

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：首页 > 科学传播 > 力学园地 > 释疑解惑

释疑解惑

【释疑解惑】从太空过生日点蜡烛说起

发布时间：2024-07-30

《力学园地》编辑部：

中国空间站建成运行，还开展了各种“天宫课堂”教学活动，对提高青少年科学素养很有裨益。我和我的小孙子一起看了神舟16的景海鹏等航天员有关太空火焰的演示教学，小孙子不断地问各种问题。因而希望你们能再提供一些背景知识以便回答孩子的提问。谢啦！

一名老者

2024年2月6日

从太空过生日点蜡烛说起

萤火 怡心

中国载人空间站“天宫”由核心舱“天和”、实验舱 I “问天”、实验舱 II “梦天”和货运飞船“天舟”组合而成。2021年4月29日，天和核心舱成功发射，正式拉开我国空间站建造的大幕。2022年6月4日，随着神舟十四号载人

飞行任务的实施，以天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱为基本构型的天宫空间站的建造全面完成。从此，我国具备了开展空间科学实验和技术验证的太空实验室，在这里还可以进行“天宫课堂”的教学演示活动。

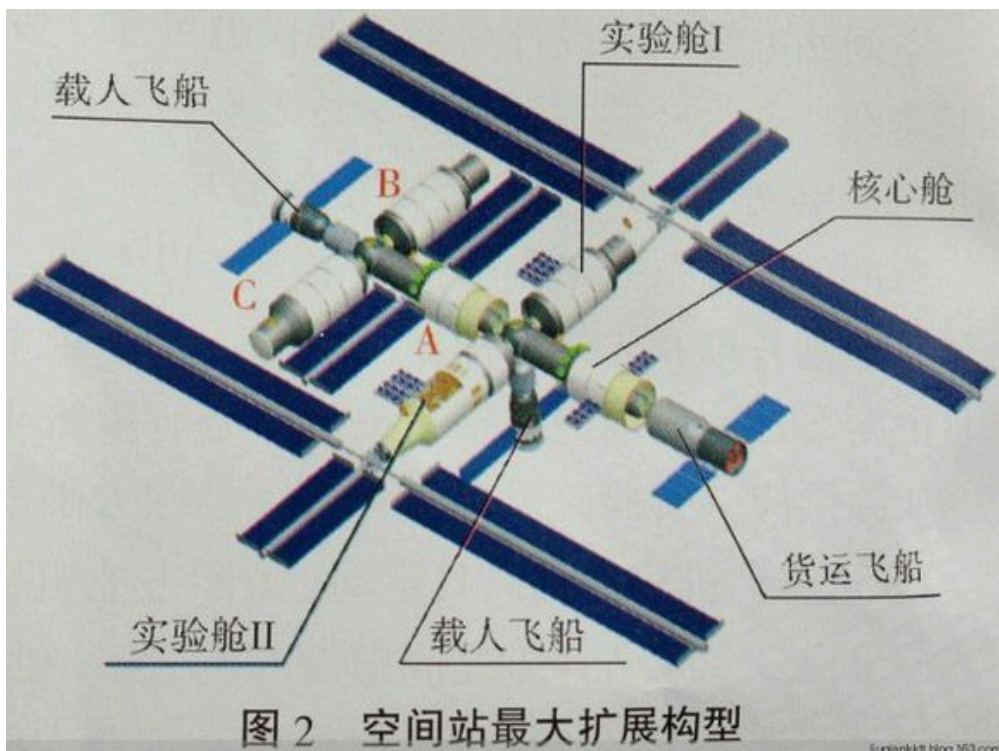


图1 中国空间站最大扩展构型（图片来源：网络）

2023年9月21日，神舟十六号航天员景海鹏、朱杨柱、桂海潮面向全国青少年进行了一场生动的太空科普授课，相信很多看过的中小学生对太空中的火焰燃烧实验念念不忘。那么，太空实验室里的蜡烛火焰和我们在地面上见到的究竟有什么不同呢？其背后的原因又是怎样的？原来，其中的关键在于太空实验室处于微重力环境。



图2 2023年9月21日的太空科普授课活动（图片来源：网络）

什么是微重力？

顾名思义，微重力是微小的重力，其实人们常常提到的“失重”就是与之相关的一种现象。学过中学物理的人都知道，我们平常说的重力是由地球引力产生的，一个物体受到的重力大小和自身的质量成正比，和与地心的距离成反比。在力学里，重力加速度的定义 $g=G/m$ ，这里 G 是物体所受的重力， m 是物体的质量。而且，力学家已经测得地面上的重力加速度 $g_0=9.8$ 米/秒²。于是，力学家采用比值 g/g_0 来定义“重力水平”。那么，重力水平低到多少就可以称为“微重力”或者“微重力环境”呢？开始时，科学家要求 $g/g_0=0(10^{-6})$ ，就是说重力水平的数量级为百万分之一。现在，有些研究者把重力水平达到 $g/g_0=0(10^{-3})$ 也称作微重力环境了，换言之，要求重力水平的数量级为千分之一。

在太空中飞行的航天器、空间站可以建立微重力环境，但这主要不是因为它们所在的轨道距离地面比较远因而地球对它们的引力小的缘故。这里不难做如下的估算：地球半径为6378千米，中国空间站的轨道高度为400千米，如果仅考虑与地心距离增加这个因素所造成的重力水平降低， $g/g_0=86\%$ 。这

和百万分之一，甚至千分之一的要求相比，几乎可以忽略不计。那么，为什么空间站还能形成微重力环境呢？这是因为空间站在不停地沿着轨道旋转（参见图3）。在地面参考系中，它的速度 v 的方向不断改变，有一个向心加速度 a ，因此受到一个向心力，这个向心力就是地球的引力。但在空间站参考系中（在牛顿力学中，这是个非惯性坐标系，因为它是做圆周运动），它是静止的（在空间站里的工作人员如此认为），因此需要有一个虚拟的惯性力——离心力，这样牛顿定律依然可以运用：离心力平衡了向心力（即重力）。所以，在空间站里形成了微重力环境。当然，在20世纪60—70年代，不少人把航天器微重力环境中的现象称为“零重力”过程，这种提法不够严格，因为在大多数航天器中很难实现重力水平等于零的状态。

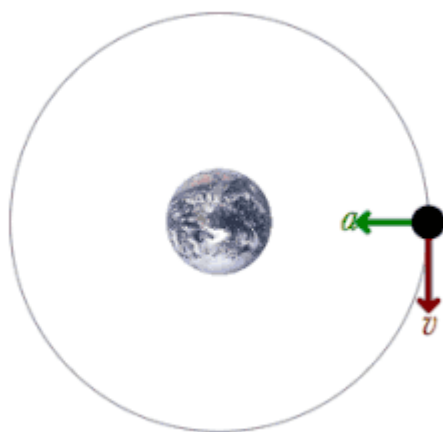


图3 空间站绕地球旋转运动（图片来源：网络）

微重力研究的意义

现在，大家都知道是地球的重力的作用使我们得以生存和站立在这个星球的大地上。地球这片大地上的常重力环境，对于人类来说似乎已经不再那样神秘。但是，未来空间探索的活动会越来越多，人类最终必然要迈向深空的探测，甚至已经在谈论移民月球、火星的设想。但是，太空环境与地面截

然不同，很多地面上的经验决不能轻易照搬到太空，否则将可能带来灾难。而人类要进军太空，就要深入研究太空微重力环境下各种与众不同的现象，并掌握其规律，以便在生命科学、材料科学等方面获得新突破，而这也就是微重力研究的总体领域。

例如，微重力流体力学就是微重力科学的重要组成部分。流体在重力作用下出现的沉淀等现象，在微重力环境下几乎消失。而且，地面上被重力掩盖掉的一些次级效应却会显现，甚至会起主导作用。浮力对流就是一个例子。在地球重力作用下，浮力会驱使流体从高温部分向低温部分运动，它称之为热对流。但是在微重力环境下，浮力对流被抑制了，但在地面上被抑制的热毛细对流却发挥作用了。在半导体晶体制备工艺中，要靠一个加热器使固体原材料融化成为“液桥”，晶体在其中慢慢生长（参见图4）。由于液桥的中部被加热，在地面时由于重力效应在液桥内部会形成如图4（a）所示的对流胞元，但在微重力下浮力不存在了液桥内部依然会形成对流如图4（b）所示。那么这里是什么机制呢？原来是液桥外表面的表面张力不均匀，表面张力梯度会驱动流体运动。这里的表面张力是液体产生的使表面尽可能缩小的力。清晨凝聚在叶片上的水珠、水龙头缓缓垂下的水滴，都是在表面张力的作用下形成的。研究清楚表面张力梯度驱动的热毛细对流，对于高品质空间材料制备有着重要的意义。

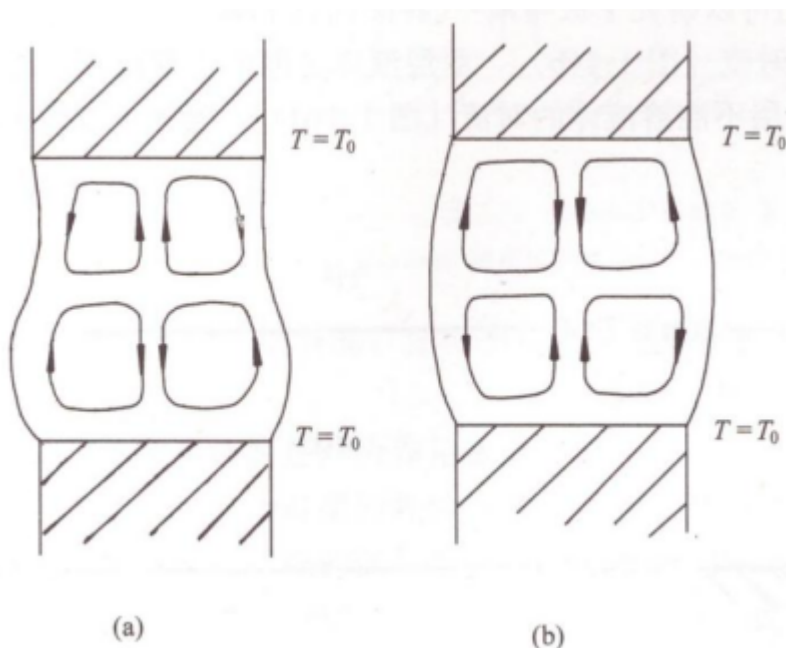


图4 液桥浮区对流的示意图 (图片来源 : 参考文献[1])

微重力环境下的火焰

01 正常重力下的火焰为何呈现为泪滴状 ?

咱们再回到火焰问题上来吧！如果你在地面上点燃一根蜡烛，你会观察到蜡烛的火焰呈现出“泪滴状”，就像图5 (a) 那样。这是和前面提到的浮力对流有关系的，因为在地球上，可燃物质与周围大气中的氧气发生反应会生成高温气态的氧化物。与周围大气相比，这些燃烧产物的温度高、密度小，在地球重力作用下浮力就产生了，从而使高温气体上升，同时周围的冷空气补充过来使可燃物继续燃烧。这样就在火焰周围形成空气向上移动的对流循环，从而使火焰呈细长的泪滴状。

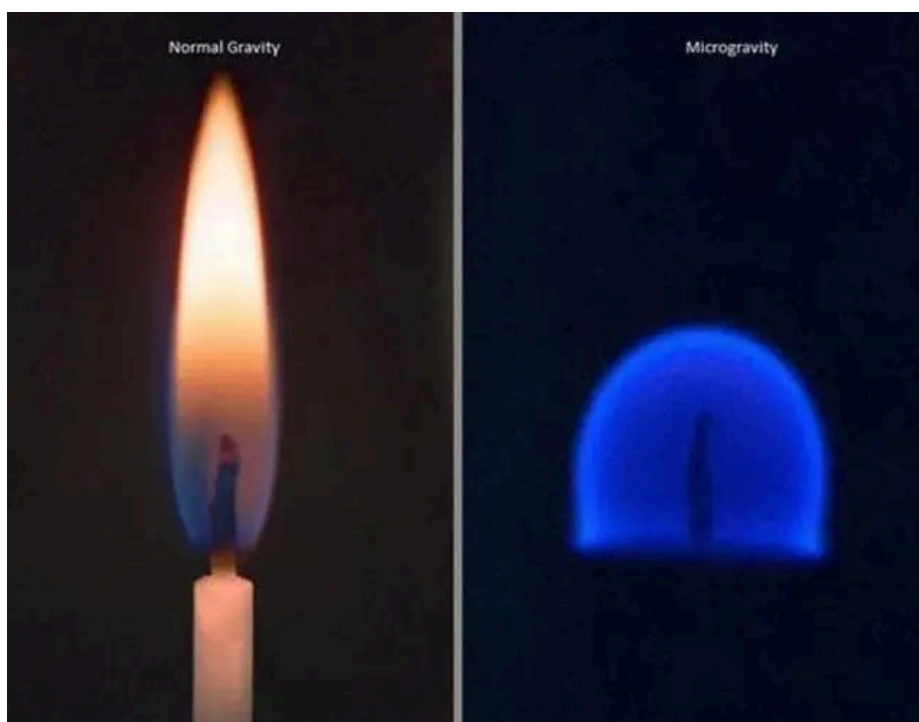


图5 常重力 (a) 和微重力 (b) 情况下火焰性状 (图片来源 : 网络)

细心的读者可能还会发现图5 (a) 中的火焰颜色存在着差异：在火焰底部是一个蓝色区域，在蓝色区域上方有一块小的深橙色部分，最上面的火焰主体呈现黄色。这里可以告诉大家（参见图6）：蓝色区域是大分子碳氢化合物蒸发并开始分解为小分子碳氢化合物的区域，该区域的氧气充足，因此属于富氧燃烧，这一部分的火焰的温度大约是800摄氏度；深橙色区域的氧气相对较少。在这里，各种形式的碳氢化合物继续分解，并伴随着碳黑颗粒的生成，这一部分的火焰温度大约有1000摄氏度；在黄色区域的底部，产生的碳黑颗粒逐渐增多。随着碳黑的上升，它们会继续被加热直到发生燃烧，并产生黄色的火焰。黄色区域的主体火焰温度约为1200摄氏度，到了顶部由于氧气的充足燃烧充分，温度可以升至1400摄氏度左右。

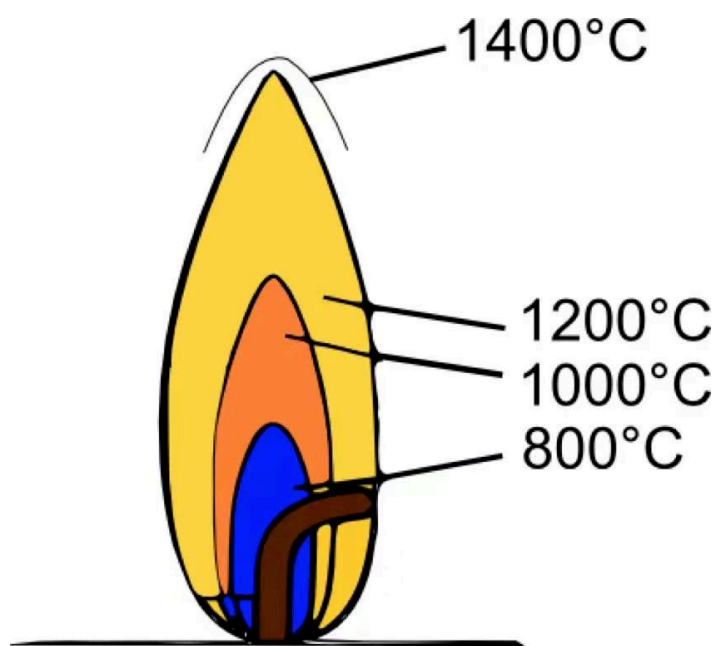


图6 地面上蜡烛火焰内部的温度分布（图片来源：网络）

02 微重力环境下火焰为何呈现出蓝色的圆球状？

在太空的微重力环境中，浮力会消失，气体的热对流便随之消失。燃烧产生的高温气体粒子具有较大的动能，会主动向四周的低温区域扩散，周围的氧气从高浓度环境中往低浓度的火焰中心区域运动，使得助燃

剂可以持续进入，此时的火焰没有所谓的向上或向左右等方向，而是向四周伸展，因而火焰是圆形的。没有了对流的存在，火焰只能“安静”地燃烧，而且能以更低温度维持燃烧，产生的碳烟含量就较少，因此火焰呈现蓝色的球形。

最后，这里要说明的，火焰研究并不是只是给大家演示一下它在太空中的形貌。这一个研究的背景是燃烧学和空间站防火技术的探讨。

微重力环境的建立

怎样建立起微重力环境呢？最好的当然是大型空间站，就像咱们中国的天宫空间站以及国际空间站等，其他如人造卫星、空间实验室也是不错的选择。但它们通常都很贵，比如国际空间站的建造和维护成本就高达上千亿美元。那么，还有什么途径能够获得微重力环境呢？微重力落塔就是其中一种，它采用的方式比较简单，就是建设一个高塔，在其中从顶处直接砸下来一个特制的容器（人们称之为“落舱”）。图7便是中国科学院力学研究所的116米高微重力落塔，它是继德国Bremen落塔（ZARM）之后世界上第二座在地面上建成的超百米落塔，可获得3.60秒的微重力时间。它依据的是力学中自由落体的“失重”原理。落塔能够提供的微重力时间取决于自由落体的高度，重力水平则取决于塔内空气的密度。对于后者，在常规的大气条件下，可达到 $g/g_0=0(10^{-2})$ ，在真空条件下，可达到 $g/g_0=0(10^{-5})$ 以上。

落塔可进行流体物理、非金属材料燃烧、液体管理等微重力实验研究，为航天飞行器载荷搭载实验及其防火技术预研提供了便利的实验手段。在某种程度上，力学所落塔标志着我国在微重力科学和应用领域内的发展水平。

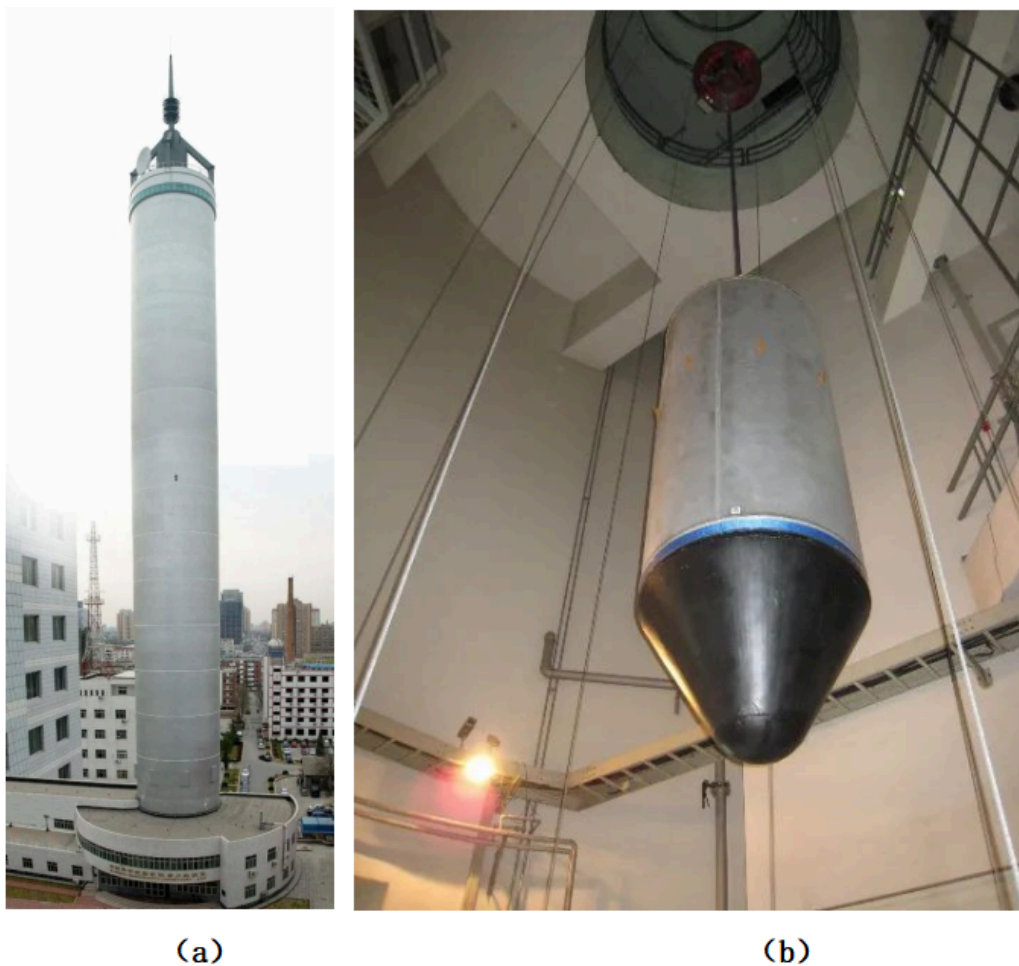


图7 中国科学院力学研究所的百米落塔：（a）落塔外观；（b）落塔内吊装的落舱

与落塔类似，人们可以建设“落井”来研究微重力问题。日本北海道上砂川市的日本微重力中心利用废弃矿井，建成了710米落井，可提供10秒的微重力试验时间。

此外，人们还可以利用飞机做抛物线飞行来获得微重力条件（参见图8），这样的飞行的飞机可以称之为“微重力飞机”。它在俯冲加速段加速到 $2g_0$ 左右，此阶段中其实是“超重”状态；然后上升进入自由飞行段做抛物线运动，此阶段可获得“低重力”环境，这时重力水平 g/g_0 的高低和驾驶员的技能相关，一般在 10^{-1} 到 10^{-2} 的范围内，因此主要是进行一些定性的实验。但微重力飞机每次飞行可以做多次抛物线飞行，反复地获得超重与低重力状况，因而便于安排并相对经济。类似地，人们还研制有“微重力火箭”，和飞机相比，

火箭的自由飞行段更长，可以维持较长时间的微重力水平（达到数十分钟）。而且重力水平可优于 10^{-5} ，再加上火箭推力大载荷能力高，可以开展一些大型实验。不过，它的费用也会相对较高些。

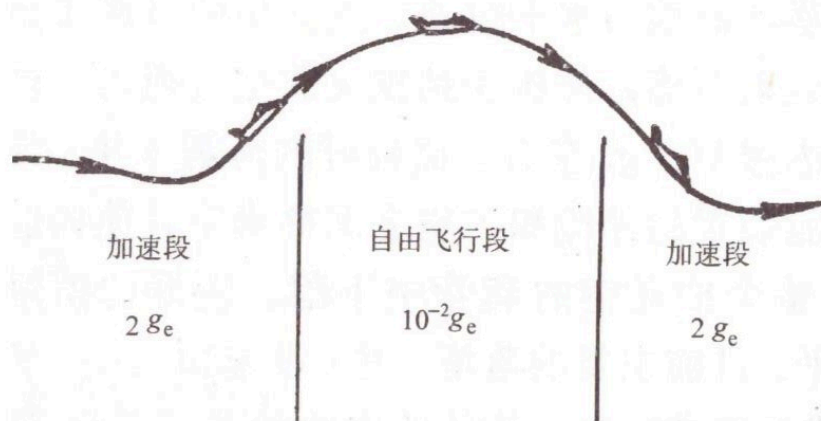


图 1-12 微重力飞机的轨迹和重力水平相应变化的关系

图8 微重力飞机的运动轨迹及相应的重力水平（图片来源：参考文献[1]）

参考文献

- [1] 胡文瑞、徐硕昌，微重力流体力学，科学出版社，1999
- [2] 冯伟泉, 柯受全, 于东波, 黎厉伟. 航天飞机G417 载荷研制及油滴与水滴接触微重力实验 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31(2): 115-121.
- [3] <https://mp.weixin.qq.com/s/NTZdjDSB0AoLyjzFPFeMQA>
- [4] <https://mp.weixin.qq.com/s/CY1wyHxO8O1APyVReQL0sw>
- [5] https://mp.weixin.qq.com/s/j0SqmAwoTnKg9D3KadLg_g
- [6] https://mp.weixin.qq.com/s/yVEm_ZPc5SFAKxxG-uuyug

上一篇：[【释疑解惑】你知道什么是数字心脏技术吗？](#)

下一篇：[【释疑解惑】风力发电机是怎样工作的？](#)

版权所有 © 2024 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

