

塑料盘管蓄冰及其强化 传热的实验研究

著者：李 强

导师：孙嗣莹
郭廷玮

北京工业大学硕士论文

分类号: X832

单位代码: 10005

学 号: S971005

密 级:

北京工业大学硕士学位论文

题 目 塑料盘管蓄冰及其强化传热的实验研究

英文并列 Experimental Research of Ice Cool Storage Using

题 目 Plastic Coil and It's Enhancement of Heat Transfer

研究生姓名 李 强

专业 热能工程 研究方向 制冷系统与换热装置的现代技术

导师姓名 孙 嗣 莹 学衔 职称 教 授

郭 廷 玮 学衔 职称 研究员

论文报告提交日期 2000.5.21 学位授予日期

授予学位单位名称和地址 北京工业大学(北京市朝阳区平乐园 100 号)

摘要

建立了采用塑料盘管的可视化蓄冷罐实验台，并设计安装了与之配套的制冷系统。

对结冰过程进行了实验研究，分析了乙二醇入口温度及流量对结冰的影响。

通过两种方法，即绕金属丝和设搅拌装置对结冰的强化传热进行了实验研究，实验表明这两种方法都能促进传热。对绕金属丝的结冰情况拍了照片，直观地显示出绕丝后的效果。

建立了结冰过程的数学模型，针对不同的运行工况作了数值计算，并将计算结果与实验结果作了比较，对二者的差异进行了分析。

关键词： 冰蓄冷 可视化 强化传热 数值计算

ABSTRACT

An installation on a visually experimental ice-storage cooling tank with plastic coil was established, and a refrigerating system providing cold source for the tank was set up. Freezing process was experimentally studied, and effect of temperature and flow on freezing was analyzed at input of glycol.

Investigation about enhancement of heat transfer was carried out by two methods, where metal wire winding outside the coil and stirring installation were used. The results indicate that both methods can enhance heat transfer. Photos were taken for the freezing of metal wire winding, and the effect was visually shown.

A mathematical model about freezing process was established. Numerical computation was conducted for different working situation. Computation was made with experimental results, and their variations were analyzed.

KEY WORDS: Ice-storage cooling, Visualization, Enhancement of heat transfer, Numerical computation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 本课题的任务.....	7
第二章 实验台的建立	8
2.1 制冷系统.....	8
2.2 可视化蓄冷罐.....	19
2.3 测试系统及其误差分析.....	20
第三章 水平管外结冰特性的实验研究	21
3.1 实验方案.....	21
3.2 实验结果与分析.....	21
第四章 水平管外结冰的强化研究	26
4.1 相变的基本理论.....	26
4.2 强化的实验研究.....	29
4.3 绕金属丝的可视化实验研究.....	32
4.4 讨论.....	33
第五章 水平管外结冰特性的理论计算	37
5.1 模型的建立.....	37
5.2 模型的求解.....	40
5.3 数值计算结果与分析.....	42
5.4 理论计算值与实验结果的比较.....	46
第六章 结论	49
主要符号表	50
参考文献	51
致谢	53
附图	54

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

近年来,随着经济的快速发展,商业用电大幅度增加,每年增加幅度达20~30%[1],而此类商业用电大部分集中在高峰用电时段;另一方面,国营大中型企业产业结构的调整使原来通过计划用电行政手段强制安排在晚间生产的企业或者晚班,因功效低,需另加晚班费等原因,渐渐恢复到白天进行生产,再加上很多企业停产下岗,导致低谷用电负荷反而逐年相对下降。因而我国的电力状况,一方面在尖峰用电时段,远远不能满足需求,另一方面,在低谷用电时段,城市用电负荷却增加缓慢,甚至下降。这一正一负的综合效果造成目前城市用电峰谷日趋拉大,电网的峰谷差占高峰负荷之比已高达25%~30%,甚至达到或超过40%[2]。为了充分利用现有电力资源,解决上述矛盾,国家计划委员会,国家经济贸易委员会,电力工业部1994年制订的“1995~2000年节电规划”指出“节约高峰电力将是缓解缺电矛盾的重要一环”。并且提出:在2000年前装机容量,发电量与国民生产总值同步增长的前提下,需要把用电最高负荷从用电高峰转移1000~1200万千瓦到每天用电低谷或季节用电低谷中去,以缓解电网缺电的矛盾。要实现削峰填谷,单靠供电系统本身难以做到,蓄冷系统就是在这样的情况下应运而生的。所谓蓄冷就是让制冷机组在夜间电力负荷低谷期运行,并将产生的冷量存储起来,在次日需要时再将冷量释放出来满足生活和生产用冷的需要。空调系统是现代商业用房不可缺少的设施,其耗电量很大。这种负荷具有很大的削峰填谷能力。据初步测算,如果全国推行蓄冷空调,在2000年将300~500万千瓦高峰空调负荷转移至低谷使用完全有可能[3]。为鼓励用户使用低谷电,全国各省市陆续制订峰谷电价政策,一般低谷电价只相当峰谷电价的1/2甚至1/5[4]。这一电价制度为促进蓄冷技术的发展和应创造了良好的外部经济环境。现在国家将蓄冷空调作为十大重点节电技术措施在全国推广,蓄冷技术在我国具有良好的应用环境和发展潜力。

1.2 国内外研究现状

采用人工制冷的空调蓄冷可以追溯到 1930 年前后,当时的蓄冷只是为了减少制冷机容量和制冷设备的费用,随着设备制造业的发展,制冷机成本大幅度降低,致使该项技术的应用不受重视。但是,能源危机改变了这种状况。

70 年代以来,美国开始了对蓄冷技术的应用研究[5],到 1987 年美国已有 40 多家电力公司制订了分时计费电价,大大促进了蓄冷技术的应用。据估计,到 1993 年 6 月,全美国有 1500~2000 套蓄冷系统[6]。

日本自然资源相当贫乏,同时人口密度大,经济发达,能源消耗大,因此对节能非常重视。1952 年东日会馆大楼第一个采用了水蓄热的中央空调系统[7]。60 年代以后,水蓄热的中央空调系统在日本得到大量应用。80 年代中期,由于冰蓄冷较水蓄冷有许多优点,同时电力部门采用了分时电价制,促进了冰蓄冷的迅速发展。

在我国,台湾的蓄冷空调应用较早,发展也快,1992 年只有 33 个,1993 年发展到 142 个,1994 年底已有 225 个[8]。大陆也有了一些应用实例,1995 年中国节能协会成立了蓄冷空调研究中心,一些大专院校也在积极从事蓄冷空调技术的研究工作。

蓄冷系统按蓄冷介质的不同,可以分为以下几种:

(一) 水蓄冷

水蓄冷系统利用水作为蓄冷介质,蓄冷温度一般在 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 之间,与大多数常规冷水机组的出水温度接近,因此很容易与常规空调系统耦合,特别适用于已有常规空调系统的改造与扩容。此外,水蓄冷系统还可以利用消防水池、蓄水设施或建筑物地下室作为蓄冷容器,这样可以降低水蓄冷系统的初投资,进一步提高其经济性。但由于水蓄冷是利用显热蓄冷,与利用潜热蓄冷的系统(如冰蓄冷)相比,蓄存同样多的冷量,水蓄冷系统所需的体积要大得多。

(二) 冰蓄冷

冰蓄冷则是利用相变潜热来蓄冷,故其蓄冷能力大大超过水蓄冷(0°C 相变潜热约为 335kJ/kg)。而且蓄冰槽的出水温度较常规空调低,在相同的空调负荷下,可减少供水量或送风量,从而供水管及送风管尺寸也相应缩小。冰蓄冷系统的缺陷在于制冷主机出水温度低至 -5°C 左右,与空调工况相比,其性能系数将下降。冰蓄冷系统根据制冰方法的不同,可分为很多种,如表 1.1 所示[1]:

表 1.1 冰蓄冷系统特性比较

系统类型	冰盘管式	完全冻结式	制冰滑落式	密封件式	冰晶式
制冷方式	直接蒸发 载冷剂间接	载冷剂间接	直接蒸发	载冷剂	直接蒸发 冷却混合溶液
制冰方式	静态	静态	动态	静态	动态
蒸发温度	-4~-9	-7~-9	-4~-7	-8~-10	-9.5
出水温度	2~4	1~5	1~2	1~5	1~3
制冰率 IPF	20~40%	50~70%	40~50%	50~60%	45%
蓄冷空间 $\text{m}^3/(\text{kWh})$	2.8~5.4	1.5~2.1	2.1~2.7	1.8~2.3	3.4
释冷速率	中	慢	快	慢	极快
适用范围	工业制冷 空调	空调	空调 食品加工	空调	小型空调 食品加工

（三）共晶盐蓄冷

共晶盐蓄冷也是利用相变潜热，所用介质主要是由无机盐、水、促凝剂和稳定剂组成的混合物，目前应用较多的是相变温度约为 8°C 的共晶盐，其相变潜热约为 95kJ/kg ，比冰蓄冷小很多。其主要优点在于相变温度高，可以使用常规冷水机组。

（四）气体水合物蓄冷

气体水合物是在特定温度和压力下水在外来气体分子周围形成坚实包络状晶体，在水合结晶时释放出相当于水结冰的相变热。由于大多数制冷剂与水相互作用时能在 $5\text{—}12^{\circ}\text{C}$ 条件下形成气体水合物，而且结晶相变热大（单位容积相变热大于冰），被认为是理想的蓄冷介质。同时，由于相变温度高，可以使用常规冷水机组。但这种系统也有很多问题需要解决，比如：（1）目前的气体水合物系统需要在一定压力下工作，必须保证蓄冷槽的密封，因此选择合适的工质，使其在常压下生成水合物更具工程意义；（2）为了水与制冷剂充分混合，需要设置喷淋装置，一旦生成絮状水合物后，喷淋管极易发生堵塞。上述几种蓄冷系统的性能比较如表 1.2[9]所示：

表 1.2 不同蓄冷空调系统性能比较

蓄冷方式	蓄冷水	蓄冰	冰/水型	共晶盐	气体水合物
蓄冷槽尺寸	8~10	1*	~1	2~3	0.89~1.0
蓄冷温度 (°C)	~7	0	0	8~12	5~12
机组效率比较	1*	0.6~0.7	0.6~0.7	0.92~0.95	0.98
热交换性能	好	一般	好	差	好
冷量损失	一般	大	大	小	小
不冻液需否	否	是	否	否	否
泵-风机能耗	1*	0.7	0.7~0.9	1.05	1.0
投资比较	~0.6	1*	1.3~1.8	1.3~2.0	1.2~1.5

目前蓄冷空调的研究工作主要集中在以下几个方面:

(一) 应用数值方法建立静态和动态蓄冷槽的数值模型研究或预测蓄冷槽的性能。

Arnold[10, 11]分析了密封件式蓄冰 (Encapsulated Ice) 的制冰和融冰过程, 提出了数值模型对系统进行动态模拟。Jones[12]等提出了冰盘管式 (Ice on Coil) 数值模型。蔡祖康[13]提出了冰蓄冷槽的简化计算模型, 指出如何确定蓄冰槽的容积, 制冰换热器的结构形式以及如何进行换热器的设计。为简化计算, 作了如下假设: (1) 每一时刻槽内水温都保持均匀分布; (2) 忽略冰和换热器的热容量, 冰层呈圆筒型; (3) 忽略蓄冷槽与周围环境的换热; (4) 水温降到 0°C 以前, 槽内不出现冰。计算时分为蓄冷过程前期 (槽内水温降到 0°C 的过程) 与蓄冷过程后期 (冰生成过程) 两个阶段。

(二) 对制冰和化冰特性的研究

季杰等[14, 15]作了这方面的模拟计算, 计算以容积为 55m³ 的蓄冰槽为例, 盘管采用聚乙烯材料 (外径 27mm, 内径 23mm), 制冰介质为 25% 的盐水, 盘管分为 66 支并联, 每支盘管长约 16.5 米, 盐水进口温度为 -5°C, 计算后得出如下结论: 导热系数小的材料比导热系数大的材料制冰效果差一些, 而当导热系数大于 3.6W/M•K 时, 增加导热系数制冰效果不会有明显的提高; 盐水流量的变化会引起换热系数的变化, 盐水流量增大时, 对流换热系数增大, 引起热阻下降, 从而提高制冰效果; 制冰盘管管径对盘管表面的平均制

冰厚度影响不大,当盘管直径增大时,制冰厚度略为有所下降,但制冰槽内冰的填充率增加了。对于化冰过程,作者指出其影响因素包括冰盘管蓄冷装置的容积、储冰率、盘管结冰厚度、空调系统循环水量及盘管排列方式等。

(三) 与冰蓄冷相结合的低温送风系统的研究

采用冰蓄冷的空调系统,主机的出水温度从传统的 7~12 度下降为 1~4 度,相应的主风道送风温度下降为 3~11 度,这样随着送风温差及送风焓差的增大,送风量下降,可有效的减少通风管道的截面积,降低房屋层高,节省建筑费用或增加有效利用空间,送风机组的功率也大为减少。因此,低温送风正成为当前研究的一个热点[16, 17, 18, 19]。但这种系统的送风温度及水温均远低于常规空调,故对水管和风管的保温有其特殊的要求。对机房内,特别是与蓄冷系统相接的低温水管,应加厚保温层,以免保温层表面温度过低,引起凝结水。

郭瑞茹[20]撰文指出,对于这种系统,未来的研究重点是如何更好的利用送风系统发挥冰蓄冷的优势,比如送风系统与新制冰技术的相互配合,开发控制软件及相应的控制设备等。至于送风系统本身,主要是硬件设备的开发,比如研制更适合于低温系统用的冷却盘管,性能良好的高诱导比散流器等。

(四) 相变材料的研究开发

早期的相变材料多用冰。但冰蓄冷的制冷主机要求在冰水出口端的温度低至-5°C 以下,故使制冷机的蒸发温度、蒸发压力均降低,使得制冷机组效率下降。与一般主机出水温度 7°C 相比,制冷量将降低至 60%左右。而且,由于制冰槽及冰水管路温度常低至 0°C 以下,须增加绝热层厚度,以免发生外部结露并减少漏热。

从 80 年代开始,共晶盐(Eutectic Salt,也称为优态盐)作相变材料的蓄冷系统相继出现,到 1993 年 6 月全美已经安装了 50~67 套[6]。共晶盐是含有多种添加剂的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 溶液的多元系统其中 5°C 和 8.3°C 的相变材料已得到了成功应用。这种系统由于相变温度较高,因此与冰蓄冷系统相比,主机效率可以提高很多,相当于一般常规冷水机组效率。该系统工作在 0°C 以上,冷水侧可采用一般常规冷水机组系统设计方法,也无须考虑管路的冻结问题,它与现有的空调系统极易耦合起来,因此特别适用于传统空调系统的改造。

共晶盐系统虽然相变温度较高(可高达 8~12 度),但蓄冷密度低,不足

冰蓄冷的 50%。因此, 气体水合物 (Gas Hydrate) 蓄冷成为一门新兴的空调蓄冷技术应运而生。很多制冷剂能在 5~12 度与水相结合生成气体水合物, 而且结晶相变热大 (有些水合物单位容积相变热大于冰) 美国 Lane[21]等做了这方面的研究工作。中科院广州能源研究所[22]和华南理工大学[23]也在做这种工作。指出了今后的研究重点: 建立实用气体水合物蓄冷蓄冷装置, 为实际生产打下基础; 选择合适的替代工质, 使其在合适的温度和压力下生成水合物; 深入研究气体水合物的生成和蓄冷机理, 进一步使用相变和非相变混合工质或用添加剂的方法强化蓄能密度, 减少过冷度, 提高换热速度, 缩短蓄冷时间; 进一步改进和完善适合气体水合物工质的实用蓄冷装置, 在实际工程中展开应用研究。

(五) 蓄冷的强化传热研究

文献[24]以实验比较了双金属蕊芯冰球和无金属蕊芯冰球的结冰情况, 指出, 加了双金属蕊芯后, 冰球的结冰速度提高了 $1/3 \sim 1/2$, 相应的结冰时间也缩短了 $1/3 \sim 1/2$ 。结冰前, 冰球的降温速度也比无金属蕊芯冰球略高。该文还比较了球内介质分别为水和添加速冻剂的配方溶液时的结冰情况, 指出, 配方溶液的导热系数比水小, 因此其降温速度较慢, 但由于速冻剂的作用, 一旦达到成核点温度, 其凝结速度比水快得多。

(六) 蓄冷技术的系统节能和经济性的评价和预测方法

张华[25]等分析了影响冰蓄冷空调经济效益和社会效益的因素, 建立了一个评价冰蓄冷空调经济性的模型, 归纳出评价冰蓄冷空调系统的五项指标: 高峰用电转移率, 蓄冷率, 制冷机容量变化率, 性能系数降低率, 增加投资回报年限。

张力君等[26]建立了冰蓄冷空调系统经济分析的数学模型, 以一个实例分析了蓄冷率和电价结构对冰蓄冷空调系统初投资和运行费用的影响, 介绍了求最佳蓄冷率的方法。同时指出, 在进行部分蓄冷空调系统设计时, 按设计日最大负荷求得最佳蓄冷率后, 系统得制冷机容量、配电容量和储冰设备得容积也随之确定, 因此, 最佳蓄冷率是选择制冷机容量和储冰设备容积的重要依据。

(七) 蓄冷系统的工作模式及其控制

蓄冷系统有两种运行策略, 即全部蓄冷和部分蓄冷。全部蓄冷系统是白天不开冷水机组, 建筑物所需负荷由冰提供, 部分蓄冷系统是白天建筑物所需的冷负荷由冷水机组和冰共同提供。蓄冷系统一般采用部分蓄冷, 其冷水

机组和储冰装置容量小，初投资少。部分蓄冷系统可分为两种模式，即冰优先和机组优先。冰优先指白天提供冷量时以冰为主，不够时再由制冷机提供，机组优先则相反。

文献[27]对机组优先和冰优先两种模式进行了比较，指出：对于冰优先系统，冷水机组容量较小，储冰容量大，冷水机组在部分负荷下运行，效率较低；对于机组优先系统，白天冷水机组处于满负荷运行状态，运行效率高，但蓄冰装置的融冰量每小时都在变化，对控制要求高，否则会造成冰不够用而室内温度过低，或者冰用不完而室内温度降不下来的现象。

文献[28]对常规空调系统、机组优先控制的部分蓄冷系统和优化控制的部分蓄冷系统进行了比较，指出优化控制具有明显的经济性：与常规系统相比，机组优先控制只节约 13.4%，回收期超过 6 年，而优化控制可节约 43.0%，回收期仅 2 年多。

1.3 本课题的任务

从国内外研究现状来看，虽然对冰蓄冷作了广泛而深入的研究，但还有一些不足之处：（1）蓄冰盘管均采用金属管（铜管）而没有研究塑料管的情形。由于冰的导热系数很小（ $2.24\text{W/m}\cdot\text{K}$ ），盘管壁又很薄，当结冰到一定厚度时，管壁的热阻将处于次要地位，采用塑料管与金属管相比，其总热阻差别不大。而塑料管具有重量轻，价格低的优势，有很好的应用前景。（2）在建立数学模型时，把边界条件考虑成常壁温或常热流，在实际的蓄冰过程中，这是难以保证的，而我们所能控制的是载冷剂的温度，以第三类边界条件建立模型更有实际意义。（3）对蓄冷槽中制冰过程的强化研究极少，特别是盘管式蓄冰的强化研究尚未见诸于文献。

鉴于上述研究现状，本课题拟作如下研究：

1. 建立实验台，包括可视化蓄冰罐（制冰盘管采用塑料管）及与之配套的制冷系统。
2. 通过实验分析影响蓄冰的因素。
3. 以第三类边界条件建立数学模型，并与实验结果进行对比。
4. 研究盘管式蓄冰的强化传热。要实现传热的强化，主要是想办法促使晶核的生成和晶体的生长，可以采用很多方法，考虑到本课题的具体情况，拟采用绕金属丝和设搅拌装置的办法。并对绕金属丝后的结冰情况拍照，分析其强化传热机理。

第二章

实验系统的建立

该实验装置主要由以下部分组成：（1）制冷系统；（2）可视化蓄冷罐；（3）测试系统。图 2.1 是实验系统图，图 2.2 是实验装置照片。

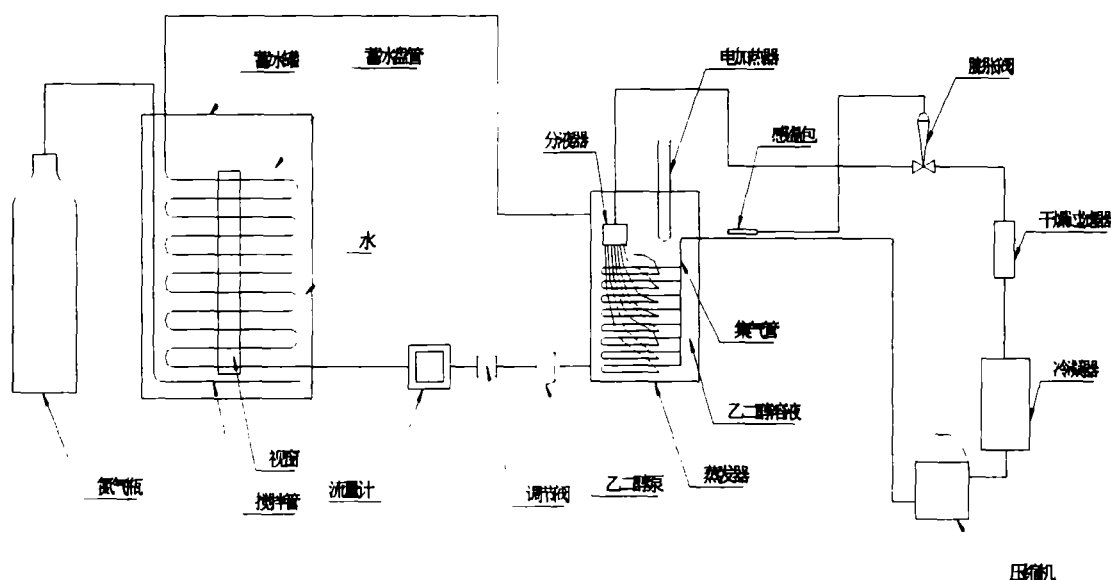


图 2.1 蓄冰实验系统图

2.1 制冷系统

制冷系统用来给结冰系统提供冷源。由于没有现成的冷源，就自己设计了一套制冷系统。本课题的实验是在中科院低温技术实验中心传热传质课题组做的。该组有一台现成的压缩冷凝机组，是法国原子能总署低温工程部赠送的，同时，还有 $\phi 6 \times 1$ 的外螺纹紫铜管。设计制冷系统时，就以这两个现成部件为基础。该制冷系统主要部件包括压缩冷凝机组、蒸发器和节流阀。

2.1.1 压缩冷凝机组

压缩冷凝机组是法国生产的，型号为 CAJ 4461A HR 24L89，制冷剂为 R12，输入电压 220 伏，输入电流 4.9 安。

2.1.2 蒸发器

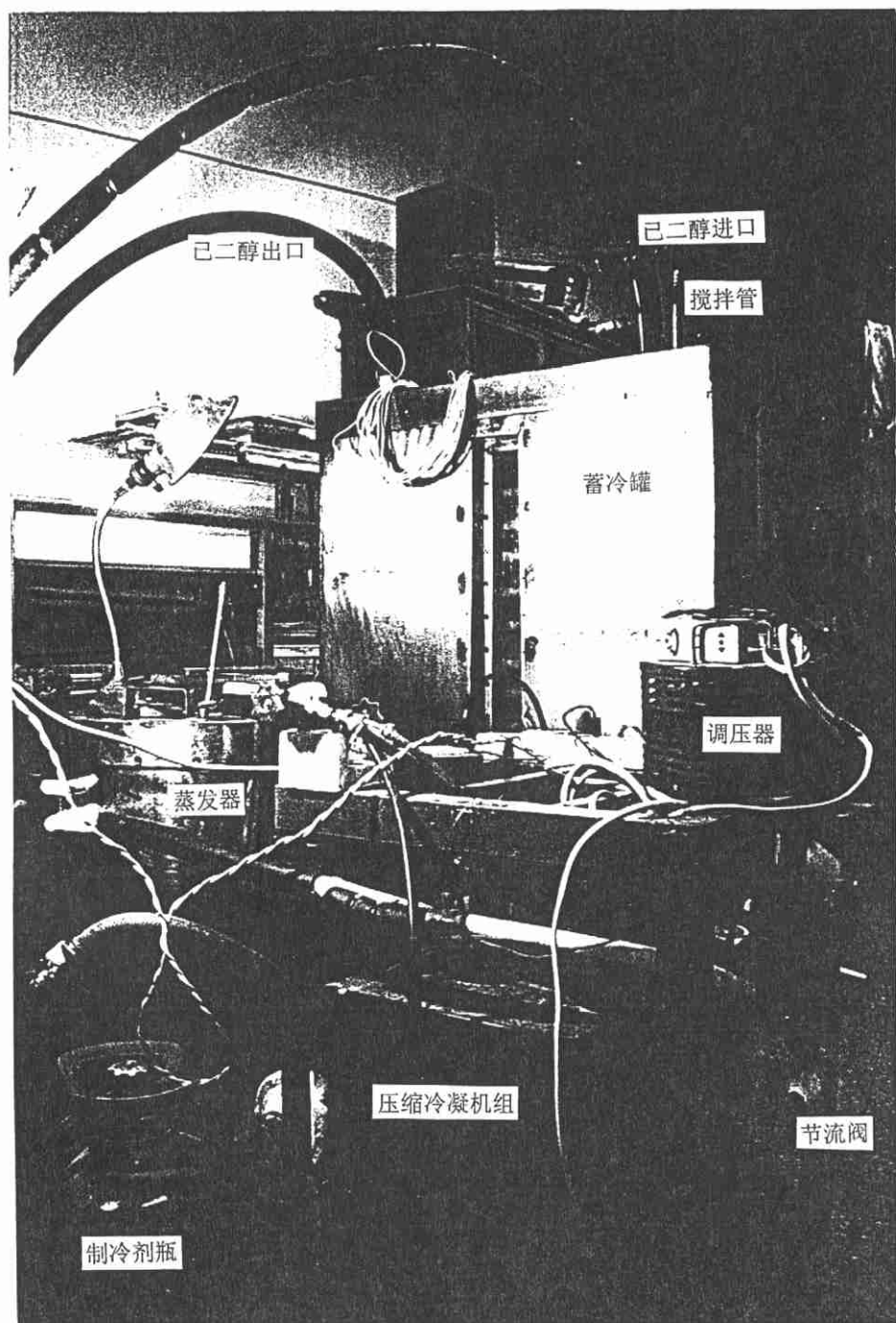
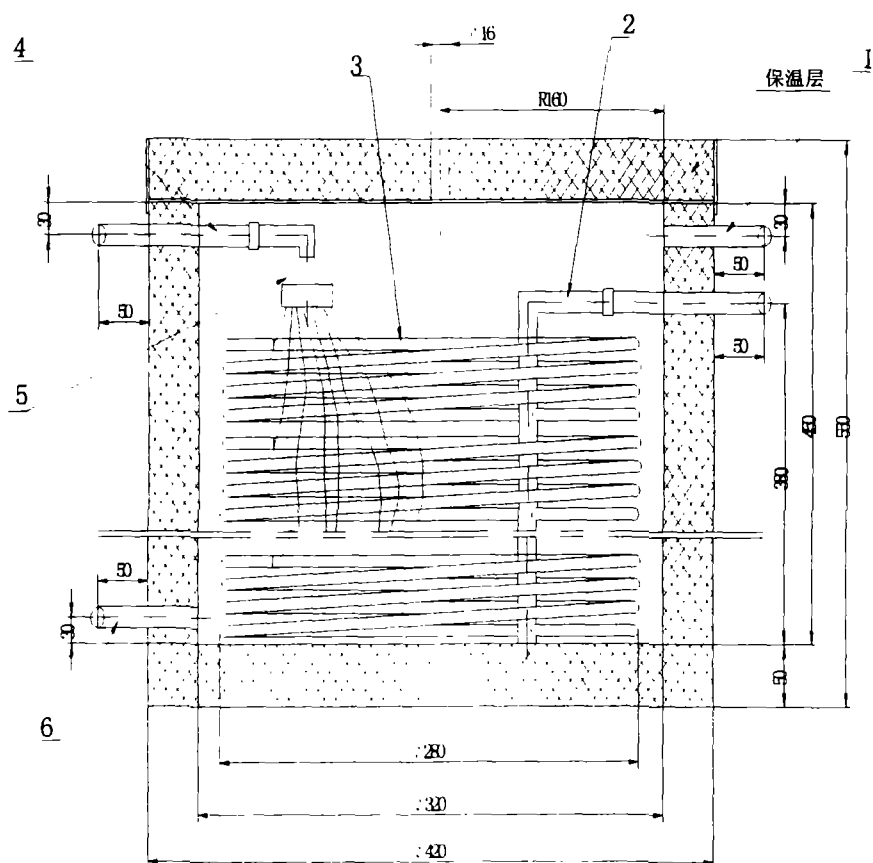


图 2.2 实验装置照片

蒸发器做成圆筒型，材料用不锈钢，内筒与外筒之间用 50mm 聚氨脂泡沫保温。圆筒高为 760mm，内筒直径为 300mm。蒸发盘管用 $\phi 6 \times 1$ 外螺纹紫铜管，分八组并联，每一组长约 3.44m，八组总长约 27.5m。分液器与蒸发盘管之间用 $\phi 3 \times 0.5$ 的紫铜管连接，使制冷剂能够均匀地分配到各路盘管。蒸发器总换

热面积约 0.52m²。整个蒸发器的加工在中科院电工所完成。蒸发器结构如下图所示:



1.乙二醇进口 2.集气管 3.盘管 4.供液管 5.分液器 6.乙二醇出口

图 2.3 蒸发器

蒸发器的具体设计步骤如下:

一、设计参数

制冷量 $Q_0=2\text{kW}$ 。蒸发温度 $T_0=-15^\circ\text{C}$ ，冷凝温度 $T_k=45^\circ\text{C}$ ，吸气过热度 $\Delta T_0=15^\circ\text{C}$ ，过冷度 $\Delta T_k=5^\circ\text{C}$ ，乙二醇溶液浓度为 27.4%，平均温度为 $t_{\text{glycol}}=-5^\circ\text{C}$ 。

二. 计算步骤

(一)传热面积计算

1. 由 R12 压焓图查得各点焓值及比容

$h_1=352.0\text{KJ}$, $h_2=391.0\text{KJ}$, $h_3=241.0\text{KJ}$, $h_4=h_3=241.0\text{KJ}$, $v_1=0.118\text{m}^3/\text{kg}$,
 $v_2=0.018\text{m}^3/\text{kg}$, 则单位容积制冷量 $q_0=h_1-h_4=111.0\text{kJ/kg}$ 。

2. 确定制冷剂管径及质量流速

我所在的课题组有现成的 $\phi 6\times 1$ 的外螺纹紫铜管, 考虑到管径较小, 而制冷剂流量较大, 因此分 8 个通路供液。

制冷剂质量流量

$$Q_m = Q_0/q_0 = 2/111.0 = 0.018\text{kg/s}$$

单个通路的流量为

$$Q_{m1} = Q_m/8 = 0.018/8 = 0.00225\text{kg/s}$$

质量流速为

$$\begin{aligned} V_m &= (4Q_{m1}/\pi/d_i/d_i) \\ &= (4\times 0.00225/\pi/0.004^2) \\ &= 179.0\text{kg/m}^2\text{s} \end{aligned}$$

根据文献[29]P⁹¹表 4—12, 该值处于推荐值范围内。

3. 假设蒸发器结构参数

蒸发器高 $H=0.76\text{m}$, 蒸发器内径 $D_i=0.30\text{m}$, 盘管层数 $N=32$, 盘管总长 $L=27.5\text{m}$ 。

4. 假设管内热流密度 $q_i=5195.0\text{W/m}^2$, 求出管内放热系数 α_i

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 1.04q_i^{0.6}(V_m/d_i)^{0.2} \\ &= 1.04\cdot 5195.0^{0.6}(179.0/0.004)^{0.2} \\ &= 1500.3\text{W/m}^2\cdot\text{k} \quad \text{文献[29]P}^{86}。 \end{aligned}$$

5. 计算管壁温, 确定定性温度 t_m 及乙二醇物性

$$\begin{aligned} t_{w1} &= q_i/\alpha_i + T_0 \\ &= 5195.0/1500.3 + (-15) \\ &= -11.537^\circ\text{C} \\ t_{w2} &= t_{w1} + q_i\cdot\delta/\lambda \\ &= -11.537 + 5195.0\cdot 0.001/0.48 \\ &= -11.524^\circ\text{C} \\ t_m &= (t_{w2} + t_{\text{glycol}}) \\ &= (-11.524 - 5) \\ &= -8.262^\circ\text{C} \end{aligned}$$

查得乙二醇物性:

$$\lambda = 0.48\text{W/m}\cdot\text{k}, \quad v = 4.67\cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.65\cdot 10^{-3}\text{1/k}, \quad \text{Pr} = 37.64。$$

6. 计算管外放热系数 α_o 及管外热流密度 q_o

$$\begin{aligned} Ra &= g\beta\Delta t d_o^3 / \nu^2 \cdot Pr \\ &= 9.81 \cdot 0.65 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 0.006^3 / (4.67 \cdot 10^{-6}) \cdot 37.64 \\ &= 1.772 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Nu &= \{0.60 + 0.387 \cdot Ra^{1/6} / [1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}\}^2, \text{ 文献[30] } P^{158} \\ &= \{0.60 + 0.387 \cdot 1.772 \times 10^4 / [1 + (0.559/37.64)^{9/16}]^{8/27}\}^2 \\ &= 6.636 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_o &= Nu \cdot 1.5\lambda / d_o \\ &= 6.636 \times 1.5 \times 0.48 / 0.006 \\ &= 796.3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_o &= \alpha_o (t_{\text{glycol}} - t_w) \\ &= 796.3 (-5 + 11.524) \\ &= 5195.0 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

7. 比较 q_i 与 q_o 的大小

如 $|q_i - q_o|/q_i > 1\%$, 取 $q_i = q_o$ 转第4步, 否则继续下一步。

8. 计算各项热阻, 传热系数, 传热面积

$$\begin{aligned} R_i &= 1 / \alpha_i \times d_o / d_i \\ &= 1 / 1500.3 \times 0.006 / 0.004 \\ &= 0.001 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_o &= 1 / \alpha_o / 1.3 \\ &= 1 / 796.3 / 1.3 \\ &= 0.000966 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{cu} &= d_o / 2 / \lambda_{cu} \ln(d_o / d_i) \\ &= 0.006 / 2 / 398 \times \ln(0.006 / 0.004) \\ &= 0.000003 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K &= 1 / (R_i + R_o + R_{cu}) \\ &= 1 / (0.001 + 0.000966 + 0.000003) \\ &= 507.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot d_o \cdot L \\ &= \pi \times 0.006 \times 27.5 \\ &= 0.519 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

9. 计算实际的换热量

$$\begin{aligned} Q &= KA(t_{\text{glycol}} - T_0) \\ &= 507.9 \times 0.519 (-5 + 15) \end{aligned}$$

$$=2635.8w$$

10. 比较 Q 与 Q_0 的大小, 保证裕量 30% 左右, 否则, 重设结构参数, 转第 3 步, 否则结束计算。

(二) 管路计算

管路计算采用文献[29]提供的方法。

1) 吸气管路计算

1. 确定管径及流速

使用的压缩冷凝机组, 其吸气管接口为 12mm, 故选用 $\phi 12 \times 1$ 的紫铜管, 相应的流速为 27m/s。

2. 校核阻力

(1) 弯头当量长度

查文献[29]P132 表 6-1, 弯头当量长度与管内径之比为 30, 该管路共有 6 个弯头, 其总当量长度为

$$L_1 = 30d \cdot 6 = 30 \times 0.01 \times 6 = 1.8m$$

(2) 角阀当量长度

角阀当量长度与管内径之比为 170, 其当量长度为

$$L_2 = 17d = 170 \times 0.01 = 1.7m$$

(3) 管长

$$L_3 = 0.05 \times 2 + 0.4 \times 2 + 0.2 = 1.1m$$

(4) 总当量长度

$$L_d = L_1 + L_2 + L_3 = 1.8 + 1.7 + 1.1 = 4.6m$$

查文献[29]P131 图 6-18, 阻力损失为 4.8kpa

2) 供液管路计算

1. 确定管径及流速

一般供液管路流速 u 小于 0.5m/s, 取 $u=0.5m/s$, 则管径为

$$d = (4Q_{mv} / \pi u)^{1/2} = 0.0071m$$

取 $d=0.008m$, 则实际流速 $u=0.4m/s$ 。

2. 校核阻力

(1) 弯头当量长度 L_1

查文献[29]P132 表 6-1, 弯头当量长度与管内径之比为 30, 该管路共有 2 个弯头, 其总当量长度为

$$L_1 = 30d \cdot 2 = 0.48m$$

(2) 角阀当量长度 L_2

角阀当量长度与管内径之比为 170, 其当量长度为

$$L_2=170d=1.36\text{m}$$

(3) 管长 L_3

$$L_3=0.3+0.4=0.7\text{m}$$

(4) 总当量长度 L_d

$$L_d=L_1+L_2+L_3=2.54\text{m}$$

(5) 液柱高度对应的阻力

$$\Delta P=\rho gh$$

$$=1274.0 \times 9.81 \times 0.3 \times 10^{-6}$$

$$=37.49 \times 10^{-4} \text{Mpa}$$

查文献[29]P130 图 6-17, 阻力损失为 4.9kpa

(三) 蒸发器热损失计算

设计参数: 乙二醇温度 $t_{\text{glycol}}=-5^{\circ}\text{C}$, 空气温度 $t_{\text{air}}=20^{\circ}\text{C}$, 保温层用聚氨酯泡沫, 其导热系数为 $\lambda_{\text{保温}}=0.043\text{w/m}\cdot^{\circ}\text{C}$, 厚度 50mm。因为侧面, 顶面和底面计算公式不同, 需分别计算。

1. 侧面热损失 Q_{side}

(1) 假设内壁温 t_{wi} , 确定定性温度 t_{mi} 及乙二醇物性.

$$t_{\text{wi}}=-4.82^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{wm}}=(t_{\text{wi}}+t_{\text{glycol}})/2=-4.91^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda=0.5\text{w/m}\cdot\text{k}, \quad \nu=4.82 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}, \quad \beta=0.65 \times 10^{-3} \text{1/k}, \quad \text{Pr}=35.8$$

(2) 求内表面换热量

$$\text{Ra}_i=g\beta(t_{\text{wi}}-t_{\text{glycol}})h^3/\nu^2\text{Pr}$$

$$=9.81 \times 0.65 \times 10^{-3} (-4.82+5) \times 0.76^3 / (4.82 \times 10^{-6})^2 \times 35.8$$

$$=7.88 \times 10^8$$

$$\text{Nui}=\{0.60+0.387\text{Ra}_i^{1/6}/[1+(0.559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}\}^2, \quad \text{文献}[30] \text{P}^{158}$$

$$=\{0.60+0.387(7.88 \times 10^8)^{1/6}/[1+(0.559/35.8)^{9/16}]^{8/27}\}^2$$

$$=152.81$$

$$\alpha_i=\text{Nui}(\lambda/h)(D_i/D_o)$$

$$=152.81 \times (0.5/0.76)$$

$$=100.5\text{w/m}^2\cdot\text{k}, \quad \text{以内表面为基准}$$

$$q_i=\alpha_i(t_{\text{wi}}-t_{\text{glycol}})$$

$$=100.5(-4.82+5)$$

$$=18.4\text{w/m}^2$$

(3) 求外壁温 t_{wo} , 确定定性温度 t_{wm} 及空气物性

$$\begin{aligned} t_{wo} &= t_{wi} + q_i \cdot D_i / 2 / \lambda_{\text{保温}} \ln(D_o / D_i) \\ &= -4.82 + 18.4 \cdot 0.3 / 2 / 0.043 \ln(0.4 / 0.3) \\ &= 13.6^\circ\text{C} \\ t_{wm} &= (t_{wo} + t_{air}) / 2 \\ &= (13.6 + 20) / 2 \\ &= 16.8^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\lambda = 0.0259 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \quad \nu = 15.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.00337 \text{ 1/K}$$

(4) 求外表面换热系数

$$\begin{aligned} Ra_o &= g\beta(t_{air} - t_{wo}) h^3 / \nu^2 Pr \\ &= 9.81 \times 0.00337 (20 - 13.6) \times 0.76^3 / (15.06 \times 10^{-6})^2 \times 0.703 \\ &= 2.94 \times 10^8 \\ Nu_o &= \{0.60 + 0.387 Ra_o^{1/4} / [1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{4/5}\}^2, \quad \text{文献[30] } P^{158} \\ &= \{0.60 + 0.387 (2.949 \times 10^8)^{1/4} / [1 + (0.559 / 0.703)^{9/16}]^{4/5}\}^2 \\ &= 111.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_o &= Nu_o (\lambda / h) (D_i / D_o) \\ &= 111.9 (0.0259 / 0.76) \times (0.3 / 0.4) \\ &= 2.86 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, \quad \text{以内表面为基准} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_o &= \alpha_o (t_{air} - t_{wo}) \\ &= 2.86 (20 - 13.6) \\ &= 18.26 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

(5) 比较 q_i 与 q_o 的大小

如 $|q_i - q_o| / q_i > 1\%$, 重新假设 t_{wi} 转第 1 步, 否则继续下一步。

(6) 计算热损失

$$\begin{aligned} Q_{\text{side}} &= q_i \pi D_i h \\ &= 18.4 \pi \times 0.3 \times 0.76 \\ &= 13.2 \text{ W} \end{aligned}$$

2. 底面热损失 Q_{bottom}

(1) 假设内壁温 t_{wi} , 确定定性温度 t_{mi} 及乙二醇物性.

$$\begin{aligned} t_{wi} &= -4.82^\circ\text{C} \\ t_{wm} &= (t_{wi} + t_{\text{glycol}}) / 2 = -4.91^\circ\text{C} \\ \lambda &= 0.49 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \quad \nu = 4.82 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.65 \times 10^{-3} \text{ 1/K}, \quad Pr = 35.8 \end{aligned}$$

(2) 求内表面换热系数

$$\begin{aligned} \text{Rai} &= g\beta(\text{twi}-\text{tglycol}) \cdot (0.9\text{Di})^3/\nu^2\text{Pr} \\ &= 9.81 (0.65 \times 10^{-3}) (-4.82+5) \cdot (0.9 \times 0.3)^3 / (4.82 \times 10^{-6})^2 \times 35.8 \\ &= 3.86 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nui} &= 0.15\text{Rai}^{1/3}, \text{ 文献[30] P}^{157} \\ &= 0.15 (3.86 \times 10^7)^{1/3} \\ &= 50.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \text{Nui}\lambda / (0.9\text{Di}) \\ &= 50.7 \times 0.49 / (0.9 \times 0.3) \\ &= 93.89 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_i &= \alpha_i(\text{twi}-\text{tglycol}) \\ &= 93.89(-4.82+5) \\ &= 16.81 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

(3) 求外壁温 two , 确定定性温度 twm 及空气物性

$$\begin{aligned} \text{two} &= \text{twi} + q_i \cdot \delta / \lambda \\ &= -4.82 + 16.81 \times 0.05 / 0.043 \\ &= 14.72^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{twm} &= (\text{two} + \text{tair}) / 2 \\ &= (14.72 + 20) / 2 \\ &= 17.36^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\lambda = 0.0260 \text{ W/m} \cdot \text{k}, \quad \nu = 15.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.0034 \text{ 1/K}, \quad \text{Pr} = 0.7$$

(4) 求外表面换热量 q_o

$$\begin{aligned} \text{Rao} &= g\beta(\text{tair}-\text{two}) \cdot (0.9\text{Di})^3/\nu^2\text{Pr} \\ &= 9.81 \times 0.0034 (20-14.72) \cdot (0.9 \times 0.3)^3 / (15.16 \times 10^{-6})^2 \times 0.7 \\ &= 1.09 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nuo} &= 0.15\text{Rao}^{1/3}, \text{ 文献[30] P}^{157} \\ &= 0.15(1.09 \times 10^7)^{1/3} \\ &= 33.23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_o &= \text{Nuo} \cdot \lambda / (0.9\text{Di}) \\ &= 33.23 \times 0.0260 / (0.9 \times 0.3) \\ &= 3.19 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_o &= \alpha_o(\text{tair}-\text{two}) \\ &= 3.19(20-14.72) \\ &= 16.83 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

(5) 比较 q_i 与 q_o 的大小

如 $|q_i - q_o|/q_i > 1\%$, 重新假设 t_{wi} 转第 1 步, 否则继续下一步。

(6) 计算热损失

$$\begin{aligned} Q_{\text{bottom}} &= q_i \cdot \pi \cdot D_i^2 / 4 \\ &= 16.81 \pi (0.3)^2 / 4 \\ &= 1.19w \end{aligned}$$

3. 顶面热损失 Q_{top}

(1) 假设内壁温 t_{wi} , 确定定性温度 t_{mi} 及乙二醇物性.

$$\begin{aligned} t_{wi} &= -4.65^\circ\text{C} \\ t_{wm} &= (t_{wi} + t_{\text{glycol}}) / 2 \\ &= (-4.65 - 5) / 2 \\ &= -4.83^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\lambda = 0.49 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \quad \nu = 4.82 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.65 \times 10^{-3} \text{ 1/K}, \quad \text{Pr} = 35.8$$

(2) 求内表面换热量

$$\begin{aligned} \text{Ra}_i &= g\beta(t_{wi} - t_{\text{glycol}}) \cdot (0.9D_i)^3 / \nu^2 \cdot \text{Pr} \\ &= 9.81 \times 0.65 \times 10^{-3} \cdot (-4.65 - 5) \cdot (0.9 \times 0.3)^3 / (4.82 \times 10^{-6})^2 \times 35.8 \\ &= 6.73 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_i &= 0.58 \text{Ra}_i^{0.2}, \quad \text{文献[30] P}^{157} \\ &= 0.58 (6.73 \times 10^7)^{0.2} \\ &= 21.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \text{Nu}_i \cdot \lambda / (0.9D_i) \\ &= 21.33 \times 0.49 / (0.9 \times 0.3) \\ &= 39.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_i &= \alpha_i(t_{wi} - t_{\text{glycol}}) \\ &= 39.5(-4.65 + 5) \\ &= 13.75 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

(3) 求外壁温 t_{wo} , 确定定性温度 t_{wm} 及空气物性

$$\begin{aligned} t_{wo} &= t_{wi} + q_i \delta / \lambda \\ &= -4.65 + 13.75 \times 0.05 / 0.043 \\ &= 11.33^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{wm} &= (t_{wo} + t_{\text{air}}) / 2 \\ &= (11.33 + 20) / 2 \\ &= 15.67^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\lambda = 0.0262 \text{ W/m}\cdot\text{K}, \quad \nu = 15.42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \beta = 0.00337 \text{ 1/K}$$

(4) 求外表面换热量 q_o

$$\begin{aligned} Rao &= g\beta(t_{air}-t_{wo}) \cdot (0.9Di)^3 / \nu^2 Pr \\ &= 9.81 \times 0.00337 (20-11.33) \cdot (0.9 \times 0.3)^3 / (15.42 \times 10^{-6})^2 \times 0.7 \\ &= 1.8 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Nuo &= 0.58 Rao^{0.2}, \text{ 文献[30] } P^{157} \\ &= 0.58 (1.8 \times 10^7)^{0.2} \\ &= 16.38 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_o &= Nu\lambda / (0.9Di) \\ &= 16.38 \times 0.0258 / (0.9 \times 0.3) \\ &= 1.57 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_o &= \alpha_o(t_{air}-t_{wo}) \\ &= 1.57(20-11.33) \\ &= 13.62 \text{ w/m}^2 \end{aligned}$$

(5) 比较 q_i 与 q_o 的大小

如 $|q_i - q_o|/q_i > 1\%$, 取 $q_i = q_o$ 转第二步, 否则继续下一步。

(6) 计算热损失

$$\begin{aligned} Q_{bottom} &= q_i \cdot \pi \cdot Di^2 / 4 \\ &= 13.62 \pi \cdot 0.3^2 / 4 \\ &= 0.97 \text{ w} \end{aligned}$$

4. 总热损失

$$\begin{aligned} \Sigma Q &= Q_{side} + Q_{bottom} + Q_{top} \\ &= 13.2 + 1.19 + 0.97 \\ &= 15.36 \text{ w} \end{aligned}$$

2.1.3 节流阀

节流阀根据制冷工况及制冷量选择, 经过计算, 选用型号为 RF12N1.5-1.9B 膨胀阀, 其额定冷量为 $1.9 \times 10^3 \text{ Kcal/h}$, 阀口通径为 1.5mm。

2.1.4 制冷剂的充注量

制冷机中氟里昂的充注量对于机器的正常运行是十分重要的, 制冷剂不足, 则达不到要求的制冷量; 制冷剂过多, 会使设备寿命缩短, 耗能增加。本文采用工况参数法[31]来确定氟里昂的充注量, 其步骤如下, 首先分别计算冷凝器、蒸发器、各连接管容积, 再根据运行工况查出蒸发器进口干度、出口干度, 求出平均干度, 然后根据蒸发温度、冷凝温度查出蒸发器、冷凝器内液体、气体容重, 分别计算蒸发器、冷凝器及连接管所需氟里昂重量, 最后相加后得出总需要量。计算出的氟里昂充注量为 240g。

2.2 可视化蓄冷罐

可视化蓄冷罐是实验台的关键部分，可以观察结冰过程的各种现象。

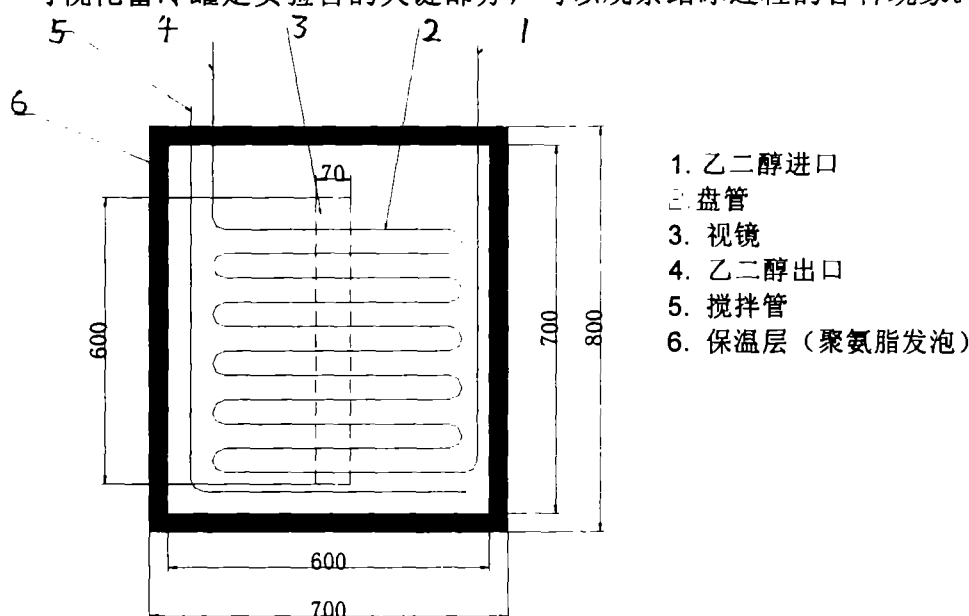


图 2.4 蓄冷罐

如图 2.4 所示, 它主要由以下部分组成:

2.2.1 罐体

罐体分内壳与外壳,内壳长、宽、高为 $600 \times 55 \times 700$,材料为 1.5mm 的不锈钢,外壳长、宽、高为 $800 \times 155 \times 700$,材料为 1.2mm 的不锈钢,内壳与外壳之间用聚氨酯发泡保温,保温层厚度为 50mm。

2.2.2 盘管

盘管用 $\phi 15 \times 1.5$ 的聚乙烯塑料管, 导热系数为 $0.44 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 盘管共 11 层, 总长约 7m。

2.2.3 视窗

视窗用来观察结冰过程。视窗在罐体中部，由双层有机玻璃（厚 3mm）组成，尺寸为 600×70 。

2.2.4 乙二醇泵

乙二醇泵的作用是把蒸发器内的低温乙二醇送入蓄冷罐内的蒸发盘管。该泵选用上海长征泵阀厂的磁力驱动泵，流量为 20L/h，扬程为 5m，转速为 2800r/min。

2.2.5 搅拌管

设搅拌管的目的是为了研究传热的强化。搅拌管用 $\phi 14 \times 2$ 的不锈钢管，孔尺寸为 $\phi 6 \times 1$ ，孔距为 25mm，放在蓄冷罐下部。搅拌时将氮气通入不锈钢管中，氮气从小孔喷出，起到搅拌作用。

2.3 测试系统及其误差分析

本实验需要测试的物理量包括温度、流量、水位等。

2.3.1 热电偶

蓄冷罐中水温，乙二醇进出口温度等各处温度的检测均采用铜—康铜热电偶。热电偶用直径为 0.1mm 的铜丝与康铜丝焊接而成。该热电偶经过北京市计量科学研究所检定，结果如表 2.3.1 所示：

表 2.1 检定值

序号	标准温度 $^{\circ}\text{C}$	示值 (mv)	分度表值 (mv)
1	-30	-1.132	-1.121
2	-20	-0.763	-0.757
3	-10	-0.387	-0.383
4	10	0.391	0.391
5	20	0.803	0.790
6	30	1.218	1.196

注：1. 示值指北京市计量科学研究所的检定值。

2. 分度表值指文献[32]中的值。

从上表的数据可以看出，在本实验使用范围内（-10—+10 $^{\circ}\text{C}$ ），精度是相当高的，误差不超过 0.1K。

2.3.2 数字电压表

热电偶的热电势采用美国生产的 192 PROGRAMMABLE DMM 精密数字电压表测量，其精度为 $1\mu\text{V}$ 。约相当于 0.05K。

2.3.3 流量计

乙二醇的流量用天津市自动化仪表十四厂生产的 LZB-15 转子流量计测量，其测量精度为 10L/h，测量中的最小流量为 180L/h，故流量的误差小于 5.56%。

2.3.4 直尺

用来测蓄冷罐的水位。其精度为 1mm，本实验水位变化不超过 28mm，故水位的误差小于 3.6%。

第三章 水平管外结冰特性的实验研究

3.1 实验方案

影响结冰的因素很多,包括盘管材料、盘管尺寸、乙二醇的温度、流量,水的初始温度等,在本课题的实验研究中,分两组工况对结冰特性进行了实验研究。第一组固定水的初始温度和乙二醇流量,改变乙二醇温度;第二组固定水的初始温度和乙二醇温度,改变乙二醇流量,以研究乙二醇温度和流量对结冰的影响。

具体步骤如下:

1. 选定水的初始温度 T_0 , 乙二醇流量 Q .
2. 室内温度一般在 15°C 左右,因此先开启制冷系统,并将乙二醇通入蓄冷罐,将蓄冷罐内水温降低至 T_0 .
3. 切断乙二醇与蓄冷罐的通路,继续运行制冷系统,直至乙二醇入口温度达到 T_{glycol} . 由于随着结冰的进行,乙二醇的温度会逐渐降低,因此需不断调节加热电压,使乙二醇温度保持恒定。
4. 开通乙二醇与蓄冷罐的通路,向蓄冷罐供冷,并监测流量,使之在所要求的流量值。
5. 每隔半小时记录各点温度值及蓄冷罐水位,直至实验结束。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 结冰量与结冰厚度的计算

结冰量可以从蓄冷罐的水位变化,利用冰与水的密度差计算得到。

如图 3.1 所示,结冰后水位上升,冰虽然是沿着盘管生成,但可以把它等效为如右图所示,即可以看作水在下面,而冰在上面,中间有一分界面,这样便于计算。假设结冰前水位高为 h_0 ,结冰后水位升高为 h_1 ,其中水层的等效高度为 x ,则冰层的等效高度为 (h_1-x) ,以 A 表示蓄冷罐的截面积,根据质量平衡可得:

$$\rho_{\text{water}} h_0 A = \rho_{\text{water}} x A + \rho_{\text{ice}} (h_1 - x) A \quad (3-1)$$

式中: ρ_{water} —— 水的密度

ρ_{ice} —— 冰的密度

由上式可以得出

$$x = \frac{\rho_{water} h_0 - \rho_{ice} (h_0 + \Delta h)}{\rho_{water} - \rho_{ice}} \quad (3-2)$$

于是可以求出结冰质量

$$m_{ice} = (h_0 + \Delta h - x) \rho_{ice} A \quad (3-3)$$

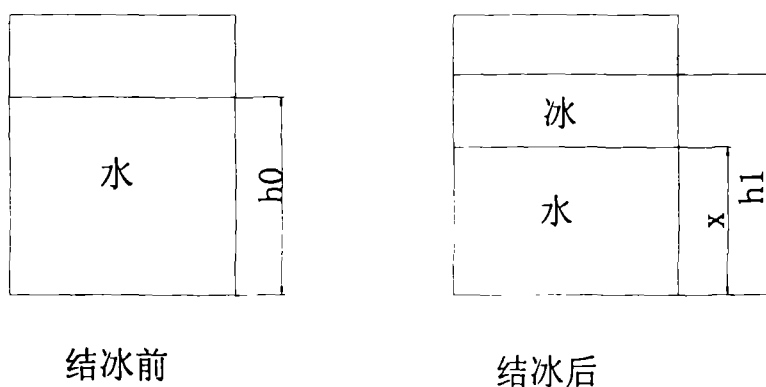


图 3.1 结冰量计算示意图

结冰厚度虽然可以从标尺上目测，但不够准确，因此根据上面得到的结冰量及盘管尺寸间接求得。结冰质量与几何尺寸的关系为：

$$m_{ice} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot l \cdot \rho_{ice}$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot [(d + 2\delta)^2 - d^2] \cdot l \cdot \rho_{ice} \quad (3-4)$$

式中： ρ_{ice} ——冰密度 l ——盘管长度

D ——冰层外径 d ——盘管外径

δ ——冰层厚度

代入已知数据，可求出结冰厚度与结冰质量的关系：

$$\delta = \frac{\sqrt{115.24m_{ice} - 367.33}}{57.62} \quad (3-5)$$

3.2.2 乙二醇温度的影响

图 3.2 给出了保持水初始温度为 4℃, 乙二醇流量为 200L/h 不变, 在不同的乙二醇入口温度的情况下, 结冰质量随时间的变化关系, 图 3.3 给出了在同样的情况下, 结冰厚度随时间的变化关系。从图中可以看出, 乙二醇入口温度对结冰影响很大, 以图 3.2 为例, 如要达到同样多的结冰量 (7.5kg), 当入口温度为 -4℃ 时, 需要 7 小时, 而入口温度为 -6℃ 和 -8℃ 时所需时间少得多, 分别为 3.8 和 4.2 小时。

3.2.3 乙二醇流量的影响

图 3.4 给出了保持水初始温度为 4℃, 乙二醇入口温度为 -6℃ 时, 在不同的乙二醇流量的情况下, 结冰质量随时间的变化关系, 图 3.5 给出了在同样的情况下, 结冰厚度随时间的变化关系。

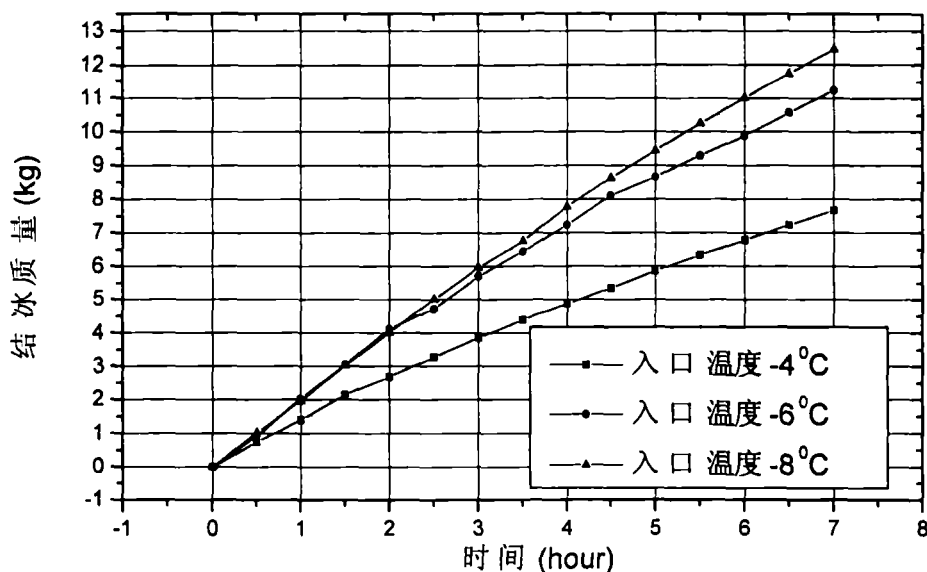


图3.2 乙二醇温度对结冰质量的影响

从图中可以看出, 乙二醇流量增加, 在同样的结冰时间内, 结冰质量和结冰厚度略有增加, 但增加量很小。以图 3.4 为例, 当流量从 185L/h 增加到 225L/h 时, 结冰量从 11.0kg 仅增加到 11.28kg, 约 2.5%。这是因为流量的增

加虽然使得盘管内换热增强,但热阻主要集中于管外,因此总热阻变化不大,从而流量对结冰厚度和结冰量的影响很小。

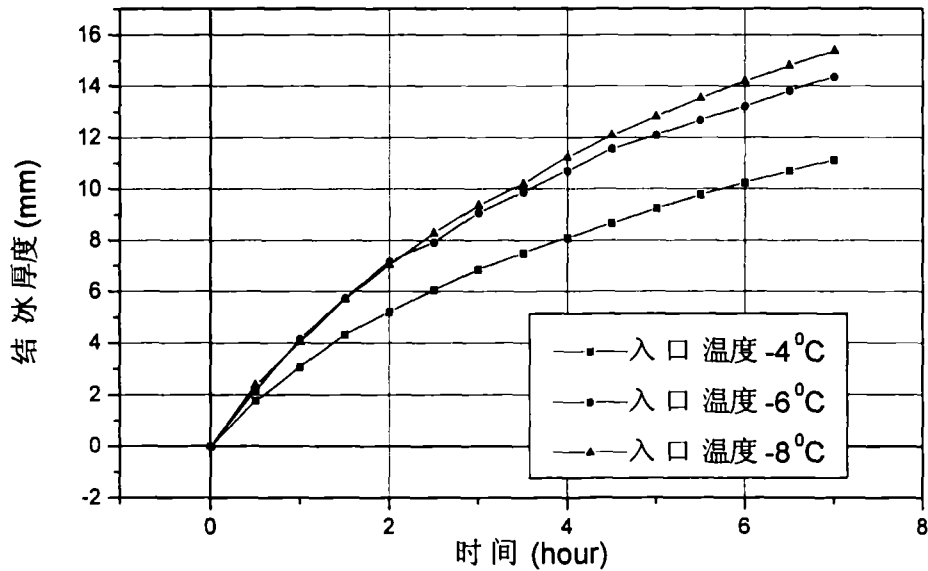


图3.3 乙二醇温度对结冰厚度的影响

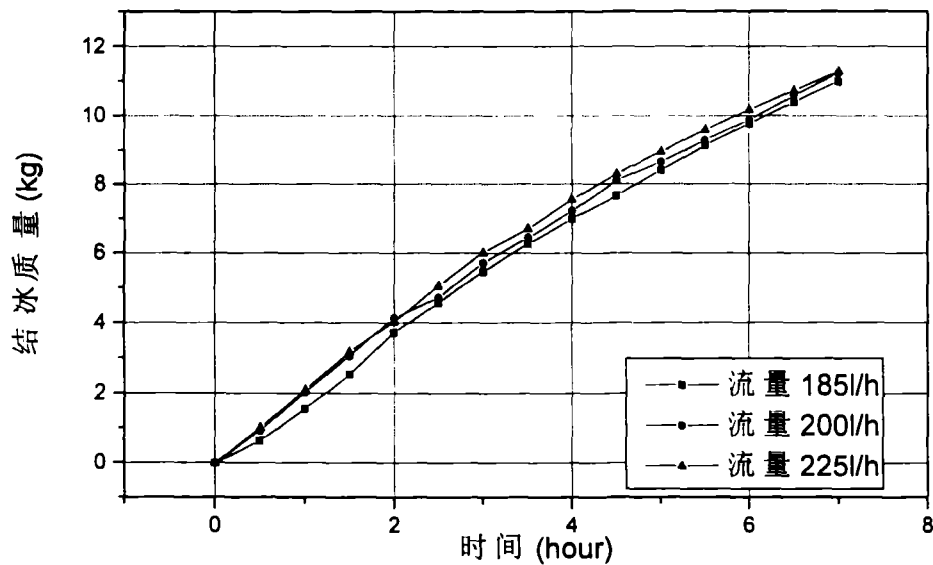


图3.4 乙二醇流量对结冰质量的影响

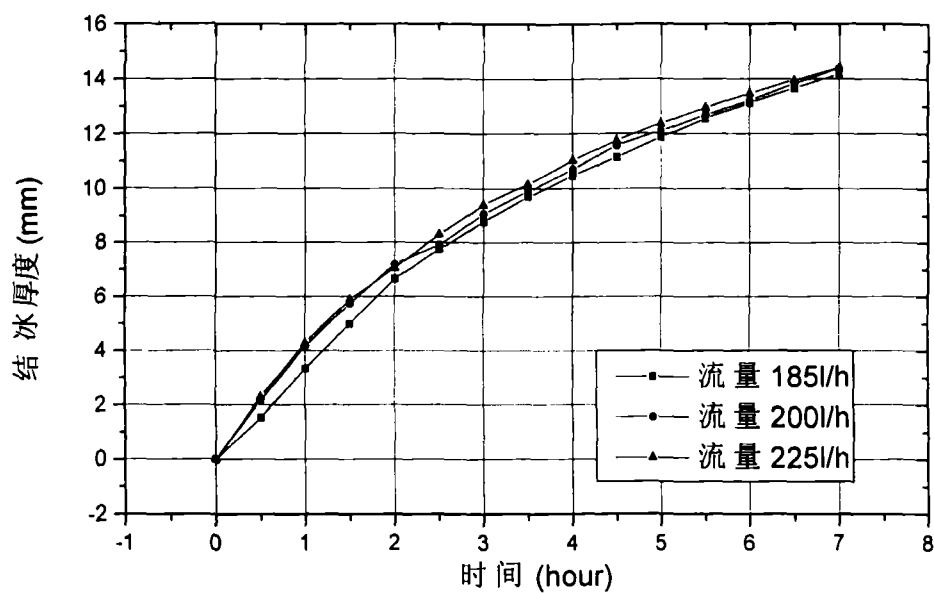


图3.5 乙二醇流量对结冰厚度的影响

第四章 水平管外结冰的强化研究

本章首先阐述相变的基本理论，从理论上指出强化传热的途径，然后进行实验研究，最后就蓄冰的强化传热作一讨论。

4.1 相变的基本理论

结晶有两个过程，一是晶核的形成，二是晶体的生长。

4.1.1 晶核的形成

一. 结晶的热力学条件

在等温等压下，只有自由能（Gibbs 函数）降低的过程才能自发进行，图 4.1[33]为固液系统的 G-T 关系式：

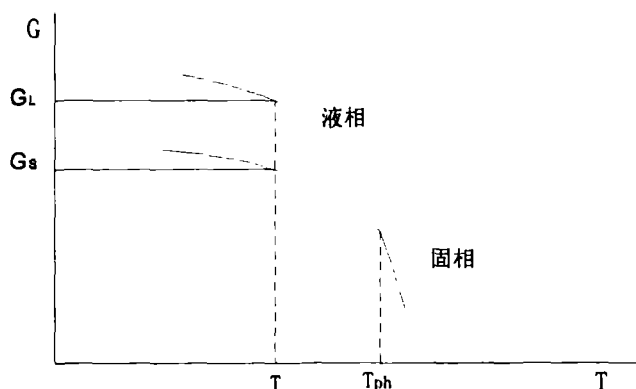


图 4.1 固液系统 Gibbs 函数与温度的关系

两条曲线的交点对应相变温度 T_{ph} ，此时 $G_L = G_S$ ，当 $T < T_{ph}$ 时， $G_L > G_S$ 时，液相会自发转变为固相。可以导出相变过程中自由能的变化[33]：

$$\Delta G = G_S - G_L = \frac{-L_{ph} \cdot \Delta T}{T_{ph}} \quad (4-1)$$

式中： G_L ， G_S 分别为液相与固相的自由能， L_{ph} 为相变潜热， $\Delta T = T_{ph} - T$ 为过冷度。

由上式可知，对于一定的相变材料，过冷度 ΔT 越大， ΔG 也越大，从而结晶

驱动力也越大。但是，成核分为均匀成核与非均匀成核，对于两种不同的成核方式，需要的过冷度是不一样的。

二. 均匀成核与非均匀成核

1. 均匀成核

如果成核是自发产生的，而不是靠外来质点或者基底的诱发，这样的成核叫做均匀成核。过冷液体（亚稳相）形成晶核（稳定相）时，系统要放出一部分自由能，这部分能量与体积有关，故称为体积自由能，以 ΔG_v 表示[33]：

$$\Delta G_v = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{\Omega_s} \cdot \Delta g \quad (4-2)$$

式中： r ——晶核半径

Ω_s ——单个原子的体积

Δg ——单个原子由流体相转变为晶体相引起的自由能降低

另一方面，晶核表面的原子与内部的原子不同，它与液相中不规则排列的原子相接触，将偏离其规则排列的平衡位置，从而引起自由能的升高，阻碍成核的进行，这部分能量与相界面积成比例，称为界面自由能（或简称界面能），以 ΔG_s 表示：

$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (4-3)$$

式中： γ_{SL} ——晶体与流体相界面的比表面自由能

于是，系统总的自由能变化为[33]：

$$\Delta G(r) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi r^3}{\Omega_s} \cdot \Delta g + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (4-4)$$

如图 4.2[33]所示。该式分为两部分，一部分是和晶核半径的三次方成正比的负项，另一部分是和半径的平方成正比的正项。在半径小的时候，正的表面能占主要部分，半径大的时候，负的体积能占主要部分，于是存在一个临界值 $\Delta G_c(r_c)$ ，相应的有一个临界半径 r_c ，小于临界半径的晶核将自行消失，而大于它的晶核将继续生长。对上式求极值，可以求出临界半径[33]：

$$r_c = \frac{2\gamma_{SL} \cdot \Omega_s}{\Delta g} \quad (4-5)$$

把上式代入式（4—4），可以求出临界成核功[33]：

$$\Delta G_c(r_c) = \frac{16 \cdot \pi \cdot \Omega_s^2 \cdot \gamma_{SL}^3}{3(\Delta g)^2} \quad (4-6)$$

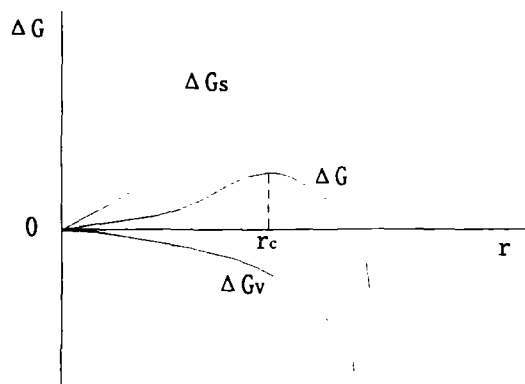


图 4.2 自由能与晶核半径的关系

2. 非均匀成核

均匀成核时，晶核须克服很大的表面能，这意味着需要相当大的过冷度才能成核。但是，容器壁，坑洞及流体中的各种杂质会降低成核时的表面能，使晶核优先在这些不均匀处形成，这就是非均匀成核。

在蓄冰实验中，水是在盘管表面结冰，此时形成的晶核是球冠形，对于球冠状晶核，可以导出其临界成核功 $\Delta G_{cl}(r_{cl})$ [33]:

$$\Delta G_{cl}(r_{cl}) = \frac{16 \cdot \pi \cdot \Omega_s^2 \cdot \gamma_{SL}^3}{3(\Delta g)^2} \cdot f(\theta) \quad (4-7)$$

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \quad (4-8)$$

式中: θ ——接触角，反映流体与表面得润湿情况

从上式可以得出以下结论:

- (1) 当 $\theta = 0^\circ$ 时, $f(\theta) = 0$, $\Delta G_{cl}(r_{cl}) = 0$, 即基底(盘管)表面上形成晶核所需得成核功为零, 此时在无过冷度得情况下也可以形成晶核。
- (2) 当 $\theta = 180^\circ$ 时, $f(\theta) = 1$, $\Delta G_{cl}(r_{cl}) = \Delta G_c(r_c)$, 此时基底对成核不起催化作用。
- (三) 当 $0^\circ < \theta < 180^\circ$, $0 < f(\theta) < 1$, $\Delta G_{cl}(r_{cl}) < \Delta G_c(r_c)$, 此时在基底表面上形成球冠状晶核所需的成核功小于在自由空间形成球状晶核需要得成核功。

可见,要有效地降低成核功,必须减小接触角,这就需要盘管材料的表面自由能高于液体的表面自由能。水的表面自由能为 72.75mJ/m^2 , 聚乙烯的表面自由能为 31mJ/m^2 [34], 因此,它们之间的润湿性是比较差的。要改善润湿性,可以采用如下办法:

- (1) 加入润湿剂,降低水的表面张力。
- (2) 用氢氧化铁溶液浸泡盘管表面,由于水合金属氧化物在盘管表面发生牢固的黏附,可使润湿性大为提高。
- (3) 在盘管表面绕金属丝,由于金属的表面自由能远远高于水,从而提高润湿性。

4.1.2 晶体的生长

晶体的生长主要取决于传热,结晶时要放出大量的凝固热,该热量若不能及时传走,结晶就会受到阻碍。由于冰和水的导热系数很小,盘管外的热阻在总热阻中占主要地位。因此传热的强化主要应考虑管外的换热。可以在蓄冷罐内设置气体搅拌器。气体搅拌器是利用配管的开孔将气体导入蓄冷罐的底部,利用浮力使大量气泡升起而搅动水流,可以强化管外的对流换热。

4.2 强化的实验研究

从上述的理论分析知道,要实现传热的强化,主要是想办法促使晶核的生成和晶体的生长,可以采用很多方法。考虑到本课题的具体情况,拟采用两种方法,一是绕金属丝,二是搅拌。

4.2.1 绕金属丝

绕金属丝可以从三个方面增强传热:(1) 提供成核基底;(2) 增加传热面积;(3) 改善润湿性。

绕金属丝有两种绕法,一种是以螺旋状绕在盘管上,还有一种是沿垂直于盘管方向缠绕在盘管上。如采用第一种方法,一旦结冰到一定厚度,覆盖了盘管后,上面提到的三个方面的强化作用将不复存在。因此,实验中采用后一种方法。使用 $\phi 0.8\text{mm}$ 的镀锡圆铜线,沿垂直于盘管方向缠绕在盘管上,如图 4.3 所示。本实验为了比较不同的缠绕密度对强化传热的影响,首先以间距 4cm 做实验,然后以间距 1cm 做实验,再把实验数据与绕丝之前的实验数据进行比较,结果如图 4.4 及 4.5 所示。

从图中可以看出,绕丝间距为 4cm 时,在同样的结冰时间,结冰量及结冰厚度比未绕丝时略大,但不明显。当绕丝间距为 1cm 时,强化的效果比较

明显, 在供冷 7 小时后, 未绕丝时的结冰量约为 11kg, 而绕丝以后的结冰量约为 12kg, 增加约 9%。结冰厚度在绕丝前为 14.3mm, 绕丝后为 15.0mm, 增加约 5%。

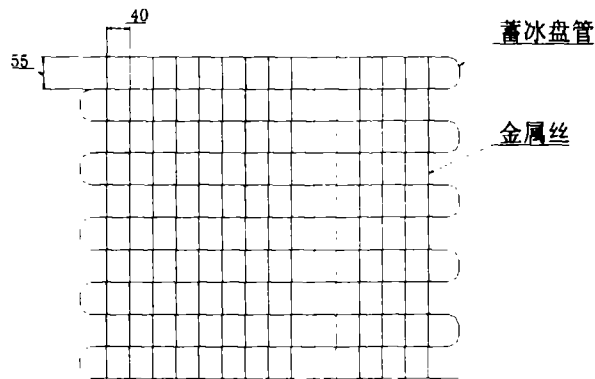


图4.3 绕丝(间距4cm)示意图

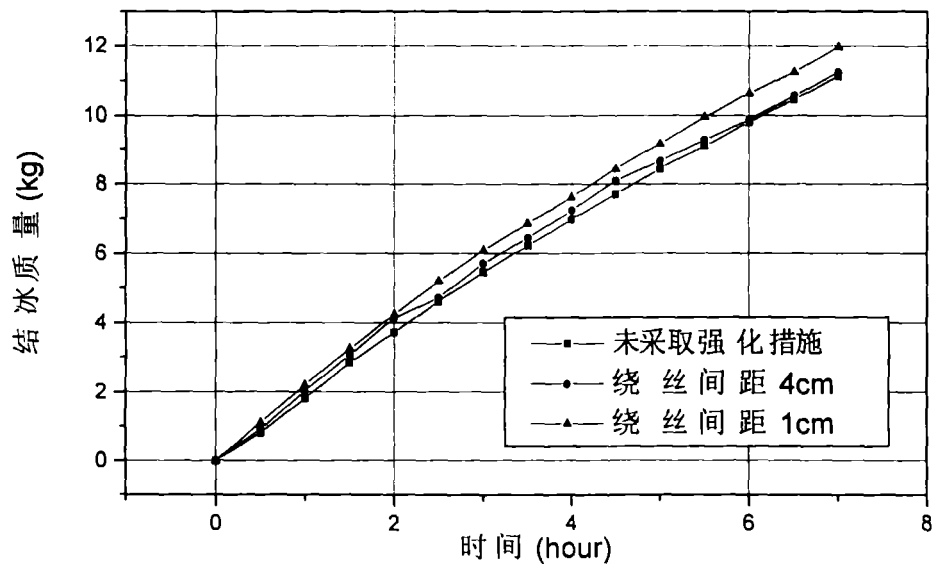


图4.4 绕丝对结冰量的影响

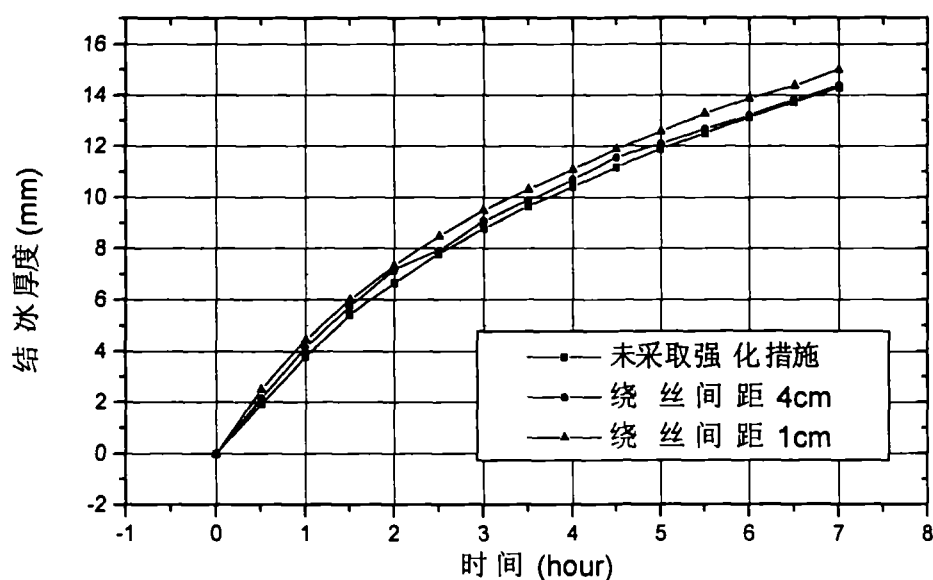


图 4.5 绕丝对结冰厚度的影响

4.2.2 搅拌

搅拌一则可以强化管外对流换热，二则可以促使过冷水（亚稳相）变成冰（稳相）。为了比较绕金属丝和搅拌的不同强化效果，将数据集中在同一张

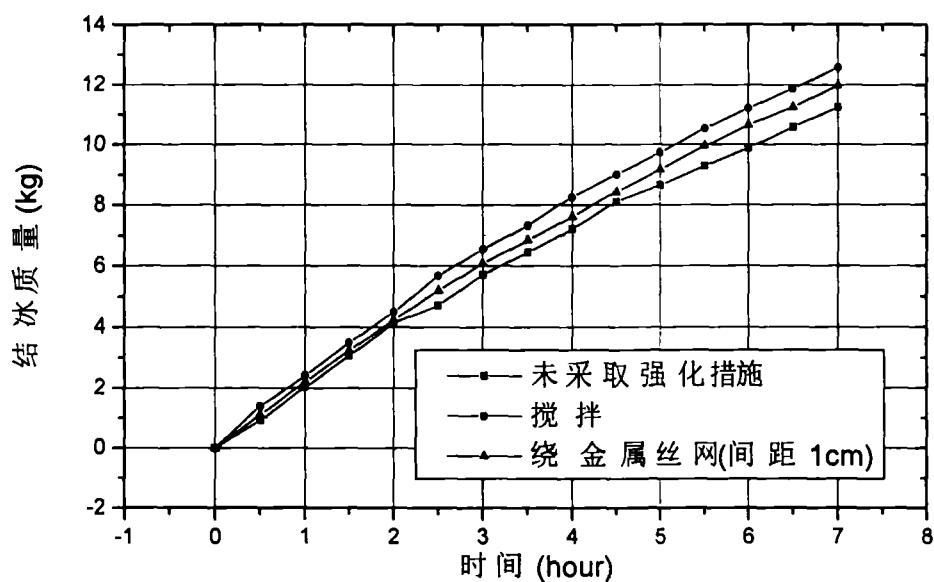


图4.6 强化前后结冰量的比较

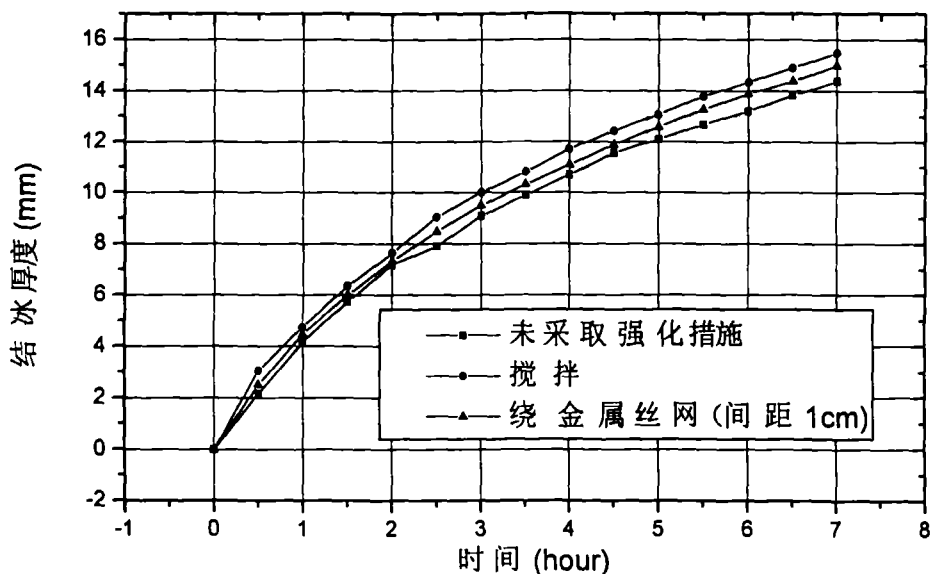


图4.7 强化前后结冰厚度的比较

图上, 图 4.6 与图 4.7 分别给出了强化前后结冰质量与结冰厚度随时间的变化关系。从图中可以看出, 搅拌的效果比绕金属丝好, 在结冰 7 小时后, 绕金属丝的结冰量约为 12kg, 而搅拌的结冰量约为 12.7kg, 提高约 7%。

4.3 绕金属丝的可视化实验研究

可视化研究是本论文的一个特色, 为了观察绕丝后强化传热的效果, 特地在蓄冷罐上安装了视窗, 以便对结冰过程拍照。图 4.8 是视窗照片, 这是在结冰以前拍的, 图中可以看到 11 根塑料盘管, 还有一个温度计。放温度计是为了监测蓄冷罐内水温, 以后对结冰过程拍照时, 为了避免温度计对结冰发生干扰, 就没有再使用它。

为了更清晰地反应绕丝后的结冰情况, 重点对第一根盘管和第二根盘管之间的区域拍照。图 4.9 是结冰 3 小时后的放大照片, 图 10~13 分别是结冰 3~6 小时后的照片。

图 4.10 是结冰 3 小时后的照片, 从图中可以看出, 在金属丝上靠近相界面处有冰生成, 并且距相界面越近, 冰层越厚, 这是因为此处的金属丝距盘管较近, 温度较低, 容易生成冰; 在两个相界面之间的中部, 由于此处距盘管较远, 金属丝温度较高, 还没有冰生成。

图 4.11 是结冰 4 小时后的照片, 可以看出, 随着过程的进行, 在两个相界面之间中部的金属丝上也结了冰, 但冰层厚度明显小于靠近相界面处金属

丝上结的冰。

图 4.12 是结冰 5 小时后的照片,随着过程的进行,金属丝上结的冰沿金属丝径向生长,由于冰层厚的地方热阻大,冰生长较慢,冰层薄的地方热阻小,冰生长较快,因此到了结冰后期,金属丝上的冰层厚度已比较均匀,几乎呈圆柱型。从图中还可以看出 4 根金属丝上的冰层厚度是不同的,左边两根的冰层厚,右边的两根薄,原因是左边的两根金属丝与盘管接触比右边两根好。

图 4.13 是结冰 6 小时后的照片,此时两根盘管上结的冰已经连上。

4.4 讨论

- 一. 从实验结果可以看出,绕金属丝的效果还是不错的。事实上效果本应该更好,因为在绕金属丝时,塑料盘管太软,不能保证金属丝与盘管外壁的紧密接触,使传热受到削弱。在进一步的研究中,应该想法解决这个问题。此外,本实验只对间距为 4cm 及 1cm 的作了探讨,对于更密的,其效果如何,也是一个值得研究的问题。
- 二. 搅拌的效果优于绕金属丝,而且就工程实际来说更易实现,要在密集的塑料盘管间绕金属丝毕竟不是一件容易的事。
- 三. 事实上强化传热的措施还有很多,本课题只对绕金属丝和搅拌作了探讨,今后还可以探讨以下办法:
 - (一) 寻找合适的冰成核剂(或润湿剂),以促进晶核的产生。加入润湿剂后,可减小接触角,降低成核功。
 - (二) 对盘管表面进行处理,塑料盘管表面用氢氧化铁溶液浸泡一定时间,由于水合金属氧化物在表面发生牢固的黏附,干燥后也可提高润湿性,当然,这种方法只在制冰初期有效,因为形成一定厚度冰层后,这些表面即被破坏,不再起作用。
 - (三) 还可把盘管表面做成凹面,因凹面成核效能高。同样,这种方法只在制冰初期有效。
 - (四) 在蓄冰槽内设空气搅拌器。这也有两个作用,一方面可使槽内水温均匀,另一方面,槽内自然对流换热变成一定程度的强迫对流换热,显然可以增强传热。但如果连续通入空气,会不断带入热量,因此,什么时候搅拌,搅拌多长时间,值得探讨。

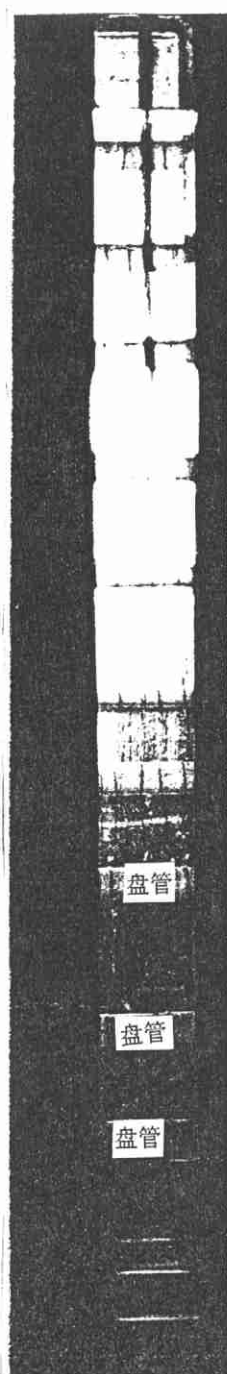


图 4.8 视窗

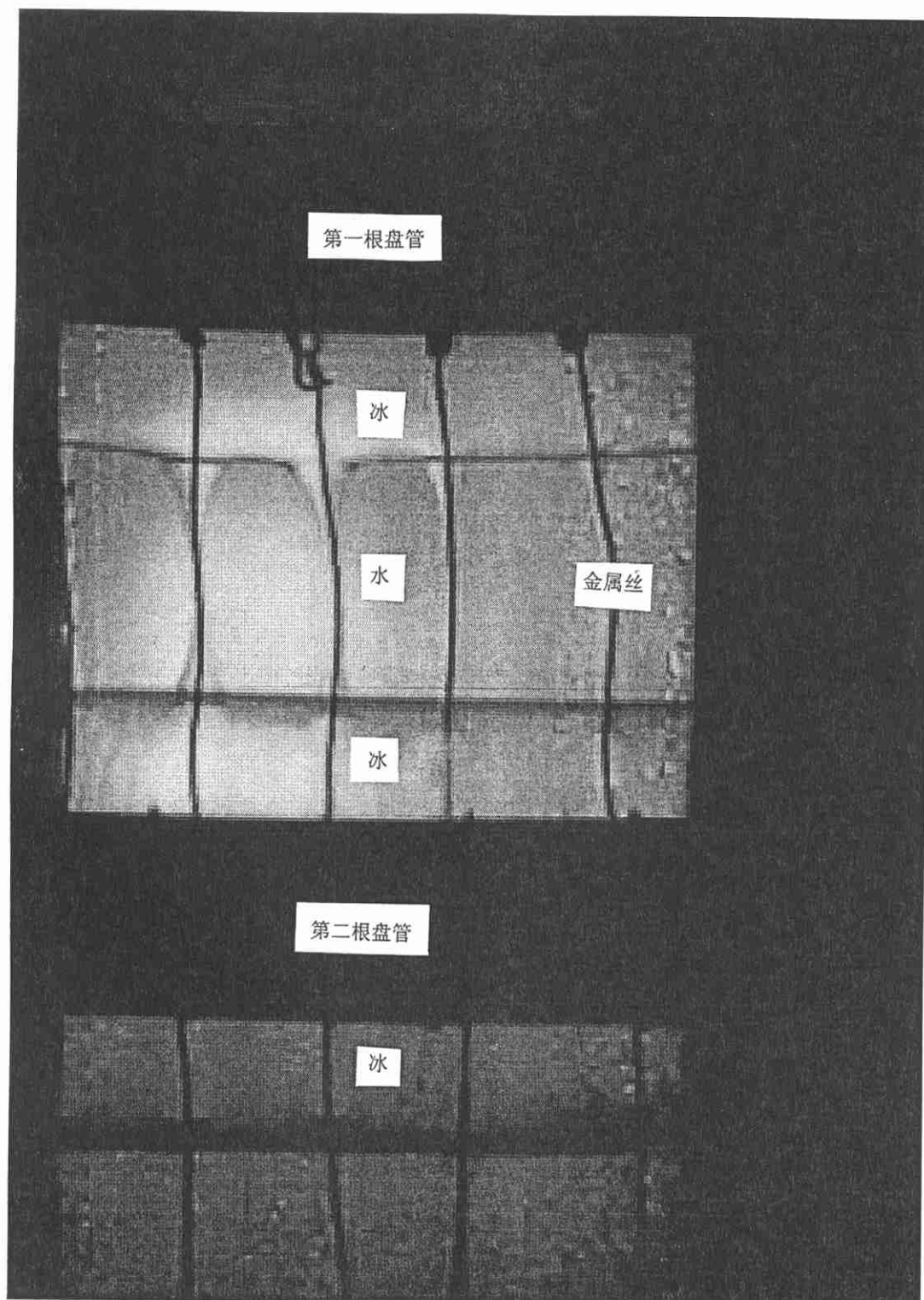


图 4.9 结冰 3 小时后的放大照片

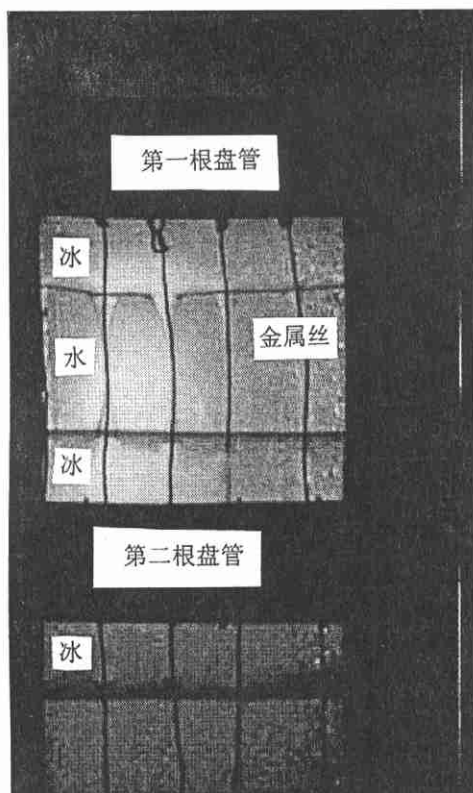


图 4.10 结冰 3 小时后的照片

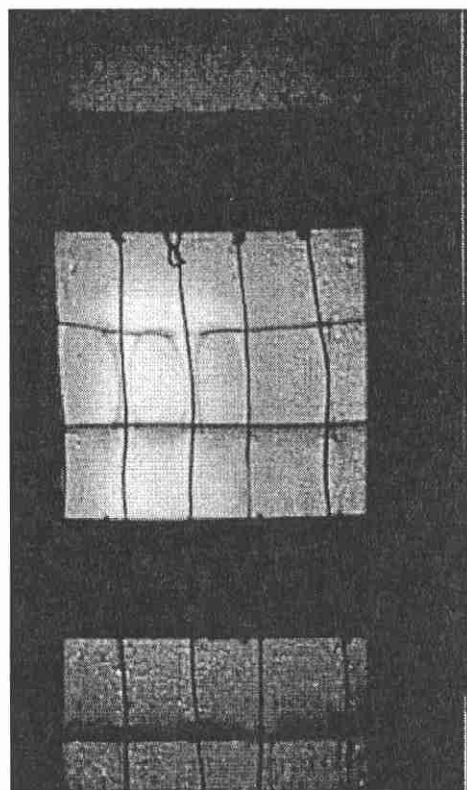


图 4.11 结冰 4 小时后的照片

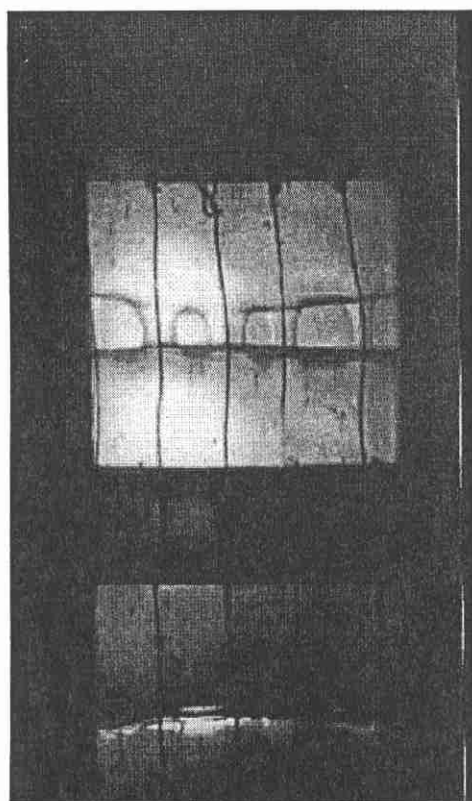


图 4.12 结冰 5 小时后的照片

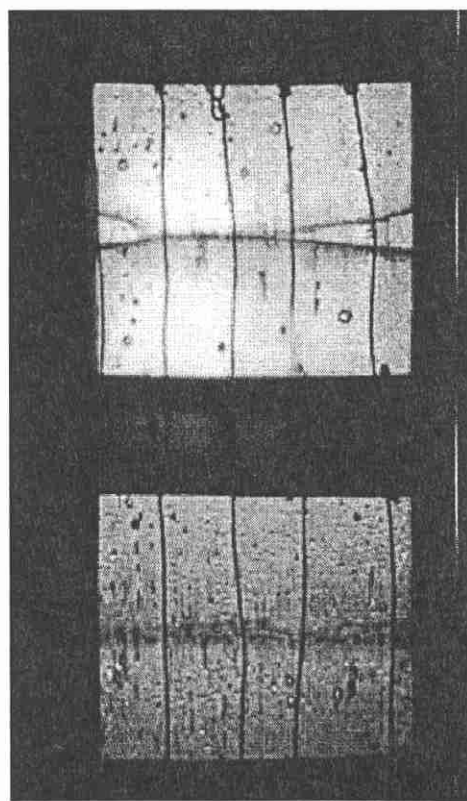


图 4.13 结冰 6 小时后的照片

第五章 水平管外结冰特性的理论计算

理论计算的目的是建立相应的模型, 进行数值求解, 将计算结果与实验值进行对比, 找出影响结冰的关键因素, 以期对蓄冷罐的优化设计提供依据。

5.1 模型的建立

假设槽内水初始温度均匀一致, 为一常数 $T_0 > 0$; $t=0$ 时刻, 管内通以恒温冷媒 (这里为 32% 的乙二醇的水溶液, 以下简称乙二醇溶液), 其温度为常数 t_f , $t_f < T_{ph}=0$, T_{ph} 为水的相变温度。设管内换热系数为一常数 α_0 , 水在相变过程中密度要发生变化, 但其变化相对较小, 可忽略不计; 忽略乙二醇流动方向传热, 且认为各相中介质的物理参数为常数。这样简化后, 就可以得到一个轴对称的一维相变问题, 如图 5.1 所示。

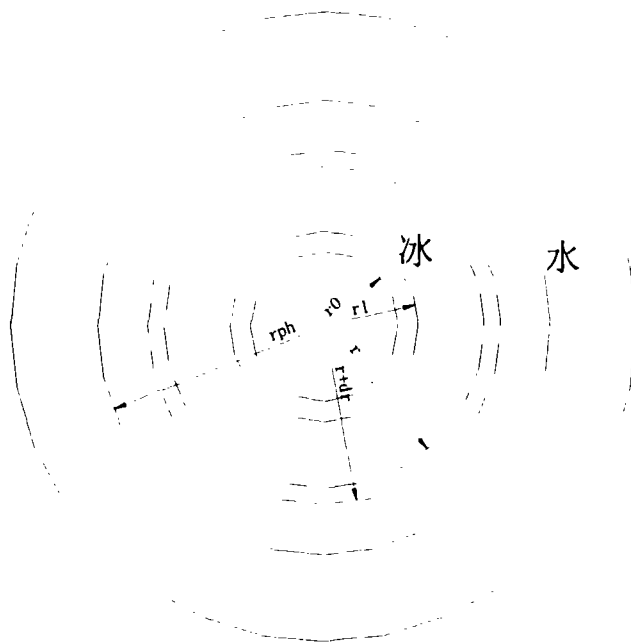


图5.1 蓄冰模型图

导热方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5-1)$$

冰水界面能量方程为:

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{\delta} = \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial r} \Big|_{\delta} + \rho Q_{ph} \frac{dr_{ph}}{dt} \quad (5-2)$$

式中, r_{ph} 为冰层厚度, 下标 S,L 分别表示固相和液相, Q_{ph} 为相变潜热, dr_{ph}/dt 表示界面移动速度。

初始条件为:

$$t=0 \text{ 时: } T(r,0)=T_0 \quad (5-3)$$

边界条件为:

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_0} = \alpha(T \Big|_{r=r_0} - T_f) \quad (5-4)$$

管内壁 ($r=r_0$) 对流:

相界面 ($r=r_{ph}$):

$$T = T_{ph} = 0 \quad (5-5)$$

蓄冷罐壁 ($r=r_{\infty}$) 绝热:

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=\infty} = 0 \quad (5-6)$$

由于求解区域中存在一个随时间移动的界面, 上述方程很难获得分析解, 一般都采用数值方法, 包括固定步长法, 自变量变换法, 焓法, 显热容法等 [33]。本文采用焓法进行计算。首先定义如下无量纲量:

无量纲焓:

$$H = \frac{h - h_s^*}{C(T_{ph} - T_f)} \quad (5-7)$$

无量纲温度:

$$\theta = \frac{T - T_{ph}}{T_{ph} - T_f} \quad (5-8)$$

无量纲潜热:

$$\varepsilon = \frac{Q_{ph}}{C(T_{ph} - T_f)} = \frac{1}{Ste} \quad (5-9)$$

无量纲半径:

$$R = \frac{r}{r_0} \quad (5-10)$$

无量纲时间:

$$\tau = \frac{at}{r_0^2} \quad (5-11)$$

以上各式中, h 为焓值, h^* 为相变时的饱和焓值, T_{ph} 为相变温度, T_f 为管内流体 (乙二醇) 温度, C 为比热, Ste 为斯第芬数, Fo 为傅立叶数。定义上述无量纲量后, 方程可化为:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \quad (5-12)$$

以及:

$$\theta = \begin{cases} H, & H < 0 \\ 0, & 0 \leq H \leq \varepsilon \\ H - \varepsilon, & H > \varepsilon \end{cases} \quad (5-13)$$

初始条件为:

$\tau=0$ 时:

$$H = \theta + \varepsilon \quad (5-14)$$

$$\theta = \frac{T_0 - T_{ph}}{T_{ph} - T_f} \quad (5-15)$$

式中, T_0 为蓄冷罐中水的初始温度.

边界条件为:

管内壁对流换热

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial R} \right|_{R=1} = -Bi(\theta + 1) \Big|_{R=1} \quad (5-16)$$

蓄冷罐壁绝热

$$\theta \Big|_{R=\infty} = -1 \quad (5-17)$$

5.2 模型的求解

采用有限差分法对方程进行离散, 时间变量采用前差, 空间变量采用中心差分. 则上述方程可化为

内部结点:

$$H_j^{n+1} = H_j^n + b \left[\left(1 + \frac{0.5\Delta r}{1+j\Delta r} \right) \theta_{j+1}^n - 2\theta_j^n + \left(1 - \frac{0.5\Delta r}{1+j\Delta r} \right) \theta_{j-1}^n \right] \quad (5-18)$$

$$\theta_j^n = \begin{cases} H_j^n & H_j^n < 0 \\ 0 & 0 \leq H_j^n \leq \varepsilon \\ H_j^n - \varepsilon & H_j^n > \varepsilon \end{cases} \quad (5-19)$$

初始条件:

$$H_j^0 = \theta_j^0 + \varepsilon \quad (5-20)$$

$$\theta_j^0 = \frac{T_0 - T_{ph}}{T_{ph} - T_f} \quad (5-21)$$

边界条件:

内边界对流换热:

$$H_1^{n+1} = H_1^n + b(2\lambda\Delta r + \frac{\Delta^2 r}{2})\theta_2^n - b(2\lambda\Delta r + \frac{\Delta^2 r}{2} + 2\alpha\Delta r)\theta_2^n + 2b\alpha\Delta r\theta_f \quad (5-22)$$

$$\theta_f = \frac{T_f - T_{ph}}{T_{ph} - T_f} = -1 \quad (5-23)$$

外边界绝热:

$$H_N^{n+1} = H_N^n + b\lambda(\Delta r - \frac{\Delta^2 r}{2(1+N\Delta r)})\theta_{N-1}^n - b\lambda(\Delta r - \frac{\Delta^2 r}{2(1+N\Delta r)} + 2\alpha\Delta r)\theta_N^n \quad (5-24)$$

式中:

$$b = \frac{\Delta\tau}{\Delta r^2} \quad (5-25)$$

由于 $\Delta\tau$ 与导温系数 a 有关, 而导温系数随蓄冷介质相态的变化而变化, 对于相界面的导温系数采用液相与固相的调和平均值, 即:

$$b_{ph} = \frac{2b_s b_l}{b_s + b_l} \quad (5-26)$$

计算时采用显示格式, 为保证计算的稳定性, 选择步长时须满足稳定性条件

$$\frac{a\Delta T}{\Delta R^2} < 0.5 \quad (5-27)$$

计算时, 取 $\Delta T=0.01s$, $\Delta R=0.2mm$, 计算总时间为 7 小时, 计算区域 $R_\infty=23mm$ 。

具体计算步骤如下:

1. 设置盘管几何参数, 计算区域、时间, 空间步长、时间步长。
2. 设置水初温, 乙二醇温度及有关物性。
3. 计算焓值, 判断相态, 确定系数 b 。

4. 根据焓值大小判断是否发生相变。
5. 每隔半小时打印计算结果，直至计算终了时间。

5.3 数值计算结果与分析

计算时每隔半小时打印一次数据。为了弄清影响结冰的因素，分两组工况对结冰特性进行了数值计算。第一组固定水的初始温度和乙二醇流速，改变乙二醇温度；第二组固定水的初始温度和乙二醇温度，改变乙二醇流速。上述两组工况的计算结果将与实验结果进行比较，以验证其正确性。

5.3.1 乙二醇温度的影响

图 5.2 与图 5.3 分别给出了乙二醇入口温度对结冰质量与结冰厚度的影响，从图中可以看出，乙二醇温度对结冰的影响是很大的，乙二醇温度越低，单位时间的结冰量与结冰厚度越大，这是很显然的，因为乙二醇温度越低，传热温差越大，热流密度越大，因而单位时间的结冰量与结冰厚度越大。

5.3.2 乙二醇流量（流速）的影响

图 5.4 给出了乙二醇流量分别为 185L/h, 200L/h, 225L/h 时结冰质量随时间的变化，图 5.5 给出了乙二醇流量分别为 185L/h, 200L/h, 225L/h 时结冰厚度随时间的变化，从图中可以看出，流量对结冰量和结冰厚度的影响很小。由于这三种工况下，流速很接近，分别为 0.454m/s、0.491m/s 和 0.553m/s。为了比较流速差别较大时的情况，对流速分别为 0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s 的情况作了计算，结果如图 5.6 和图 5.7 所示，可以看出，乙二醇流量（或流速）对结冰也有一定的影响，随着流量的增加，单位时间的结冰厚度及结冰量越大，这是因为乙二醇流量越大，管内对流换热将加强，从而热流密度越大，因而单位时间的结冰厚度及结冰量越大。但对于本课题来说，因为塑料管的导热系数很小（ $0.45\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ），冰的导热系数也不大（ $2.22\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ），因此塑料管和冰的热阻占主要地位，管内对流换热的增强对总热阻影响不是太大，所以乙二醇流量（或流速）对结冰虽有一定的影响，但影响不大。

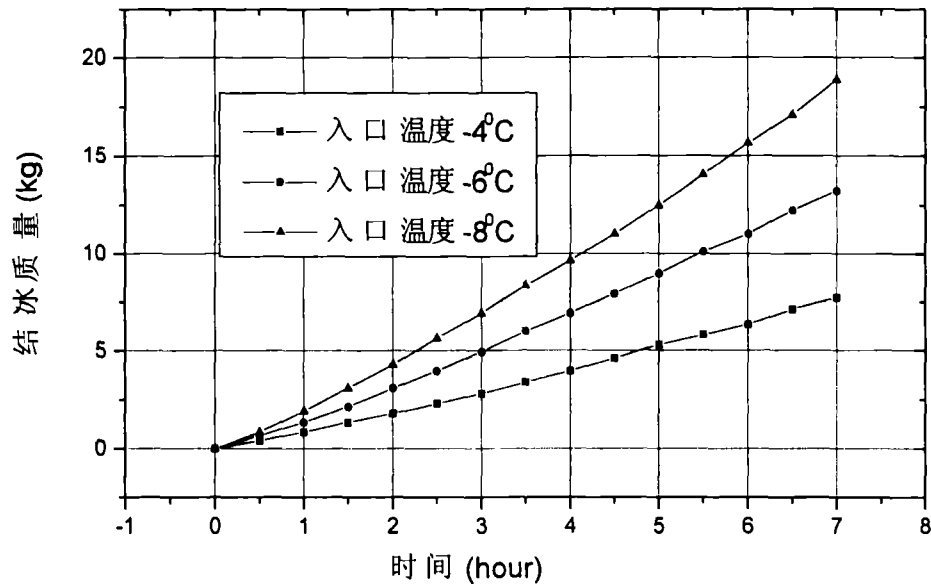


图5.2 乙二醇温度对结冰量的影响

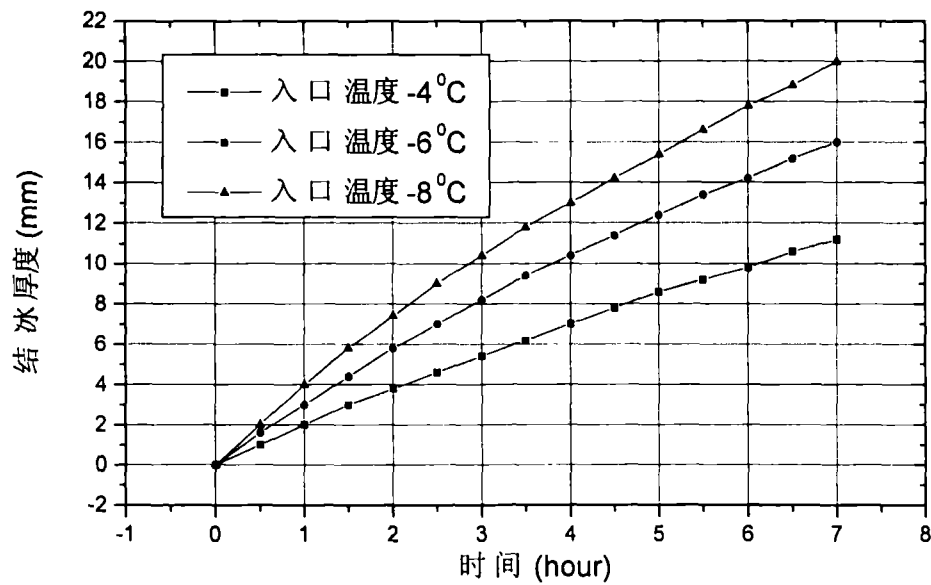


图5.3 乙二醇温度对结冰厚度的影响

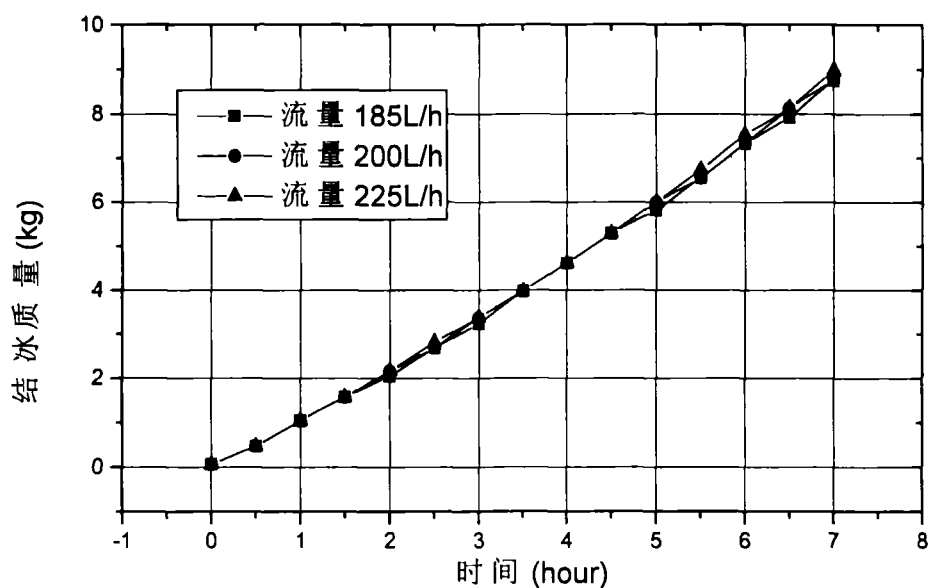


图5.4 乙二醇流量对结冰量的影响

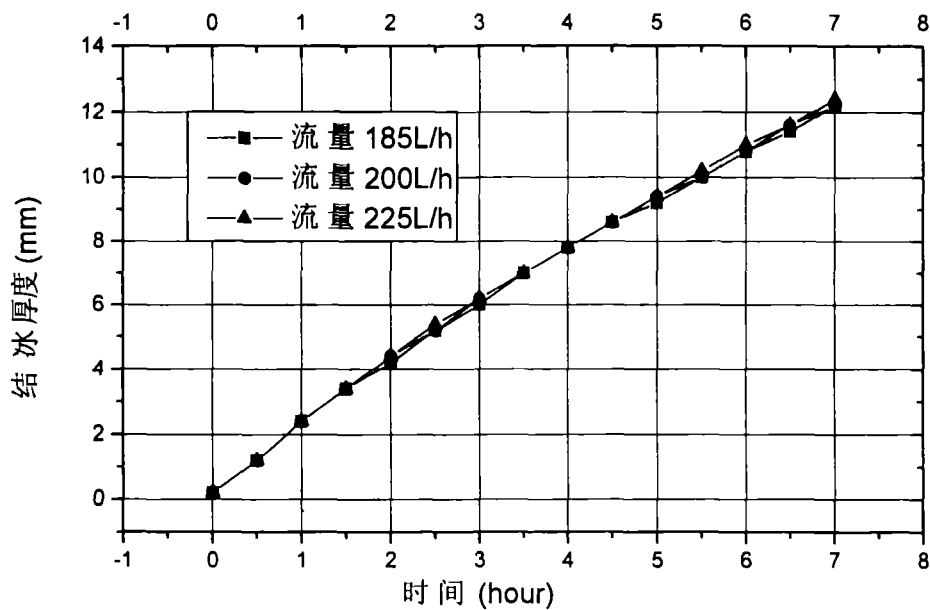


图5.5 乙二醇流量对结冰厚度的影响

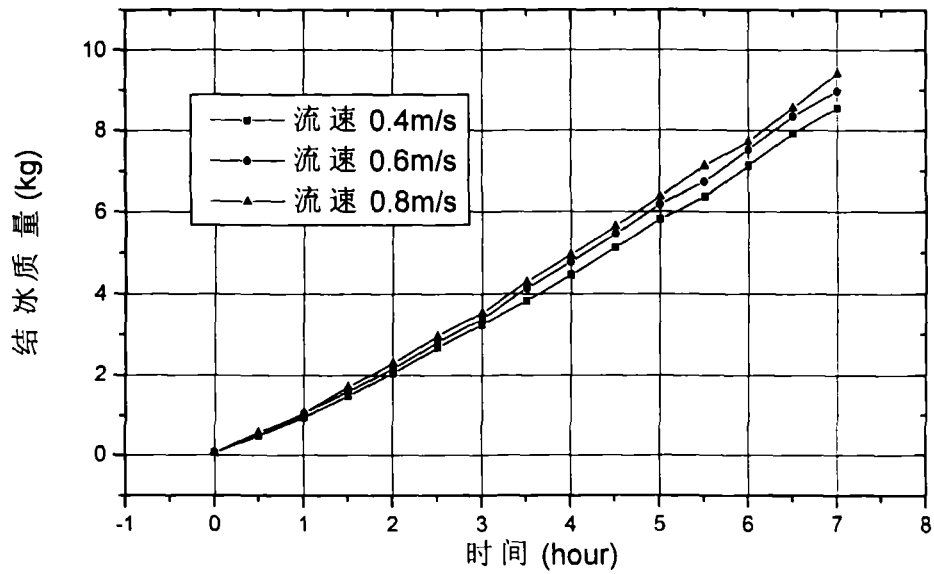


图5.6 乙二醇流速对结冰质量的影响

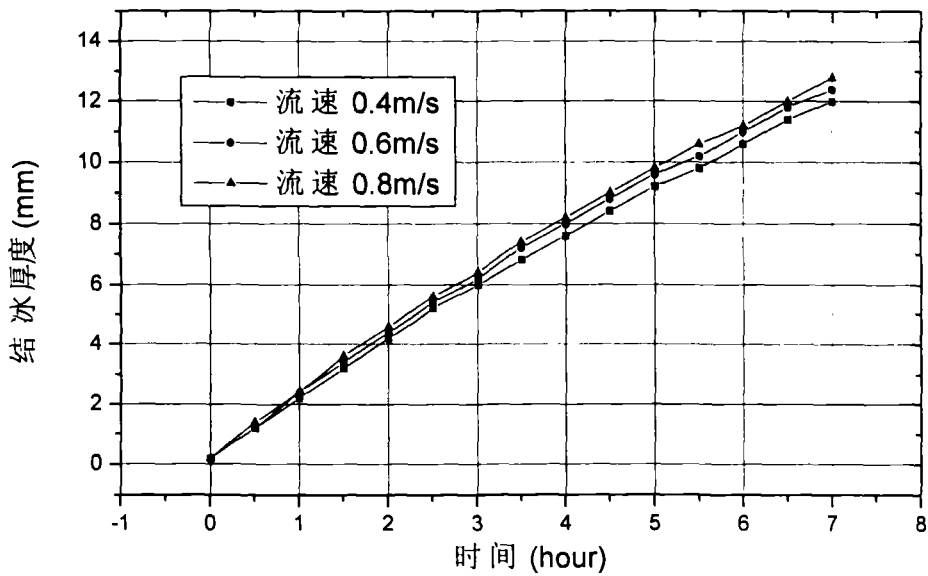


图5.7 乙二醇流速对结冰厚度的影响

5.4 理论计算值与实验结果的比较

5.4.1 乙二醇温度的影响

图 5.8 给出了温度-结冰量关系的计算值与实验值比较, 图 5.9 给出了温度-结冰厚度关系的计算值与实验值比较。

从图中可以看出, -4°C 的计算值与实验值符合较好, 这是因为计算程序的有关参数的修正是按照 -4°C 。

从图中还可以看出, 随着时间的增长, 结冰量的增加趋势对于计算值和实验值是一致的, 从计算结果来看, 随着结冰过程的进行, 结冰量呈线性增加, 实验值的结冰量增加速度趋缓。

5.4.2 乙二醇流量的影响

图 5.10 给出了流量-结冰量关系的计算值与实验值比较, 图 5.11 给出了流量-结冰厚度关系的计算值与实验值比较。

从图中可以看出, 随着时间的增长, 结冰量的增加趋势对于计算值和实验值是一致的, 从计算结果来看, 随着结冰过程的进行, 结冰量呈线性增加, 实验值的结冰量增加速度趋缓。

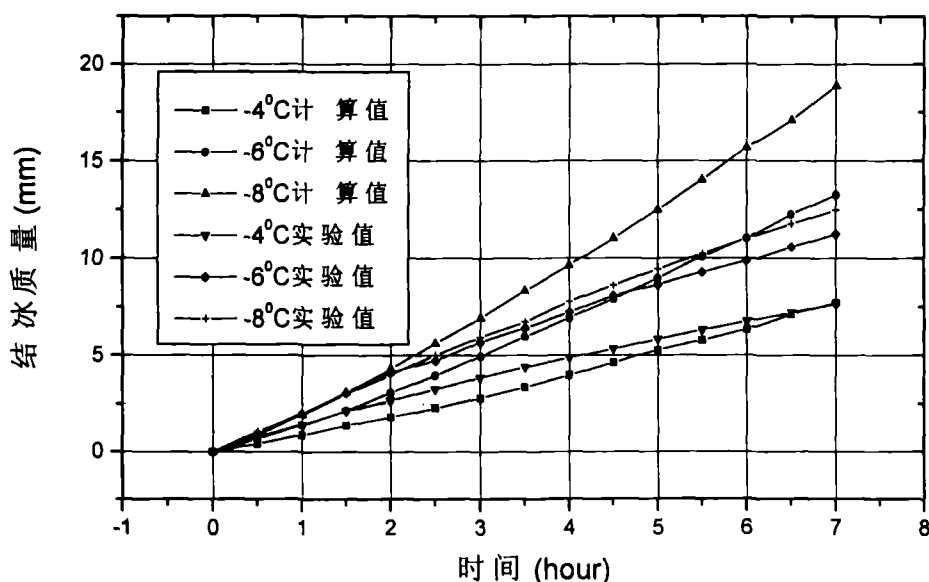


图 5.8 温度-结冰质量的计算值与实验值比较

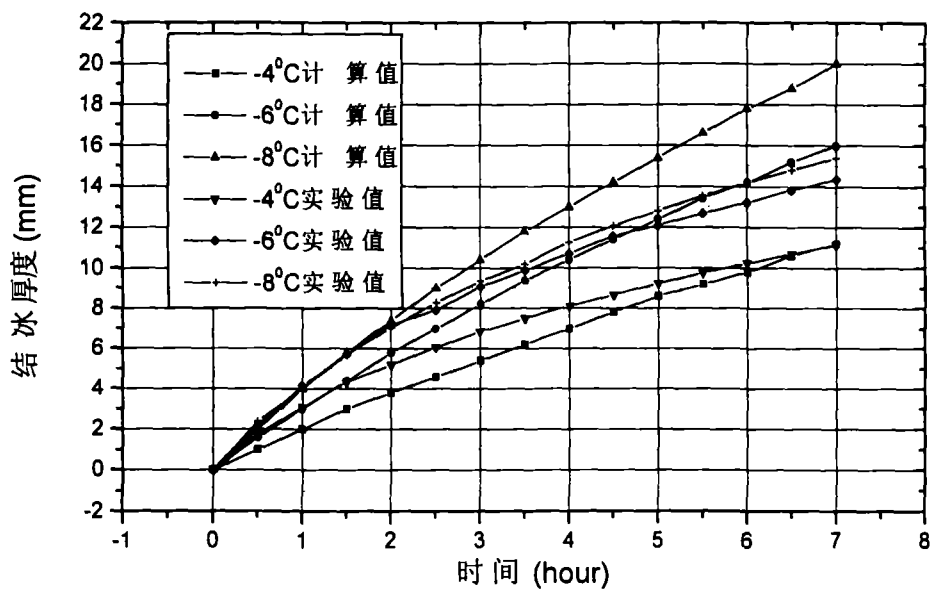


图 5.9 温度-结冰厚度的计算值与实验值比较

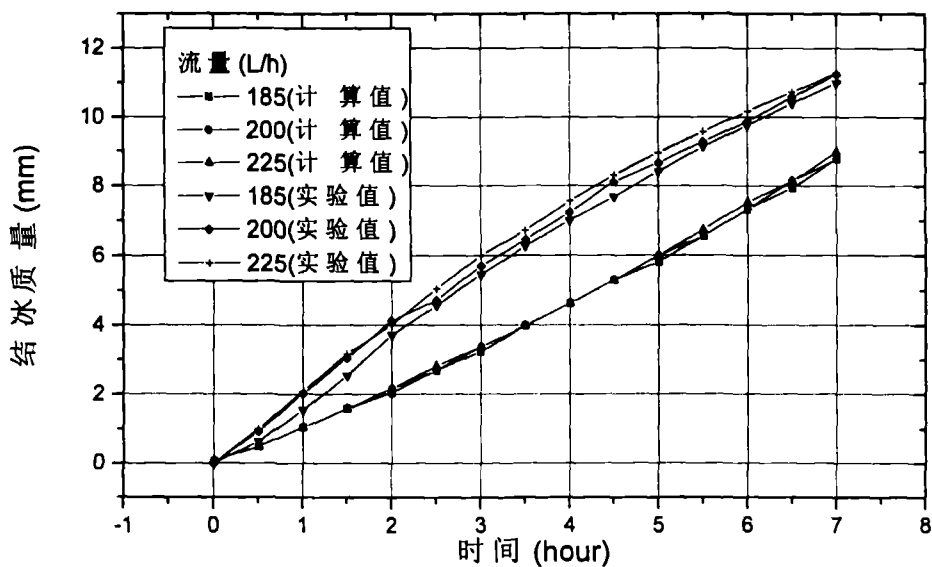


图5.10 流量-结冰量的计算值与实验值比较

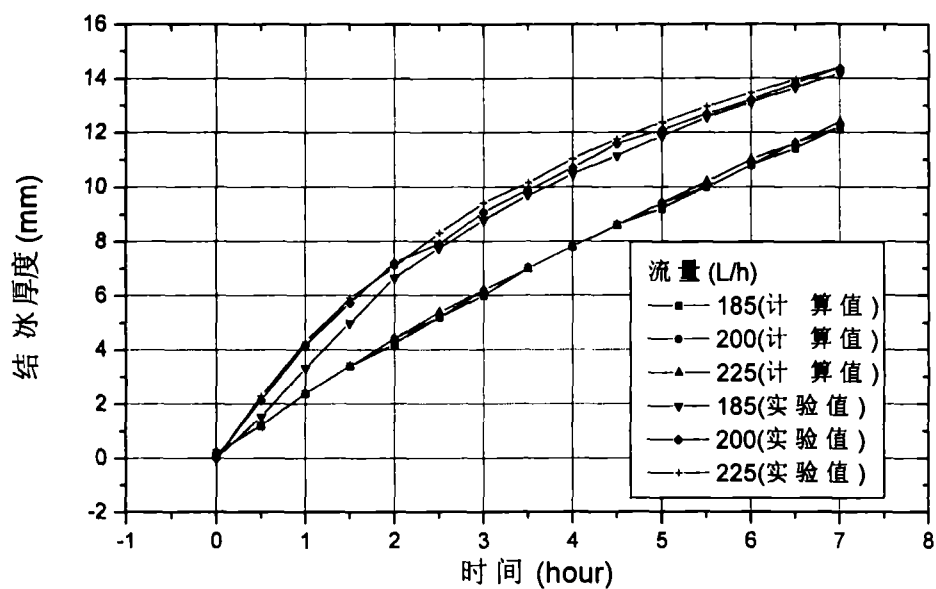


图 5.11 流量-结冰厚度的计 算值与实验值比较

第六章 结论

本课题建立了采用塑料盘管的可视化蓄冰实验台，通过实验、拍照和理论计算，得出如下结论：

一. 乙二醇流量的选择

从实验结果来看，在结冰 7 小时后，当乙二醇流量从 185L/h 增加到 225L/h（约增加 17.8%），结冰量从 11.0kg 增加到 11.28kg（约增加 2.5%），由于乙二醇流量对换热的影响很小，而流速的增加会导致流动阻力的增大，所以，选择较小的乙二醇流量比较合适。

二. 乙二醇温度的选择

乙二醇温度越低，在相同时间内结冰量越多，这是有利的一面，但乙二醇温度越低，制冷机的效率也越低（机组出水温度每降低 1℃，机组制冷量约降低 3%[36]），管道的冷损失也越多，而且乙二醇的密度和粘度都会增加，使得流动阻力增大，因此应综合考虑。从实验结果来看，当乙二醇入口温度从 -4℃ 降到 -6℃ 时，结冰量增加很多（从 7.6kg 增加到 11.3kg），当乙二醇入口温度从 -6℃ 降到 -8℃ 时，结冰量增加就很少了（从 11.3kg 增加到 12.5kg），由此看来，乙二醇入口温度以 -6℃ 为宜。

三. 搅拌与绕丝的强化传热作用

搅拌与绕丝均能促进传热。

蓄冰热阻主要集中在管外，搅拌正好可以强化管外的对流换热，因此采用搅拌后结冰速率明显提高。从实验结果来看，在结冰 7 小时后，未采取强化措施时结冰量约为 11kg，采用搅拌后，只需要 6 小时结冰量就可以达到 11kg。

绕丝能够促进传热，在于能提供成核基底、改善润湿性、增加传热面积。一旦冰层覆盖金属丝后，前面两个因素就不起作用了；再加上塑料盘管与金属丝接触欠佳，因此绕丝的强化效果不如搅拌。

四. 数学模型与实验结果的比较。

采用导热模型的数值计算结果与实验结果相比，二者的变化趋势是一致的，随着结冰过程的进行，计算值的结冰量随时间几乎呈线性增加，而实验值的结冰量随时间的增加趋缓。

主要符号表

A	面积	m^2	α	换热系数	$W/m \cdot K$
a	导温系数	m^2/s	β	膨胀系数	$1/K$
c	比热	$kJ/kg \cdot K$	γ_{sl}	表面自由能	J/m^2
d	管径	m	δ	厚度	m
G	吉布斯函数	kJ/kg	ρ	密度	kg/m^3
g	重力加速度	m/s^2	ε	无量纲潜热	
H	无量纲焓		θ	无量纲温度	
h	焓或高度	$kJ/kg, m$	λ	导热系数	$W/m \cdot K$
L	潜热	kJ/kg	ν	运动粘度	$N \cdot s/m^2$
K	传热系数	$W/m \cdot K$	τ	无量纲时间	
P	压力	Pa	Ω	原子体积	m^3
Q	流量或换热量	$m^3/s, W$	Δ	差值	
q	热流通量	W/m^2	Bi	毕渥数	
R	无量纲半径		Fo	傅里叶数	
r	半径	m	Gr	格拉晓夫数	
t	温度或时间	K, s	Nu	努谢尔特数	
u	乙二醇流速	m/s	Pr	普朗特数	
v	制冷剂流速	m/s	Ra	瑞利数	
			Re	雷诺数	

上标

n 时间网点

下标

i 管内
j 空间网点
L 液态
m 平均值
o 管外
S 固态
w 壁面

参考文献

- [1] 汪训昌, 结合国情, 稳步建设蓄冷空调工程, 暖通空调, 1997 年第 27 卷第 5 期, 16~21
- [2] 华泽钊, 刘道平等, 蓄冷技术及其在空调工程中的应用, 科学出版社, 北京, 1997
- [3] 岳鹿群, 在中国节能协会蓄冷空调研究中心成立大会上的讲话, 制冷与空调, 1995 年第 3 期, 15~17
- [4] 巨永平, 孙志荣, 空调工程中的蓄冷技术, 暖通空调, 1995 年第 5 期, 39~41
- [5] 刘道平, 蓄冷技术及其应用现状, 暖通空调, 1995 (4), 30~33
- [6] Robert A. Potter, Jr., Douglas P. Weitzel, Dion J. King, Daisie D. Boettner, Ashrae RP-766: Study of Operational Experience with Thermal Storage Systems, ASHARE Transaction, 1995, VOL101. pp549~557
- [7] 陈光明, 日本蓄热空调现状, 暖通空调, 1998 年第 28 卷第 4 期, 33~35
- [8] 王仁忠, 沈英章, 林延彦, 台湾地区储冰系统发展现况及未来展望, 中国冷冻空调杂志, 1994 年 8 月, 60
- [9] 郭开华, 舒碧芬, 空调蓄冷及气体水合蓄冷技术, 制冷, 1995 (4), 15~21
- [10] D.Arnold, Dynamic Simulation of Encapsulated Ice Stores-Part 1: Model Development and Validation, ASHARE Transaction, 1990, VOL96(1), pp566~571
- [11] D.Arnold, Dynamic Simulation of Encapsulated Ice Stores-Part 2: Model Development and Validation, ASHARE Transaction, 1994, VOL100, pp1245~1254
- [12] Jerold W.Jones.1995. Evaluation of RP-459 Algorithms for Modeling External Melt,Ice-on-Pipe Thermal Storage System Components. ASHARE Transaction, 1995, VOL101.1342~1351
- [13] 蔡祖康, 间冷式冰蓄冷槽的简化计算, 暖通空调, 1990 (6), 18~21
- [14] 季杰等, 并联冰盘管蓄冷装置制冰特性研究, 中国科学技术大学学报, 1997, 27 (2)
- [15] 季杰等, 并联冰盘管蓄冷装置化冰特性研究, 中国科学技术大学学报, 1997, 27 (4)
- [16] M. Landy, and C.D. Noble.1991.Case Study of Cost-Effective Low-Temperature Air Distribution, Ice Storage .ASHARE.VOL 97(1).854~859
- [17] Elleson,1991.High-Quality Air Conditioning with Cold Air Distribution, ASHARE.VOL 97 (1) .839~842
- [18] L.Catanese.1991. An Energy Analysis of Low-Temperature Air Distribution System and Reduced Economize-Cycle Cooling. ASHARE,VOL 97(1) 848~853

-
- [19] C.E.Dorgan and J.S. Elleson.1988. Cold Air Distribution. ASHARE Transaction VOL94(1B) 2008~2025
- [20] 郭瑞茹, 与冰蓄冷相结合的低温送风系统, 暖通空调, 1992 (1), 31~34
- [21] G.A.Lane.1985.PCM Science and Technology : The Essential Connection. ASHARE Transaction VOL91(2B-2).1897~1910
- [22] 郭开华, 气体水合物及其在空调蓄冷技术中的应用, 制冷, 1994 (2), 22~28
- [23] 蔡毅, 王世平等, 替代 CFC 工质 R141b 气体水合物蓄冷实验研究, 暖通空调, 1997 年第 27 卷第 5 期, 6~9
- [24] 叶水泉, 叶招发等, 蓄冷空调用蕊芯冰球的实验研究, 暖通空调, 1997 年第 27 卷第 5 期, 13~15
- [25] 张华等, 冰蓄冷空调系统的评价方法. 节能技术, 96 (2), 8~11
- [26] 张力君, 张萍, 蓄冷率对冰蓄冷空调系统经济性的影响及最佳蓄冷率的确定方法, 暖通空调, 1997 年第 27 卷第 5 期, 2~5
- [27] 陈仕泉, 冰蓄冷系统中的两种工作模式, 全国暖通空调制冷 1998 年学术年会资料集, 中国建筑工业出版社, 1998
- [28] 刘业风, 史钟璋, 张吉光, 胡松涛, 冰蓄冷空调系统优化控制的经济性分析, 暖通空调, 1998 年第 3 期
- [29] 彦启森, 空气调节用制冷技术 (第 2 版), 中国建筑工业出版社, 北京, 1985 年
- [30] 章熙民, 任泽霈, 梅飞鸣, 传热学 (第 3 版), 中国建筑工业出版社, 北京, 1993 年
- [31] 湖家泽, 用工况参数法计算制冷机氟的注入量, 制冷, 1994 年第 1 期, 64~67
- [32] 李吉林, 常用热电偶、热电阻分度表, 中国计量出版社, 北京, 1992 年
- [33] 姚连增, 晶体生长基础. 中国科学技术大学出版社, 合肥, 1995
- [34] 顾惕人, 表面化学, 科学出版社, 北京, 1990
- [35] 郭宽良, 孔祥谦, 陈善年, 中国科学技术大学出版社, 合肥, 1988
- [36] 彦启森, 蓄冰空调设计, 北京制冷学会, 北京, 1995

致 谢

本课题是在导师孙嗣莹教授和中国科学院低温技术实验中心郭廷玮研究员的精心指导和亲切关怀下完成的，作者在此表示衷心的感谢。

在选题及调研过程中得到肖远立副教授和天津商学院申江教授的大力帮助，在此一并致谢。

本课题在实验经费、仪器设备以及实验台的设计安装方面得到了中国科学院低温中心 204 课题组的支持和帮助，在此向朱庭英高工、周一欣副研究员、张雨新师傅和吕昶同学表示感谢。

本课题工作得到了国家自然科学基金的支持，作者在此表示感谢。

感谢在我攻读硕士学位期间各位老师和同学给予我的关心和帮助。

附 图

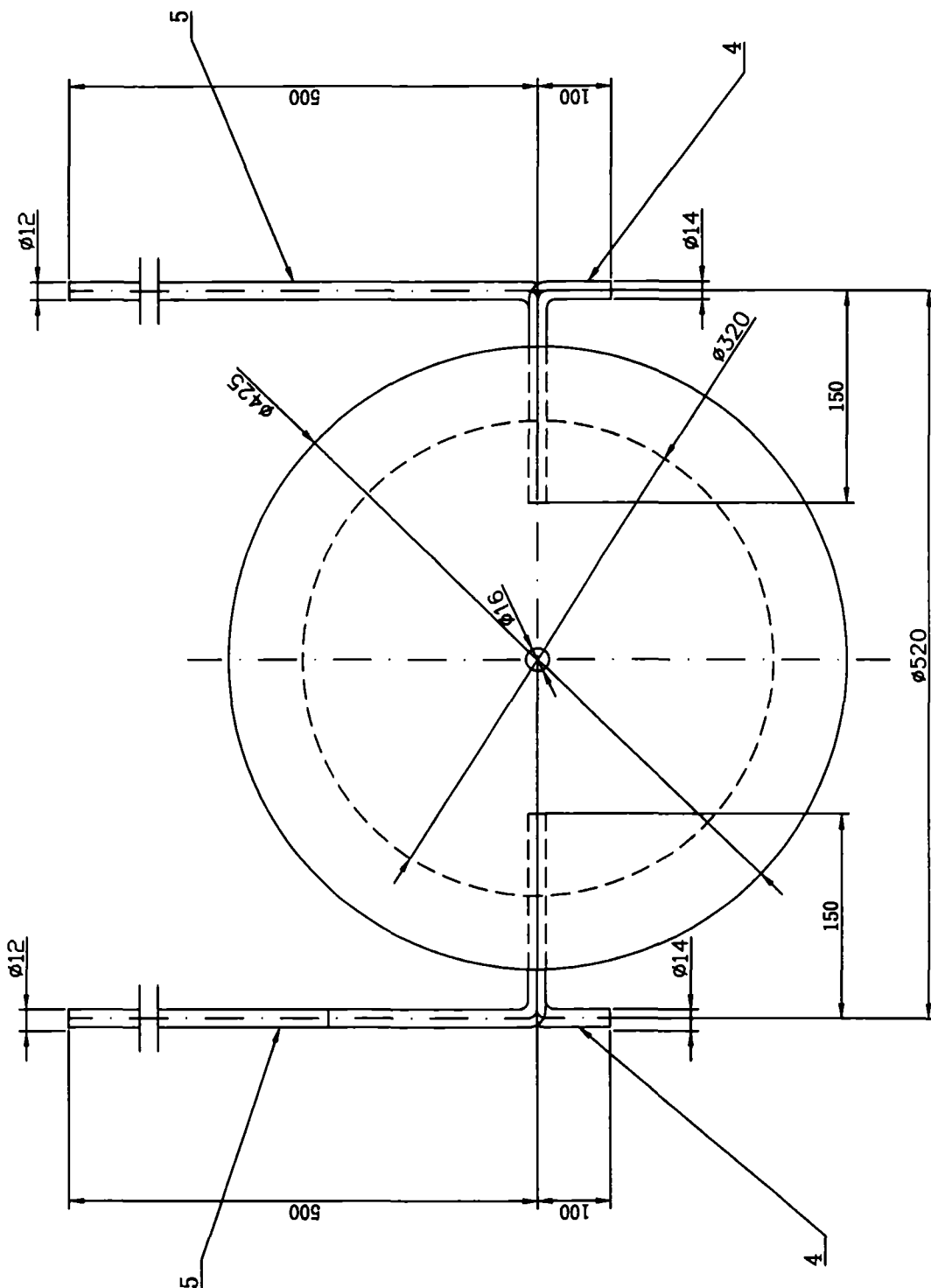
一. 蒸发器 (共 15 页)

1. 图纸清单
2. 蒸发器
3. 蒸发器俯视图
4. 分液器组合件
5. 分液器连接管
6. 大小头
7. 分液器
8. 毛细管
9. 不锈钢管
10. 紫铜管
11. 连接头
12. 集气管
13. 蒸发盘管
14. 壳体
15. 盖板

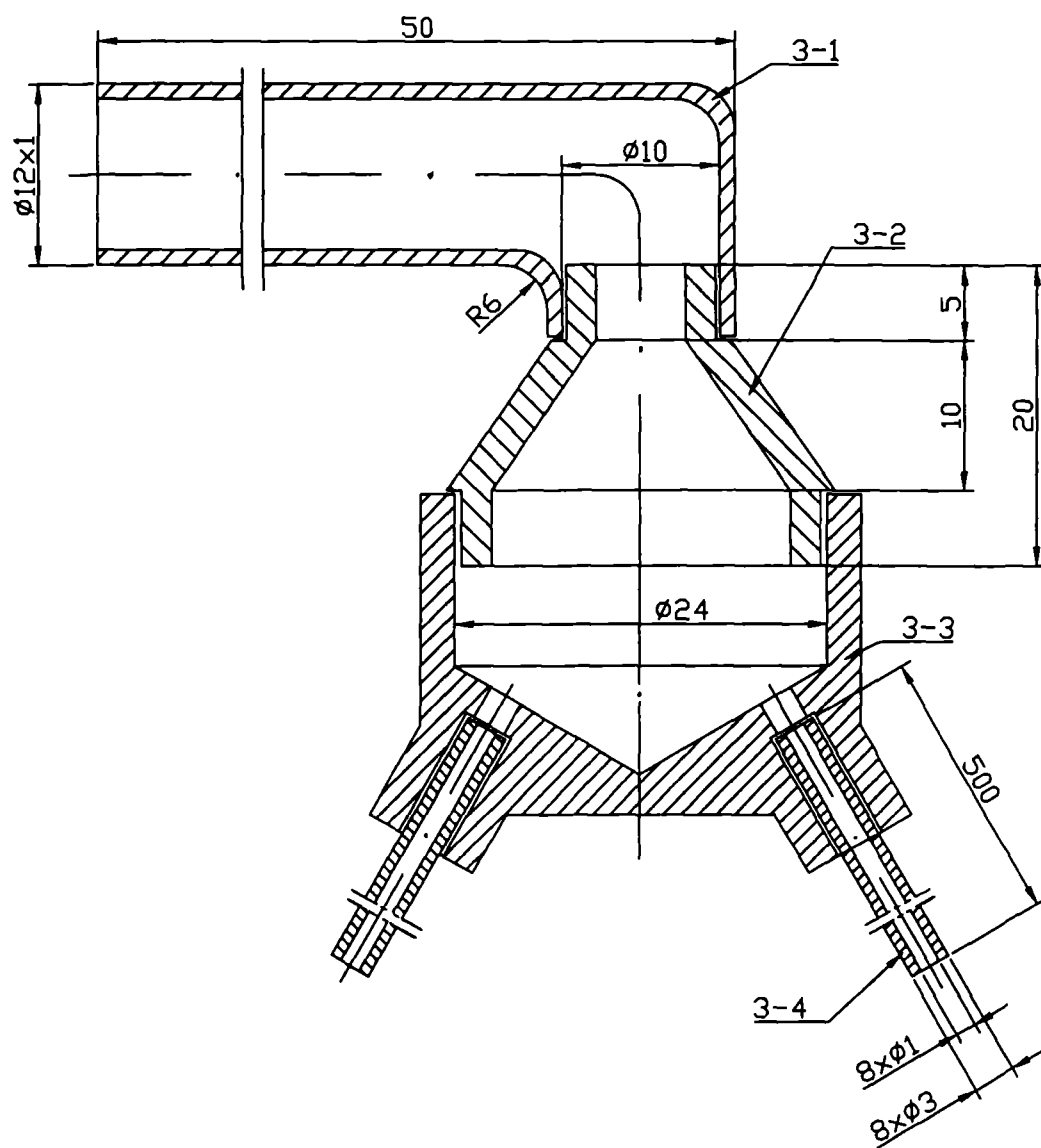
二. 蓄冷罐 (共 17 页)

1. 图纸清单
2. 蓄冷罐
3. 装配图
4. 外壳体
5. 内壳体
6. 盖板
7. 视镜内法兰
8. 视镜外法兰
9. 连接弯头
10. 连接头
11. 密封圈
12. 视镜
13. 支撑板 (长)
14. 支撑板 (短)
15. 支撑板
16. 外壳密封圈
17. 外壳玻板

10	盖板	1	不锈钢					
9	壳体	1	不锈钢					
8	蒸发盘管	8	紫铜					
7	集气管	1	紫铜					
6	连接头	2	紫铜					
5	紫铜管	2	紫铜					
4	不锈钢管	2	不锈钢					
3-4	毛细管	8	紫铜					
3-3	分液器	1	紫铜					
3-2	大小头	1	紫铜					
3-1	分液器连接管	1	紫铜					
3	分液器组合件							
2	蒸发器俯视图							
1	蒸发器							
图号	名称		数量	材料	备注			
更改标记	签字	日期	图 纸 清 单			材料		
	设计					数量	比例	重量
	制图	李强						
	描图							
	校对			共 页 第 页				
审核			图号		件号	中国科学院低温技术实验中心		

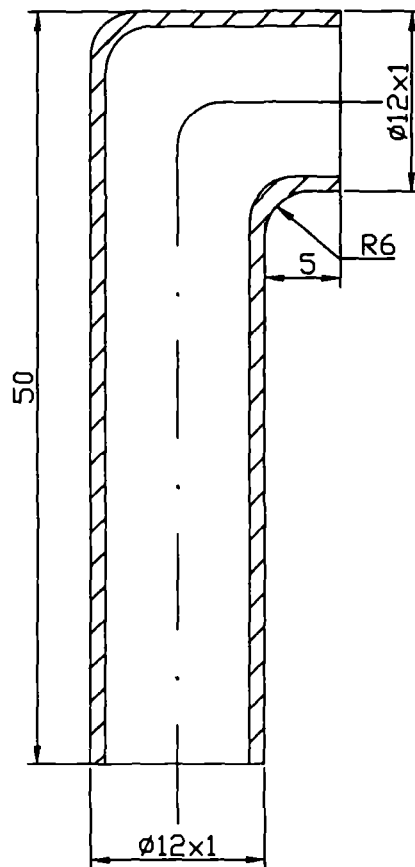


更改记录	签字	日期	蒸发器俯视图	材料	数量	比例	重量
设计	李强					1:4	
审核							
制图							
校对							
审核							
图号	2	件号		共	页	第	页
中国科学院低温技术实验中心							



			分液器组合件				材 料	紫 铜	
更改标记	签 字	日 期					数 量	比 例	重 量
设 计	李 强							2:1	
制 图							共 页		第 页
校 对			图号	3	件号		中国科学院低温技术实验中心		
审 核									

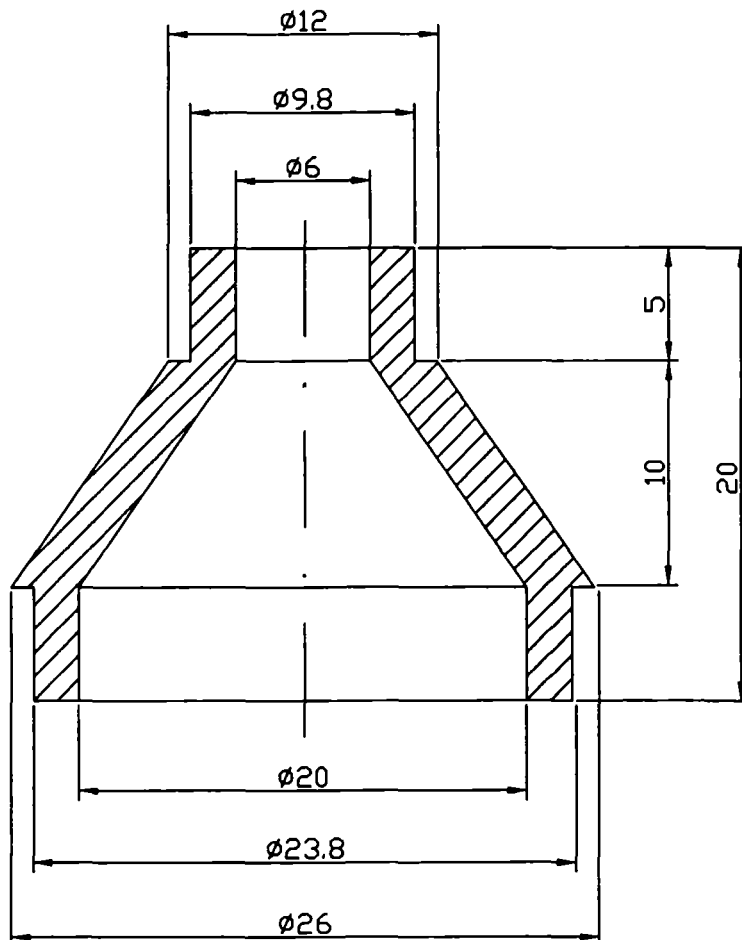
12.5 /



注：总长L=55

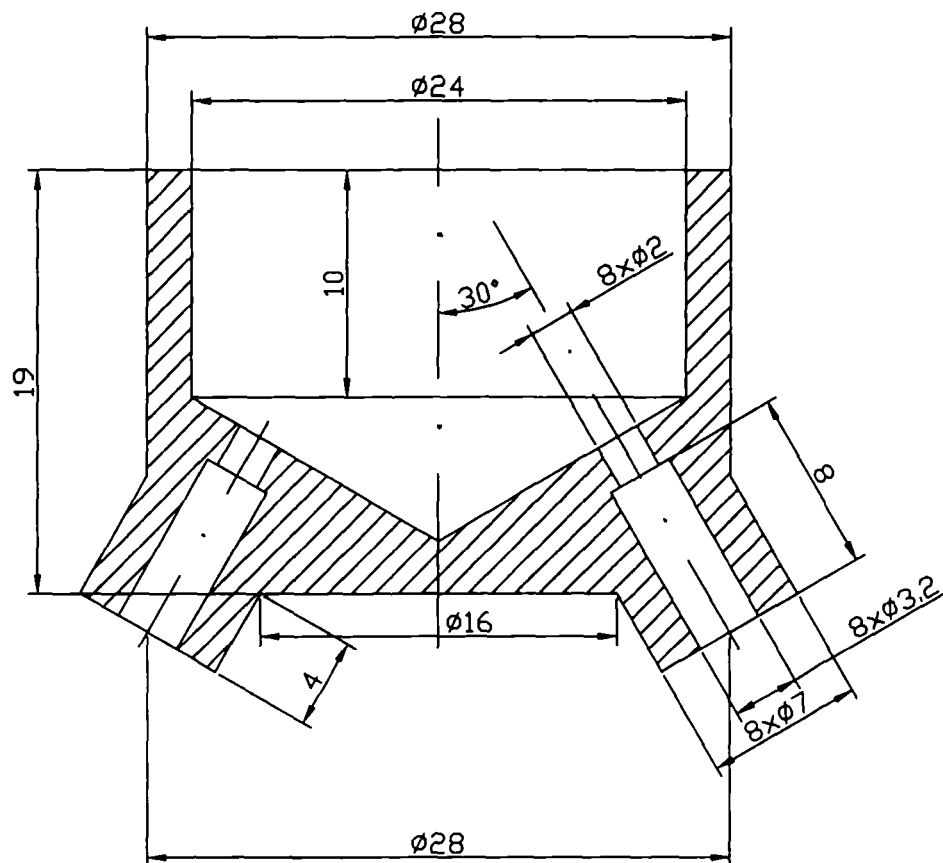
更改标记	签字	日期	分液器连接管				材料		紫铜	
							数量	比例	重量	
设计	李强						1	2:1		
制图							共		页	第
校对									第	页
审核			图号	3-1	件号		中国科学院低温技术实验中心			

12.5
▽



更改标记	签字	日期	大小头			材料	紫铜	
设计	李强					数量	比例	重量
制图						1	3:1	
描图						共	页	第 页
校对			图号	3-2	件号	中国科学院低温技术实验中心		
审核								

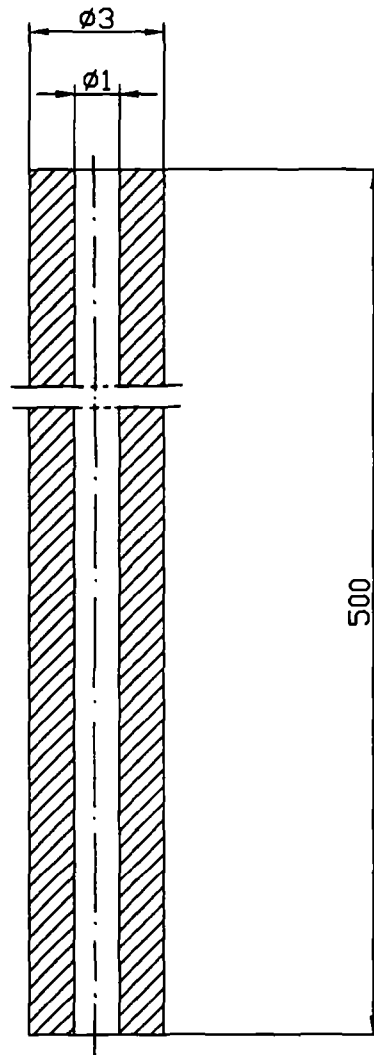
12.5



注： 8个孔须均匀分布

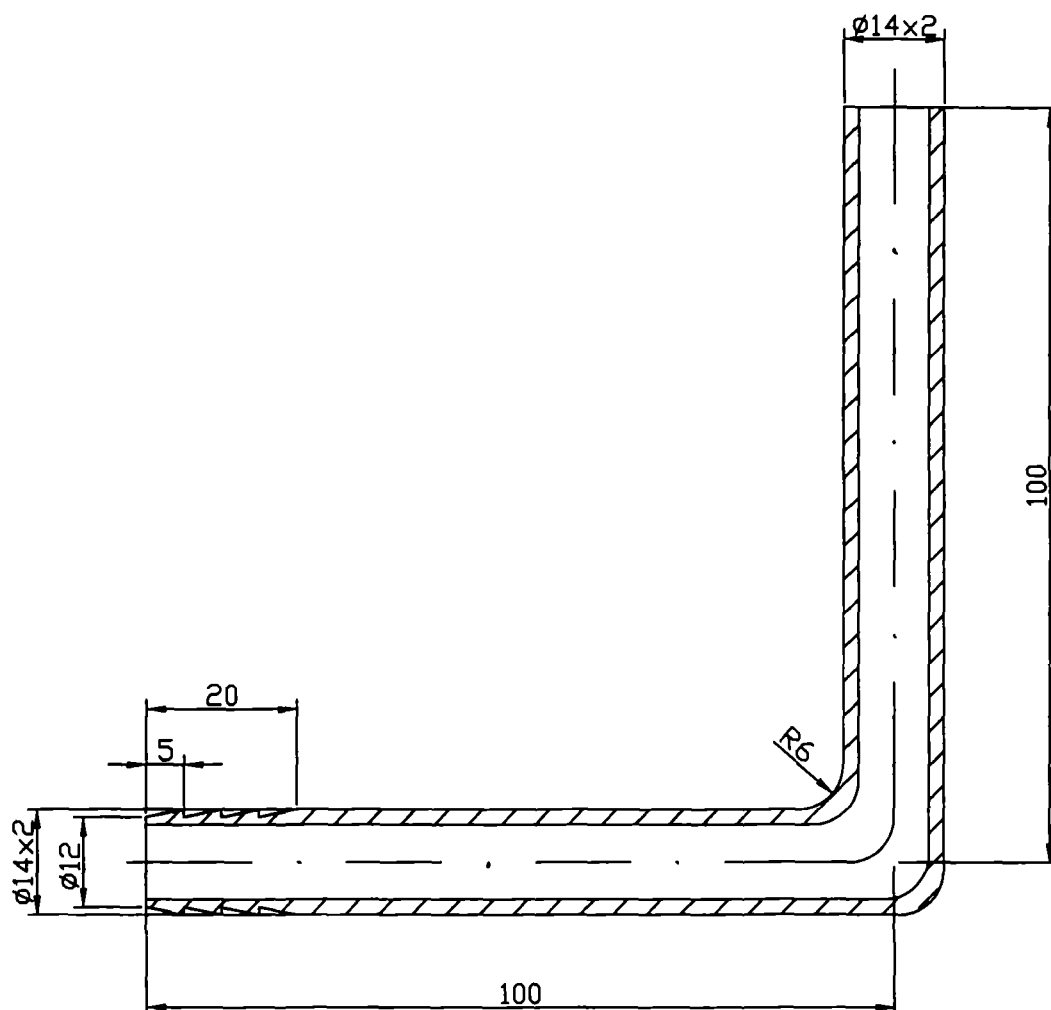
			分液器				材 料	紫 铜	
更改标记	签 字	日 期					数 量	比 例	重 量
设 计	李 强						1	3:1	
制 图							共 页		第 页
描 图									
校 对			图号	3-3	件号		中国科学院低温技术实验中心		
审 核									

12.5/√



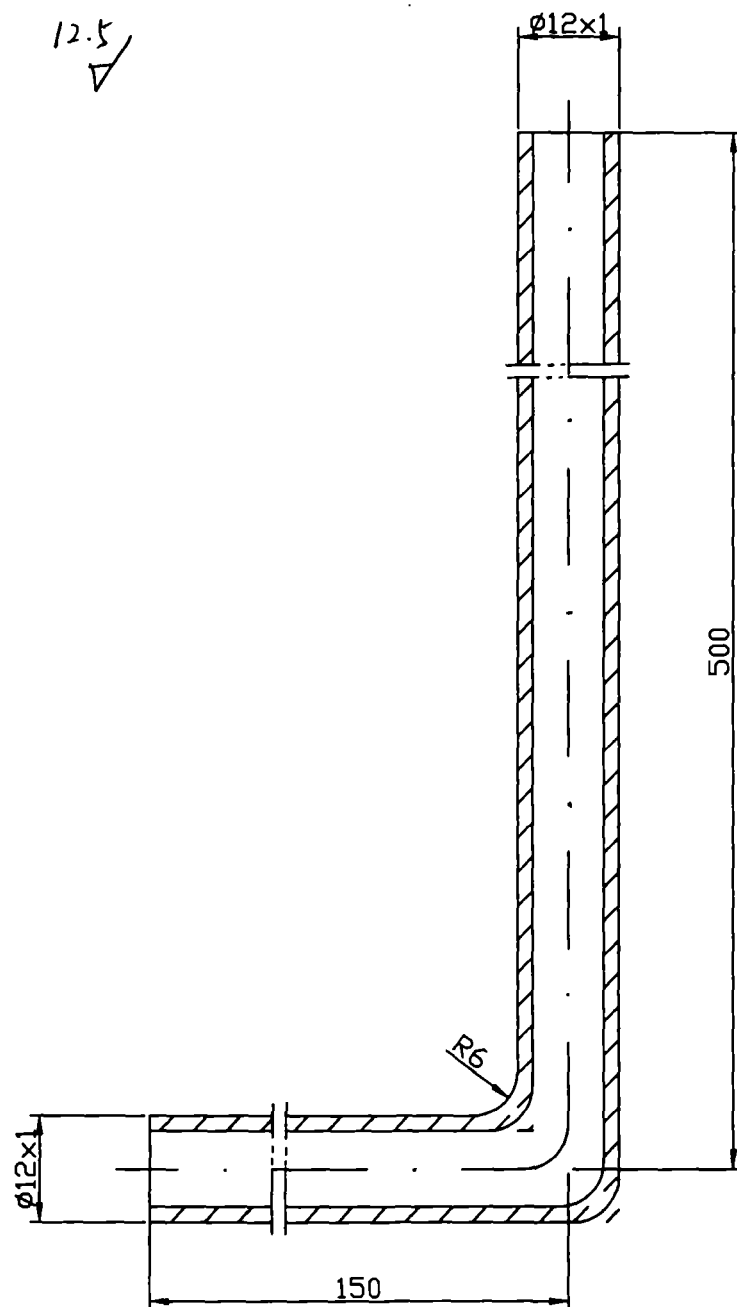
更改标记	签 字	日 期	毛 细 管				材 料	紫 铜	
							数 量	比 例	重 量
设 计	李 强						8	5:1	
制 图							共	页	第 页
描 图			图号	3-4	件号		中国科学院低温技术实验中心		
校 对									
审 核									

12.5
A



注：总长L=200

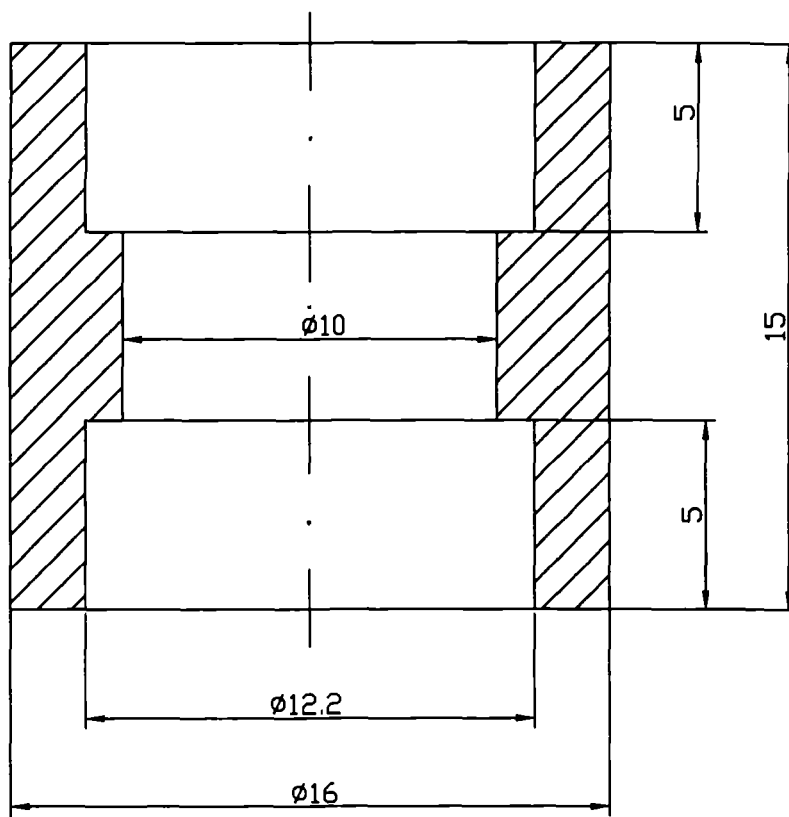
			不 锈 钢 管				材 料		不 锈 钢		
更改标记	签 字	日 期					数 量		比 例		重 量
设 计	李 强						2		1:1		
制 图											
描 图							共		页		
校 对									第		
审 核			图号	4	件号	中国科学院低温技术实验中心					



注：总长=650

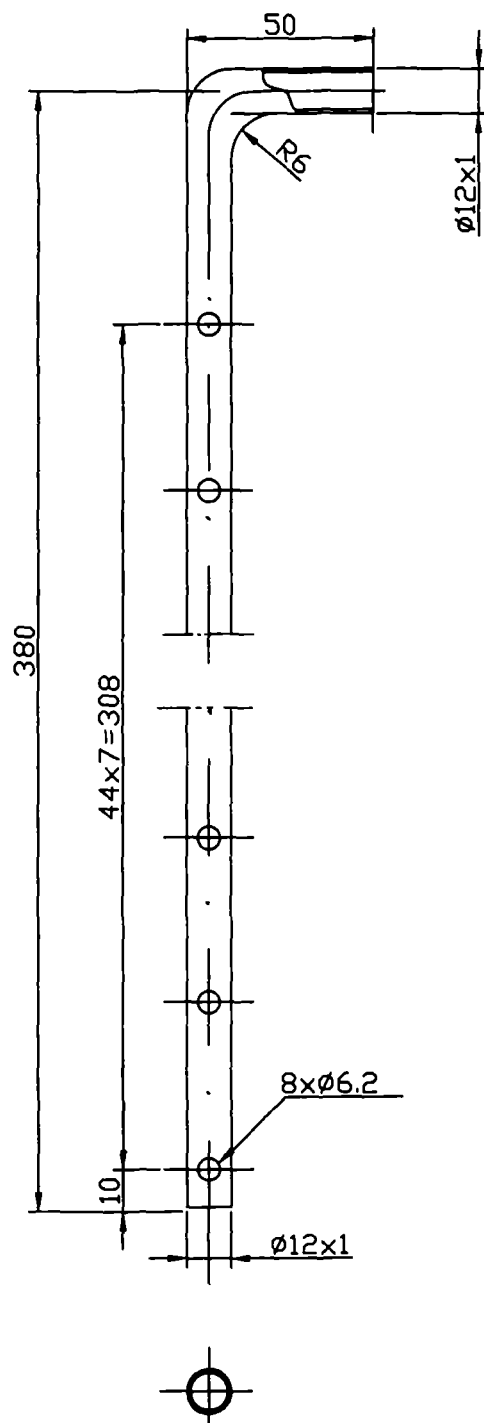
			紫铜管				材 料		紫 铜	
更改标记	签 字	日 期					数 量		比 例	
设 计	李 强						2		1:1	
制 图										
描 图										
校 对			图号				共		页	
审 核							5		件号	
							中国科学院低温技术实验中心			

12.5
△



			连接头				材 料	紫 铜		
更改标记	签 字	日 期					数 量	比 例	重 量	
设 计	李 强						2	5:1		
制 图										
描 图										
校 对							共	页	第	页
审 核			图号	6	件号	中国科学院低温技术实验中心				

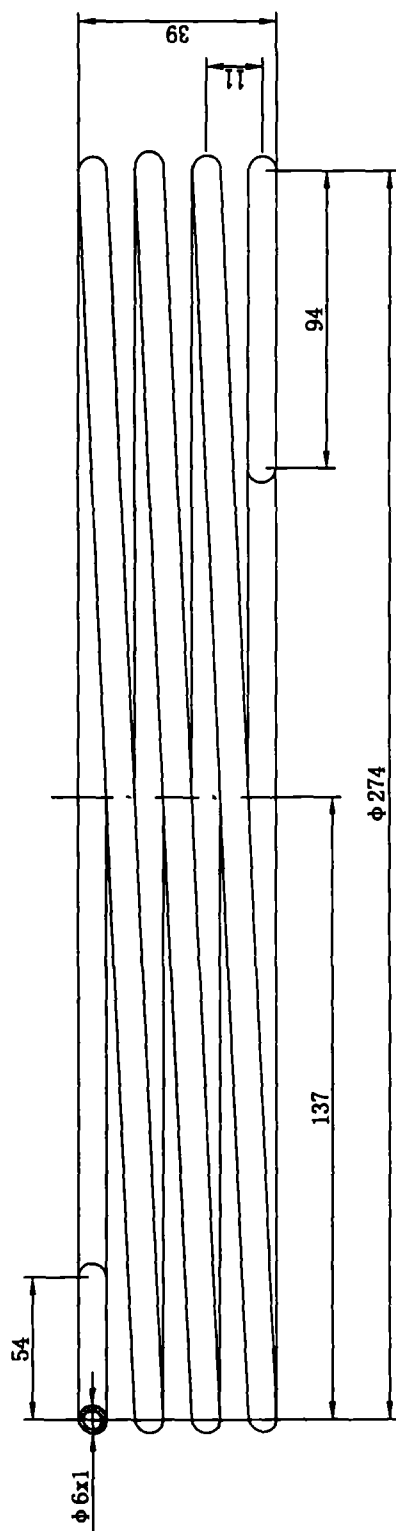
12.5 /



A - A

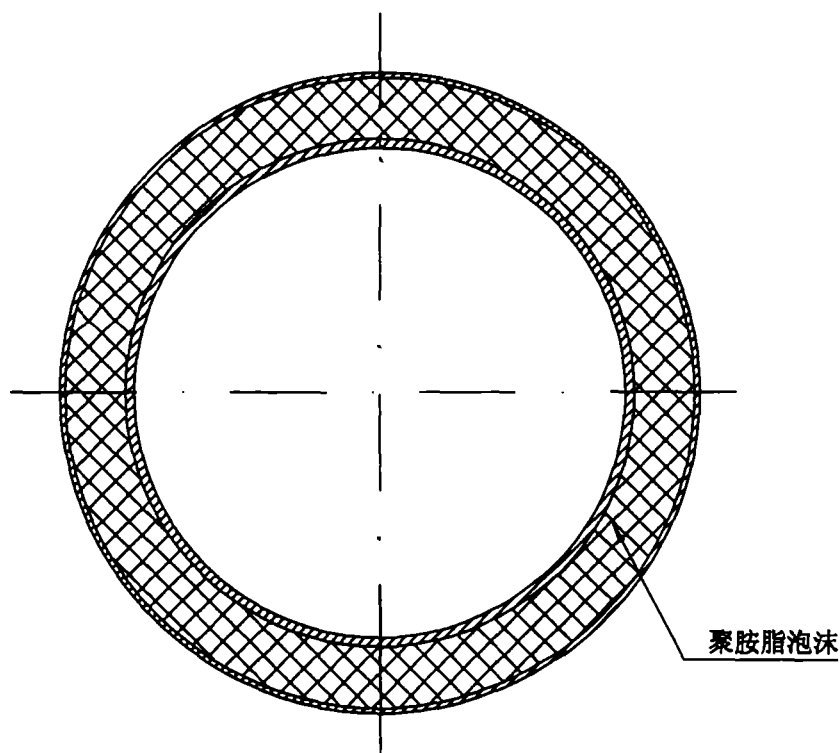
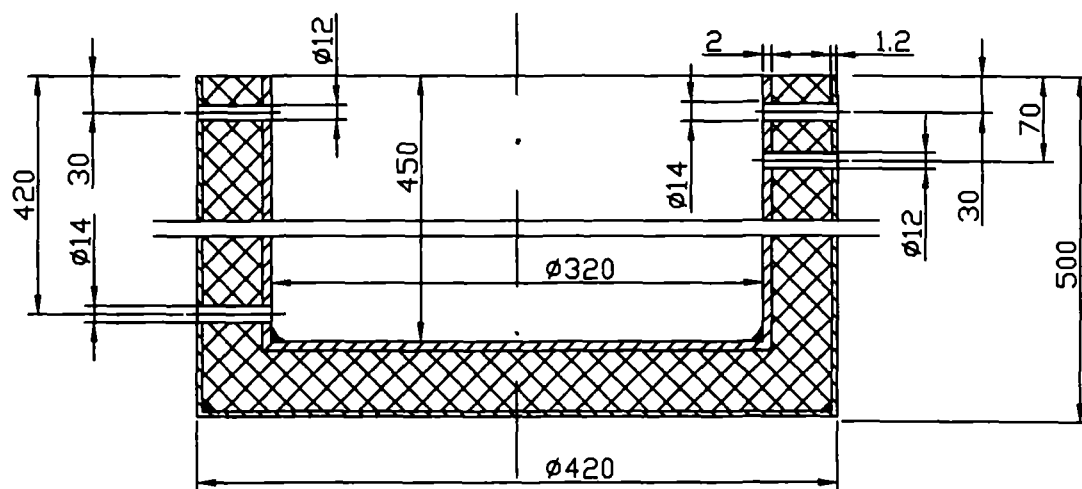
注: 总长L=430

			集 气 管				材 料		紫 铜					
更改标记	签 字	日 期					数 量		比 例		重 量			
设 计	李 强						1		1:2					
制 图							共		页		第		页	
描 图														
校 对			图号	7	件号		中国科学院低温技术实验中心							
审 核														



更改标记	签字	日期	蒸发盘管		材料	紫铜	数量	比例	重量
设计	李永				数量	8	1:1.5		
制图					共	页	第	页	
审核			图号	8	作号	中国科学院低温技术实验中心			

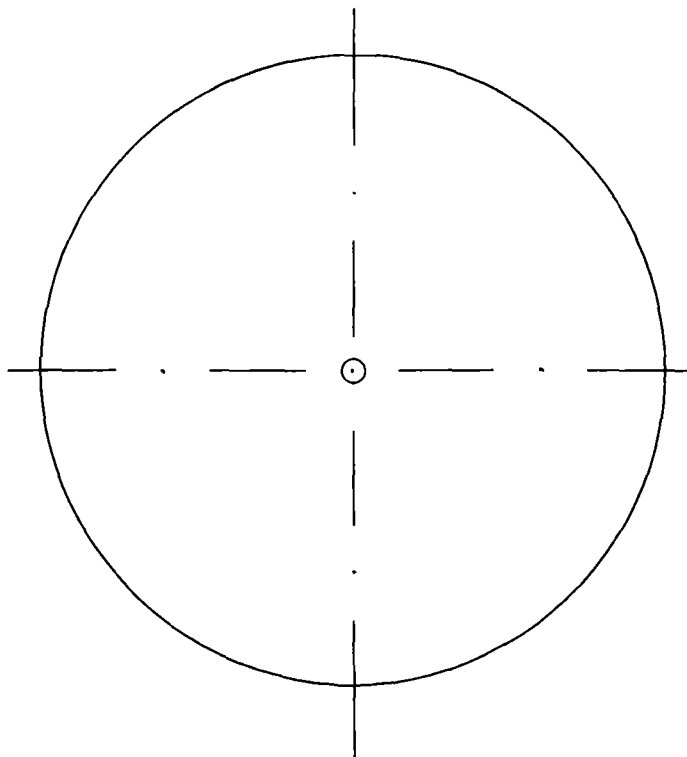
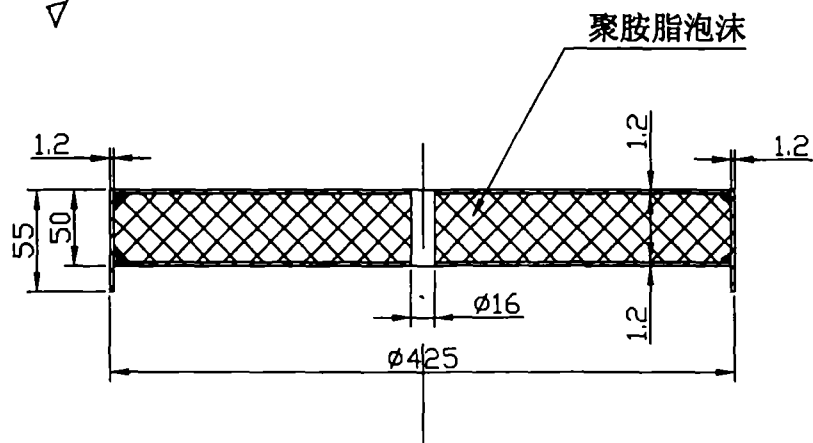
12.5
△



注：内胆壁厚2mm，外胆壁厚1.2mm，材料为不锈钢

更改标记	签字	日期	壳 体			不 锈 钢	
						材 料 数 量	比 例 重 量
设 计	李 强					1	1: 5
制 图						共	页
描 图						第	页
校 对							
审 核			图号	9	件号	中国科学院低温技术实验中心	

12.5

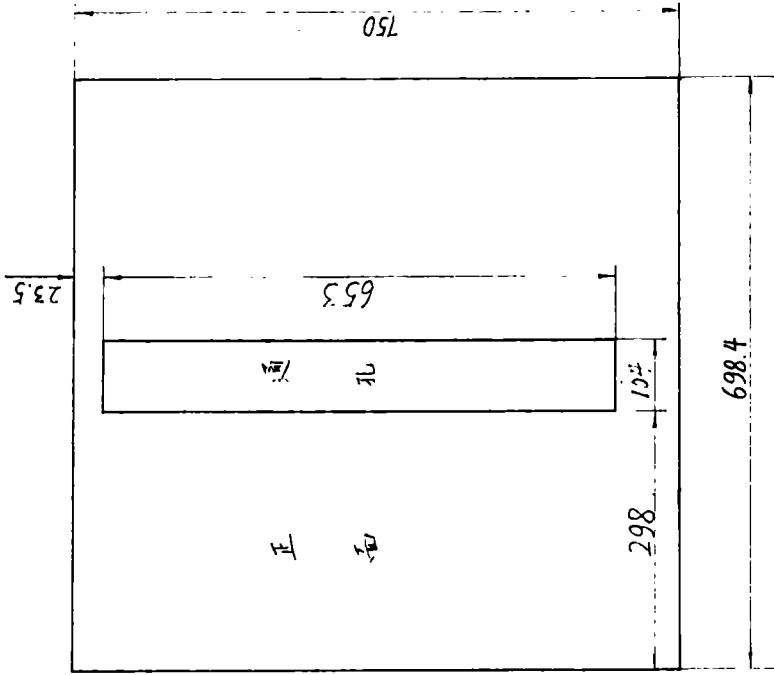
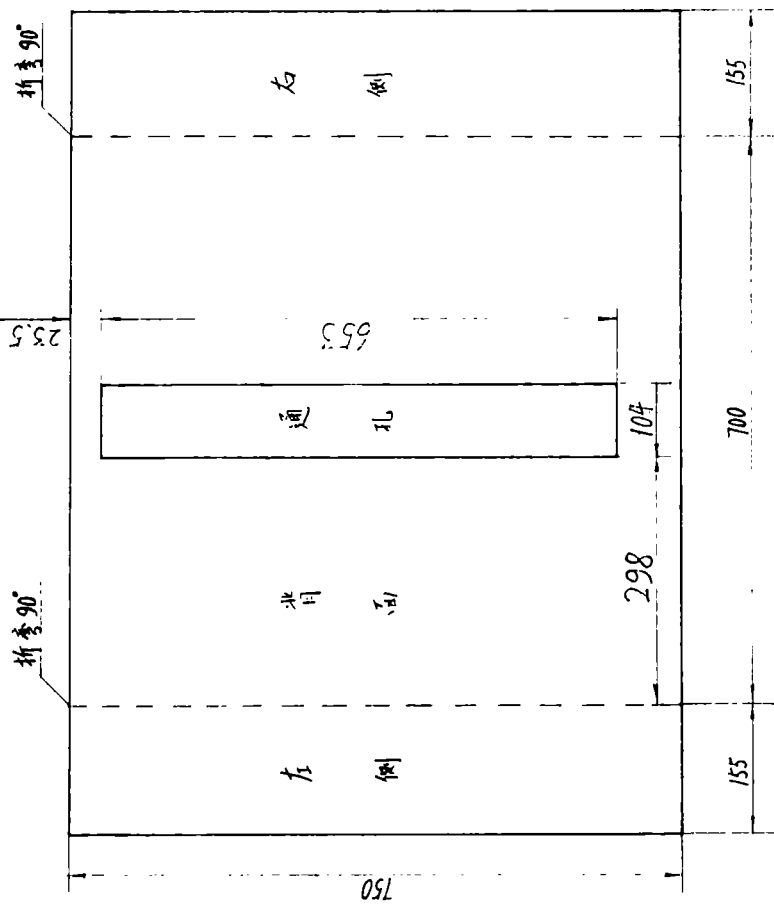


注：壁厚 1.2 mm

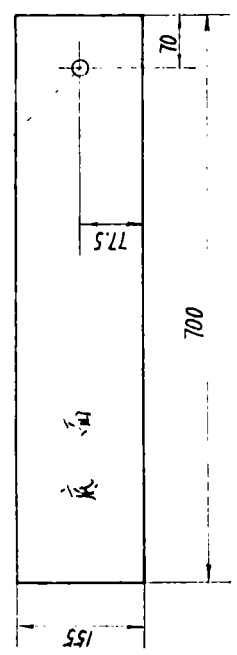
更改标记	签字	日期	盖 板			材 料	不 锈 钢	
						数 量	比 例	重 量
设 计	李 强					1	1: 5	
制 图						共	页	第 页
描 图						中国科学院低温技术实验中心		
校 对								
审 核			图号	10	件号			

16	外壳玻板	
15	外壳密封圈	
14	支撑板	
13	支撑板(短)	
12	支撑板(长)	
11	视镜	
10	密封圈	
9	接头	
8	连接弯头	
7	视镜外法兰	
6	视镜内法兰	
5	盖板	
4	内壳体	
3	外壳体	
2	装配图	
1	蓄冷罐	
图号	名称	备注

更改标记	签字	日期	图 纸 清 单		材料		
设计	204组				数量	比例	重量
制图	李强		图号		共 页 第 页		
描图	李庭英				中国科学院低温技术实验中心		
校核	郭延伟		件号				



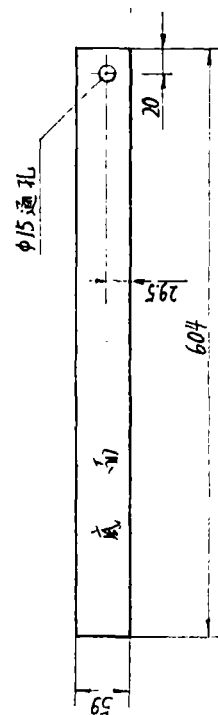
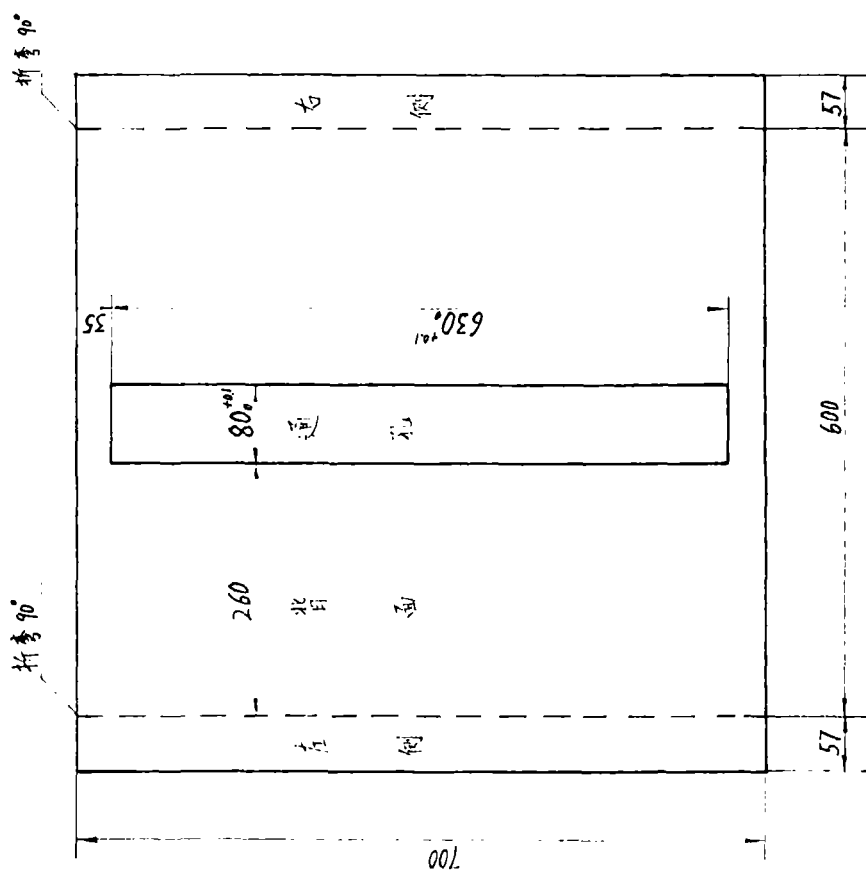
φ15 通孔



12.5

注：1. 板厚 0.8 mm.
2. 卸模。

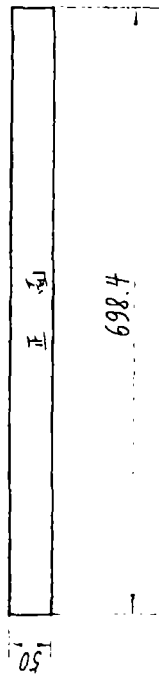
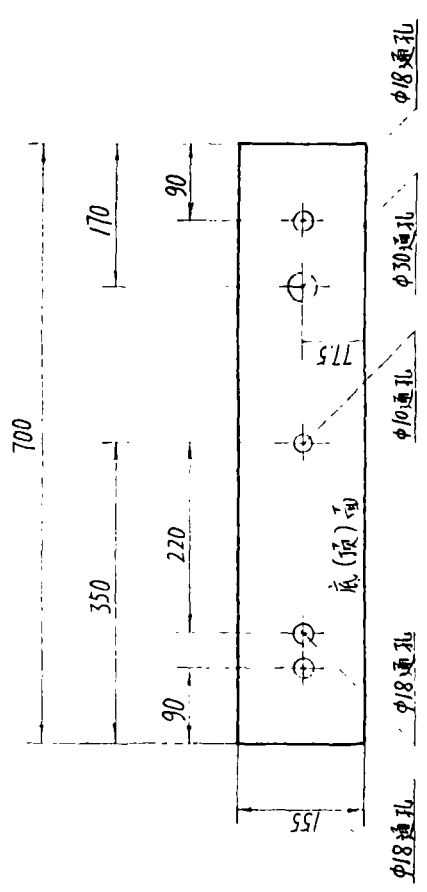
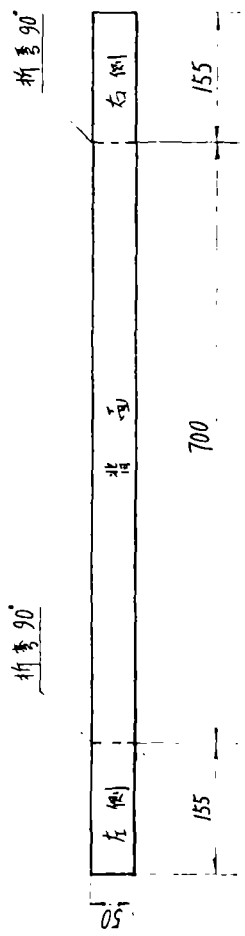
更改标记	签字	日期	外壳体	材料	数量	比例	重量
设计	2011.11.11			数量	1:6		
制图	李 强			重量			
审核	李 强	2011.11.11	图号	件号	1		
审批	李 强	2011.11.11	图号	件号	3		



12.5 ✓

注：板厚 2 mm

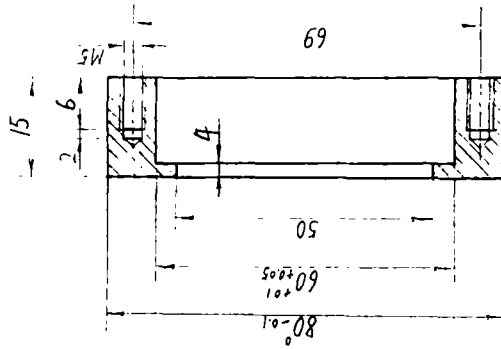
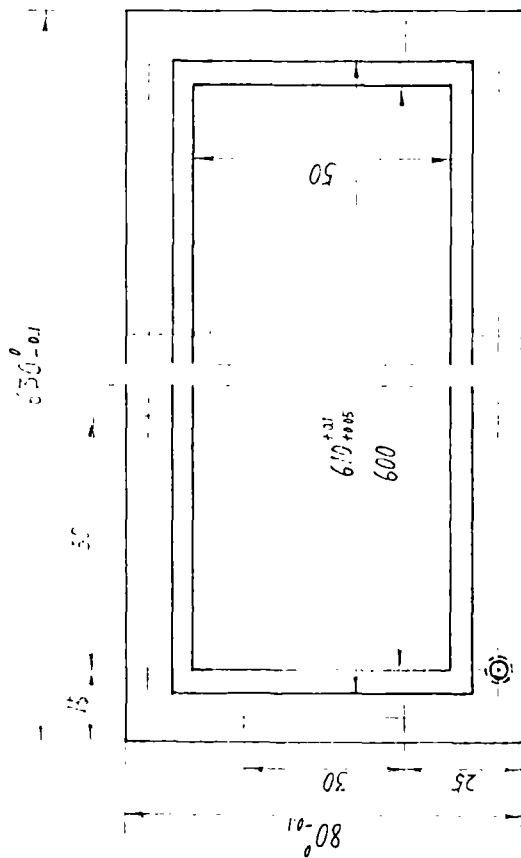
更改设计	李全	日期		内壳体	材料重量比	不锈纲
制图	李全				1:5	
校对	李全					
审核	李全					
审批	李全					
图号	4	件号	2	共页	第页	页
中国科学院低温技术实验中心						



12.5

- 注
1. 顶面、底面各一块
 2. 板厚0.8mm
 3. 铆钉(由工厂确定)
 4. 装入保温材料后封装

更改标记	签字	日期	盖	板	材料	比例	页	第	页
设计	李强				数	1:6	共		
制图					图号		5		
审核	李强				件号		5		
审批	李强	98.5.15							

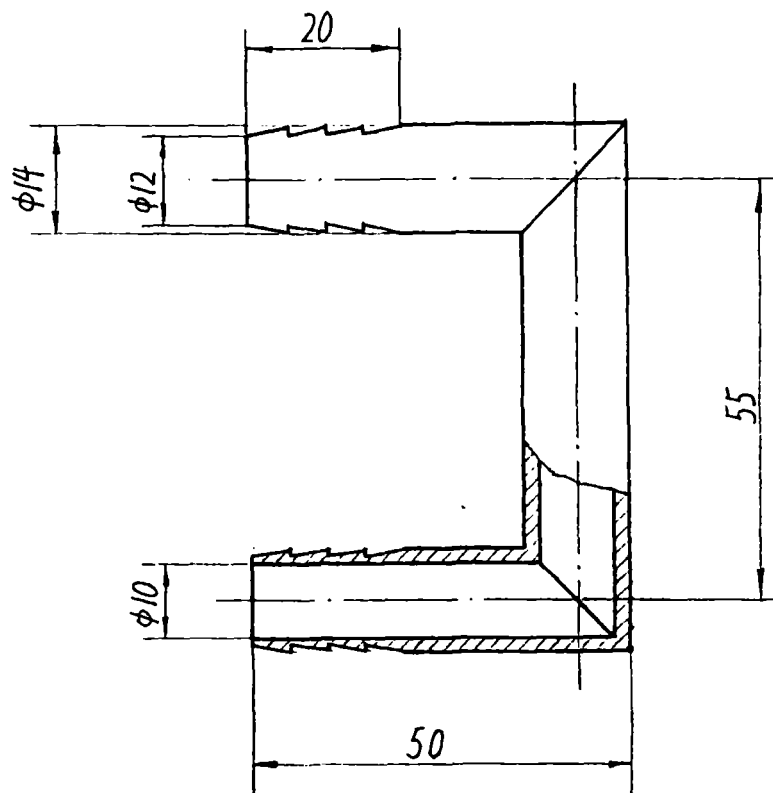


12.5

M5

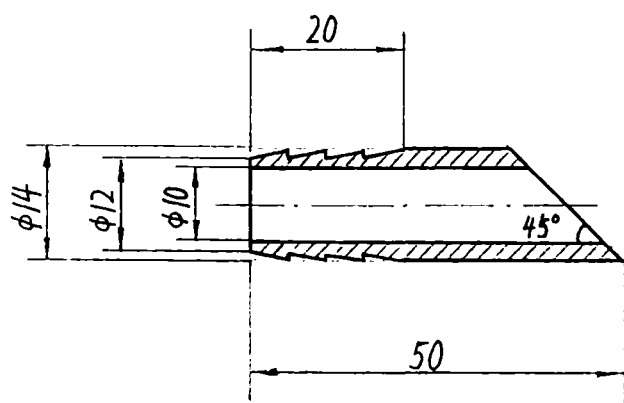
更改标记	签字	日期	视图	材料	不锈钢
设计	2004.12			数量	比例
制图	李			2	1:1
审核	李			共	页
校对	李			6	第
审核	李			3	页
中国科学院低温技术实验中心					

12.5/

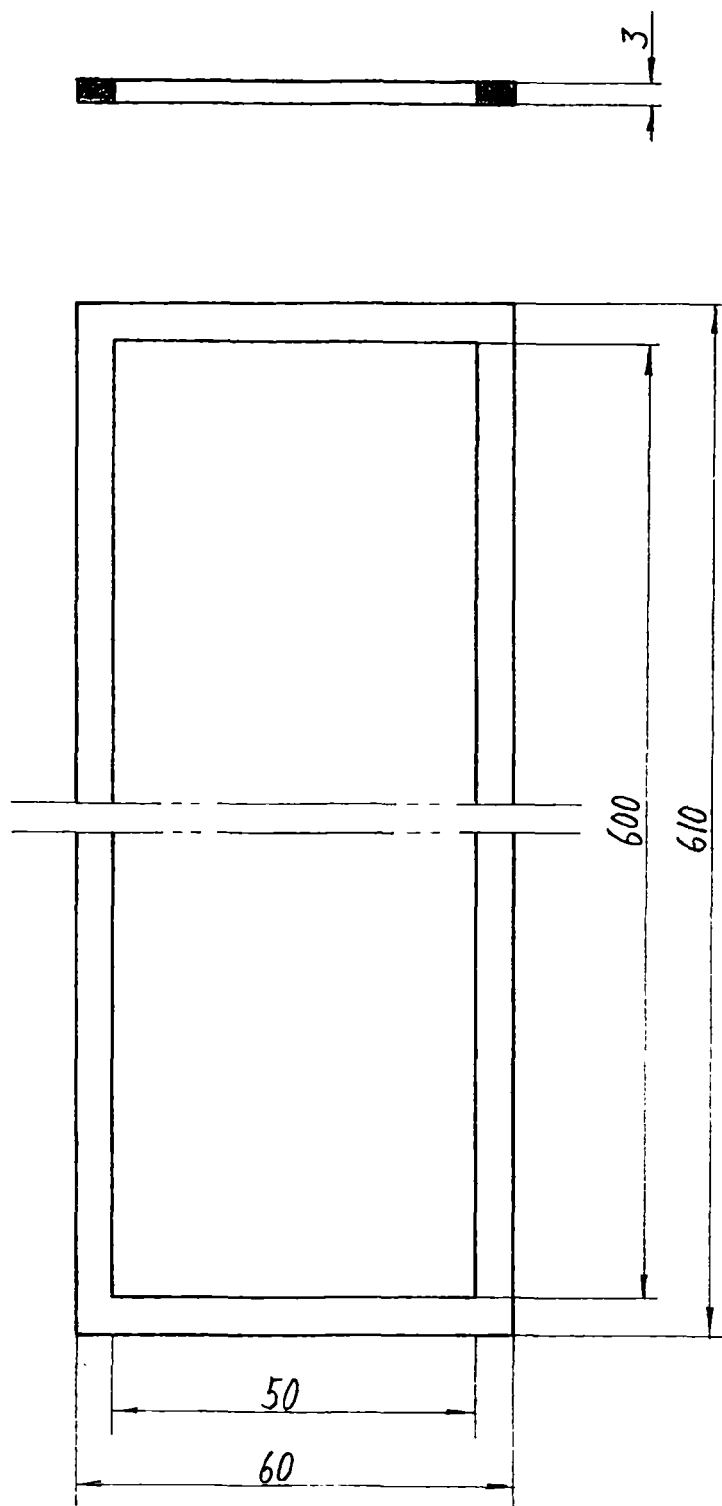


更改标记	签字	日期	连接弯头		材料	不锈钢	
设计	2009.12				数量	比例	重量
制图	李强				12	1:1	
描图	李强				共	页	第 页
校对	李强				中国科学院低温技术实验中心		
审核	李强	99.12.12	图号	8	件号	6	

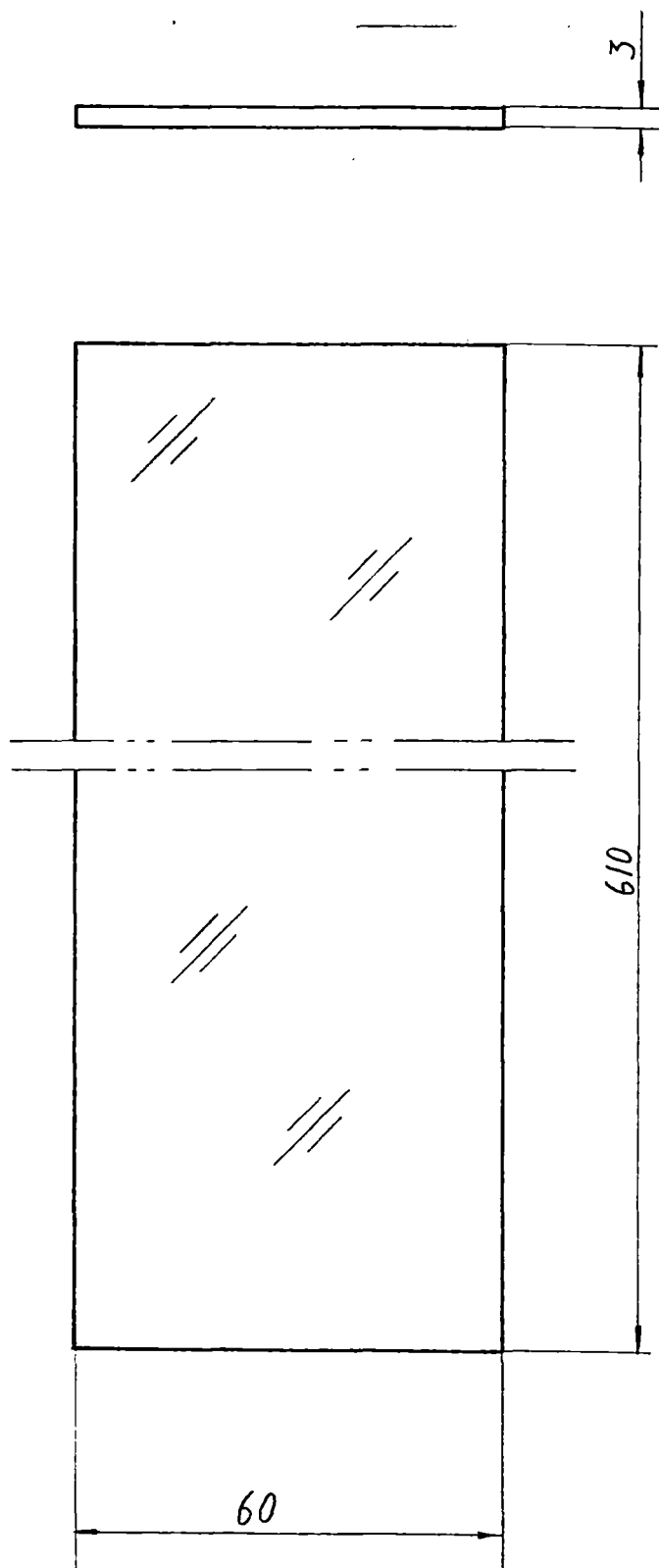
12.5 / ∇



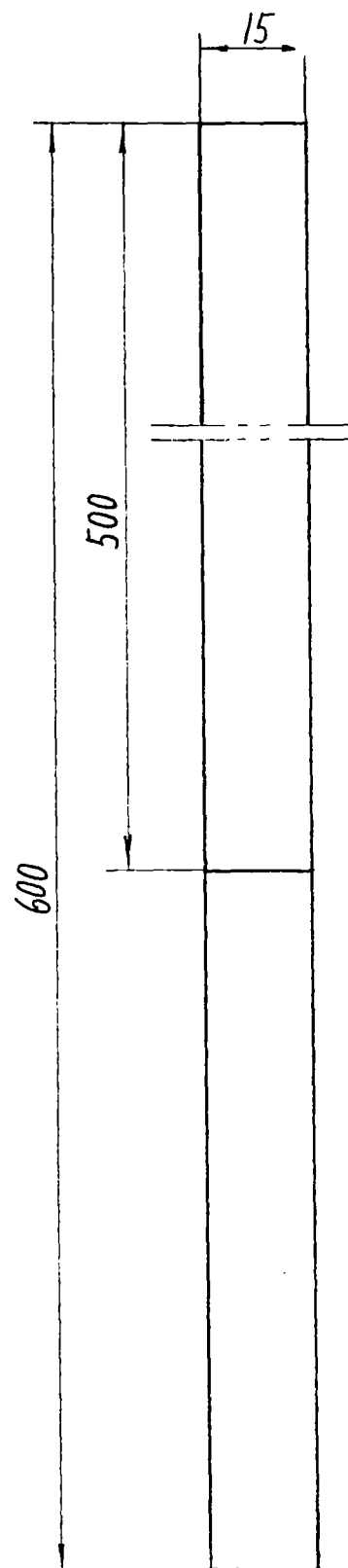
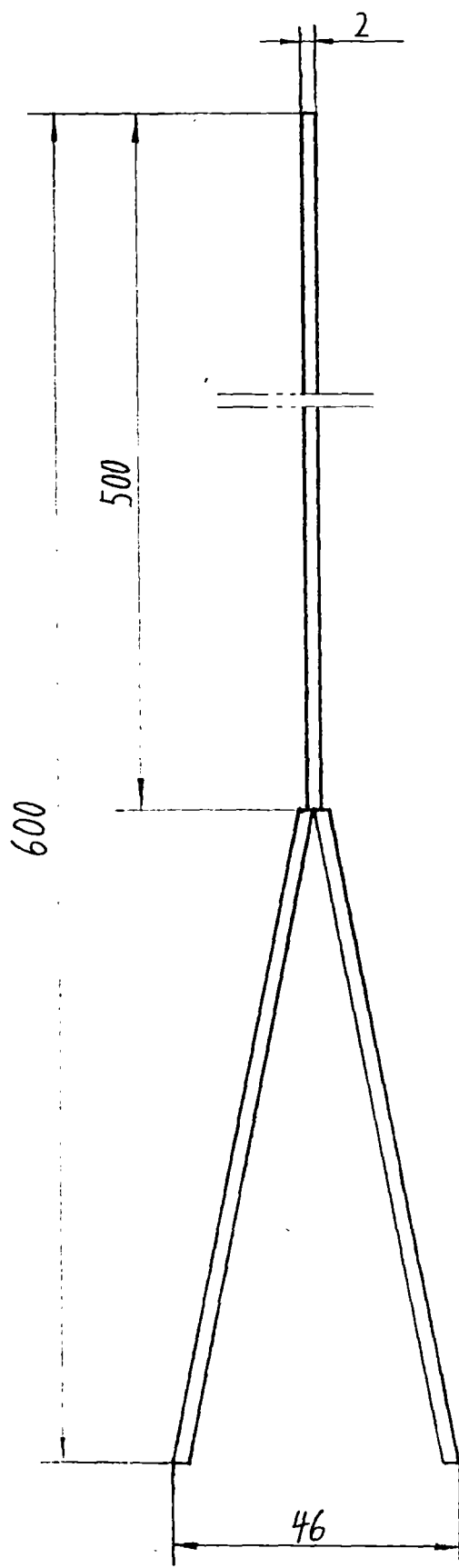
更改标记	签字	日期	连 接 头			材 料	不 锈 钢	
设 计	20410					数 量	比 例	重 量
制 图	李 强					8	1:1	
描 图						共	页	第 页
校 对	李 强							
审 核	郭 延 锦	99.5.13	图号	9	件号	7	中国科学院低温技术实验中心	



更改标记 设计 制图 描图 校对 审核	签字	日期	密封圈		材料	橡胶	
	20412				数量	比例	重量
	李强				8	1:1	
	井根荣				共	页	第 页
	郭延坤	99.5.13	图号	10	件号	8	中国科学院低温技术实验中心

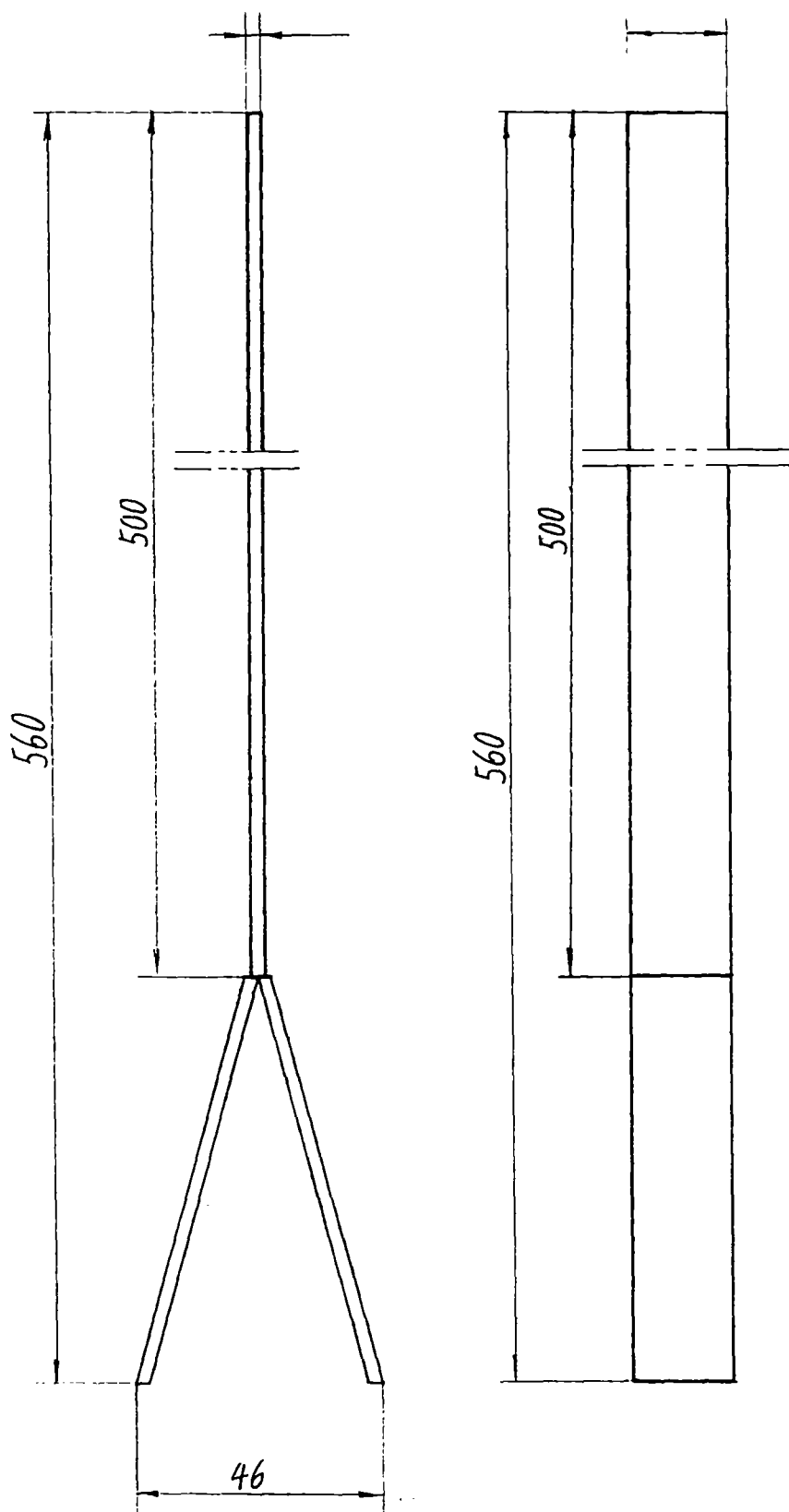


更改标记	签字	日期	视 镜		材料	玻璃	
设计	20442				数量	比例	重量
制图	李 强				4	1:1	
描图	李 强				共	页	第 页
校对	李 强		图号	11	件号	9	中国科学院低温技术实验中心
审核	郭运伟	99.5.13					



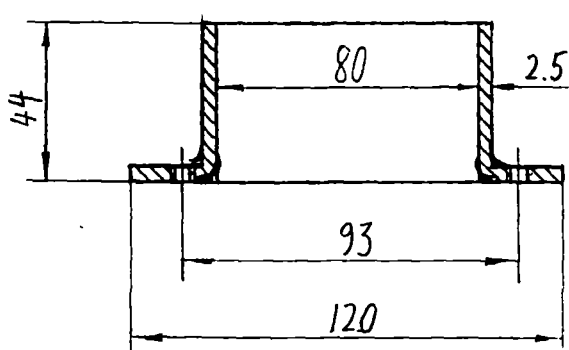
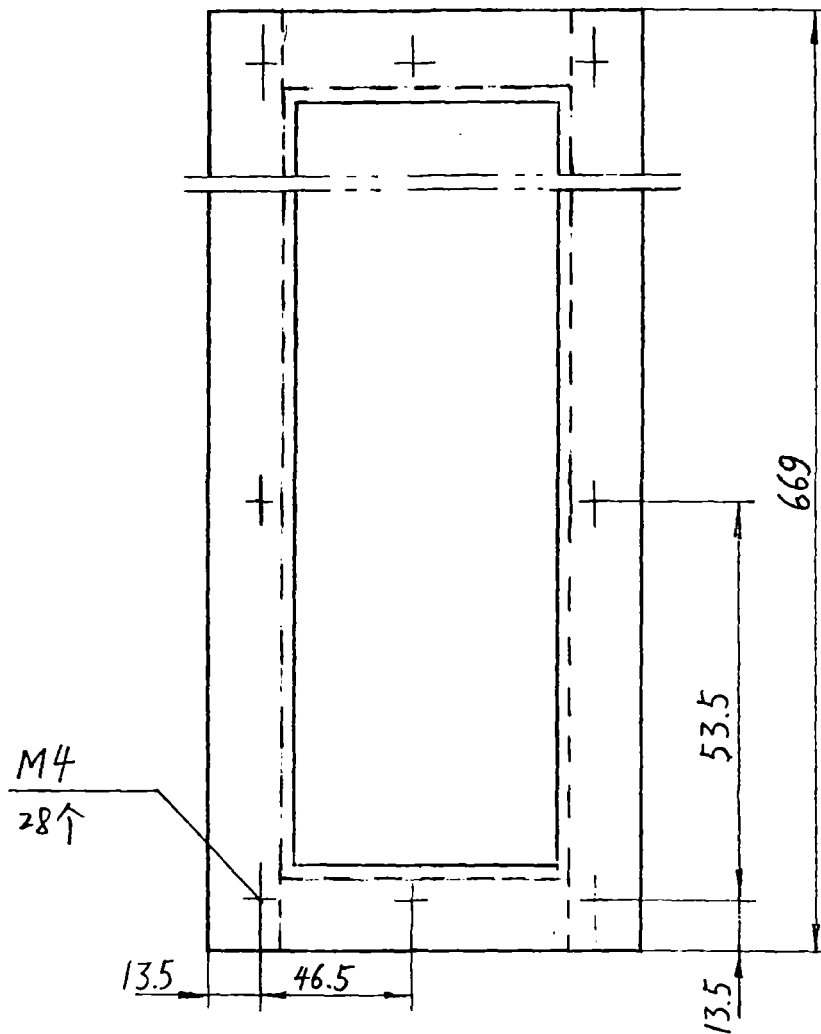
注: 焊接

更改标记	签 字	日 期	支 撑 板 (长)				材 料	不 锈 钢	
设 计	204组						数 量	比 例	重 量
制 图	李 强						1	1:1	
描 图							共 页 第 页		
校 对							中国科学院低温技术实验中心		
审 核	郭正坤	98.5.13	图号	12	件号	10			



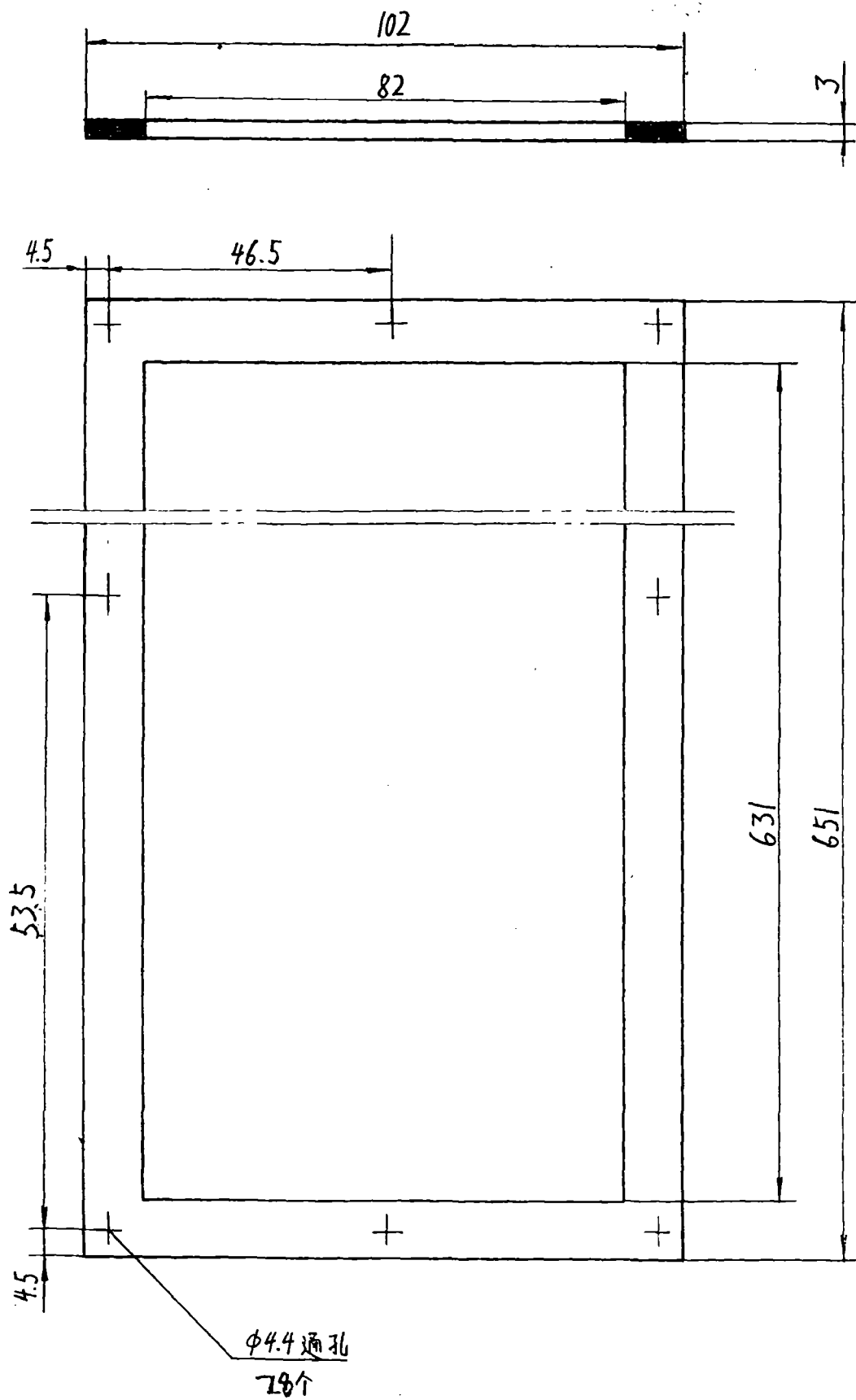
更改标记	签字	日期	支撑板 (短)		材料	不锈钢	
设计	204组				数量	比例	重量
制图	李强				1	1:1	
描图	李强				共	页	第 页
校核	郭也中	98.5.13	图号	13	件号	11	中国科学院低温技术实验中心

12.5/

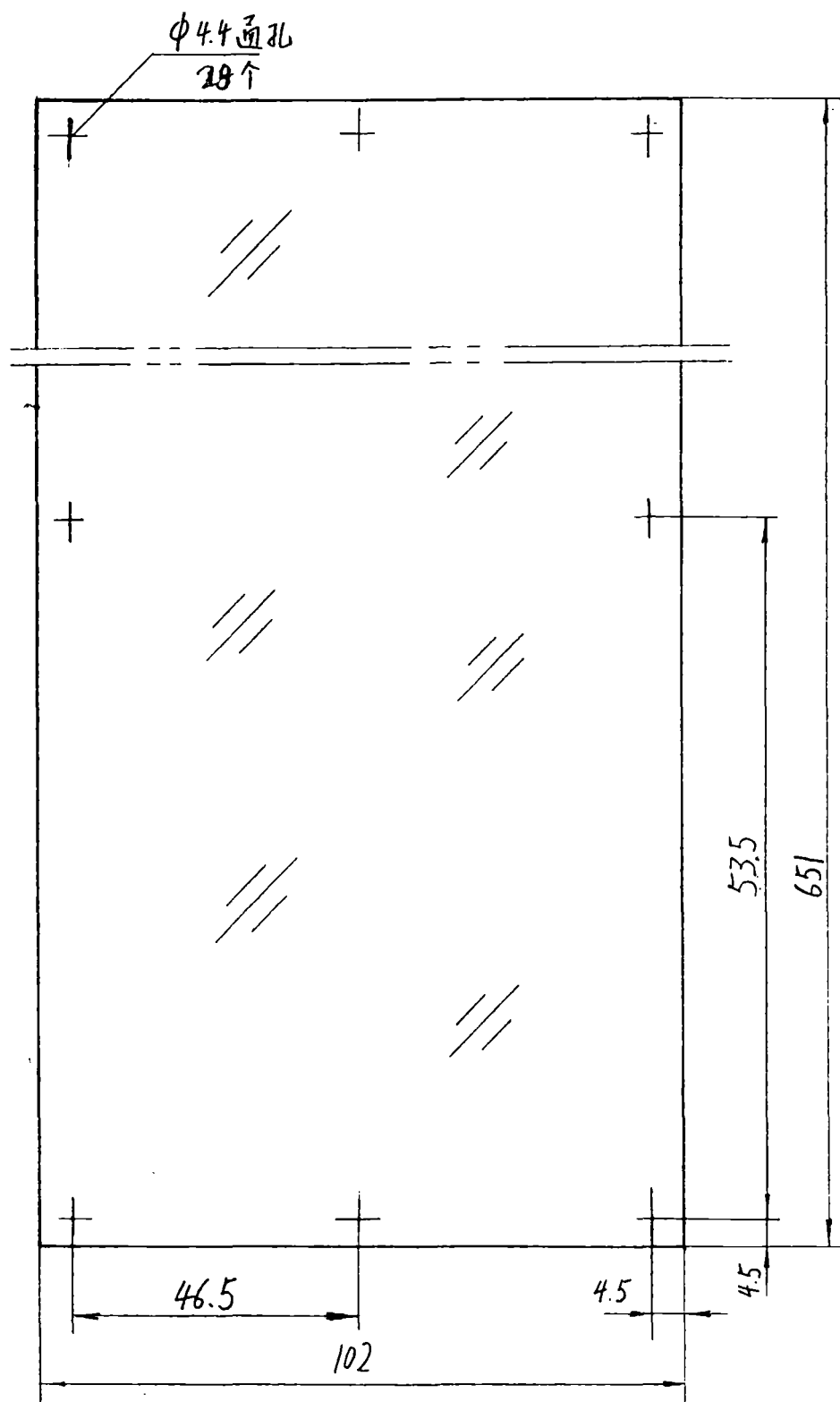


技术要求:
本支撑板由四块折弯板构成, 将其上4焊在视镜法兰外侧, 使其带
螺纹孔的一面尽可能在同一平面上.

更改标记	签字	日期	支 撑 板			材 料	不 锈 钢	
设 计	204 组					数 量	比 例	重 量
制 图	李 强					2	1:2	
描 图						共 页 第 页		
校 对								
审 核	郭 心 伟		图号	12.5/	件号	12	中国科学院低温技术实验中心	



更改标记	签字	日期	外壳密封圈		材料	橡胶	
设计	204组				数量	比例	重量
制图	李强				2	1:1	
描图					共	页	第
校对							
审核	郭延平	99.5.15	图号	15	件号	13	中国科学院低温技术实验中心



注: 板厚 3mm

更改标记	签字	日期	外壳玻板		材料	有机玻璃	
设计	204组				数量	比例	重量
制图	李强				2	1:1	
描图					共	页	第
校对							页
审核	2014/12/14	2014/12/14	图号	16	件号	14	中国科学院低温技术实验中心