

剑桥，科学精神的家园

——序《剑桥文丛》

萧 乾

40年代，除去短期去度假，我同剑桥先后有过两段因缘。1939至1940年，我是作为伦敦大学东方学院的讲师被疏散到剑桥去的，身份也可以说是个“难民”。那一年，我只是剑大英文系的旁听生，因为战乱的机缘，我得以寄身在这一所牛顿曾执教30年、有着深厚的科学传统和学术氛围的大学。

剑桥有个好传统，有如民国初年的北大，对来旁听的学生总是敞开大门，对那时由伦敦疏散来的兄弟大学成员更是竭诚欢迎。

1942年夏天，我辞去了东方学院的教职，成为剑大英文系的研究生，住进了这所15世纪兴建的皇家学院。书房门楣上，已事先漆上了我的名字。书房里，家具一应俱全，宽敞舒适；壁炉两边是书架，沿着三面墙是可以坐上十来位客人的沙发和软椅。最使人兴奋的是，窗户外面隔着草坪，正与英国古建筑中赫赫有名的皇家学院教堂遥遥相对。整整两年，我都望着大草坪上被晨曦拖长了的教堂身影，黄昏时分聆听在大风琴伴奏下唱诗班那清脆嘹亮的歌声。

1944年，我怀着依依不舍的心情向剑桥、向皇家学院告别。当时，我已动手写论文了，还差一年就可考取学位。然而，盟军已在诺曼底登陆，新闻记者的本能驱使我舍弃剑桥那恬静幽雅的书院生活，奔赴现实的前哨。于是，我就脱掉僧侣式的黑袍，走进了报社林立的伦敦舰队街，从一个埋首书斋的读书人，成为戎装上阵的战地记者。

剑桥有一种魅力，使曾经在那里生活过的人们一有机会就想回去看看它。我认识一个学习古希腊罗马文学的青年，开战后应征入伍，不久就成为熟练的轰炸机驾驶员。他一直保留着在剑桥的住房。每周两度去执行任务，不值勤的日子，就仍回到剑桥来。他屡次对我说，去轰炸德国鲁尔的工业设施，他不心疼。他最怕的是被派去轰炸意大利。他说，两次欧战都是欧洲人的自杀。他含着一腔热泪对我说：人类的希望在东方，但愿你们将来搞机械化的时候，千万别把固有的文明都丢掉。可惜下一次执行任务后他再也没回来。

剑桥叫我难忘，主要在于她对真理、对科学精神，对天文、生物、物理、原子的那种刻苦追求精神。卡文迪许试验室的灯光时常通宵达旦地亮着，剑桥天文台的望远镜和医学研究所的显微镜，经常勾起我对未知世界的神秘联想。

一次，在哲学家罗素的小型茶会上，我遇到一位怪人——正在十分认真地研究鬼学的心理系教授。席间他大谈人鬼之间传递信息的可能性。当时我纳闷他怎么没被大学评议会除名，也没遭到同僚们的孤立、歧视或鄙夷。后来另一位剑桥朋友听我提起此事，说他本人并不信鬼，偌大个剑桥，除了此公，谁也不信鬼。也不是没人背后非议他，然而让这位鬼学家安然无恙地存在着，既无伤大雅，又足以保持住剑桥在学术方面自由探讨的空气。大家都想在真理方面有所突破，而不是墨守成规。牛顿的万有引力定

律和达尔文的进化论就正是在这种气氛中探索出来的。

剑桥不仅为世界培养了许多一流的经营管理人才和杰出的科学家。这套《剑桥文丛》的作者大多都是本世纪世界级的科学家，大多曾在剑桥任教，是英国皇家学会的会员。像《穿越时空》的作者詹姆斯·金斯，最早提出物质不断创生理论，在天文理论方面也有不少创新，但闻名于世的还是由于他的天文科普著作。《残缺的记忆》的作者奥托·弗里希，他参与了现代物理学的一些重大事件，参加了研制第一个原子弹的工作，“感情原子核的裂变”这个词还是他发明的。他以这本精彩而幽默的个性回忆录，为本世纪许多最重大科学发现背后的人物和事件增加了迷人的色彩。《预测未来》的作者斯蒂芬·霍金 1974 年当选为皇家学会最年轻的会员，1979 年，任剑大卢卡斯讲座教授，这是牛顿曾经担任的职位。他有关大爆炸、黑洞的发现有助于把相对论和量子力学联系起来。他写的《时间简史》畅销全世界。

这种由世界级科学大家亲自撰写的科普读物，是目前国内科普读物中最缺乏的。本套作品我看不仅适合青少年，同时也适合成人阅读。出版者的直接意图并不在教给人们多少知识，而在于培养一种科学思考生命、思考世界的方法和科学精神。对那些勤于思考的人来说，思考本身即是科学的荣耀。物质和头脑两方面的完善，对一个现代化人更为重要，那更有助于他清楚地了解和思考自身在空间中的存在。

虚拟现实：虚幻的世界

照一下镜子，镜中可见到你的形象。当然，镜中什么都没有。物理学家将这种形象称作“虚拟图像”。“虚拟”是“不真实”或“虚构”的意思。今天，科学家们远不止利用镜子来推出虚构的东西。他们利用功能强大的计算机推出看上去真实，其实并不存在的整个世界。当你步入这些世界时犹如置身于虚拟现实之中。

“虚拟现实”一词是虚拟现实实验室研究的创始人贾朗·拉尼尔于1989年发明的，它向我们展现了一个崭新的领域。史蒂夫·奥克斯塔卡、尼斯和戴维·布莱特纳在《硅片奇迹》一书中称，“它是人们可潜心研究的、计算机生成的、交互式三维环境。”然而计算机是怎样生成这个人工世界的呢？更引人入胜的是，人们怎样进入这个世界并与之交互作用呢？这与大象分娩一样难度很大。

技 术

利用计算机为虚拟现实编程的目的是让人相信自己身处于一个其实并不存在的世界。为此，这个世界必须欺骗你的感觉，特别是你的视觉、听觉和触觉。在这三者中，视觉欺骗最重要，也是技术开发人员的研究重点所在。

今天，虚拟现实是头盔显示器产生的。所谓头盔显示器说得确切是一些罩住眼睛、用起来有所不便的头盔状的设备。在头盔中分别给每只眼睛配备一个2英寸~3英寸的小屏幕。在设计得更完善的头盔中，屏幕可从头部周围部分地卷起。从而你可通过观察周围情况来确信虚拟世界的存在。

屏幕可以是我們很熟悉的阴极射线管或液晶显示器，阴极射线管是典型的电视屏幕或计算机监视器。液晶显示器则重量轻，价格便宜，不过阴极射线管可产生分辨率更高的图像。事实上，液晶显示器的图像往往像卡通片，不十分逼真。

不论用哪种屏幕，一旦计算机开始工作，立体重叠图像以每秒60幅或60幅以上的速度在观察者眼前快速持续地闪烁。人的每只眼睛在稍微不同的时刻看到不同的图像；结果观察者可即刻融入一个三维环境。不过，乐趣才刚刚开始。多数头盔都配有传感器，可执行定位/定向跟踪等必要功能。这些传感器跟踪每个动作，每次转动，每点一次头，都将这些信息传给计算机。

跟踪器有多种，每种都有其优缺点。其中一种是装在头盔顶部的照相机，在人移动时采集顶灯闪光信号，让计算机了解人的去向。在时下流行的Nintendo（日本电子游戏机商标名——译注）功能手套游戏系统中，游戏人戴着一种发出高频的咔嚓声的特制手套。Nintendo计算机中的麦克风探测到这些超声波咔嚓声，并把它们转换成游戏人手掌的屏幕运动。

第三种跟踪方法，也是时下最流行的方法，叫磁性位置传感。在头盔或手套内安装互成不同角度的两组线圈。电流通过一组线圈时，产生一个小磁场。手或头活动时，第二组线圈在磁场中移动，在这些线圈中产生小电流。正确编程的计算机利用这种感应电流可追踪身体特定部位的移动。

虚拟现实实验室的数据手套也使用这种运动探测方式。这比 Nintendo 的功能手套先进许多，不过成本也为后者的 100 倍。

尽管磁性位置传感已得到广泛应用，图像提取将是未来的跟踪方式。图像提取技术使用一组摄像机从不同角度来跟踪被观测对象的活动，然后把数据输入编程计算机中进行活动分析。这是所有位置传感方式中精度最高的一种，可在屏幕上产生最逼真的运动。而且，采用图像提取技术不必戴上颇为不便的设备。可惜这也是所有方法中计算强度最大的一种。需要使用功率很大的巨型计算机和十分复杂的编程，下世纪之前这项技术不会被投放到消费市场。

在虚拟世界中准确跟踪你的运动至关重要，因为只有这样，计算机才能准确地改变环境。当你转向右边时，你希望所看到的图像能与真实世界一样。当你穿过房间时，随着你走近物体，物体应变大。当你绕椅子踱步时，不仅椅子的外观要发生平稳适当的变化，还要显示视差，与远处的物体相比，掠过你的视野更快些。如果房间里亮着灯，计算机必须不断调整明暗和影子，以产生真实的幻觉。不用说，所有这些改变和调整都对计算机提出了很高的要求。为避免出现电影中慢动作播放的不平稳、断断续续的运动，计算机必须每秒更新镜头 15 次。环境越复杂，计算机要处理的物体越多，计算就越多。目前计算机的功能还不可能处理这么多的数据。因此，虚拟世界仍然是利用代表真人漫画的数字简单地构成和装饰的。

好像计算机在欺骗你的视觉方面没有太大的麻烦似的，还要与你的听觉比比高低。为了能做到以假乱真，三维虚拟世界所拥有的声响还必须与你在类似的真实环境中所听到的声响完全相似，使你觉察不出来。放在屋中一隅播放的收音机必须做到让人听起来声音像来自屋中一隅似的。如果你走远一点，声音则必须弱一些。如果你走到屋子的另一边，声音听起来就要像从那儿传来似的。

奥克斯塔卡尔尼斯和布莱特纳在他们撰写的书中，谈到威斯康星大学弗雷德·赖特曼和多丽丝·基斯特勒所做的一项有趣实验。赖特曼和基斯特勒想确切地知道耳朵从三维空间听到声音时能听到些什么。然后，将这个数据输入计算机，计算机可模拟从不同方向到达耳朵的声波的形状。他们先让接受试验人员在屋中落座，将一个很小的探管传声器深深地塞入他的耳朵，并贴近其耳鼓。整个房间中的 144 个扬声器各发出不同的声音。每个扬声器所发出的特殊声音都用微音器收听并录下来。通过耳机将录音播放时，其音质与最初从不同扬声器所发出的声音显然一样。

利用从上述试验获得的足够的的数据，采用一组立体声耳机，一个定位/定向跟踪电路耦合系统以及配有十分复杂的计算能力的巨型计算机（解题战略），可得到接近真实生活和合理地实时变化的声音。

虚拟现实还让我们感受到触觉。当你抓住一只虚拟球，打开虚拟电灯开关，用手指抚摸虚拟女友的头发，把手伸入一桶虚拟水中，或摸一下虚拟玫瑰上的虚拟刺，你想有某种知觉，在远处模拟真实事物的某种感觉。处在虚拟环境中，连初步的触觉都没有就会大大降低幻觉效果。不幸的是，直到最近，人们还只好满足于这种大大折扣的幻觉效果。根本得不到触觉反馈。现在，虽说已取得进展，但结果仍然远远落后于实际。虚拟现实研究人员面临的最大挑战也许就是复制出触觉。

这有一个十分重要的问题，触觉有别于视觉和听觉，需要皮肤与物体

接触。触觉模拟的主要工作都针对手，手毕竟是人类驾驭环境的主要手段，手上的触觉感受器最多。手的工作模式大体上可归纳为通过使用特别设计的手套，跟踪手指弯曲等手的所有运动，然后在头戴三维显示器上用计算机产生的虚拟手来模拟。迄今，这方面还算顺利。但是，伸出虚拟手去抓物体又会怎样呢？这时，手套必须传递出已摸到东西的感觉。

能做到这一点的方法有多种，其中有一种已被采用。回顾 80 年代中期，美国空军把压电晶体缝在手套的指尖部位，通电时，晶体震动，产生触觉。尽管这种做法很原始且不准，不过飞行员已在虚拟仪表板上成功地进行了飞行模拟。

第二步要将感觉引入虚拟世界，这也许是更颇有抱负的尝试，其特点是采用分布在手套下侧的许多小气囊。当你触摸一件虚拟物体时，适用的气囊膨胀，往手指和手掌施加了压力。再来一次，触感不很真实。不过当你伸出手去抓一件并不存在的东西，你能指望拿到什么？

至少在可预见的将来，不能寄予太多的希望。随着人类发挥独创精神推出更富有创造力的方法，模拟手部乃至全身的神经末梢和肌肉（虚拟现实实验室已经创造出与数据手套配套的数据服），这种局面会改观，但是肯定仍有局限性。例如，你无法坐在一把虚拟椅子上和靠在虚拟墙上。因为，你缺少支撑物。当物体提起时，你无法感觉到物体的重量，除非手套中有装置可提供压力。但是，略有触觉的模拟总比没有强。让我们看一看现今已造出哪些虚拟世界，再想想明天的虚拟世界。

应 用

虚拟现实将不仅仅是代替电视机而已。

阿瑟·C·克拉克

在上述这段文字中，身为最优秀的科幻小说家之一的克拉克的观点十分鲜明，他确信虚拟现实对人类娱乐生活将产生意义深远的影响。而这是不是有点言过其实？或许不是。虽然虚拟现实绝对适应不了真实世界结构的错综复杂或丰富多彩，不过它也提供了投入和交互两种魔力。相比之下，电视则纯属被动式。绝不能将虚拟现实的用户说成懒汉，他们的行动会十分迅速。例如，自动办公设备公司推出了一种游乐中心式游戏，虚拟短网拍墙球（比赛规则和场地都与有四面墙场地的墙手球相同，但击球用以皮带拴腕的短柄球拍，球较墙手球略大而软——译注）。戴上头盔和数据手套，利用运动跟踪系统握着短网球拍，你会突然发现自己身在虚拟短网拍墙球的球场内，准备接发球。你的短网球拍的所有运动都由计算机的图形系统如实复制，就像你与计算机或另一可能远在几千英里之外的人打球。你的肾上腺素开始流动。到游戏一结束，你着实出了一身汗。

1993 年 3 月，W 工业公司制作的“手指恶梦”是另一个虚拟现实交互游戏，截止 1993 年 3 月已在美国十来家虚拟现实中心上市。这种游戏的目标是抢在对手（即这个游戏的另一方）发现并摧毁你之前干掉“他”。游戏中的另一个威胁是由计算机产生的翼趾怪物，它会猛扑下来，用爪子抓住你。这是一种初级仿真游戏，反映了当时虚拟现实游戏系统的水平。虚拟世界虽然是立体的，但像卡通片似的，没有触觉反馈，只是通过控制杆

上按键进行活动。然而人们还是排起长队花 4 美元去作 3 分钟的体验。也应当将这种游戏称作“经济恶梦”才对。

虚拟现实以后无疑会成为娱乐界的佼佼者。它可以使梦想成真。戴上头盔，拿着一把特制的吉他，计算机会使你如身临摇滚演唱会，给成百上千名狂热的歌迷演奏。此后，你就绝不会再去唱卡拉 OK 了。

虚拟现实在娱乐上的应用完全仅受到人们的想象力的限制。如果说 Nintendo 等家庭娱乐系统是一种征兆，虚拟现实将会普及得很快。不过，我们应指出，虚拟现实要比不用脑子的游乐中心游戏强得多，以免人们把虚拟现实当作“虚拟电视”。其真正的价值并不在于造就一个人工世界，而是帮助我们更好地理解真实世界。例如，位于查佩尔希尔的北卡罗莱那大学的化学家们正在戴上护目镜，投入双螺旋蛋白分子的三维世界中去。他们使用操纵杆或控制臂操纵更小的药物分子的图像，试图将这些图像置于蛋白质的活跃部位。操纵杆中甚至有引力和阻力（这是蛋白质的电磁力）。在药物分子接近时，蛋白质发生意外扭曲。药物公司通过这些模拟，希望在开始投入生产之前能了解哪种实验药物疗效最好。

1992 年《科学》杂志上有一篇文章把现实的计算机模拟称作“科学的第三分支”（该文并未说明前两个分支是什么）。美国宇航局在阿莫斯研究中心，根据飞往火星的卫星和探测器收集到的数据，将虚拟现实技术用于再现火星表面。城市开发商用一个含 80 个街区乘 80 个街区的虚拟模型来重建洛杉矶南部被暴乱毁掉的地区。他们利用仿真在这个地区踱步或疾步行走，可以发现并进而修改设计中的疏忽和错误。建筑师和汽车制造商采用同样方法出于同样的考虑使用虚拟现实技术来设计新住宅和新的汽车模型。1992 年 1 月的《科学新闻》报道：“在日本，顾客可以在设备陈列室的计算机屏幕上设计一间新厨房，而后戴上护目镜和手套试试想象中的发着微光的模拟小厨房。”

各种虚拟现实技术（尽管并非真正投入和交互）甚至已经用于法庭。在 1991 年的洛杉矶淫秽电影大王谋杀案中，其兄弟是嫌疑犯。原告及其律师设置了虚拟的犯罪现场，重现谋杀情景。在看了模拟后，法庭裁定嫌疑犯有罪。

应当指出，有意思的是，军方在虚拟现实的研究上投入了大量资金，当然军方是虚拟现实研究和发展的最大资金来源。奥克斯塔卡尔尼斯和布莱特纳说：“要是没有国防部，虚拟现实也许还未面世呢。”军方使用最新式的头盔、服装和世界上最快的巨型计算机，正在开拓供飞行员训练飞行用的近真实的环境。通过世界上最大的投入式仿真网络设备 SIMNET，美国和欧洲的军事人员正在搞战争演习和仿真的恐怖分子袭击，为防范真的出现这些情况作准备。1992 至 1996 年期间，美国军方计划耗资 5 亿多美元进行仿真研究（飞行仿真所用的一种头盔的造价为 100 万美元）。

医学上也开始使用虚拟现实技术。医生们现在在有各种虚拟损伤和肿瘤的虚拟病人身上练习外科手术。我们来看一下奥克斯塔卡尔尼斯和布莱特纳在《硅片奇迹》一书中对这一情景所作的下述描述：

米亚卡瓦医生伸出手去，可感受到戴上手套的手中的虚拟手术刀，当他切割皮肤时，计算机控制的小马达不出声响地快速转动着，产生以假乱真的阻力。外科医生在进行手术的过程中，精心编程的计算机通过护目镜向医生展现皮肤收缩、血液流动、内

部骨骼和潜在的问题。

虚拟现实的先驱和泰斗，贾朗·拉尼尔认为虚拟现实未来的“巨大市场”会是医学。有朝一日，世界上某地的医生可以对数千英里以外的病人完成棘手的手术。手术室机器人身上的摄像机将成为外科医生的眼睛。外科医生所戴的手套将不再是消过毒的橡皮手套，而是精度极高可遥控跟踪和进行触觉反馈的手套，手术器件用机械手来控制。

现场感受远方正在发展的事情，如千里之外的手术，叫远景显现。纯粹主义者认为远程存在并不是真正的虚拟现实，因为并未出现一个人工的、计算机控制的环境。他们说的对，但为什么分得这么细呢？技术、硬件、投入和交互均出现了。当然，意义就在这里。下个世纪，分布在世界各地的商业人员，通过计算机联网、头盔显示器，在虚拟会议室中聚会并讨论商务。虽然，他们各在大洋一方，但都投入彼此交互的仿真环境，如同在一个会议室聚会。这叫做远程电话会议，这种想法将变为现实。

你有恐高症吗？怕蛇吗？怕蜘蛛吗？得，算你幸运。治疗专家正计划将虚拟现实用于治愈神经官能症。让患者面对虚拟的蛇和蜘蛛，设法让他们对这些东西不敏感并最终治愈。

虚拟现实在性领域应用的潜力很大。不幸的是，当虚拟性生活最终发展到以假乱真时，恐怕你已太老而享受不了其中的乐趣了。用《虚拟现实》这本畅销书的作者霍华德·莱茵戈德的话来说，虚拟性生活是“21世纪初期和中叶的技术，并非翌年就能实现的。”其原因有两条：一是计算能力跟不上，二是没有适用的硬件（不是双关语）因而无法得到必要的触觉。但是，如果莱茵戈德谈到未来虚拟性生活的一段话可作为未来实际性生活征兆的话，那么耐心地等待还是值得的：

在爬进一间配有舒适的床垫的房间和戴上三维眼镜之前，你穿上轻质的紧身连衫裤（有人希望这种连衫裤是透明的），犹如衣裤相连的紧身内衣，但这种紧身衣配有可得到性生活快感的避孕套。在这套衣服的内侧使用现在尚未问世的技术，那是一套智能型传感器-效应器，其实这是与硬度不同的振动器配套的小型触觉探测器网，每平方英寸上有几百个，可以接收和传输触觉的真实感觉……你可以把脸颊靠在虚拟缎子上，感受触摸虚拟肌肉的不同感觉，或者你可以慢慢挤压某个软且弯柔的东西，并感受到经过你触摸后，这个东西变硬了。

现在想象把你整个听觉-视觉-触觉远程存在系统都接入电话网。你看到你自身和你配偶的身体像真的但却是人工的虚拟再现……你把手放在配偶的锁骨上，而在6000英里以外，一组效应器正以正确的顺序和频率传送你所希望传送的触摸。

真不错。仿真性行为被称作远程人造阴茎性活动，这比远程电话会议强多了。在虚拟约会结束之后，你可以轻拨计算机触发器，享受一下清新的虚拟冷水浴。拿一块厚实干爽的虚拟浴巾擦干全身。可惜，当你结束这场电子虚拟现实，爬出连衫裤时，你仍旧感到闷热，身上沾着真实的汗水。这才是真的。

（段斐然 译）

我的兄弟，克隆人

我是一个克隆人。但是，我的诞生不是某个违反道德守则的科学研究的結果。我是一个克隆人，因为事实上我有一个与我一模一样的双胞胎。他，实际上，也是本书的共同作者之一。

简单地说，克隆人是基因的复制品。怀孕时，发育我的卵子在受精后分裂时并未保留大量细胞。开始时，它分裂成两群。一群成长为一个聪明、英俊、有魅力的年轻小伙，也就是我。另一群则成为我的孪生兄弟。不过，重要的是我们都来自同一个合子或受精卵（一模一样的双胞胎更确切的名稱是单卵双生）。这意味着我们的脱氧核糖核酸 DNA（我们的基因组合）是相同的。双生是一种自然克隆¹。

克隆一般见于物种。生物体无性再生的结果（没有其他配偶体），克隆是单亲的产物。事实上，所有植物都可以克隆自己。土豆的块茎，草莓的长匍茎和醉蝶花属植物，以及郁金香球茎，都可以进行亲代克隆。而种子则是花粉粒受精卵的结果，属于有性生殖。每个种子发芽长成一个有独特基因的个体，就是非克隆。

克隆维持着各代动植物特定种类的同—性。这是无性生殖的一个特点。也是人类长期以来一直利用的一个特点。当你截下一段喜爱的盆栽植物并把它的根埋入土壤里，长出来的新植物就是原植物克隆个体。当你品尝一只“美味”的苹果（一种红苹果——译注）或麦金托什苹果（由麦金托什培育的一种晚熟的皮薄汁多带香味的红苹果——译注）或无子桔子时，你吃的是克隆植物。它是通过在普通树上嫁接优良果树的嫩枝或幼枝获得的。实际上，克隆一词来自希腊文中的 klon，意思是“细枝”或“幼枝”。早在 4000 年以前就进行了葡萄、香蕉、白薯、甘蔗、菠萝、芦笋乃至大蒜的人工克隆。

动物的无性繁殖没有植物那样普遍。尽管所有的动物都是有性繁殖，无性繁殖通常仅限于简单的无脊椎动物。水母或扁虫夹断身上的一小段，让大量的细胞长成一个新个体。雌蚜产下的卵，不授精就长成基因与其母体相同的新蚜。有几种鱼、两栖动物和蜥蜴也可以进行无性繁殖，即单性生殖（详见《物种的性活动》）。但是脊椎动物基本上无法通过自身的一部分，哪怕是一大块或一个单个的细胞，长成为一个新个体。动物进化为脊椎动物之后已丧失了这种能力。科学能重现这种能力吗？科学是否应该重现这种能力？

克隆动物：一段历史

克隆动物学实际上研究细胞分化。为什么受精卵细胞可以分裂长出骨骼、肌肉和皮肤的细胞，而成人的皮肤细胞和肌肉细胞只能分别造出更多的皮肤细胞和肌肉细胞呢？为什么一个具有受精卵细胞的所有 DNA 的皮肤细胞不能像卵细胞一样长成新的人？这是生物学尚未解开的最大的谜。到人类解开胚胎演化之谜时，人类就找到了治愈癌症和人类其他大量疾病以及防止衰老的方法。

¹ 南美犰狳在克隆方面很有意思。雌犰狳的受精卵在细胞分离时分成四部分，因此经常生四胞胎。

上世纪末，德国生物学家奥古斯特·韦斯曼提出了设法解释细胞分化最早的一种学说，认为受精卵的基因因子在胚胎细胞分裂时分裂。最后，各细胞会得到细胞特化所需要的基因因子。例如，一个皮肤细胞会得到只形成皮肤的基因因子，而一个肌肉细胞会具有只形成肌肉的基因因子。

这种学说经不起科学检验，后来被抛弃了。将一个双细胞青蛙胚胎晃动到两个细胞分离时，每个细胞长成健康的蝌蚪，继而长成一只健康的成蛙。细胞并未分摊到因子。

现在，我们知道，在每次分裂中，各个细胞获得原胚胎中的所有基因物质。分裂过程如下：在分裂全过程的某个环节，细胞中的基因不可逆地减少，限制细胞分化的潜力。在胚胎发育过程中，不同基因变成不同细胞，细胞定向发育。细胞能否不特化呢？切断的基因能否再接上？利用科学技术手段，能否让皮肤细胞再生，是否有再造一个健全的人的潜力？回答是不可能，至少目前不能，虽然十分引人入胜的科幻小说中都有这方面的内容。

艾拉·莱文在其 1976 年发表的《来自巴西的男孩》一书（后来拍成了电影）谈到，亲纳粹的科学家取得希特勒的身体细胞，并把它们发育成新的希特勒。好像希特勒还不够味似的，作家迈克尔·克莱顿撰写的《侏罗纪公园》一书写到利用恐龙 DNA 碎片无性繁殖出恐龙。从靠吸取恐龙血为生的尚未变成琥珀化石的史前昆虫的腹部萃取到所需的基因物质。这些书显然都是科幻小说，写出来也完全是为了娱乐。但是，戴维·罗威克于 1978 年推出的一本题目为《他的影像——克隆人》的图书十分畅销。该书认定克隆人已经出现，一个经商的富翁给了科学家们 100 多万美元，让他们用他的一个皮肤细胞或一个肝脏细胞（书中没有谈采用人体的哪部分细胞）复制自己。

最后，各国科学家都称该书纯属无稽之谈。一位曾被盗用姓名并与克隆实验联系在一起的科学家甚至打赢了与出版商的官司。但是，罗威克描述了十分令人信服的制造克隆人的过程，并在青蛙等低等脊椎动物身上做了实验。

哦，可怜的青蛙。它连同一种与海星有关的小型海洋生物海胆一起，从 19 世纪 50 年代开始就遭到胚胎学家无情地捕捉。按哺乳学家的标准，原因有二，其一是青蛙卵太大。其二是它们在体外受精和生长，便于掌握和研究胚胎分化。

因此，胚胎学家设法利用青蛙卵（这些卵当然在一小碟池塘水中）克隆出成蛙。其过程很简单：

1. 移走成年青蛙体细胞中带有基因物质的细胞核。
2. 将该细胞核放入一个卵细胞中，用精子激活（该精子的细胞核已通过显微手术移走了）。
3. 观察有细胞核的胚胎长成一只克隆青蛙。

此类所谓的核子转移研究肯定会失败，因为成蛙细胞核即使在被激活的受精卵中，仍然无法活化被切断的基因并分化成新的生物体。因此，50 年代初，又进行了这项试验，这次使用仅出生一天的青蛙胚胎的细胞核。仅出生一天的胚胎叫作囊胚，包括几千个细胞。试验顺利地进行，结果出现健康的蝌蚪和成蛙。

令人惊讶的是，从一只成蛙的癌细胞中取出核子，将其植入一个去核

的卵子中，也能产生蝌蚪和成蛙。这个结果让许多生物学家震惊，他们一直认为大量肿瘤细胞会扩散，显而易见，细胞癌变时，将特化细胞中本应切断的基因接通。也许到将来，可从致死的那个癌细胞中克隆出一个新的你。这是一种有趣的想法，不过还是让我们回过头来看看。

70年代中期，牛津大学的J.B.格登博士和他的助手从完全发育的蝌蚪的肠细胞中取出细胞核，将它移植到去核的卵细胞中，再次造出一只普通的青蛙。显而易见，分化的基因在蝌蚪阶段尚未被不可逆转地抑制住。卵细胞在适宜的环境中还可以复原。可惜这方面的机能至今还是个谜。

对青蛙所作的实验导致了几项重大进展。但是哺乳动物又如何呢？克隆能成功地用在人类那样有毛发的热血动物身上吗？

回答是肯定的。80年代初，日内瓦的生物学家们克隆出3只老鼠。他们所用的方法与克隆青蛙一样。从早期胚胎细胞中提取核子并将其植入被精液激活的卵子中。但是，和受精的青蛙卵的不同是，必须将老鼠胚胎植入雌鼠体中培养。

自胚胎学发展的早期到现在，在克隆的前沿研究中还未出现惊天动地的突破。费尽心机的生物学家始终无法提取出成年细胞核，不能使细胞核特化的基因与这些细胞核匹配。1993年下半年，新闻媒介对虚有其表的克隆人争论不休，但这种反应过于激烈。并没有克隆出成年人，科学家远未能达到这一目标。也许可以做到双生，肯定可以做到裂球分离，但还没有无性繁殖出人。让我们详细了解一下实际取得的成就。

裂球分离

受精卵开始分裂时，得到的胚胎细胞叫裂球。1970年，动物研究学家分离了两个裂球，并将其用来造出相同的双生幼鼠。任何子宫可以孕育胚胎，而不需要生物学中所说母体胚胎。1979年，英国剑桥大学动物生理学院进行的裂球分离，创造出几组相同的双生羊羔。不久，上述程序被用来造出小牛。对动物饲养员来说，让优良家畜生产许多后代的“人工双生”办法已老掉牙了。但是1993年10月，杰里·L·霍尔和罗勃特·J·斯蒂尔曼首次对人进行了“成功”的裂球分离。所谓“成功”并非指在人的子宫中实际植入培育的裂球。那种实验是不道德和不合法的。他们的做法如下：

在乔治·华盛顿大学体外受精诊所中工作的霍尔和斯蒂尔曼选择了17种被多种精液受精的胚胎。一些有缺陷的胚胎并未存活，打算将其抛弃。所有选出的胚胎都处于卵裂早期（受精后的分裂），包括2到8个不等的裂球。用一种链霉菌蛋白酶来分解一般能保护发育中的卵子的名叫“卵膜”的透明胶状涂层，将裂球逐个分离并包入从海草中提取的合成卵膜中。

研究人员把这些裂球放入一个碟子中培育。来自双细胞胚胎的细胞发育最好，有些甚至达到了32个细胞的阶段。这时，可将它们植入子宫中。总之，霍尔和斯蒂尔曼共造出48个“克隆生物”。

这并不是一门新科学。如前所述，家畜业使用这项技术已有几十年。霍尔和斯蒂尔曼并没有按家畜饲养的标准做法，把核子从胚胎细胞移植到卵细胞中。那么为什么要紧张不安呢？因为人不是家畜。这是首次对人的胚胎做的实验，虽然它不能发育。

许多人根本无法接受对人的胚胎的研究，他们担心这项技术会被用于制造阴谋。使用“优秀”人才的精液和卵子可以造出“优秀”的裂球，这样就可以成立孩童加工厂。“子宫出租”一类的标牌将到处可见。一个家庭可能由不同年龄的相同双生儿组成。只需将分离的裂球冷冻，需要时可以生另一个孪生儿。悖理的结果是一位母亲可按自己的想象生出双胞胎。如果一个孩子在任何方面都表现得很优秀，那么甚至可以向出价最高的人出售他冷冻的克隆细胞。

这听起来荒唐吧？多数生物学家都相信这有可能成为现实，克隆出一支全部由希特勒组成的军队将是一幅令人信服的未来景象。让我回想一下下述事件：在 1990 年，阿贝和玛丽·阿亚拉承认她们曾设想为一位患有白血病的生命垂危的姐姐提供她的同胞小妹妹的骨髓。让冷冻的胚胎生长，并在此后某个时间抽取其中某个部分用作身体备用的想法并不太令人吃惊。因为，无性繁殖体与它们的基因双生完全匹配，不会遇到任何器官排斥反应问题。

这也难怪重视医德的人会批评这种以近乎宗教般的狂热作任何形式的人体实验，以及搞无性繁殖或孪生实验。但是，早期胚胎实验也出现了混乱。对先驱者来说，这种研究为成千上万对无法生育的夫妇造福。现在，医生用单个卵细胞进行体外受精的成功率只有 10%。利用裂球分离法来造出几个可植入的胚胎，成功率会大大提高。

裂球分离还广泛用于新型的基因诊断。采用这种方法，有家族性严重遗传病史的夫妇（如家庭性黑蒙性白痴、囊性纤维变性或肌营养不良）都可以进行身外受精。用一根微型导管在胚胎的卵膜开个口并吸出一个裂球，找出 DNA 中有缺陷的基因。麻烦在于，有时一个细胞还不够。如果利用霍尔和斯蒂尔曼技术可复制多个单一的裂球，就可以收集到足够的 DNA 来进行一次成功的实验。

总之，如果人类不扪心自问并进行调查，就不会有长进。以前的外科医生不将人体打开，就学不到外科技能。科学家不研究受精卵，就无法知晓受精卵如何分化。也许我们应引用 17 世纪英国伟大哲学家托马斯·霍布斯的至理名言“知识就是力量”。我们只是真诚地希望这种力量能用来造福人类。

（段斐然 译）

温度的极限

先将温度计放在嘴里含 7 分钟，再取出，温度读数为 98.6°F 。要是感到身体不舒服，温度读数为 103°F 或 104°F 。许多人知道如果温度读数为 110°F ，人会死去。读数为 90°F 时，人已死一段时间了。我们都知道体温的意义，也知道温度在天气预报中的意义。例如在 20°F 时，作户外运动就要穿上冬装； 90°F ，就得去海滨。我们很熟悉温度和日常生活关系密切。但是温度究竟是什么？ 20°F 、 90°F 乃至 9000°F 时的空气有何不同？

温度指冷热程度

温度是热和冷的测量单位，由分子的运动或动能确定。

永恒运动

所有的分子都在运动：正如在气体中分子向所有方向散开；在液体中，粘在一起滑动；在固体中，固定在其位置上振动，这种运动产生热和温度。一组分子动能越大，温度就越高。即使是在物质少量取样中，分子的运动速度也不同，因此以一组分子的平均动能来定义温度。身体健康不发烧时，体温为 98.6°F 左右。 98.6°F 是什么意思？ 98.6 盎司约为 6 磅。 98.6 英寸约为 8 英尺。那么 98.6°F 是多少？

英寸和英尺是距离的度量单位，盎司和磅是重量的度量单位，同样华氏度是温度的度量单位，称作华氏温标。荷兰裔德国物理学家丹尼尔·加布里埃尔·华伦海特于 1714 年率先推出精度的确很高的温度计。以往的温度计基于空气等气体或酒精或水等液体的膨胀和收缩，而华氏温度计使用了液体水银。事实证明，水银在许多方面优于其他物质。其一，在所有液体中，水银的膨胀率最均匀，而水随温度变化时其的膨胀尤为不均匀。其二，水银不如水那样容易结冰，不如酒精那样容易沸腾，在很宽的温度范围内都保持液态。其三，水和酒精会附在玻璃表面。水温度计或酒精温度计的温度下降时，一些液体附在玻璃上，下降缓慢，因此很难得出温度的精确读数。

华伦海特还发明了一种校准他所推出的温度计的温标。艾萨克·牛顿建议以水的凝固点、人的体温作为温度计的标定点，并将水的凝固点定为 0 度，华伦海特推出的温标基本上以它为基础。同时他还意识到这样一来，冬天的温度将低于零度。为了避免负温度，将盐加到水中以降低水的凝固点。他将盐水凝固温度定为 0 华氏度（即 0°F ）。然后将 0 度到体温之间的间隔分成 96 等份（为什么这样划分无可奉告），将体温定为 96°F 。根据这一温标，纯水的凝固点接近 32°F ，沸点接近 212°F 。

科学家进一步了解水的物理和化学特性后发现，纯水的凝固点和沸点很有参考价值。因此，华伦海特调整了温标，将凝固点正好定为 32°F ，沸点为 212°F ，其间的间隔分成 180 等份。体温就调整为 98.6°F 。

在美国，除科学界以外的其他领域主要采用华氏温标。其他许多国家（即便是华氏温标的发源地英国）及那些国家的科学家都使用瑞典天文学

家安德·摄尔西乌斯于 1742 年发明的另一种温标。这种温标极其简单，它将纯水的凝固点定为 0 度，沸点定为 100 度，将其间的间隔分成 100 等份（奇怪的是，摄尔西乌斯先将凝固点定为 100 度，沸点为 0 度，但第二年就将两者倒了过来）。起先这种温标称为百分标，即分成“100 等份”，在 1948 年之后大家达成一致，将其更名为摄氏温标（这两种温标的符号都是 C，因而在教科书中不必修改）。

图 1 对华氏温标和摄氏温标作了比较。

另一种温标是法国物理学家列奥米尔于 1731 年发明的列氏温标，该温标将水的凝固点计为 0 度，沸点计为 80 度。这种温标也曾持续使用了一段时间，但后来逐渐失去了影响，现在只是科学上的一段小插曲而已。

列奥米尔之后的一个多世纪之内温标并没有很大变化。看来找不出什么理由将水的凝固点和沸点之间的间隔分成其他等份。但是不久，物理界发现将水的凝固点作为温标的起点没有任何意义。

高温和低温的极限

数千年来人们都知道，物体受热膨胀，冷却时收缩（但水在一定温度时有例外，参见《奇妙的水分子》）。温度变化时，固体和液体几乎不膨胀也不收缩，少量有变化的也因物质而异。例如，金属铝的膨胀比矿石石英快 77 倍。气体则并非如此。温度变化时，所有气体都随之发生明显的膨胀和收缩，且变化率相同，是一般固体的 300 倍。

气体收缩率不变，也出现了一个有意思的问题。气体冷却时以恒定比率收缩会不会越缩越小，最终缩到物质消失？那时会出现什么现象？物质怎么能没有体积不占空间，而基本上消失呢？

法国化学家约瑟夫·路易斯·盖伊·勒萨克在 18 世纪末期提出了这个问题。他取出一定体积的气体以 0 为起始温度将其慢慢冷却并记录其体积的变化。气体温度每下降 1 度，体积减少 $1/273$ 。例如，他用 273 加仑的氧气从 0 开始实验，温度降为 -1 时，体积减为 272 加仑；在 -10 时，体积变为 263 加仑；在 -50 时，变成 223 加仑，依此类推。那么如果气体温度为 -273，又怎样呢？体积会减为零吗？

不会。气体在冷却到一定程度时变成液体，收缩率大大下降。温度更低时，液体固化，收缩率进一步减少。因而体积永远不可能降为零。盖伊·勒萨克和其他人的研究导致了另一个有趣的问题：物体的冷却到底有无限度？

-273 是一个令人感兴趣的值。物理学家开始将温度变化与分子动能而不是与体积变化相联系，他们推断，温度从 0 开始每降低 1 度，实验中的氧气体积不仅减少 $1/273$ ，分子也失去了 $1/273$ 的动能。在 -273 时，分子不再运动，甚至在组成分子的原子中移动的电子也不运动，总动能为零。物理学家不会接受这种观点。如果电子不在原子内到处运动，由于两者间的相互吸引，就会被拉向原子核，原子就会崩溃。那么所有物质在 -273

他没有将膨胀考虑进去，某种受约束的限定气体变热时无限膨胀，而宇宙中有足够的空间，很容易接收这个观点。

时都会崩溃。

但是，物质不会崩溃；因此，温度不可能达到-273。事实上存在的温度的下限，即使利用现代的先进技术，也绝不可能达到-273（确切值为-273.16），将来也绝不可能达到。这是物理界“无法做到”的事之一。如果有朝一日做到这一点，将会出现十分奇特的现象。光速是另一个做不到的事（参见《一切事物都是相对的：狭义相对论》）。

不管能否做到，-273 很快得到了很好的应用。1848 年，苏格兰物理学家威廉·汤姆森（后来提升为男爵，头衔开尔文勋爵）提出温标中的零点不应该是水的凝固点（摄氏温标）或 32 度（华氏温标），而应采用能存在的最低温度（水像酒精、苹果汁和巧克力奶油冻一样，仅仅是无数物质之一），这样才有意义。他将这个最低温度称为绝对零度，由此产生的温标称为绝对温标。通常也被称为开氏温标。

为了符合自己的使用目的，开尔文决定修改摄氏温标而不修改华氏温标。1 开 (1K) 和 1 的值实际上相等（今天温度比昨天高 10，同样也高出 10K）。唯一的区别是它们的起点，若开氏温标从 0 开始，那么摄氏温标从-273 开始（华氏温标从-460 开始）。

天文学和物理学等领域乐于采用开氏温标。表 1 对开氏温标和摄氏温标的公共值作了比较。

	绝对温度	
		K
水的沸点	100	373
人的体温	37	310
室温	20	293
水的凝固点	0	273
绝对零度	-273	0

将摄氏温度变为开氏温度，加上 273。

将开氏温度变为摄氏温度，减去 273。

我们已经了解了温度的下限。是否有温度的上限？

460 °F 到 11,000 °F
(-273 到 6000)

尽管我们无法达到绝对零度，但能够十分接近这个温度，仅仅高出十亿分之几度，这种温度下没有气体，也几乎没有液体。您呼吸的空气是块状的固态冰。在分子一级，一切物质都以极低的速度运动。

物体受热时，分子开始振动和摆动。许多分子挣脱束缚。熔解和沸腾下面还要谈到。压力对不同温度下物质的物理状态有一定的作用。物质的熔点和沸点通常指在常压下，或是海平面的标准大气压下。

在高于绝对零度 2 华氏度或 1 摄氏度下（现在，我们开始使用这两种常用温标），氢首先熔解；略高于这一温度（-452 °F 或 -269）就开始沸腾。接着是氦。氧排在第四位，在-361 °F（-218）时熔解，-297 °F

开氏温标的符号 [°] 通常省略。

(-183)时沸腾，温度再升高 168 °F，就达到地球上的最低气温记录：-129 °F (-89)。这一气温于 1983 年在南极洲出现。最先熔化的金属为汞，在-38 °F (-39)时熔解。冰在 32 °F (0)时溶解。

我们现在来看温标的正值，温度稳步上升。1992 年，利比亚出现了地球上树荫下的最高温度 136 °F (58)。但比 212 °F (100)的沸水温度低得多。更比厨房火炉通常的 550 °F (288)低。550 °F 略高于纸张的燃点。雷·布拉德伯里撰写的《华氏 451 度》一书的书名源于纸张的燃点。书中讲到在未来沉闷的社会，政府为压制思想和言语自由而焚书。

炉内空气达不到将空气加热的火焰热度。标准火炉或炉顶燃烧器所用天然气(甲烷)火焰的温度超过 2000 °F (1039)。这大体上是金和铜的熔点，汽车尾气的温度(汽车发动机的温度可达到 4500 °F)。在这个温度下，受热物体将发出红光。

其他许多金属，如铁在 2795 °F (1535)时熔解。熔点最高的金属是灯泡中发光的灯丝，金属钨。它在 6116 °F (3380)时变为液体。唯有钻石在更高温度下才熔解，其熔点为 6400 °F (3538)。费解的是，钨的沸点为 10,700 °F (5927)，是所有物质中最高的，高于钻石的沸点。

在 7300 °F (约 4000)的常压下根本没有固体存在。

温度还能更高。什么情况下出现这些超高温，在什么过程中出现？

11,000 °F (约 6000)甚至更高

在地下 4000 英里的地球中心处的温度约为 12,000 °F (6649)，略高于太阳表面温度。地球中心处的材料主要是极高压下的固态金属铁和镍。高压产生高温，体积和质量更大的恒星将产生更大的内部压力，核心的温度更高，太阳系中体积最大、质量最大的木星(其质量大于其他 8 个行星质量之和)的核心温度估计高达 3.6 万 °F (约 2 万)。温度之高，所有分子键都无法存在。存在的物质都由单原子和部分原子组成。

既然这时的温度已超过行星的温度，我们来看一下恒星。恒星的表面温度悬殊很大。体积较小的恒星其实温度不算高，约 5400 °F (约 3000)。它们看上去呈红色。太阳的质量约为小恒星的 10 倍，是木星的 1000 倍，因此其内部的压力和热量都很大。它的表面温度约为 10,000 °F (约 5500)，发出黄光。太阳远不能和质量最大、最热的恒星相比。质量最大和温度最高的恒星的表面温度达到 20 万 °F (约 11.1 万)，发出蓝白光。激光束的温度则是这个温度的 10 倍。

激光和恒星表面的温度远远比不上恒星中心的温度。即使是最小的恒星的核心温度也超过 1800 万 °F (约 1000 万)。这是氢聚变的温度，氢聚变是恒星有能量并发光的原因。太阳中心的温度约为 2700 万 °F (1500 万)，质量更大的恒星中心的温度更高。科学家在地球上用氢弹爆炸再现氢聚变反应。托卡马克实验核反应堆在受控实验室条件下可再现氢聚变(不要将托卡马克热核反应装置与世界各国产生社会所需能量的核反应堆混为一谈，后者是裂变反应堆，根本不是实验反应堆，它采用完全不同的核反应过程，释放的能量不如实验核反应堆多)。托卡马克装置的内部温度能达到 7.2 亿 °F (约 4 亿)。

还有温度更高的物质吗？有。恒星将氢用尽，开始死亡时，会出现失常行为。它们开始融合其他元素，核心处温度高达 25 亿 °F (约 14 亿)。最重的恒星在意想不到的爆炸中结束生命，这个过程叫超新星。发生超新星现象时，其核心温度超过 410 亿 °F (约 230 亿)。据报道，粒子加速器中的温度超过 18000 亿 °F (约 10000 亿)。

现在我们知道温度能达到数万亿度。温度有上限吗？物理学家认为既然有温度下限，肯定也存在上限。美国国家标准与技术研究所的约翰·黑斯蒂和大卫·邦内尔以及美国首都华盛顿的国际风险科学中心的琼·贝科威茨合著的《高温》一文中指出，自然界能达到的最大温度受可用能量开始生成物质的限制，估计能达到 $2 \times 10^{12} \text{K}$ ，即 3.6 万亿 °F (约 2 万亿)，比我们现在所知道的温度最高的物体还高一倍。

创世大爆炸也是例外。我们相信宇宙从创世大爆炸开始，当时的温度是无法想象的。按宇宙论者和天文物理学家计算，“大爆炸”的温度达到 $2 \times 10^{32} \text{°F}$ (将 2 改为 1，即为大致的摄氏度)，任何温度都不会高于这个温度了。

(段斐然 译)

奇妙的水分子

心脏能跳动

血液能流动

肺能呼吸，关节能活动，肌肉能运动

多亏有了人体的冷却系统

——埃维昂公司瓶装水广告语节选

水的功能远不止这些。

水是用得最普遍的物质。没有水就没有生命，世界气候就会是另一个样子，最要紧的是无法用微波炉加热食物。水这种物质如此特殊的原因何在？关键在于它的分子结构。

正确的角度

尽管水的行为复杂又独特，它却是又小又简单的分子。它由两个氢原子分别和氧原子键合而成（见图1）。

水分子的三个原子形成 104.5 度角。每个氢原子和氧原子之间的键，叫共价键，通过分享一对电子形成。应当指出，一对电子的共享程度并不均衡。氧比氢更需要电子（这种特性称为负电性）。换言之，氢原子和氧原子键合时，在这个过程中共价电子主要在负电的氧原子周围运动。因此，共价键氧的一侧带负电(-)，氢的一侧带正电(+)(高中物理课本就介绍过电子带负电)。

如果水是线性分子，这些电荷就无关紧要。这种分子应该对称（见图2）。

（为了检验水等由三个原子组成的分子的对称性，画一条横线与一条竖线穿过分子中部。如果分子对称，上下、左右看上去都应该一样。）正电荷均匀地分布在负电荷周围，作用相互抵消。只有一个电荷中心；分子为无极分子。

但是水分子为非线性，呈角分布，因而差异很大（见图3）。

因为呈角分布，因而分子不对称。在负电荷周围，正电荷不均匀分布。作用不能相互抵消，两者都有自己的电荷中心。分子有正负极。这是有极分子，化学家称为偶极子（见图4）。事实上，水是一种特殊的有极分子，其有极属性比几乎其他所有分子都明显。

因而水分子呈非线性，且呈角分布。这方面哪怕稍有差池，生命就不会存在。

黏在一起

因为偶极子有正极与负极，活像小磁铁。分子的正极吸引邻近分子的负极，从而分子黏在一起。蜂蜜黏性大，就是这个原因。图5为水分子相互吸引的示意图。