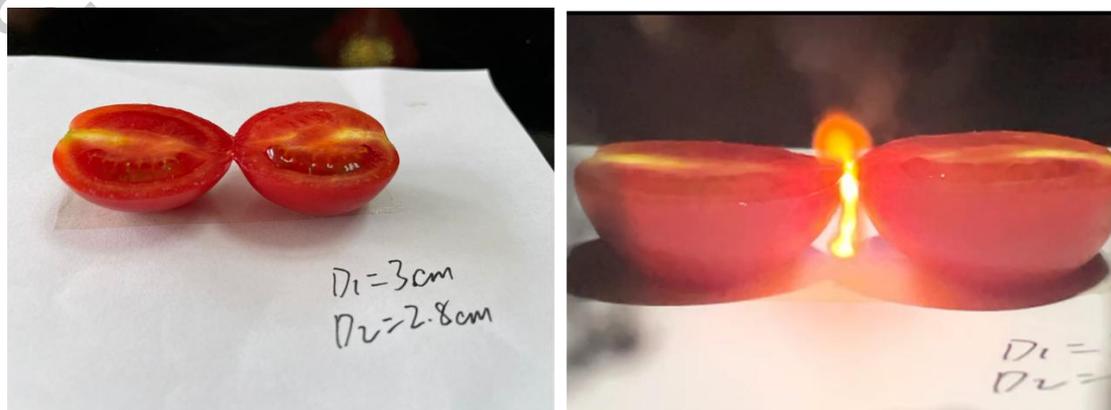


图 4.15 西红柿二聚体实验，观察到明显 plasma 现象的产生。

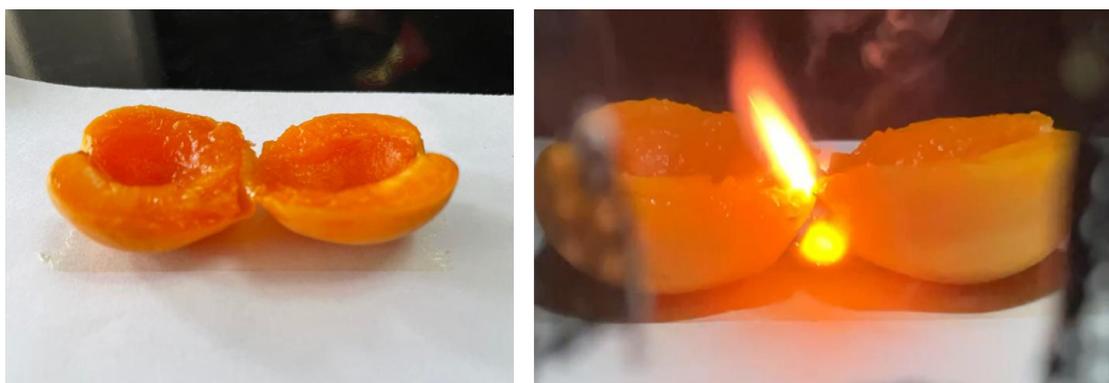


图 4.16 杏子二聚体实验，观察到明显 plasma 现象的产生。

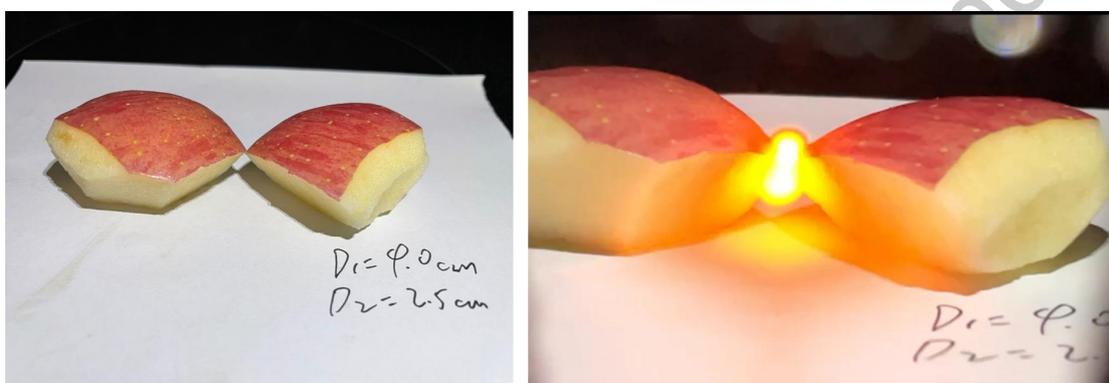


图 4.17 苹果块二聚体实验，观察到明显 plasma 现象的产生。

值得一提的是，有一种水果非常非常的有意思，那就是橘子。一开始，我们的设计如图 4.18 所示，结果发现根本就没有 plasma 现象的产生。其实这个是因为，这种双瓣接触，接触点不稳定，很容易错开，导致放电效应难以形成。

为此，我们改进了设计，得到了如图 4.19 所示的样品，可结果还是没有 plasma 现象。经过仔细分析，我们认为此时接触面积过大，使得接触处体积过大，则 hotspot 带来的温度提高不够，不能点燃橘子。

随后，我们将橘子的连接处进行了适当切割，使其仅有一层薄皮相连。此时重新实验即可观察到非常明显的 plasma 现象，其结果如图 4.20 所示。

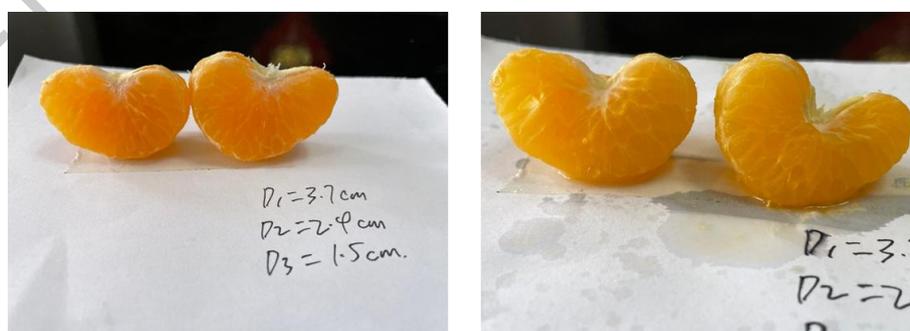


图 4.18 橘子二聚体实验 1，(左) 加热前与 (右) 加热后，可以看到根本没有 plasma 现象的产生。

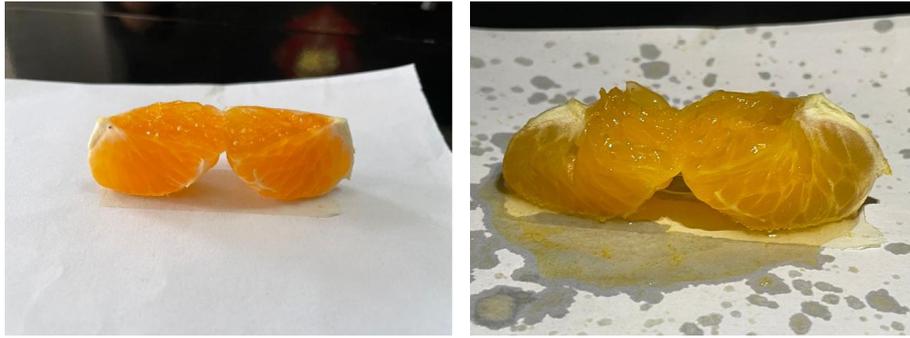


图 4.19 橘子二聚体实验 2, (左) 加热前与 (右) 加热后, 可以看到根本没有 plasma 现象的产生。



图 4.20 橘子二聚体实验 3, 观察到明显 plasma 现象的产生。

4.4 完备的理论模型

通过上一章不同水果的尝试和优化, 我们明确了 plasma 效应的产生离不开燃烧和放电两种效应。在这里, 我们也进一步总结出来产生这种现象的两个要素: **第一: 需要有小体积的燃烧质 (燃烧所需); 第二, 需要有稳定的小距离 gap 存在 (燃烧、放电共同需要)。**

最后, 基于所有的探究过程, 总结之前的控制变量, 我们得出最终完备的理论模型如图 4.21 所示。我们认为从 hotspot 出发, 到达最终的 plasma sparking 有两条基本的路径:

第一, 是 hotspot 带来吸收增强, 使得连接处温度迅速上升, 最终到达燃点, 形成燃烧火花。这一解释是目前主流文献所持有的观点。

第二, 是 hotspot 带来局域电压增强, 当超过击穿空气的阈值的时候, 就能够形成尖端放电, 带来电火花。这一解释是我们根据我们的实验现象所发现的。

第一条已经在众多文献中有所解释, 这里针对第二条, 再做一些补充性说明和量级估计, 其中包括: **需要多小的尺寸才可能击穿空气? 这种尺寸在实验上能否被观察到?**

通过查阅相关资料我们知道: 在温度 20 度, 压力为 101325 pa 和绝对湿度为 11 g/m³ 的标准大气压下, 通常认为均匀电场空气间隙击穿场强为 30 KV/cm。而根据文献的记载, 当输入场为 1 V/m, 葡萄大小在 1 cm 左右附近, gap 距离为 0.5 mm 时, 其在 gap 间的电场约为 20 V/m 左右, 这一数值距离击穿空气的临界值还有很大的距离。

但是, 微波炉的功率是可调的, gap 的距离也是可调的。对于我们所使用的 900 w 电源, 其内部能够产生的输入场约为 1000 V/m。我们假设二聚体之间电压不变, 则**击穿空气所需的 gap 尺寸约为 0.005 mm, 即 5 微米。这一尺度远远超过了我们相机拍摄的分辨率, 因此,**

我们在实验中只能闻其声，却并不能见其形。

值得一提的是，高压放电的过程中，同样会带来大量的热量。因此，我们在整体的理论框架图中加入了红色的箭头，这从物理上代表了欧姆效应对于温度提升的作用，说明放电效应可以进一步的促进燃烧现象的产生，从而最终实现 plasma。

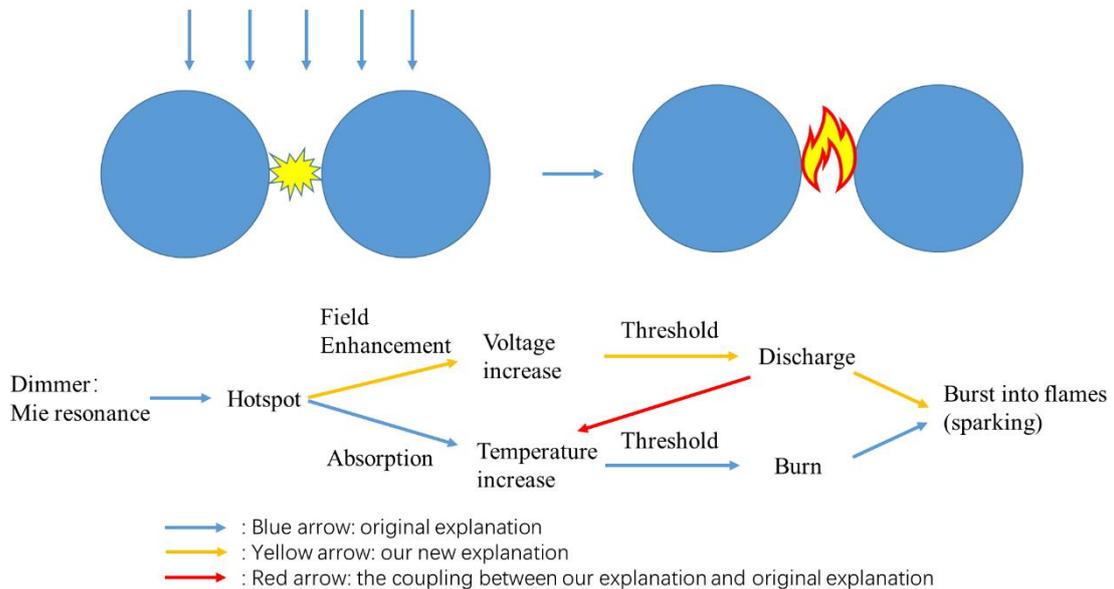


图 4.21 完备的理论模型。其中，蓝色箭头代表目前文献的结论，而黄色箭头代表了我们的新发现。我们认为二者共同作用，才能组成完整的理论模型。

5 冰与火之歌——ice plasma 存在的证明

这里，我们根据上一章中得到的完备理论模型，来做一些有趣的试探性推广和测试。最终，我们实验上实现了 ice plasma 这一神奇的现象。

5.1 冰球实验

第一个实验的对象就是，具有高导电性的 ice 能否可以激发 Plasma? 根据我们在 4.4 节中所总结的规律，高导电性的冰球能够形成比较稳定的高压放电，但是由于缺少燃烧质，所以理论上是不会产生 plasma 的。

为此我们进行了实验验证，其最终结果如图 5.1 所示，详细视频见补充视频 4。从中可以看到，在微波炉加热整个过程中，冰球之间都没有产生过任何的 plasma 现象，其在不断的融化。这和我们的理论预测保持一致。这一实验也进一步证明了，放电和燃烧对于 plasma 的产生缺一不可。

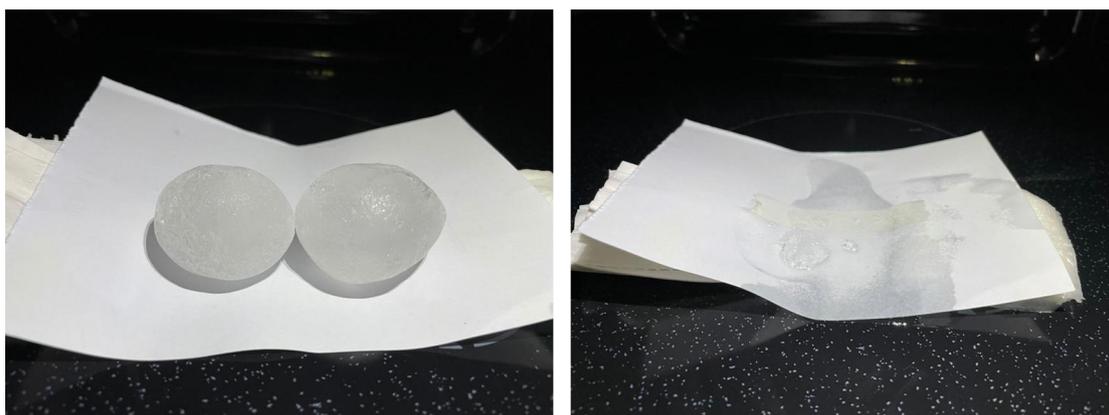


图 5.1 冰球 plasma 实验。(左) 加热前与 (右) 加热后。结果并没有观察到 plasma 现象。

5.2 冰葡萄实验

很遗憾，我们没有在冰球间观察到 ice plasma，但这并不代表 ice plasma 就是不存在的。我们只需要根据理论提示，在 ice 体系中加入适当的燃烧质即可。

下面我们将展示我们设计的另外一个体系，即冰葡萄。其结果如图 5.2 所示，详细视频见补充视频 5。图中可以看到，在微波炉的加热下，冰葡萄产生了非常明显的 plasma。



图 5.2 冰葡萄 plasma 实验。(左) 加热前与 (右) 加热中。可以观察到明显的 plasma 现象。

刚开始观察到这个现象的时候，我们有队员提出，会不会是因为葡萄被加热，所以其实已经没有冰的存在了？这是一个非常好的疑问，我们一度找不到答案。直到 7 月 18 号下午的那次讨论，我们灵光一现，突然想到我们既然有红外温度成像仪，那可以直接测出来在发生 plasma 的时候，葡萄表面的温度，进而证明我们的猜测是否正确！

于是，我们利用该思路重新实验，其结果如下图 5.3 所示。图中左边是没有放入微波炉中加热的热成像，整个葡萄的温度为 -4° ，证明其已经完全结冰；图中右边是激发火花之后的热成像，可以看到此时整颗葡萄的温度依旧处在零点之下 (-0.4°)，这说明在激发火花的时候，葡萄表面依旧存在着结冰区。这个实验非常完美地证明了，在冰葡萄上，我们实现了 ice plasma 的产生。于是我们饶有兴趣地将这一实验称之为：冰与火之歌。

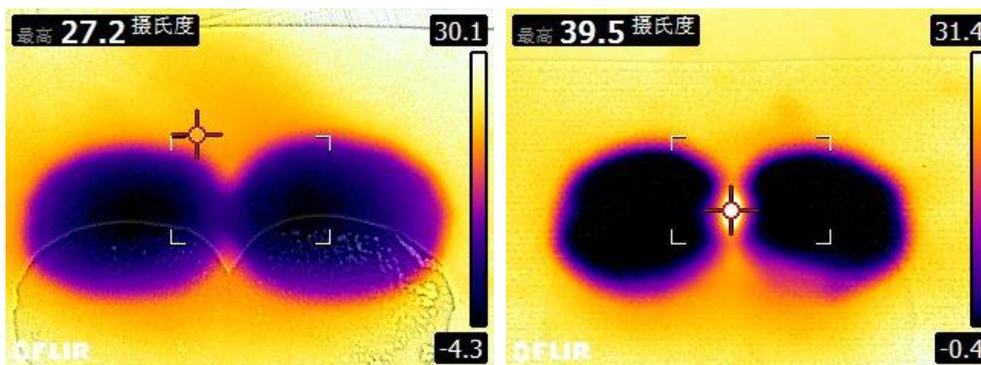


图 5.3 冰葡萄在激发 plasma（左）之前和（右）之后的温度分布图。

6 总结与讨论

在本篇论文中，我们以葡萄 plasma 作为研究对象。在前人研究的基础上，我们在预实验过程中发现了新的实验现象，且现有的理论无法对该现象进行解释。我们不清楚，葡萄 plasma 现象，究竟是一种燃烧，还是放电。

因此，我们展开了自己独立的探索。首先，我们利用红外热成像设备，采集了 plasma 产生过程中任一时刻中葡萄二聚体中的温度分布，并分析清楚了 plasma 现象的时间响应，明确了其和微波炉普通加热模式是完全不同的物理机制。

随后，我们通过一系列精心设计的控制变量实验，明确了 plasma 现象的产生，既有燃烧的机制，又有放电的机制。同时，我们也总结出来产生这种现象的两个要素：第一：需要小体积的燃烧质（燃烧所需）；第二，需要有稳定的小距离 gap 存在（燃烧、放电共同需要）。

最后，我们基于我们的发现，对现有的理论进行了补充，得到了完备的理论模型。基于该理论模型，我们又进一步设计了 ice plasma 的实验并成功实现。

我们工作的创新点在于：

第一：首次在 plasma 现象分析中引入时域热场分布分析，而现有的文献都只是研究稳态热场分布。时间分辨成像的技术让我们更加清楚地看到，plasma 现象和普通加热模式在空间和时间上的异同。

第二：我们通过控制变量对比实验，明确了 plasma 现象的产生，既有燃烧的机制，又有放电的机制。我们的发现，是对现有理论的一次补充。

第三：基于我们的理论，我们实现了 ice plasma 现象的产生，并用红外热成像验证了这一结论。我们认为这是一件很 cool 的事情。

参考文献

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics)).
- [2] Goldston, R.J.; Rutherford, P.H. (1995). Introduction to Plasma Physics. Taylor & Francis. p. 1–2. ISBN 978-0-7503-0183-1.
- [3] Khattak H K, Bianucci P, Slepko A D. Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(10): 4000-4005.
- [4] Khattak H K, Waitukaitis S R, Slepko A D. Microwave induced mechanical activation of hydrogel dimers[J]. Soft matter, 2019, 15(29): 5804-5809.
- [5] Wang G, McDonough J R, Zivkovic V, et al. From Thermal Energy to Kinetic Energy: Droplet Motion Triggered by the Leidenfrost Effect[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(2): 2001249.
- [6] Zhang Y, Yang H, Yan B, et al. Continuous flow microwave system with helical tubes for liquid food heating[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 110409.

附录

4月11号

4.11 小组讨论记录

1. 安排后续日程
2. 经过比较葡萄题目与太阳导航题目（是否便于进一步研究，成员是否感兴趣实验）后
确定题目为葡萄 并简要讨论葡萄进一步思路
 - 使用不同水果对比实验 及火花现象与水果电解质关系
 - 用其他方法替代水果实验
 - 探究水果独特震动规律
 - 如何使微波加热效率最大化
 - 选择一两方面实验即可
3. 确定下次讨论为4月24日晚 和分配需要阅读论文（另需要购买微波炉和葡萄）

4月23号

讨论内容：

1. 大家对文献的理解，想法
2. 之后的工作安排

安排：

1. 研究现象的主要参数影响：
(大小、距离、特点、温度分布等)
2. 下一步思考实验的实际操作方法
3. 对于其他外部参数的影响暂不考虑
4. 下次时间五月八日或十五日

1. 实验所需哪些仪器：葡萄，微波炉，还有呢？
2. 实验装置搭建：应该将仪器进行何种搭建方式，可以安全有效地进行实验？
3. 实验测量手段及过程：用哪些实验方案测量数据？研究哪些变量对于实验结果的影响？探究实验现象中哪些性质的变化？
4. 实验采集数据包括哪些？用视频、音频等手段进行定量数据采集该如何进行？
5. 实验数据的处理如何进行？慢速视频该如何进行量化分析？
6. 量化得到的数据该如何进行展示？

5月8号

1. 确定了下次会议时间
2. 确定日后会议方向：预实验
3. 研讨群里范例实验PPT：
 1. 关于需要的实验器材：
 1. 微波炉：透明，方便调参数
 2. 微波炉专用的碗/容器
 3. 葡萄
 4. 拍摄：手机【延时摄影】
1. 陈昭融任务：在家先试做实验，并完成前三张PPT
2. 胡馨元任务：配合陈昭融完成实验及实验记录和数据处理
 1. 实验的4部分如何构思：各部分器材要求及实验目的
 2. 量化参数：亮度、温度
 1. 火花亮度与葡萄大小的比较：按帧对比，画出亮度与时间的变化
 2. 温度：体温枪测量葡萄温度变化曲线

时间：2021年5月22日晚上 19:00-22:00

地点：陈同学家里

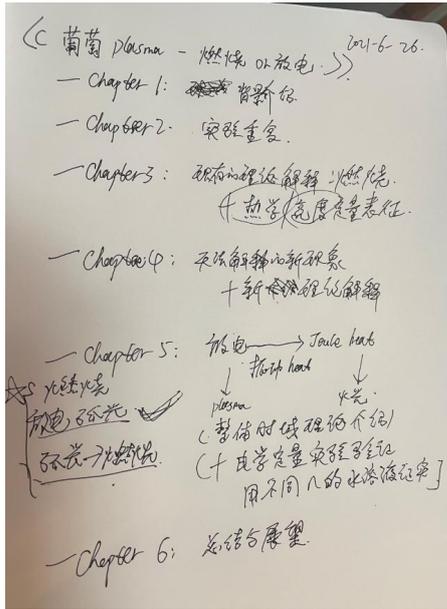
参加者：辅导老师、陈昭融、余星瑶、胡馨元（本次纪要人）

本次研讨内容：

- 1) 摸索实验方法，初步观察实验现象；
- 2) 学习微波炉加热食物的原理，运用所学知识如光（波）的折射、波频、波振幅、固有频率、共振波、水分子运动生热等物理学概念理解微波加热食物的机理。
- 3) 通过改变葡萄形状、大小、品种（内部成分差异）、摆放距离、是否剥皮等初步观察实验现象。
- 4) 讨论函数 $Y=f(X)$ 的关系，其中 X 为各种影响因素， Y 是在众多 X 作用下的结果指标
 目前初步确定的 Y 为 ①亮度（打火光亮度） ②葡萄温度
 将来还可以考虑的 Y 有：葡萄弹开的频率、弹力大小等
 目前思考到的 X 有：物体形状、大小、内部成分（离子含量）、物体间距离、
- 5) 初步探索了所涉及的 X 、 Y 的测量方法：
 - 亮度：视频拍照，视频分析软件分析
 - 温度：先用测温枪，后续考虑温度成像仪测量绘图
 - 形状：可观察或测量
 - 大小：可观察或测量
 - 内部成分：离子测量方法待定
 - 物体间距离：测距仪（待定）或视频分析
- 6) 当前已采购设备：微波炉、适用器皿、测温仪

下一步安排：

- 1) 6月底前测量方法明确、测量仪器到位、大家学会实验和测量方法。
 7月份全力实验（7月11日-7月30日），实验前先设计再实验。7月完成论文初稿。
 8月完善论文（需要的话补充一些实验）
 9月初提交论文。
- 2) 下次 meeting 的时间是：2021-6-5 晚上 19:00，地点：陈同学家里
- 3) 下次会议前需要完成的内容：
 - ① 辅导老师协助大家学会视频拍摄和视频分析软件的应用。
 - ② 家长协助大家解决成像仪问题
 - ③ 思考实验过程和参数的测量方法，下次 meeting 进一步细化此内容。



7月5日

已有理论
成像仪呈现两个葡萄连接处会有高温点
温度达到燃点葡萄燃烧

有新的现象原有理论解释不了

hot spot同时会产生很大的电火花
(原有理论的燃烧现象存在, 但是还有电火花)

今天要控制葡萄距离, 固定加热时间, 看什么时候火花出现
同一距离测三次取平均值
测七个距离
先拍下来
微波炉的参数要记下来
横坐标距离, 纵坐标开始燃烧的时间

第二套切成两半 (优先做)

葡萄半径平均为33mm
成功做了三次无距离的, 两次距离2毫米的
失败了几次
录了视频没有具体的点燃时间因为觉得精确到秒不够要更高的精确度

学会科学的测量, 重复测量
(测完一次要把温度降下来)

理解模型

7月16-7月20号为持续采集数据时间。

致谢

本论文的完成,离不开许多人的支持与指导。他们的帮助,使得我们的实验探究不停推进与深化,论文写作不断丰富与完善,在本论文即将完成之际,我们要对所有帮助我们的人致以衷心的感谢。

首先,诚挚地感谢曹旻老师和蒋霖峰老师对我们的悉心辅导,是他们把我们带入此次科学探索之门。两位老师作为学校的物理老师,他们渊博的专业知识、周密的逻辑思维、严谨的治学态度启发了我们对物理的追求与探索,我们从他们身上学到了物理学习的态度与方法,从而完成了本课题的探究。是他们指引着我们作出更具广度、深度和有创意的选择。

其次,我们更要感谢我们的校外辅导老师熊波老师。熊老师在理论上和实验设计上给予了我们很大的帮助,他的严谨态度指导着我们更为精密地进行实验、更为周密地进行分析;在论文的写作中,他的丰富经验引导我们进行更合理的内容安排更严谨的文字表述。我们从中收获良多,感激之情不胜言表。

再次,我们要诚挚地感谢我们团队的每一位成员,大家的不懈探寻与努力是本论文得以完成的关键。从选题的思考与创新,到内容的调研与设计,再到实验的操作与改进,然后是结果的分析与处理,最后是文章的安排与写作。当我们遇到瓶颈时大家相互鼓励,遇到挫折与困惑时,大家头脑风暴先发散后收敛总能找到答案。此次实验和论文的完美达成离不开我们每一位成员的良好协作。感谢陈昭融同学认真仔细地操作实验,感谢余星瑶实验设计中的突出贡献,感谢胡馨元实验过程细致地实验记录和数据采集分析和验证。我们共同完成了论文的撰写,共同进行了一次对物理世界的探索,再次感谢我们团队的每一位成员。

最后,真诚地感谢我们的家长为我们提供了很好的后勤保障,感谢所有帮助过我们的师长与同学们。我们的论文与您见面是我们的荣幸,希望得到每位读者的指导,提前致谢!

参赛队员信息

姓名：陈昭融 性别：男

学校：南京市金陵中学中美班 年级：高二

简介：各学科成绩优秀，热爱物理，喜爱探索，是班级物理课代表。具有锲而不舍的坚毅品质，有物理实验经验和良好的口头表达能力。

2021 年 Bpho 英国物理竞赛银奖

2021 年 美国高中物理竞赛 PhysicsBow 铜奖

姓名：余星瑶 性别：女

学校：南京市金陵中学中美班 年级：高二

简介：各学科均衡发展，成绩优异，喜欢独立思考并通过实验检验设想，分析能力较强，有良好的团队协作能力。

2020 年 初三年级毕业典礼学生领袖奖

2021 年 袋鼠数学竞赛中国区金奖

2021 年 全球未来太空学者大会初赛一等奖

姓名：胡馨元 性别：女

学校：南京市金陵中学中美班 年级：高二

简介：对科学充满了好奇和探索精神，曾获得南京市科学小博士称号。各学科成绩优异，尤其酷爱物理学科，喜探索，爱实践。独立思考和系统分析能力很强。初高中阶段多次担任学习委员和物理课代表。

2018, 2019 年 “随园杯” 初中物理一等奖

