

工程热物理与能源利用学科

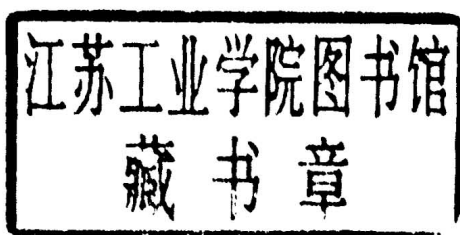
传热学研究发展战略讨论会 专 题 报 告 汇 编

国家自然科学基金委员会材料科学与工程科学部
工程热物理与能源利用学科发展战略研究组

一九八九年十月 北京

工程热物理与能源利用学科

传热学研究发展战略讨论会 专 题 报 告 汇 编



国家自然科学基金委员会材料科学与工程科学部
工程热物理与能源利用学科发展战略研究组

一九八九年五月 北京

前 言

受国家自然科学基金委员会材料科学与工程科学部的委托, 1988年11月29至30日在清华大学邀约部分专家举行“传热学研究的发展战略讨论会”。本文集收编了会后由作者各自整理的十二篇报告。

当前科学与新兴技术、包括高技术的发展迅猛, 突出表现出的趋向是不同学科之间的交叉和科学与技术的传统界限在逐渐模糊。不仅能源, 而且在材料加工工艺以及信息、环境、航天和生物医学技术等都对相关的传热传质或者隔热防湿提出不少有待解决的前沿课题。这使传热学成为国际技术科学界非常活跃的一个分支学科, 频繁地举行国际传热会议和分组或者专题讨论性的学术会议。1988年, 先后在我国召开了多次传热方面的国际学术会议, 即八月在清华大学召开的“第二届北京国际传热学学术会议”, 五月在重庆大学举办的“国际相变传热学术会议”和八月初在广州举办的“传热强化与节能国际会议”; 十月还在沈阳由中美协作举办了“节能中的传热问题国际会议”。同样在1988年, 我国学者应邀出席了五月在苏联召开的首届“明斯克传热传质学术会议”, 八月底至九月初相继在南斯拉夫召开的由国际传热传质中心(ICHMT)举办的“电子器件冷却专题学术讨论会”以及首届“全球实验传热学、实验流体力学与实验热力学学术会议”, 也参加了七月在西德亚琛召开的“国际低温生物工程学术会议”和在美国由ASME与AIChE联合举办的“传热学学术年会”。因此, 在1988年11月29至30日, 有针对性邀集参加上述活动的一些同志举行“传热学研究的发展战略讨论会”, 可以比较客观地总结我国传热研究的现状、找出与国外的差距和展望未来。与会者一致肯定了自然科学基金对组织和引导我国传热研究面向国家现实、面向世界、面向未来起了卓有成效的积极推动作用, 才能在1988年同一年内接连举办颇具规模的国际会议, 博得国际传热界的高度评价和重视; 同时也认为: 我们的队伍仍嫌过小, 研究内容以传统领域的居多, 比较集中于节能范围的传热强化, 对新技术兴起的兼顾不够, 对诸如材料工艺、包括机械加工工艺和材料工作安全性的传热研究以及跨学科、跨部门、基础性强的传热领域的开拓急需加强导向扶持, 即便象工业炉节能中强化辐射换热的基础性研究也还相当薄弱。

1988年11月29至30日两天的讨论会, 虽然与会者分工作了较好的准备, 也很难期望它对传热学研究作出广泛的全面的探讨。本文集所收编的十二篇报告, 是以专题评述的方式, 对探索我国传热学研究的发展战略提出了一些有益的建议和展望, 或许能起到抛砖引玉的作用, 有助于更好地发挥自然科学基金的资助效益。这是编集本文集的主要出发点。在编辑过程中曾作了少量删节, 以突出报告的主旨, 完全保留原作的格局和特色。

王补宣

1989年7月15日

— 1 —

目 录

前言	王补宣	1
1. 传热传质研究已成为低温生物学的重要课题	华泽钊	3
2. 热管技术的应用及其基础研究	马同泽	13
3. 沸腾与凝结换热进展	辛明道 夏吉良	20
4. 固液相变研究的现状与展望	陈钟颐 董志锋	32
5. 对辐射换热现状与发展的一些看法	余其铮 谈和平	41
6. 多孔介质的传热传质	王补宣	51
7. 换热器与对流换热强化	罗棣庵	57
8. 化工领域传热的研究方向	邓颂九 谭盈科	69
9. 热流体(力)学及其应用	过增元	76
10. 电子器件冷却——传热学发展的新领域	马重芳	91
11. 激光材料加工工艺中的传热问题	张能力 杨继东	98
12. 生命科学中的若干热物理问题	赵令德	102

前 言

受国家自然科学基金委员会材料科学与工程科学部的委托, 1988年11月29至30日在清华大学邀约部分专家举行“传热学研究的发展战略讨论会”。本文集收编了会后由作者各自整理的十二篇报告。

当前科学与新兴技术、包括高技术的发展迅猛, 突出表现出的趋向是不同学科之间的交叉和科学与技术的传统界限在逐渐模糊。不仅能源, 而且在材料加工工艺以及信息、环境、航天和生物医学技术等都对相关的传热传质或者隔热防湿提出不少有待解决的前沿课题。这使传热学成为国际技术科学界非常活跃的一个分支学科, 频繁地举行国际传热会议和分组或者专题讨论性的学术会议。1988年, 先后在我国召开了多次传热方面的国际学术会议, 即八月在清华大学召开的“第二届北京国际传热学学术会议”, 五月在重庆大学举办的“国际相变传热学术会议”和八月初在广州举办的“传热强化与节能国际会议”; 十月还在沈阳由中美协作举办了“节能中的传热问题国际会议”。同样在1988年, 我国学者应邀出席了五月在苏联召开的首届“明斯克传热传质学术会议”, 八月底至九月初相继在南斯拉夫召开的由国际传热传质中心(ICHMT)举办的“电子器件冷却专题学术讨论会”以及首届“全球实验传热学、实验流体力学与实验热力学学术会议”, 也参加了七月在西德亚琛召开的“国际低温生物工程学术会议”和在美国由ASME与AIChE联合举办的“传热学学术年会”。因此, 在1988年11月29至30日, 有针对性邀集参加上述活动的一些同志举行“传热学研究的发展战略讨论会”, 可以比较客观地总结我国传热研究的现状、找出与国外的差距和展望未来。与会者一致肯定了自然科学基金对组织和引导我国传热研究面向国家现实、面向世界、面向未来起了卓有成效的积极推动作用, 才能在1988年同一年内接连举办颇具规模的国际会议, 博得国际传热界的高度评价和重视; 同时也认为: 我们的队伍仍嫌过小, 研究内容以传统领域的居多, 比较集中于节能范围的传热强化, 对新技术兴起的兼顾不够, 对诸如材料工艺、包括机械加工工艺和材料工作安全性的传热研究以及跨学科、跨部门、基础性强的传热领域的开拓急需加强导向扶持, 即便象工业炉节能中强化辐射换热的基础性研究也还相当薄弱。

1988年11月29至30日两天的讨论会, 虽然与会者分工作了较好的准备, 也很难期望它对传热学研究作出广泛的全面的探讨。本文集所收编的十二篇报告, 是以专题评述的方式, 对探索我国传热学研究的发展战略提出了一些有益的建议和展望, 或许能起到抛砖引玉的作用, 有助于更好地发挥自然科学基金的资助效益。这是编集本文集的主要出发点。在编辑过程中曾作了少量删节, 以突出报告的主旨, 完全保留原作的格局和特色。

王补宣

1989年7月15日

— 1 —

43413

目 录

前言	王补宣	1
1. 传热传质研究已成为低温生物学的重要课题	华泽钊	3
2. 热管技术的应用及其基础研究	马同泽	13
3. 沸腾与凝结换热进展	辛明道 夏吉良	20
4. 固液相变研究的现状与展望	陈钟颐 董志锋	32
5. 对辐射换热现状与发展的一些看法	余其铮 谈和平	41
6. 多孔介质的传热传质	王补宣	51
7. 换热器与对流换热强化	罗棣庵	57
8. 化工领域传热的研究方向	邓颂九 谭盈科	69
9. 热流体(力)学及其应用	过增元	76
10. 电子器件冷却——传热学发展的新领域	马重芳	91
11. 激光材料加工工艺中的传热问题	张能力 杨继东	98
12. 生命科学中的若干热物理问题	赵令德	102

传热传质研究已成为 低温生物学的重要课题

华泽钊

(上海机械学院低温生物工程研究室)

摘 要——一些细胞能在 -196°C 的低温下保持数十年以上，这在医学和农牧业上具有很大的实际应用价值，并由此产生一门新兴学科——低温生物学。但是到目前为止，大多数生物材料的低温保存却遇到困难。为了克服这些困难，人们逐步发现必须深入研究溶液在降温 and 复温过程中产生的许多特殊的传热传质问题并研究相应的技术和设备。这些研究大大推进了低温生物学的发展，也给工程热物理学科增加了新的内容。

一. 低温保存与低温生物学

很久以前，人们就有了将生物材料放在低温下长期保存的想法。从上世纪起，一些科学幻想小说作家就编写了生物体以至整个人体在低温下长期保存的故事。但是真正开始实现低温保存还只是最近三十多年的事。1949年英国生物学家波尔格(C. Palge)和史密斯(A.U. Smith)在偶然的情况下发现加了甘油的精子可以经历低温而不死亡。当他们在英国《自然》杂志上发表了简短的论文后，一大批生物学家被吸引到“低温保存”这个课题上来了。

生物体为什么会能在低温下长期保存呢？这是因为低温能抑制生物体的生化活动。按阿尔赫尼厄斯(S. Arrhenius)公式来估算，即认为生化反应的速率 K 和绝对温度 T 之间存在着下面的关系：

$$K = A \cdot \exp(-E_A / RT)$$

当取定活化能 E_A 的数值后，就可算出 K 随温度降低而衰减的情况。举例来说，若一生物体在 4°C 环境下能存活2小时，那么，从理论上说，它在 -40°C 下能保存数日，在 -80°C 下可保存数月，而在 -196°C 下可望保存几个世纪。

六十年代，美国纽约血液中心主任罗(A.W. Rowe)实现了红细胞的低温保存。1980年他将在液氮温度下保存了12年的红细胞复温后进行检查，没有发现任何生化和功能上的变异。这从实际上证明了生物材料可以在低温下长期保存。

1981年，美国麻省理工学院克拉瓦尔霍(E.G. Gravalho)等将红细胞的温度一直降到 -272.29°C (0.9K)，复温后未见任何变异，这说明低温保存并未发现有温度下限。从阿尔赫尼厄斯公式分析，温度越低，保存时间可越长，但要达到液氮温度以下，耗费很大，所以从实用观点来说， -196°C 已足够了。

生物体虽能在低温下长期保存，但却很容易在降温和复温的过程中遭受损伤而死亡，这就是“低温损伤”。低温损伤也可被应用于医学上，如可用来杀伤肿瘤等不利细胞，这在外科中已形成了一个新分支——“低温外科”。它是利用液氮作冷源，形成特殊的“冷刀”。当“冷刀”接触肿瘤时，即可将该处的细胞杀伤。除了直接作用外，低温还可造成组织中微循环的栓塞，从而使肿瘤细胞进一步损伤而死亡。低温外科是1963年库柏(J.S. Cooper)开创的，它具有设备简单、手术方便、出血少等优点；有人还发现经低温外科手术后会出现抗原，从而具有一定的免疫性。

到60年代，一批生物材料成功地实行了低温保存，但对一些复杂的细胞，一直没法实现低温保存(组织和器官的情况就更差了)，这使科学家们认识到低温保存并非简单的事，深感有进行研究的必要。1964年他们组织了国际低温生物学会(Society for Cryobiology)，出版国际学术期刊《低温生物学》(Cryobiology)，并每年举行低温生物学会年会。

顾名思义，低温生物学是研究低温对生物体所产生的影响的一门学科。它研究生物体在低温下的变化，以及低温损伤生物体的机理。它所包括的课题，除了生物材料在低温下长期保存机理外，还有4℃左右和过冷状态的短期保存、冷冻干燥、低温外科、低体温医学、低温酶学、极地生物学、动物冬眠、动植物抗寒性、人的冻伤及其防治等。从1964年国际低温生物学会成立以来，生物材料在液氮温度下的长期保存以及低温损伤机理的研究一直是最被关心的课题，近来这种情况更有加强的趋势。在国际低温生物学会1988年年会上，关于低温长期保存及损伤机理的论文已占全部论文的四分之三。

二、低温保存在医学上的应用

生物材料的低温保存在医学上主要用于“移植”。移植又分自体移植和异体移植。所谓自体移植就是将体内的生物材料取出加以保存，然后再移植到患者自己体内。笔者在美国麻省总医院血液中心的低温血库中见到有许多私人的储血袋，这些人将自己的血液抽出放在低温下长期保存。这一方面可以备日后车祸、手术等不时之需，因为用自己的血可避免排异反应；另一方面当年迈时输入年轻时的血有返老还童之作用。异体移植是指“供体”和“受体”并非同一个人，例如可将刚死亡者的皮肤取下保存，以备严重烧伤病人植皮之需。

目前医学上已开始应用的低温保存生物材料有：人血液及其某些成分、精子、胚胎、骨髓细胞、肝细胞、皮肤、角膜、胰腺组织、甲状旁腺等，以及制药用的高品位菌种。这些材料的低温保存已为医学带来了突破性的发展。

1. 骨髓细胞的低温保存和癌症的治疗——目前治疗实体恶性肿瘤和白血病的常用方法是进行化疗和放疗，这个方法能杀死癌细胞，但同时也杀死了大量造血的“祖先细胞”——骨髓细胞。从80年代起，医生们利用低温生物学原理，先将骨髓细胞由患者体内取出，用甘

油、DMSO 或 PVP 作抗冻剂，经二步冷却法(第一步先以 $1\sim 3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 降至 -60°C ；第二步再快速冷却到液氮温度)存放在液氮容器中。接着对患者进行超剂量的化疗和放疗；疗后将低温保存的骨髓细胞取出复温(存活率可达 $65\sim 100\%$)，移植回患者体内，使其迅速恢复造血功能。近三年来，国内对低温保存骨髓进行了大量研究，并已用于临床，据 1986 年初统计，病例已超过 30 个，绝大多数患者的造血功能得到明显的恢复。

2. 血液的分成保存和移植——血液由液体血浆和有形成分(红细胞、白细胞、血小板等)两部分组成，由于血液会很快凝固，所以长期以来人们一直在研究血液的保存。1947 年发现 ACD(枸橼酸—枸橼酸钠—葡萄糖)保存液能防止血液凝固和红细胞被破坏，使血液在 4°C 冰箱内可保存 21 天。以后不断改进保存液，使保存时间增长到 70—80 天。

然而，人们并不满足于全血的短期保存，而迫切地研究着血液分成分的长期保存。这一方面是因为供需双方的尖锐矛盾，需要更长期、更安全的保存方法；另一方面是由于血液的珍贵和不同患者要求不同的血液成分。例如，烧伤和出血性休克病人主要需要血浆，贫血病人需要红细胞，缺乏血小板的病人需要血小板，血友病人需要血液中某些凝血因子等。

关于红细胞的液氮低温保存，目前主要有二种方法。一种是以 Rowe 为代表的低浓度抗冻剂快速降温($100^{\circ}\text{C}/\text{分}$)方法；另一种是以 Huggins 为代表的高浓度抗冻剂慢速降温($1^{\circ}\text{C}/\text{分}$)方法。两法的存活率均可达 90% 左右。血小板在 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的降温方法下可取得 50%—80% 存活率，同属于白细胞的淋巴细胞和粒性白细胞分别要求 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 和 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的降温速率，前者的存活率近 100%；而后者却只有 10%—30%，还不能用于临床。

3. 胰腺的保存和糖尿病的治疗——糖尿病是由于缺乏胰岛素引起的代谢性疾病。通过移植胰腺组织或胰岛细胞，可释放胰岛素，使糖代谢等得到调节和稳定的控制，从而使糖尿病得到治疗。

治疗糖尿病需移植异体胰腺，特别是矢折胎儿的胰腺。在 4°C 下，胰腺只能保持 48 小时。人们从 70 年代开始研究胎鼠胰腺的低温保存，80 年代研究人的胎儿胰腺低温长期保存，目前已开始临床应用。对离体的胰岛细胞可用 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 降温；而对离体的胰腺组织，则降温速率须慢得多($0.2^{\circ}\text{C}/\text{分}$)，复温速率也要慢得多。

4. 人的精子和胚胎低温保存——这一方面的成就，使许多患不育症的夫妇喜得子女，标志世界医学先进水平的冷冻试管婴儿，正就是利用在液氮温度下保持的胚胎在体外培养成的。

近年来，上海机械学院低温生物工程研究室配合一些医学研究单位和医院，成功地进行了皮肤、精子和骨髓细胞等的低温保存，并进行了高品位抗生素菌种的低温保存，存活率已达国际先进水平。1985 年上海某医院对一位老年严重甲亢病妇进行甲状腺全切除手术，我们曾协助医院将患者的甲状旁腺进行低温保存。即把甲状旁腺切成边长为 2

毫米的小片，置于由 80% 的韦默思(Waymouth)培养液、10% 的 DMSO、10% 的自体血清组成的溶液中，以 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 降温至 -80°C ，再直接放入液氮容器中保存。手术后该患者出现甲状腺衰退，医生即将低温保存的小片复温，植入患者前臂，甲状腺功能迅速恢复正常。

三、低温保存在农牧业上的应用

哺乳类动物精子和胚胎的低温保存，已给畜牧业带来了巨大的变革。以奶牛为例，若要得到大量优良奶牛，就得要相应地饲养一大批良种公牛和良种母牛，而这需要耗费很大的财力和人力。但当牛的精子、胚胎实现低温保存后，人们就可以只饲养很少量的良种公牛和良种母牛，就能得大量良种的奶牛崽。其方法是先收集良种公牛的大量精液，置于液氮中保存，并送到各地的良种母牛处；对良种母牛注射“超排卵剂”，使之一次能排卵数十个；将冷冻精液复温后注入母牛子宫，让其和超排的卵子结合，形成数十只胚胎；用水将胚胎冲出并收集，以特殊的技术保存于 -196°C 低温下；需用时将这些当种胚胎逐一分别置入一般母牛的子宫内，让其怀孕生崽。用这种方法，良种母牛只须排卵而不必怀孕生崽。一头良种母牛每年可以超排大量卵子，通过“借腹怀胎”的办法得到大量的良种牛崽。

精子低温保存技术在 50 年代已基本解决，且存活率较高；胚胎的保存则要困难得多，直到 70 年代才逐渐摸索到规律。胚胎保存要求很慢的降温速率，有时只有 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ，且存活率也只有 50% 左右，至今仍是低温生物学家研究的重点课题之一。中国农业科学院畜牧研究所在牛、羊等家畜精子和胚胎低温保存方面作出很大贡献，并取得极明显的经济效益。

鱼、蟹、虾等水生经济动物的精子和胚胎的低温保存，也可望给渔业生产带来巨大变革。鱼的卵子是在体外受精和发育的，在自然情况下卵子的受精率很低，受精卵也因被吞食等原因而大量丢失。有了冷冻的受精卵或胚胎，就可按需进行复温和培育，这就可不受地区、季节限制向市场供应个体大小合适的鱼。但鱼胚胎的低温保存并非简单之事，因为它的体积较大(直径 1~6 毫米)，且胚胎内含有很高的卵黄成分。加拿大、日本等国研究过斑马鱼和大西洋鲑的胚胎，只能降到零下十几摄氏度。最近几年，上海机械学院取得了鲤鱼的个别胚胎在 -196°C 下低温保存的实例，引起国内外同行的注意。

对于濒危的珍稀动物，如大熊猫、东北虎等，有可能通过低温保存精子和胚胎的方法得到挽救。近年，我国成功地实现了熊猫精子的低温保存，并用冷冻精液让雌熊猫怀孕，生了大熊猫幼仔。

植物的纯种种子是国家的重要资源，许多国家都建立了自己的种子库，以保存种子不使其变异。液氮低温种子库有其特殊的优点，如不会有病害和虫害，能长期保存而无变异，不需要复杂的温度和湿度调节等。1982 年 Styles 将 24 种种子放在液氮中保持 600

天，复温后未发现对发芽有任何不良影响，有些种子在低温处理时极易受损伤，需逐个仔细地研究它们的低温保存工艺。

低温保存微生物、寄生虫等，可用于检验药物的抗寄生虫能力，以及探测环境污染和致癌物质。

某些昆虫的保存具有特殊的意义，1986年美国国家科学基金会(NSF)公开招标，希望低温生物学家和遗传学家共同研究果蝇在各个发育阶段的低温保存。果蝇是研究遗传变异的极重要的生物材料，从1909年摩尔根(T.H. Morgan)开始以果蝇为材料进行实验遗传学研究以来，在近80年内遗传学家一直用人工方法培养果蝇，这样不仅要耗费大量的人力和财力，而且易发生变异。若果蝇卵能实现低温保存，将给遗传学研究带来崭新的技术。

四.低温生物学遇到的困难和相应传热传质研究的兴起

目前能实现低温保存的生物材料大多数是细胞，少数是组织，而几乎没有器官。器官低温保存的困难，一方面是由于器官由多种细胞组成，各种细胞要求不同的降温、复温程序和不同的抗冻剂，它们很难同时得到满足；另一方面是由于器官体积较大，很难达到内部温度一致和浓度一致。到目前为止，肾等器官只能在 8°C 左右用灌注方法进行短期保存。1976年格特曼(F. M. Guttman)发表论文报道利用灌注氮气等方法，将17只狗肾在 -80°C 下保存15分钟，复温后有9只存活。1978年著名生物学家佩格(D. E. Pegg)重复了上述试验，但没有成功，以后一直没有人发表过肾在低温下保存的报道。

至于整个人体的低温保存，现在还未具备条件，在美国有一些人将患绝症的晚期病人直接放在液氮中企图得到保存；他们还出版几期刊物宣传他们的活动，然而不可能有成功的报道。这些人曾要求参加国际低温生物学会，但遭到拒绝，因为学会认为他们所从事的并非真正的科学研究。

从1949年英国生物学家Polge等偶然地实现精子保存以后的约20年期间，许多生物学家对各种生物材料的低温保存进行了大量的试验研究，在试验中发现了一些规律：

(1)除了少数极简单的微生物外，一般生物体要实现低温保存都需要用某些“抗冻剂”(或称“低温保护剂”)。目前常用的抗冻剂有甘油、二甲亚砜(DMSO)、聚烯吡酮(PVP)、甲醇、乙二醇、羟乙基淀粉(HES)等。

(2)为了达到成功的低温保存，不同的细胞不仅要求不同种类的抗冻剂，还对抗冻剂的浓度以及加入和取走程序有着严格的要求。

(3)不同的细胞要求不同的降温程序，有的要求 $100^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的降温，有的却要求 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的冷却速率，一些复杂的细胞还要求降温程序分成多段进行，每段具有不同的冷却速率。

(4)不同的细胞要求不同的复温程序，快的要求每分钟数百度，慢的只要求每分钟几度。

虽然，生物学家的研究发现了上述经验性规律，但低温保存仍存在着巨大困难，许多细胞不能实现低温保存，低温损伤的机理也没有被仔细地研究。

从七十年代开始，科学家们已逐渐认识到，光靠大量的单纯生物学的试验，无法从根本上解决低温保存的困难，因为这些问题并非完全属于传统的生物学范畴。从本质上来说，低温损伤是由于温度这个物理量的变化而引起细胞所处溶液的物理化学变化，进而影响细胞的。这些变化的分析和控制应是物理学家和工程学家的擅长，其中相当部分的内容应是工程热物理研究的课题。

在低温生物学中传热传质研究的兴起是从七十年代开始的，主要有如下成果。

七十年代初，美国的 P. Mazur 博士在若干近似假设的前提下，建立了在降温过程中细胞中水分透过细胞膜向外渗透的传质模型，并建立了偏微分方程。方程组的解可以定性地给出细胞的体积变化和降温速率、细胞膜的水渗透率等因素的关系。

根据细胞在冷却过程中的渗透模型，Mazur 又进一步提出造成低温损伤的两种因素的理论。根据此理论，任何一种细胞在低温保存过程中都存在着最佳冷却速率。如冷却过慢，由于细胞外溶液中的水分结冰，胞内外渗透压不等，使大量水分由胞内通过细胞膜向外渗出；由于细胞的剧烈收缩和细胞处于高浓度溶液中的时间过长，细胞受到损伤而死亡。这是造成低温损伤的一个因素，称为“溶液损伤”。如冷却过快，在胞外溶液水分结冰时，胞内的水来不及通过细胞膜向外渗出，胞内溶液过冷而结冰，形成“胞内冰”。这是造成细胞损伤的另一个因素，称为“胞内冰损伤”。由于这两个因素的作用，就存在着某种最佳冷却速率。

笔者在美国麻省理工学院进修期间，曾于 1982 年发表论文，分析了在降温过程中细胞膜内外可能产生的温度差及其对水渗透的影响，并综合研究了温度场、浓度场对水渗透的影响。

通过低温生物学中热学问题的研究，目前人们已普遍具有这样的看法：生物体的低温保存要经历三个阶段，即降温阶段、低温下储存阶段和复温阶段，而在降温阶段和复温阶段又会产生三个主要的过程，即溶液的结冰过程、冰的融化过程以及水分通过细胞膜向内或向外的渗透过程。（而这三个过程实质上都是热物理过程）。如果低温储存的温度低于 -80°C ，那么细胞的损伤几乎全来自降温 and 复温两个阶段。在溶液的结冰过程中，溶液的冰晶形成和增长会损伤细胞；在溶液的融化过程中，冰晶的再结晶会损伤细胞；在渗透过程中，高渗透应力和高浓度溶液也会损伤细胞。这样，低温保存的研究，在很大的程度上就成为分析和研究这三个热物理过程及其对细胞的损伤，并进而寻找较好的方案来控制细胞的降温、复温过程，以使细胞免受或少受损伤。

传热学实验技术也在低温生物学研究中发挥了重要作用，突出地表现在低温生物显微镜系统的研制成功。美国麻省理工学院教授 E.G. Cravalho 原是加州大学贝克莱分校田长霖教授的博士生，是研究低温传热的。在他组建低温生物研究室以后，通过他和儿

届研究生,以及笔者几年的工作,于1983年建成了较完善的低温显微系统。在该系统中,生物样品的温度可在 $+25^{\circ}\text{C}$ 至 -120°C 内任意变化,其降温 and 复温程序由微型计算机精确控制,细胞在低温下所经历的全部变化由摄、录象机进行录摄,便于分析研究。继 Gavalho 以后,他的博士生 Dill, McGrath, Cosman 等人在毕业后研究了对流式、导热式等数种不同类型的低温显微系统。

低温显微镜系统的出现,为低温生物学的研究提供了强有力的工具,从此人们可以形象地和定量地观察到细胞及溶液在降温、复温过程的变化。美国的 Leibo 用这套系统对鼠胚胎进行研究,摄录了胚胎的形态变化,定性地证实了 Mazur 关于低温损伤的两因素理论,也得到了鼠胚胎低温保存的合理程序。

五. 在当前低温生物学研究中与传热传质有关的课题

1. 低温保存过程的热分析和热控制——生物材料被冷却时,总要发生液相冷却、过冷与晶核形成、液固相变、固相冷却等过程。利用低温显微镜系统进行研究时,由于所用样品的数量极小,可以真实地得到细胞所经历的保存程序。在实用时,无论用安瓿还是塑料袋,生物材料总是有相当数量的,在降温、复温时都要产生复杂的传热学问题。我们的实验说明,即使使用由计算机控制的降温仪,样品的实际温度和冷腔温度之间总会存在着差别,特别是在相变释放潜热的“平台”之后,两者的温度差可能超过 40°C ;同时,两者的降温速率也相差很大,这也是严重损伤生物材料的一个原因。近年来,人们开始运用传热学方法分析这个问题,并试图对其进行控制。1985年 Diller 研究了晶核形成温度(T_n)、相变时间(τ_p)对细胞损伤的影响;一些学者用传热学方法研究了实际容器中,在有溶液相变的情况下,各点的生物材料的温度和冷却速率,为确定低温保存实际工艺提供了指导。

要实现对保存过程的控制,就需要研制相应的降温 and 复温的设备。80年代初,出现了微机控制的降温仪,它是用喷射液氮的办法达到降温目的的。此法具有降温速率快的特点,但当用于慢速降温时(如鱼胚胎保存要求低于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{分}$),较难控制温度的变化。1987年我们研制了用微机步进电机控制的沉降式降温仪,它是利用液氮自然蒸发在容器颈管内所形成的温度梯度,通过控制样品在此温度场中的运动,达到控制降温程序的目的。此法不仅可以达到很低的降温速率,而且液氮耗量极少。近年来,人们还开始研究在降温过程中如何控制晶核形成温度和固化相变时间。

如果由低温显微镜系统研究得到的细胞保存程序不是太复杂,那么完全可以不用降温仪,而利用简单的“三步法”来达到所要求的降温程序。这种方法只需要简单的冷源设备,如液氮容器、冰箱等,但却需要较多的传热学分析和试验。从1983年起,三步法已在许多材料的低温保存中获得了成功,并已为医院、生物学研究部门广泛采用。

近年来,我们研究了一种新的冷却技术,可以在单一冷源的情况下,实现在很大的

温度范围内均匀降温。这种新方法是寻找一种特定的二元溶液作为中间介质,可以代替三步法中的一个温度较高的冷源。

1985年,弗里克塞尔(M. A. Fryxell)和胡克斯(C. E. Hooks)等提出了三步复温法。这种方法的特点是在低温时实行快速复温,以免胞内冰再结晶;而在从0℃以下某一温度开始,实行慢速复温;这样可以增加渗透流所需的平衡时间,减少细胞的损伤。

2. 溶液固化相变传热传质过程的研究——低温生物学经常遇到溶液的固化相变问题。在冷冻过程中,冰界面由外向内移动;而在融化过程中,冰界面由内向外移动。这里要求解决的是所谓传热传质逆斯梯芬问题(Inverse Stefan Problem),即给定相变界面(固液)的移动速率(或冷却速率),求解在固定的外界面上应加怎样的热条件。这个问题对冶金、食品等工业均有重要现实意义。

溶液的固化相变过程要比单一工质(如水)的固化相变过程复杂得多,现仅以水—NaCl二元溶液的固化过程为例。当温度降低时,固相中几乎是纯水的冰,而电解质NaCl被排斥在固相之外。这样,在相变界面的液相区,NaCl的浓度就要增加,高于远离相界面的液相区。液相区内就会产生NaCl的浓度场,从而发生传质过程。美国加州大学贝克莱分校机械系Rubinsky教授从理论上研究了这个问题,指出由于电解质的扩散还会使固液相界面产生复杂的形状。

在溶液固化相变过程中还会有更复杂的电场效应。这是因为电解质被排斥在固相之外。在相界面的两侧,一侧是纯水,另一侧是浓度较高的电解质溶液,会产生瞬时的电势差。1985年美国麻省理工学院的教授Cravalho等研究了盐水溶液在固化过程中的电场效应。1987年上海机械学院研究了含抗冻剂(甘油、二甲亚砜)、NaCl和水的三元溶液在固化相变时的电场效应。实验已表明,有时此电势可达几百毫伏。当然,这个电场效应还和冷却速率、相界面的移动速度等有关。这个问题很值得研究,因为它可能是造成细胞在冷冻时损伤的一个原因。

3. 溶液相图的研究和低温热分析技术的发展——在金属学中,相图是十分有用的工具。同样,在低温生物学中,相图的构成和分析也是十分重要的。实际遇到的是三元或更多元的溶液。为了研究其固化过程中各种组分在液相和固相中的分配,就要用到溶液的相图。

七十年代中期,美国Cocks教授等人运用了热分析技术获得了三种三元溶液的一次相变温度,但试验范围很窄。近年来,许多科学家都在利用差示扫描量热技术(DSC)来研究溶液的相图。

DSC是在程序控制温度下,测量输给样品和参比物的功率与温度关系的一种热分析技术。这种技术是通过控制电功率的方法,保持样品和参比物在线性升温或降温过程中,温度被引相同,而记录出热流率($\frac{dH}{dt}$) $\Delta T = 0$ 随温度的变化关系。DSC技术可用于热

物性测量、相变和化学反应的研究。近年来,随着计算机技术的发展,DSC的测量精度有了很大提高,并已出现了可测量低温物性的DSC。在低温生物学中,人们正利用低温DSC测量多种溶液在冷却和复温过程中产生的晶态化相变和非晶态(玻璃化)相变。1988年上海机械学院提出研究一种将低温显微和DSC相结合的新技术,得到了国家自然科学基金会的支持。

4.低温显微技术的新发展——七十年代末,八十年代初,美国麻省理工学院Cravalho教授领导研制成功了世界上第一套完整的低温显微镜系统。它用微机控制样品的温度变化,用摄录象系统获得细胞及溶液随温度变化的信息。上海机械学院1985年研制成功了类似系统,目前加拿大、西德、英国等也有相似的低温显微镜。

最近,由麻省理工学院毕业的两名博士,Cosman和Kandel研制了最先进的低温显微镜系统。它具有完善的微机控制和实时信息显示,并具有图象处理系统。

美国德州大学奥斯汀分校机械系教授Diller最近研究了用集成电路的工艺在低温显微镜样品台上布置了高密度的温度测量点,以求得在极小区域内温度场的显微分布。这种高技术对于研究许多传热传质问题都将是十分有用的。

5.溶液的非晶态固化(玻璃化)——到目前为止,能实现低温保存的细胞是很有限的。其主要原因是由于在冷冻过程中溶液形成了晶态的冰;在复温过程中,冰要再结晶和融化,以及由此引起的渗透等一系列问题,都会造成细胞的损伤。从八十年代中期起,科学家开始摸索使溶液非晶态固化的途径,并期望由此取得低温保存的重大突破。目前,已找到了三种特殊的溶液可实现玻璃态固化,并已成功地用于红细胞、鼠胚胎的低温保存。但要推广,则需要对溶液的非晶态固化过程进行深入的研究。

对于稀溶液,在一般的降温速率下要实现玻璃化是极其困难的。因为在溶液被降到玻璃化温度之前,冰晶核心早已在溶液中形成,并有足够的时间生长成晶体的冰。若要实现非晶态化,就要求极高的降温速率,以致使溶液形成冰晶前就被降到玻璃化温度以下。理论计算表明,要使直径1微米的纯水滴玻璃化,需要 $6 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{分}$,而目前一般采用的将样品直接投入液氮(-196°C)的方法,降温速率只有 $600 \sim 2500 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{分}$,若要用这种方法使纯水玻璃化是不可能的,只能将溶液的浓度提高到42%以上,而这么高的浓度在常温下会对细胞产生致命的损伤。

当前,玻璃化研究主要集中在两个方面:

(1)研究某些高浓度的“玻璃化溶液”,其浓度高达40%,但其配方特殊,可降低对某些细胞的损伤,但目前很难找到对较多细胞均适用的配方。

(2)研究提高冷却速率的方法,使低浓度的溶液(如16%)能实现玻璃化。目前正在研究的三种低温冷却法是浸入液氮法、液氮喷雾法和与低温固体表面快速接触法。可望将冷却速率提高到 $10^4 \sim 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{分}$ 。

如低浓度溶液能实现玻璃化,将为生物材料的低温保存开辟一条新的途径。

参考文献:

- 1 华泽钊,“生物材料的低温保存”,《科学》第39卷第1期第35--41页,1987
- 2 Mazur, P., "Freezing of Living Cells, Mechanisms and Implication", Am. J. of Physiology, 247, C125-142, 1984
- 3 Toner, M., Cravalho, E.G., Chiang, Y.M., "Vitrification of Biological Cell Suspension: The importance of Controlled Cooling and Warmin," Paper Submitted to Annual meeting of the Society for Cryobiology, 1988

热管技术的应用及其基础研究

马同泽

(中国科学院工程热物理所)

摘 要——本文对国内外热管技术的应用及其基础研究的现状和发展趋势进行了评述，提出了今后热管热物理基础研究的内容和方向。

前 言

热管技术自 1964 年由 Grover 等人发明以来至今已有 20 余年。在不太长的时期里，它已得到蓬勃的发展。然而正如其它新技术一样，其发展是不平衡的，不仅在各个时期内发展不平衡，而且在世界各地区的发展也是不平衡的。但是概括起来说，它已从航天应用走向地面应用，从失重条件走向重力条件下运行。

一、热管技术的应用和发展

热管的内部过程是以高传热率的沸腾和凝结过程所组成，因此它具有极高的当量导热系数这一外部特性。人们称它为热超导体。初期人们直接利用这一特点，得到极佳的效果。例如在航天飞行器中，缺乏空气，缺乏流体，传热方式只限于导热和辐射。人们利用热管这一前所未有的良导体，将飞行器中的热量从高温处传至低温处，很顺利地使飞行器中某些部件的温度拉平或者使某一局部的温度得以控制，保证飞行器的正常工作。在七十年代工业发达国家已将热管技术广泛地用于航天技术，八十年代初美国发射的航天飞机上用了许多热管来控制仪器舱的温度。在这一时期内各国对具有毛细结构的低温热管进行了大量的研究，很多国家将热管安装在飞行器上进行零重力条件下的飞行试验。与此同时各国进行了将热管用于电子元件冷却的研究。由于现代电子技术的发展使得元件体积愈来愈小，而单位体积耗散的热量愈来愈大，因此在一个很小的元件上配个庞大的风冷散热器，极不相称。即使如此，大功率元件散热问题往往得不到解决，而要求助于液体冷却。问题在于电子元件向空气的散热要经过传导和对流的串联传热过程。当散热器外部对流换热系数较低时(如风冷)，要增加散热量必然要增加散热面积，而增加面积的结果又使体积增加，因而总热阻降低有限，散热器效率无法大幅度提高。如果采用热管来代替实体散热器就可避免这一矛盾，它可以将固体导热这一部分热阻降到实体散热器的十分之一，因此用热管散热器就可以大幅度缩小散热器尺寸和减轻重量。先进国家，例如日本、英国和西德不仅将它用于大功率晶体管的冷却，而且用于大规模集成电路块的冷却。

七十年代初热管的一个大规模应用是在美国阿拉斯加输油管线上用了 11 万余根以氮