

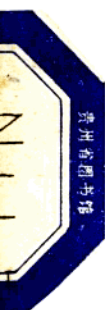
出国考察技术总结报告

国外低温工程与低温材料研究状况
实时数据处理和过程控制
国外图像处理技术

11

航天工业部第七〇七研究所

一九八三年



目 录

国外低温工程技术的研究状况	(1)
(一) 氢液化技术	(1)
(二) 氮液化技术	(4)
(三) 小型制冷机	(7)
(四) 低温测量	(8)
低温材料	(14)
(一) 金属结构材料	(14)
(二) 非金属结构材料	(18)
(三) 低温绝热材料	(19)
实时数据处理和过程控制	(21)
(一) 实时处理及过程控制用计算机系统结构	(21)
(二) 总线与数据通讯中的标准化	(23)
(三) 软件部分	(24)
(四) LAU 系统	(29)
(五) 关于 CAMAC 的几点情况	(32)
(六) 图像识别信息处理机	(33)
国外图像处理技术	(36)
(一) 图像处理中的几个典型问题	(36)
(二) 图像处理技术的应用情况	(47)

国外低温工程技术的研究状况

尚廷科 毕洪昶

(一) 氢液化技术

目前在国外,不论是美国、欧洲各国还是日本,氢的液化技术都可以说是随着航天事业的发展而发展起来。但是日本的氢液化技术又是在氮液化技术和有关机器设备在液氢领域里应用的基础上发展起来的。自从1978年,日本帝国氧气公司为大阪氢气公司研制了一套730升/时氢液化器并装设在尼崎工厂以后,日本的氢液化才从实验室使用转到了工业生产,其规模超过了以前20倍左右。为了适应日本宇宙开发事业团研制10吨推力氢氧火箭发动机的需要,研制了730升/时氢液化器。这是日本唯一的一套工业规模的氢液化设备,自1978年9月14日投入运行至今,运行状况良好。

原料氢气由相邻的电解制碱厂通过管道送到尼崎工厂的200立方米气柜中,稳定压力为400毫米水柱。原料氢气中含有 O_2 、 N_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 和 H_2O 等杂质,其总含量约为0.3%。

液化流程采用氮—布赖顿循环,如图1-1所示。氮制冷循环是一个闭合循环,1.2~1.5千克/厘米²回流氮气,经氮压缩机1,将压力提高到18千克/厘米²,通过热交换器14、15,被降温到120~130 K。一部分氮气(Q_1 为260米³/分)通过高温透平膨胀机(其转速为11万转/分),压力降至1.2~1.5千克/厘米²,温度下降到80 K,然后进入热交换器17汇入回流氮气。其余的氮气通过热交换器16、17、20,继续降温到40 K,然后经两台并联低温透平膨胀机5、6(转速为8万转/分,流量 Q_2 为550米³/分),压力降到1.2~1.5千克/厘米²,温度下降到20 K。此后,经所有热交换器,逐步吸收热量恢复常温,回到氮气贮槽,完成一次制冷循环。

从氢气柜出来的原料氢气,经压缩机将其压力提高到5千克/厘米²,经冷却器8分离水分,在纯化器9里,用F22进一步将温度降至0°~3℃,在冷却器10里,把冷凝水分离出去,在纯化器11中,用贵金属催化剂初步除氧,最后在纯化器13中,用-196℃下的分子筛吸附,完成氢气纯化。正—仲氢转化分三级进行:常压液氮温度(78 K)转化器13;负压液氮温度(66 K)转化器19和常压液氢温度(20.4 K)转化器23、24。原料氢气经一系列的纯化、转化和热交换,逐步从液氮和冷氮气流中吸收冷量,最后变为液体,进入液氢贮存容器。

氢气中的 O_2 、 N_2 杂质由气相色谱仪进行自动连续分析, CO 、 CO_2 和 CH_4 是每24小时分析一次,水分则为每周分析一次。

从原理上讲,气体液化过程可分为两种,一种是焦耳—汤姆逊循环,另一种是热膨胀循环。通常都是根据液化装置的规模大小而配合使用的。美国在液氢发展的初期所研制的液化装置,是采用简易的焦耳—汤姆逊循环,其设备简单,运行可靠,但效率低。美国刚

刚开始液氮的工业生产时，采用设备容量为 500~800 升/小时的一个复合焦耳—汤姆逊循环，它比简单的焦耳—汤姆逊循环的效率要高一些，但是由于活塞式和透平式膨胀机的研制成功，这类流程现在几乎不用了。

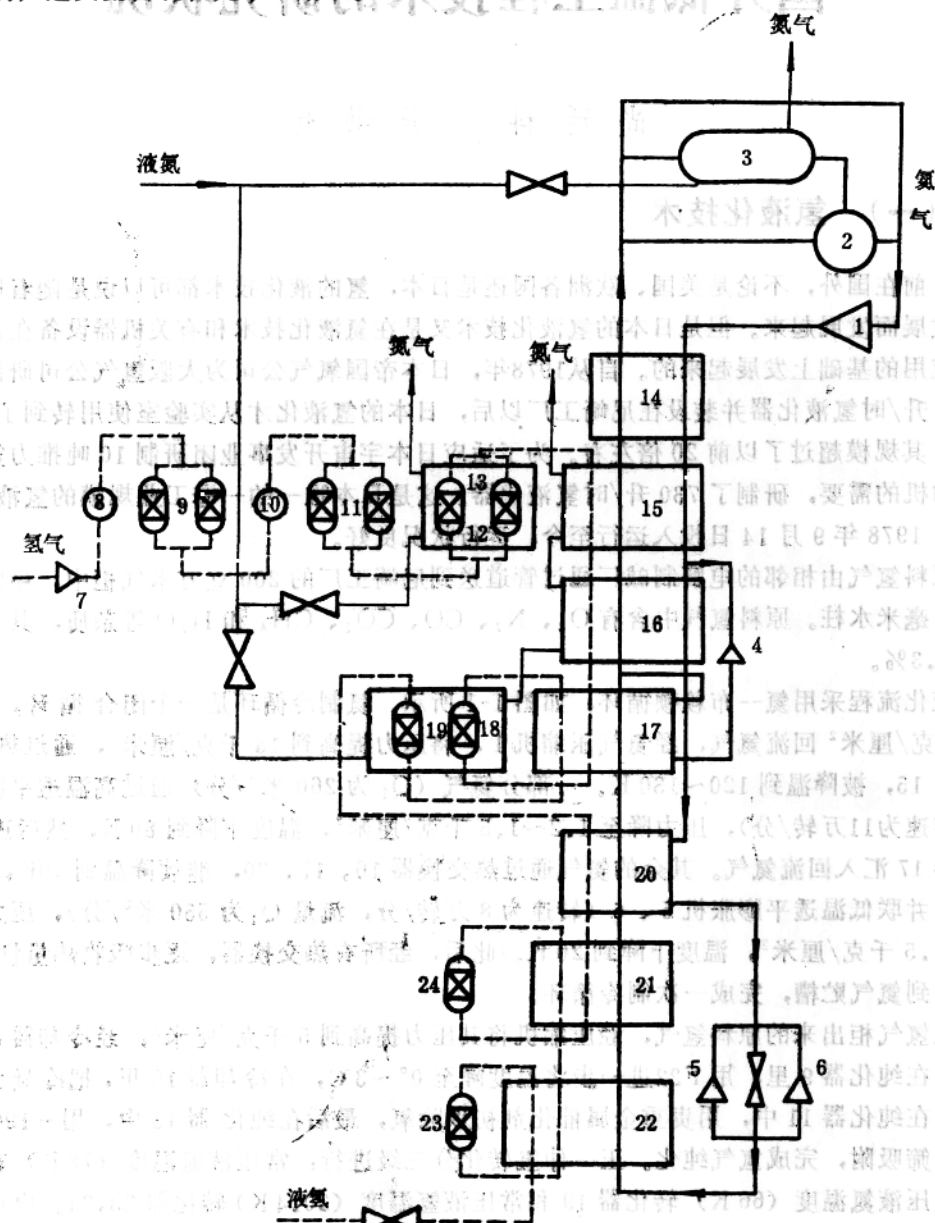


图 1-1 730 升/时氮液化设备流程图

- | | |
|-------------------|------------------|
| 1—氮气压缩机 | 2—氮气贮槽 |
| 3—氮气纯化器 | 4—氮高温透平膨胀机 |
| 5,6—氮低温透平膨胀机 | 7—氮气压缩机 |
| 8,10—冷却器 | 9,11,12—纯化器 |
| 13~18, 20~22—热交换器 | 19,23,24—正/仲氮转化器 |

图 1-2 所示流程是 1966 年法国气体液化公司研制的氮液化装置所采用的，起初产量为 500 升/小时，1975 年改造后，产量提高到 800 升/小时，这是目前整个欧洲唯一的工业规

模的氢液化设备，其产品供应整个欧洲。

由于工厂规模的不断扩大，美国已建成世界上规模最大，日产 60 吨液氢的设备。其液化设备逐步发展成如图 1-3 所示的多级转化低压膨胀循环。正一仲氢转化分 7 ~ 9 级进行，氢气通过正一仲氢转化器时，产生放热反应，经过一系列冷却—转化—冷却—转化而使温差阶段性地缩小，使温度反复降低，从而提高正一仲氢的转化率，降低能耗。但这会使设备庞杂，尤其对中小型设备来说，会增加设备费用，反而提高液氢的生产成本。对液化流程而言，人们总是希望设备简单、安全、高效。所以中小型氢液化设备，一般只用 2 ~ 3 级正一仲氢转化。表 1-1 为日本低温液化流程、设备规模和所需动力的比较。

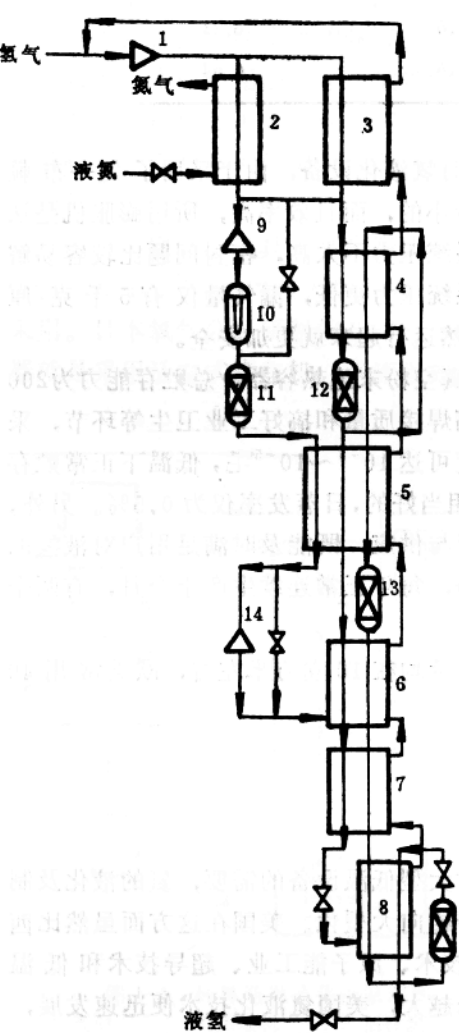


图 1-2 800 升/小时液化流程图

- 1. 氢气压缩机
- 2. ~8. 热交换器
- 9. 氢膨胀机
- 10. 过滤器
- 11、12. 纯化器
- 13、15. 转化器
- 14. 透平膨胀机

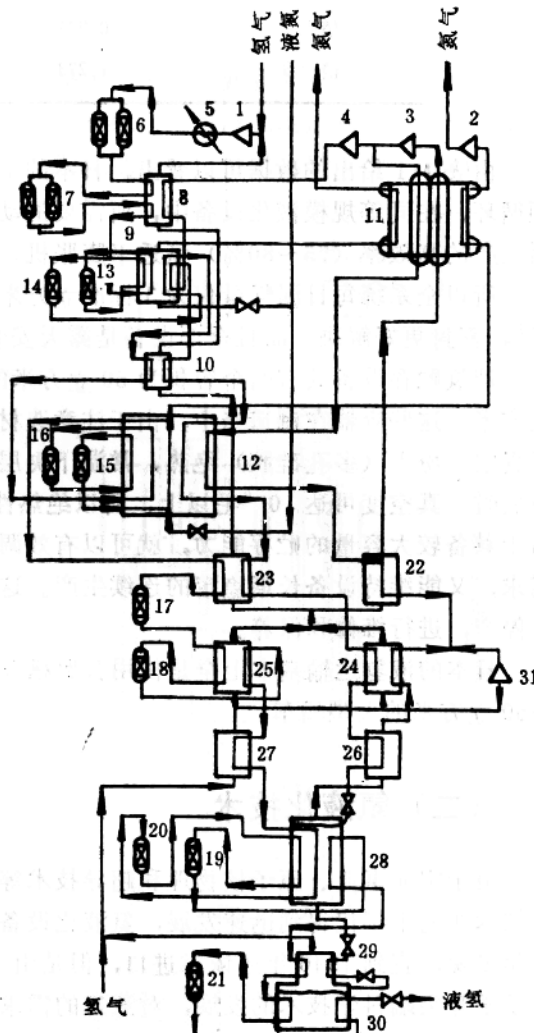


图 1-3 多级转化低压透平膨胀液化流程图

- 1. 氢气压缩机
- 2. 氮真空泵
- 3、4. 氢复循环压缩机
- 5. 氟里昂冷却器
- 6. 干燥器
- 7. 吸附器
- 8~12, 22~30 热交换器
- 13~21. 转化器
- 31. 氢透平膨胀机

表 1-1 低温液化流程、设备规模和所需动力的比较

流 程	设 备 规 模 (吨/日)	所 需 动 力 (KWh/LH ₂ kg)	所 需 液 氮 (LN ₂ kg/LH ₂ kg)
简单焦—汤循环	0~1.8	22.05	11.6
复合焦—汤循环	1.8~4.5	19.18	10
绝热膨胀循环	2.7~54.4	11.03	1
氮—布赖顿循环			
情况 1	0.977	22	0
情况 2	0.977	16	6.23
情况 3	1.273	16	6.64

由表 1-1 给出的数据可以看出, 日本的 730 升/时氢液化设备, 由于采用了氮—布赖顿循环, 在同等规模液化设备中, 所需要的动力是最小的, 而且效率高, 所用膨胀机是法国生产的高效率 (75~80%) 氮透平膨胀机。氢气系统压力不太高, 密封问题比较容易解决, 所以全系统每日漏气量仅为 3 标准立方米。氢系统压力更低, 漏气量仅有 5 千克/厘米², 密封更好解决。而且全部设备是露天安装, 当然运行起来就更加安全。

液氢贮存设备共有四个容积为 50 立方米的立式真空粉末绝热容器, 总贮存能力为 200 立方米。这些容器在制造当中, 由于注意选材、提高焊接质量和搞好工业卫生等环节, 采用真空—粉末 (多孔硅胶) 绝热, 常温下夹层真空度可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 托, 低温下正常贮存液氢时, 真空度可达 10^{-6} 托以上, 所以绝热性能是相当好的, 日蒸发率仅为 0.5%。另外, 由于具备较大容量的贮存能力, 就可以有效调节生产与供应, 既能及时满足用户对液氢的需求, 又能维持设备长期稳定的连续生产。这套设备, 每年正常连续生产十个月, 有两个月停产, 进行维修和保养。

日本的液氢运输基本上全是使用公路槽车, 其容量均在 10 立方米左右, 欧美常用 40~50 立方米的大型槽车。

(二) 氮液化技术

由于宇航事业、原子核物理和超导技术等对大型低温设备的需要, 氮的液化及制冷技术在七十年代得到迅速发展, 氮液化设备也逐步趋向大型化。美国在这方面虽然比西德起步晚, 直到 1946 年还依靠进口, 但是由于空间技术、原子能工业、超导技术和低温电子学等尖端科学技术的发展, 对液氮的需求量越来越大, 美国氮液化技术便迅速发展, 日本及欧洲许多国家所需氮气大都从美国进口, 而且以液氮运输较为经济, 促使美国对氮液化技术和设备的研究。

目前美国是世界液氮生产能力最大的国家, 1958 年生产液氮 700 立方米, 1964 年生产液氮 1700 立方米, 而到 1968 年就猛增到 12000 立方米, 1971 年兴建了一套 740 升/小时的液化器后, 使美国的液氮生产能力提高了一倍。1977 年美国低温技术公司和苏尔寿公司联合研制一台大型氮制冷装置和一台大型氮液化器。制冷机的制冷能力在 3.5 K 时,

消耗功率为 900 瓦，液化器的能力超过 3000 升/小时。1979 年，费米加速器研究所为了冷却粒子加速器的 1000 个超导磁体，使其保持在 4.2 K，建造了当今世界上最大的氦液化装置，液化能力为 4500 升/小时，大大提高了美国的液氦生产能力。

日本从 1955 年开始氦液化器的研制，到 1968 年，全国各研究单位装有 10 升/小时以上氦液化器约 50 台，其中日本自己研制的占 50%。1972 年，东京芝浦电气等公司研制了一台 250 升/小时的氦液化器。1981 年，日本原子能研究所研制了一台目前日本最大的氦液化器，生产能力为 350 升/小时。由此可见，日本的氦液化技术的发展也是相当迅速的。

日本目前使用的氦液化器，大体分为两类：即中、小型的带活塞式膨胀机的氦液化器和带透平膨胀机的大、中型氦液化制冷装置。

(1) 带活塞膨胀机的氦液化器

目前日本所使用的小、中型氦液化器，大都是带有两个活塞膨胀机的柯林斯型氦液化器，液化原理如图 1-4 所示，其特点是采用两台膨胀机，使预冷温度达到 9 K，因而提高了液化率。在日本大学理工部看到一台 10 升/小时氦液化器，虽已运转了十年，现仍在稳定运行。

由于活塞膨胀机具有高膨胀比和高效率等优点，在 100 升/小时较大型的液化器中也有采用。日本氧气公司研制的 60 升/小时氦液化器就是采用活塞式膨胀机，其流程如图 1-5 所

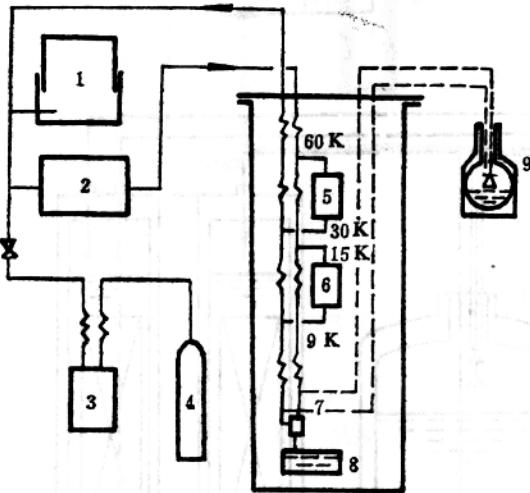


图 1-4 柯林斯氦液化器原理图

- | | | |
|---------|----------|-------------|
| 1. 气柜 | 2. 压缩机 | 3. 活性炭 |
| 4. 液氮槽 | 5. 第一膨胀机 | 6. 第二膨胀机 |
| 7. 内膨胀阀 | 8. 液氮槽 | 9. 外膨胀阀和杜瓦瓶 |

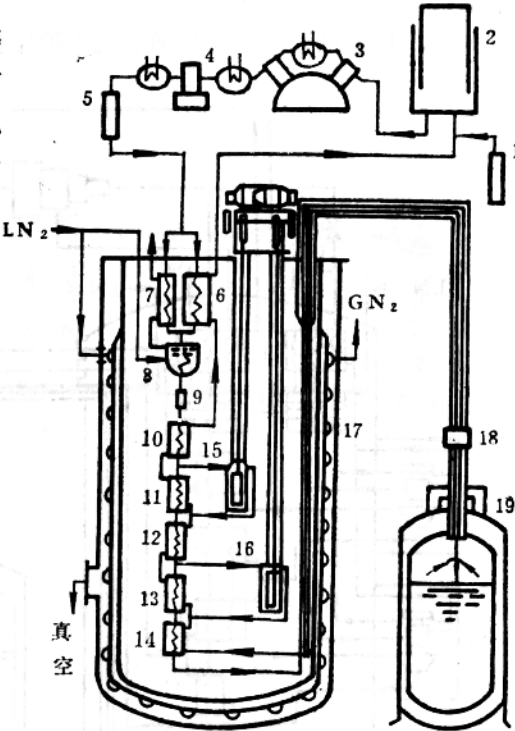


图 1-5 60 升/小时氦液化器流程图

- | | | |
|----------|-------------|-------------|
| 1. 液氮槽 | 2. 气柜 | 3, 4. 压缩机 |
| 5. 干燥器 | 6, 7. 热交换器 | 8. 液氮槽 |
| 9. 吸附器 | 10~14. 热交换器 | 15, 16. 膨胀机 |
| 17. 绝热容器 | 18. 节流阀 | 19. 液氮贮槽 |

示。来自气柜的氦气经压缩机后，压力提高到 20 大气压，通过干燥器后，进入液化器，经热交换器 6、10 冷却到 50 K，约 30% 的高压氦气进入膨胀机 15，其余部分经热交换器 11、12 降温到 15 K。然后，又有 48% 的氦气进入膨胀机 16，其余 22% 的氦气经热交换

器 13、14 冷却后，节流到 1.3 大气压，部分被液化，液氮进入贮槽 19。

(2) 带透平膨胀机的氮液化制冷装置

透平膨胀机处理的气量大，稳定性好，能长时间连续运转，易于维修。所以在大型液化制冷装置中，特别是要求长期连续运转的设备中，大多数都采用带透平机的克劳德循环。在日本筑波大学看到的 100 升/小时氮液化器就是这一种，其透平膨胀机是瑞士苏尔寿公司的产品。东京大学物性研究所的氮液化器是日本小池氧气公司生产的 88 升/小时氮液化器，所用透平膨胀机是英国 BOC 的产品。

为研究低温技术，日本还自行研制透平膨胀机，1972 年东芝、丰田精机等为日本电子技术综合研究所研制的 250 升/小时氮液化器，就是应用他们自己研制的透平膨胀机，其流程如图 1-6 所示。液化制冷装置由常温气体容器、压缩机、制冷液化器、500 升容器（内有节流阀）等组成，分为透平、液化和轴承三个系统。将常温氮气分别压缩成透平系统的 4 个大气压、液化系统的 25 大气压和轴承系统的 10 个大气压，并用液氮冷却到 80 K 左右。通过膨胀机 14、15 和热交换器，将液化系统的高压氮气冷却到 10~15 K，最后通过节流阀，使其部分液化。

另外，日本也大量引进外国的透平膨胀机，引进最多的有瑞士苏尔寿公司、英国 BOC

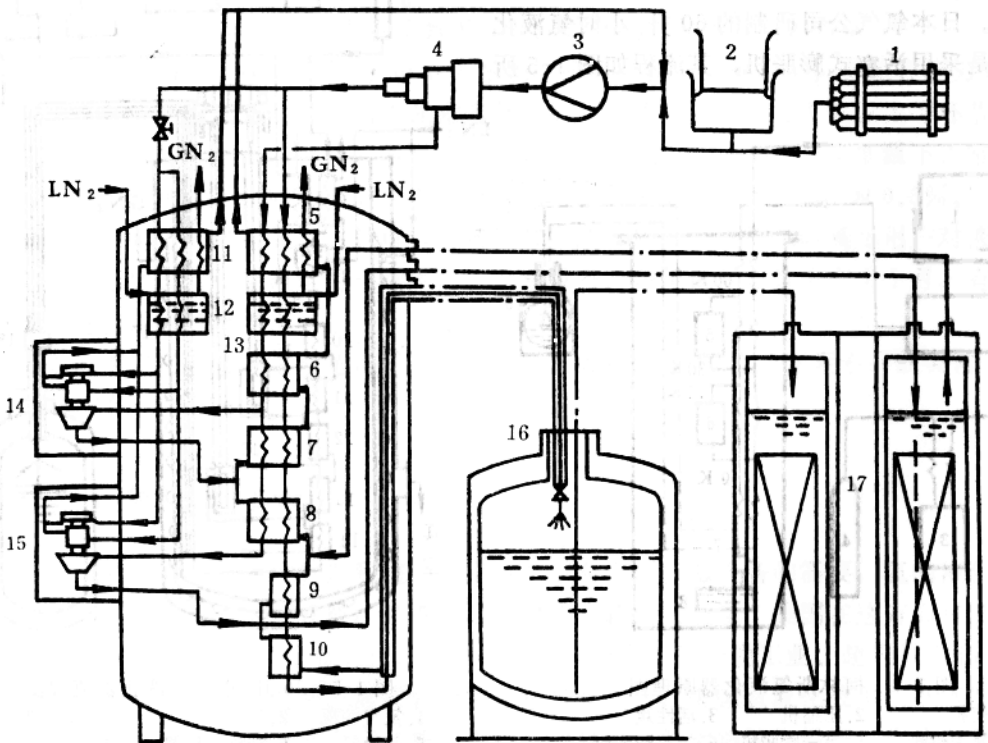


图 1-6 250 升/小时氮液化器流程图

- | | |
|--|-------------|
| 1. 氮气钢 | 2. 30 立方米气柜 |
| 3. 螺杆式压缩机 ($P = 2.2$ 千克/厘米 ² , $Q = 5610$ 米 ³ /时) | 5~11. 热交换器 |
| 4. 活塞式压缩机 | 14, 15. 膨胀机 |
| 12, 13. 液氮槽 | 17. 大型超导磁体 |
| 16. 5000 升液氮容器 | |

及法国空气液化公司的透平膨胀机。目前氮液化器有向着大型化发展的趋势，日本也在努力研制大型透平膨胀机。同时，日本在研制小型膨胀机方面进展也很快，并取得了很大成绩，如日本平冢研究所研制的超小型氮透平，转子叶轮直径仅 5 毫米，采用静压气体轴承，最高转速可达 780000 转/分，在世界上处于领先地位。

(三) 小型制冷机

小型制冷机是伴随量子放大器、参量放大器以及军用红外探测器的冷却而发展起来的，目前日本这方面的技术较美国为低，大阪氧气公司研制的 Modified-Solvay 循环小型制冷机，是日本使用较好的一种小型制冷机。随着深冷系的迅速发展，在日本实际出售数量已超过 400 台。在这次会议上，展出了一台样机，接通电源在一小时内就可达到 11.5 K 或 22 K 的温度。这种小型制冷机的系统流程如图 1-7 所示，是一封闭循环，它由一个压缩机装置、制冷机和两根柔性软管组成，结构简单紧凑。

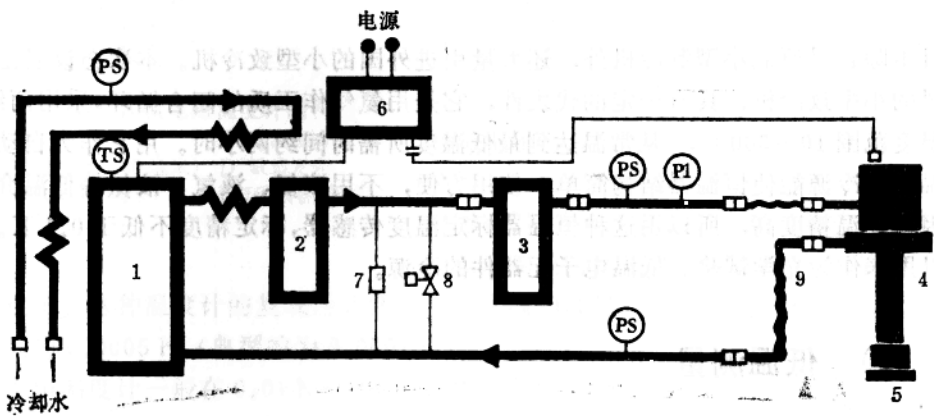


图 1-7 低温小型制冷机流程图

- | | | |
|----------|---------|---------|
| 1. 压缩机 | 2. 油分离器 | 3. 吸附器 |
| 4. 制冷机 | 5. 冷头 | 6. 控制单元 |
| 7. 自动旁通阀 | 8. 电磁阀 | 9. 柔性软管 |

这种小型制冷机的特点如下：

- (1) 无需值班操作，只要每运行 6000 小时更换制冷机的活性炭芯子和密封元件就可连续运行；
- (2) 维护简单易行，部件的维护和更换仅需 4—5 分钟，而且不需要任何专门技术；
- (3) 小而轻，只需很小的安装空间，运行时允许压缩机装置自由放置，用两根柔性软管把压缩机与制冷机连接起来。压缩机重 77 公斤，制冷机重 5.5 公斤；
- (4) 通过装在制冷机冷头上的加热器和温度计，可进行温度的自动控制；
- (5) 短时间内可达最低温度，即启动后只需 1 小时就可获得 11.5 K 的低温；
- (6) 该制冷机不需液氮预冷，只要供给动力和冷却水即可，主要技术参数见 表 1-2 所示。

表 1-2 Cryomini 小型制冷机技术参数

型 号		Cryomini-S	Cryomini-D
制 冷 容 量		30 瓦(在 77 K 时)	1 瓦(在 15 K 时)
可 达 温 度		22 K	11.5K
动 力 消 耗		3 千瓦	3 千瓦
电 源		220 伏交流单相 30 安 50/60 周	220 伏交流单相 30 安 50/60 周
冷 却 水		200 升/小时 (1.5 公斤/厘米 ²)	200 升/小时 (1.5 公斤/厘米 ²)
重	压 缩 机	77 公斤	77公斤
量	制 冷 机	5.5 公斤	5.5 公斤

日本除自己研制小型制冷机外,还大量引进外国的小型致冷机。本次会议展出美国一家公司的小型致冷机,具有一定的代表性,它是用氦气作工质的闭合循环,采用两级制冷,工作温度范围 10~300 K,从常温达到最低温度所需时间约两小时。用它作为自动控制低温恒温器的冷源能使恒温器结构简单,使用方便,不用液氮、液氢、液氮等低温介质作冷源。因其控温精度高,所以用这种恒温器标定温度传感器,标定精度不低于 0.1 K。同时,也可以用来作为光学试验、低温电子元器件的冷源。

(四) 低温测量

这里所说的低温测量,是指从液氮温度(约 4 K)到液氢温度(约 20 K)范围内的测量。

1. 温度测量

在 4 K~20 K 温区内,实际使用的温度传感器主要有热电偶温度传感器、电阻温度传感器、蒸气压温度传感器。

(1) 热电偶温度传感器

在日本工业标准规定的热电偶中,可用于低温测量的有镍铬—康铜(CRC)、铜—康铜(CC)和镍铬—镍铝(CA)等,但这些热电偶的灵敏度随着温度的下降而急剧地降低。

金铁合金(含铁量 0.07%)的性能稳定,均质度也好。由图 1-8 可知,镍铬—金铁热电偶的灵敏度在由常温至液氮沸点(4.2 K)范围内,几乎保持

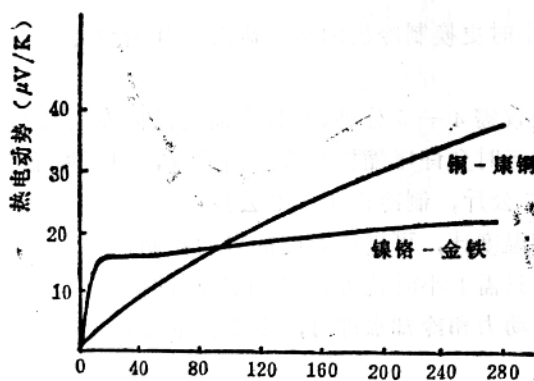


图 1-8 低温用热电偶特性

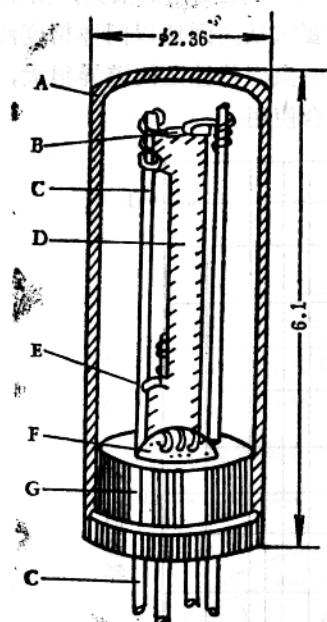


图 1-9 GR 200 B 锗电阻温度计结构图
A. 镀金铜壳 B. 电流引进区
C. 磷青铜引线($\phi 0.20$ 毫米) D. 敏感元件
E. 金引线($\phi 0.05$ 毫米) F. 环氧树脂热沉
G. 氧化铜底座。

自身加热小。这种温度计的复现性非常好，在室温和液氮温度之间进行热冲击时，温度复现性最大为 0.0005 K （典型的为 0.0001 K ）。

锗电阻温度计一般在 $0.01\text{ K} \sim 100\text{ K}$ 范围内使用，但是每一支温度计并不能测量上述整个温度区间的温度，每一支温度计都有其特定的使用温度区间如表 1-3 所示。

图 1-3 GR-200 B 锗电阻温度计的使用温区

型 号	4.2K时的电阻 (欧)	使用温区 (K)
GR-200B-30	20~40	0.1~1.5 (4.2)
GR-200B-50	40~60	0.1~2.0 (4.2)
GR-200B-100	70~130	0.3~4.2
GR-200B-250	200~300	0.5~10
GR-200B-500	350~750	1.0~20
GR-200B-1000	750~1300	1.5~40 (100)
GR-200B-1500	1300~2000	1.5~75 (100)
GR-200B-2000	1750~2250	4.2~75 (100)
GR-200B-2500	2000~3000	4.2~75 (100)

另外,由图 1-10 可以看到,电阻温度系数 (dR/dT) 和电阻变化都很大,所以对大范围内的测量来说,电阻测试仪必须有较大的量程才行。要求从高到低以同样精度测量,从与电阻测试仪配合来看,也是很难实现的。因为电阻——温度特性之间差异很大,而且不易于线性地提高性能,所以,目前较难与数据采集器配合使用。

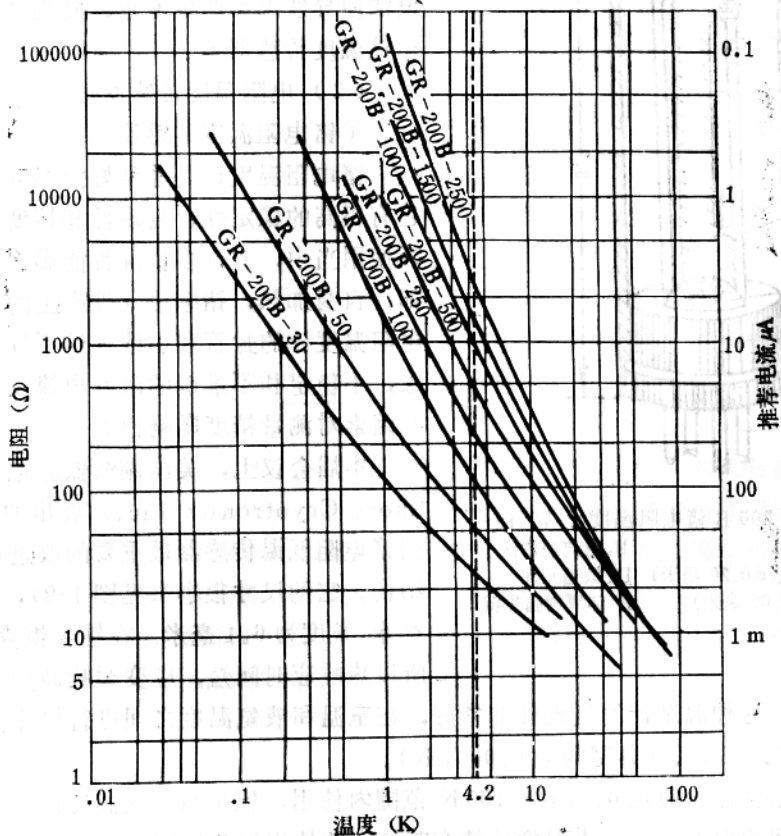


图 1-10 GR 200 B 铂电阻温度计温度对电阻的典型曲线

② 铂—钴电阻温度传感器

在日本,除广泛使用铂电阻温度计之外,在铂电阻温度计制造和测量技术基础上,日本工业技术院计量研究所研制成功一种铂—钴电阻温度传感器。这种温度计是日本独有的,是千野制作所在计量研究所的指导下制造的,铂钴合金是在铂中加入微量(0.5%)的磁性元素钴制成的。在低温下,它的电阻值和灵敏度(dR/dT)比铂要大的多。此外,铂钴温度计还有如下优点:

- 互换性好,容易和记录仪、数据采集器配合使用;
- 机械强度高,稳定性好;
- 测量范围广。

日本目前生产的铂钴温度计有两种:一种用于精密测量,可作为标准温度计使用;另一种用于一般测量。标准铂钴温度计(R 800-4 型)先把铂钴合金丝绕成螺旋形,再在线圈架上绕成无感应的双线圈式感温部分,然后装入铂壳内,向铂壳里充灌氮气,最后密封起来即成。因感温线圈是被半固定成自由状态,所以不致因热胀冷缩而产生形变积累,

因此,电阻值的重复性能非常好。因铂壳内充有氮气,所以响应快。自身加热量也很小,测量电流为1毫安时,自身加热仅为4mk。其灵敏度如图1-11所示。40K以下时,比铂电阻温度计高,12K附近为极小值,约为 $0.12\Omega/K$ 。虽然在12K附近有一拐点,但就整体来说,基本是线性的。因此,与电阻温度计相比,校准点数少,而校准范围宽,作为刻度校准方法,氮沸点和 0°C 的电阻与标准特性的偏差,在4~300K温区内利用近似插值公式,刻度校准精度可达 $\pm 0.1\sim 0.05\text{K}$ 左右。

标准铂钴温度计主要是用于物质的比热测定,也可校准一般工业用的低温温度计。

在日本用于一般测量的工业用铂钴电阻温度计已经商品化,工业用铂钴电阻温度计(R800-5型)是将感温部分封入不锈钢管($\phi 2.5\times 25$)内的,并带有四导线式电缆。特别是线圈型电阻元件已经实现了小型化,也适于测量小范围内的温度分布。图1-12是工业用铂钴电阻温度计及其所用二次仪表,这种温度计响应快,自身加热量小,机械强度高,元件间的互换性被控制在 $\pm 0.5\text{K}$ 以内。

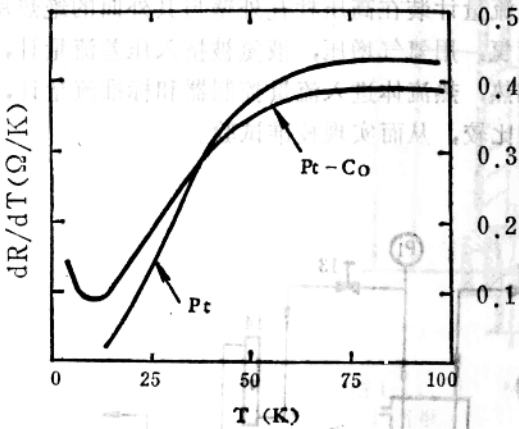


图1-11 铂钴和铂电阻温度计的灵敏度

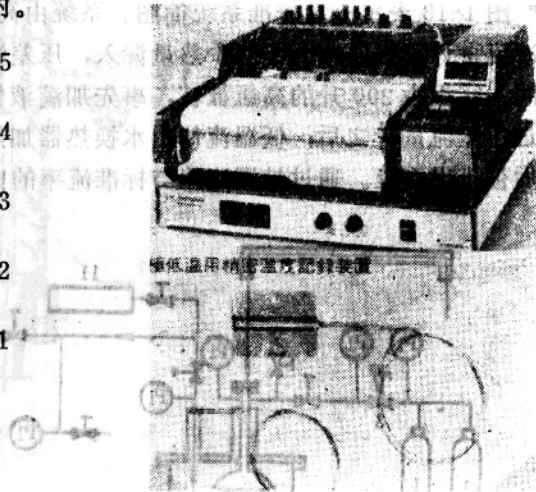


图1-12 极低温用温度记录装置及R800-5型铂钴电阻温度计

铂钴电阻温度计与金铁—铬热电偶相比,对二次仪表的输入灵敏度高,记录调解分析能力强。而且基准接点不需温度补偿,复现性和互换性也比较突出。与锑电阻温度计相比,复现性和灵敏度要稍差些,但在电阻—温度特性的单调性和互换性方面却具有突出的优点,包括校准费在内,价格也便宜。所以这种温度计目前在日本低温领域使用很广泛。

2. 流量测量

日本正在研制10吨推力的氢氧火箭发动机,在发动机试验中,推力和推进剂流量的测量是非常重要的,又是最难解决的问题。要求流量测量精度为全量程的 $\pm 0.5\%$,只要进行正确的校准,用结构简单而精度高的涡轮流量计是可以满足的。

日本使用的第一代液氢涡轮流量计是用水校准的,然后用热收缩系数和流体粘度系数进行修正。但因液氢的动粘度是极小的,所以不得不在一定范围内使用外推法来确定流量计的校准系数,据说这种方法大约有2%的误差。

为了改进液氢流量测量精度,日本宇宙开发事业团和三菱重工联合研制了一种液氢液面计,用它来实现直接用液氢来校准涡轮流量计。这个液面计由三部分组成:三个直径为

300 毫米，壁厚为 0.92 毫米的铝合金圆球组成的浮子；带有 20 个弹簧触点的浮子导管，装在浮子里的锰—铝磁体。

把液面计装在一个标定容器里，校准时，浮子随着液面下降而向下走，磁体逐个接通弹簧触点。流量计校准系数可以根据液面计两信号之间的时间间隔和两弹簧触点之间标定容器的容积来确定。校准结果表明，流量计系数的偏差小于全量程的 $\pm 0.3\%$ ，满足空间技术对流量测量精度的要求。

据了解，宇宙开发事业团的秋田试验场所使用的液氢流量计，也是涡轮流量计，它是在美国国家标准局设在 BOULDER 的动态重量流量校验设备上上进行校准的。

在要求不太高的一般低温流量测量中，日本也广泛应用压差式流量计。日本原子能研究所和三菱重工为了控制大型超导线圈的冷却速率，研制了低温流体的流量校验系统和孔板及文氏管压差式流量计。

图 1-13 表示流量校准系统简图。系统由高压杜瓦试验压差流量计、水换热器、气体标准流量计等组成。为了减少热量漏入，压差流量计装在高压杜瓦外壁与其外面的绝热层之间。容积为 200 升的高压杜瓦，事先加满液氢，用氢气增压，液氢被挤入压差流量计，流过压差流量计之后，低温流体由水换热器加热，热流体进入流量控制器和标准流量计，最后被排出系统。通过被测流率与标准流率的比较，从而实现校准试验。

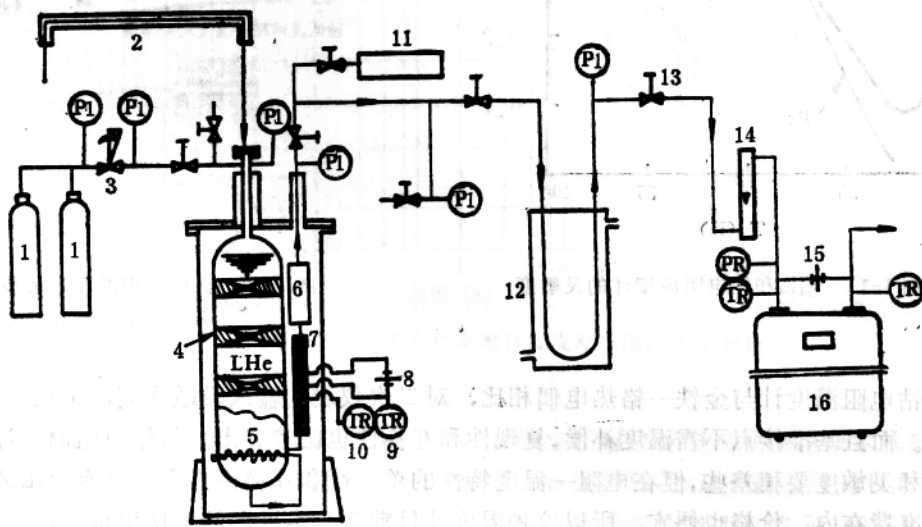


图 1-13 流量校准系统

- 1. 氮气钢瓶
- 2. 液氮输送管
- 3. 压力调节器
- 4. 液氮杜瓦
- 5. 加热器

图 1-14 是一个压差式流量计。流体种类和流率范围变化时，孔板开口直径可以很容易地改变。在测量部分里，流体流向用箭头指出，为了减小热量漏入，用 $\phi 3 \times 1$ 毫米的不锈钢管作取压管，开孔尺寸列于表 1-4，试验条件在表 1-5 中列出。

试验结果：在低温流体流量测量中，使用压差式流量计，其计算误差小于 $\pm 5\%$ 。按照日本的工业标准，这是可采用的。

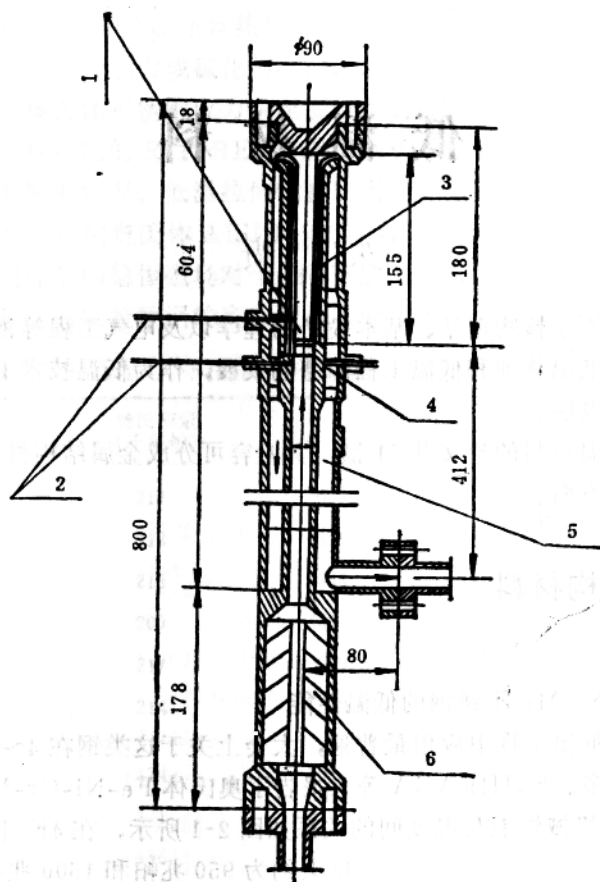


图 1-14 压 差 式 流 量 计

1. 孔板
2. 取压管
3. 可变换喉
4. 温度计
5. 环形流道
6. 混合腔

表 1-4 开孔尺寸

类 型	D(毫米)	d(微米)
孔 板 型	18.4	6.96
	18.4	2.40
	11.4	3.73
	6.2	2.51
文 丘 利 型	11.4	4.80

表 1-5 试验条件

流 体	压力(大气压)	温度(K)	流率(克/秒)
LHe	1.4~2.0	4.5~4.9	1.21~2.05
He	4.9~11.8	4.9~6.9	2.65~4.74
GHe	4.6~12.6	78.0~304	1.27~4.97
LH ₂	5.0~7.0	21.5~23.0	0.95~2.86
LN ₂	5.9~11.9	78.7~95.0	9.99~38.7

低温材料

朱 贤

由于航天技术、原子核物理学、基本粒子物理学以及电气工程等领域对低温技术日益迫切的需求,促进了低温物理和低温工程的蓬勃发展,作为低温技术主要支柱之一的低温材料科学也有了很大发展。

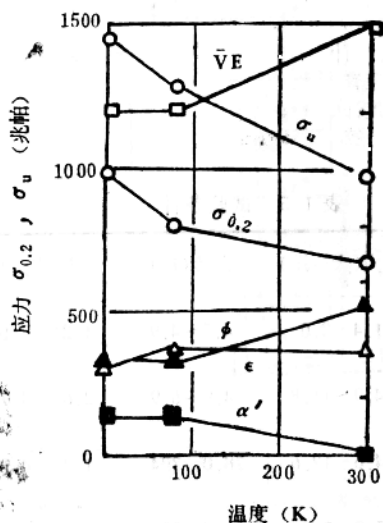
这次会议关于低温材料的论文共 51 篇,其内容可分成金属结构材料、非金属结构材料和低温绝热材料三个方面。

(一)金属结构材料

1. 不锈钢

(1)奥氏体 Fe-Ni-Mn 不锈钢的低温性能

奥氏体不锈钢在低温工程中应用最普遍,大会上关于这类钢在 4~300K 温区内各种性能的研究报告也最多。K. HIRAGA 等人报告了奥氏体 Fe-Ni-Cr-Mn 不锈钢的低温性能。含 Mn 6% 时,其机械性能与温度间的关系如图 2-1 所示,在 4K 下屈服强度和极限强度



ϵ - 总伸长率

ϕ - 面积收缩率

α' - 马氏体 (%)

V_E - 冲击能

图 2-1 含 Mn 6% 的 Fe-Ni-Cr-Mn 不锈钢机械性能与温度间关系

度大约为 950 兆帕和 1500 兆帕,冲击能量大于 110 焦耳,伸长率和截面收缩率均大于 30%,表明其低温韧性极其突出。对于 Ni 当量 (Ni 重量百分比加 Mn 重量百分比的和除以 2) 低于 24 的合金,在低温变形时引起的马氏体相变,在 4K 下马氏体相可占 15% 左右。对 Mn 重量比超过 6% 的合金,6 K 下观察到线性的磁化曲线,当 Ni 重量比从 16% 增加到 21% 时,磁化率 X_g 仅有很小的增加。对亚稳结构的奥氏体 Fe-Ni-Cr-Mn 不锈钢,在 6 K 下其磁化率 X_g 一般在 $5 \times 10^{-5}/g$ 至 $7 \times 10^{-5}/g$ 范围内,当 Mn 含量增加时其低温线膨胀系数有所下降。

D.A. WIGLEY 指出氮强化的奥氏体不锈钢 N 40 (21Cr-6Ni-9Mn-0.4N) 在低温下具有高强度和高韧性的组合,因而可用作低温风洞的翼型材料。为了满足低温风洞对材料在加工过程和冷热循环下具备极好的形态和尺寸稳定性的要求,以往的经验都是采用在 1060°C 下热处理后缓冷的方法,但这种方法引起碳化物沉淀而造成

低温韧性下降。他指出在 1060℃ 下均热后并在液氮中淬冷，能消除此弊病。新方法即消除了残余应力又没引起淬冷应力或碳化物沉淀，效果很好。

(2) 稳恒磁场对奥氏体不锈钢应力—应变特性的影响

会上，美国国家标准局的 R.P. REED 等人报告了他们考察稳恒磁场对于 4K 下奥氏体应力—应变特性的影响情况。低温拉伸试验所用的样品是稳定的奥氏体不锈钢 AISI 310 (Fe-26Cr-20Ni) 和亚稳的奥氏体 AISI 304 (Fe-18Cr-9Ni)，所得结果列于表 2-1 中。他们的结论是：7 兆兆焦的稳恒磁场对于 4K 下这两种材料的杨氏模量和屈服强度的影响相当小，超不过样品之间实验数据的离散度，实际上无法测出这种影响。

表 2-1 磁场对 304、310 合金 4K 下拉伸性能的影响

合 金	磁 场 (兆兆焦)	杨氏模量 (千兆帕)	屈服强度 (兆 帕)
304 (退火)	0	217	623
	0	212	575
	0	212	538
	7	209	480
	7	217	529
	7	214	614
310 (退火)	0	174	1030
	7	171	1110
	7	186	1000
	7	187	1000
	7	180	1070

(3) 离心浇铸不锈钢的性能

K.S. LEE 等人对离心浇铸不锈钢 CF 8 (ASTM 743) 在 4~300K 温区内的机械性能也作了很多研究工作，所得结论是：

①降低温度一般会使强度增加，而延展性和抗冲击能力下降；

②含碳量从 0.02% 重量百分比开始再增加时，可以提高屈服强度，尤其是低温下的屈服强度，而不损失延展性能；

③将含氮量的重量百分比从 0.05% 提高到 0.12%，能使低温下的屈服强度大幅度提高，但在整个温度范围内延展性均下降；

- ④浇铸后的高温固溶热处理能改善延展性；
- ⑤存在过量的强碳化物形成源可导制晶粒边界沉淀，并造成低温延展性的严重下降；
- ⑥当 δ —铁素体的组分高于 8% δ 时，随着 δ —铁素体组分的增加，在整个温度范围内材料的屈服强度增加，而延展性下降；
- ⑦在铁素体组分未到 8~10% δ 时，随着铁素体组分的增加，冲击韧性略有增加，但继续增加铁素体组分冲击韧性反而下降。

T.A. WHIPPLE 报告了 CF8M 浇铸不锈钢在 4K 下机械性能的研究结果。除了与 LEE 等人类似的结论之外，他们还观察到当 δ —铁素体组分低于 15% 时，随着 δ —铁素体组分的增加，材料的断裂韧性降低；当高于 15% 时， δ —铁素体组分再增加时断裂韧性基本不变。

总的结论是：假如控制 δ —铁素体组分低于 10%，同时限制出现强碳化物形成源和过量的氮，CF8 能满足低温下使用的要求。

(4) 电子束焊接对于冷轧不锈钢低温性能的影响

T. OGATA 等人研究了电子束焊接对于冷轧不锈钢 SUS304L、SUS310S、SUS316L 低温性能的影响。对于拉伸试验样品，焊缝宜在试样长度的中心；对于冲击试验样品，焊