

一、制冷系统的热力学基本原理

- 一、制冷系统的热力学基本原理
 - 1.1 质量守恒
 - 1.2 动量守恒(牛顿第二定律)
 - 1.3 能量守恒
 - 1.3.1 压缩机能量的转化
 - 1.3.2 冷凝端散热
 - 1.3.3 毛细管回热
 - 1.3.4 蒸发器吸热
 - 1.3.5 箱体漏热
- 二、制冷剂在系统中的运动和循环
 - 2.1 拉低温过程制冷剂的迁移
 - 2.2 开停机过程的制冷剂迁移
 - 2.3 保压原理
 - 2.4 系统制冷剂灌注量

冰箱需要使用压缩机将电能转化为热能和机械能，驱动制冷剂在管路内循环流动形成“有回热的朗肯循环”，将箱体内部的热量带走并排放至环境中，从而实现制冷功能，这是一个典型的非线性热力/机械动力系统，描述和计算系统的运动是非常复杂的，但基本的物理学定律，如质量守恒、动量守恒和能量守恒对于制冷系统仍然是严格适用的：

1.1 质量守恒

制冷系统依靠制冷剂的运动来实现能量的运输和传递，压缩机做功压缩制冷剂，其流量表达式为：

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\eta_v V_k N}{v_1}$$

$$\eta_v = \eta_1(P_{cond}, P_{evap}, N)$$

当系统运行稳定后，毛细管的质量流量与压缩机的排气质量流量相等,毛细管内流动一般为两相流动：

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{capillary}$$

1.2 动量守恒(牛顿第二定律)

当制冷系统运行时，冷凝器侧（高压侧）与蒸发器侧（低压侧）存在压差，压差由压缩机的运动来维持：当压缩机吸入气体后，在气缸内被压缩后压力升高，排出后向毛细管入口流动，由于沿程阻力的影响，到达毛细管入口时，其压力会略有降低。一般在冰箱等小型制冷系统中，可近似按照排气压力与饱和冷凝压力相等来进行系统性能计算。

毛细管进出口之间的压差驱动制冷剂从冷凝器侧流向蒸发器侧，在毛细管内摩擦阻力作用下降压降温，到毛细管出口时，压力与蒸发压力相同，然后在蒸发器内流动时，受沿程阻力的影响，压力会降低，导致蒸发器出口温度低于蒸发器入口温度。一般情况下可近似认为吸气压力等同于饱和蒸发压力

当制冷剂从吸气管进入压缩机，依次通过消音器→吸气腔→吸气阀片→气缸→排气阀片→排气腔→内排管→排气管,在吸入和排出时，会存在压力损失,这两项压力损失会造成压缩机的耗功增加，如图所示：

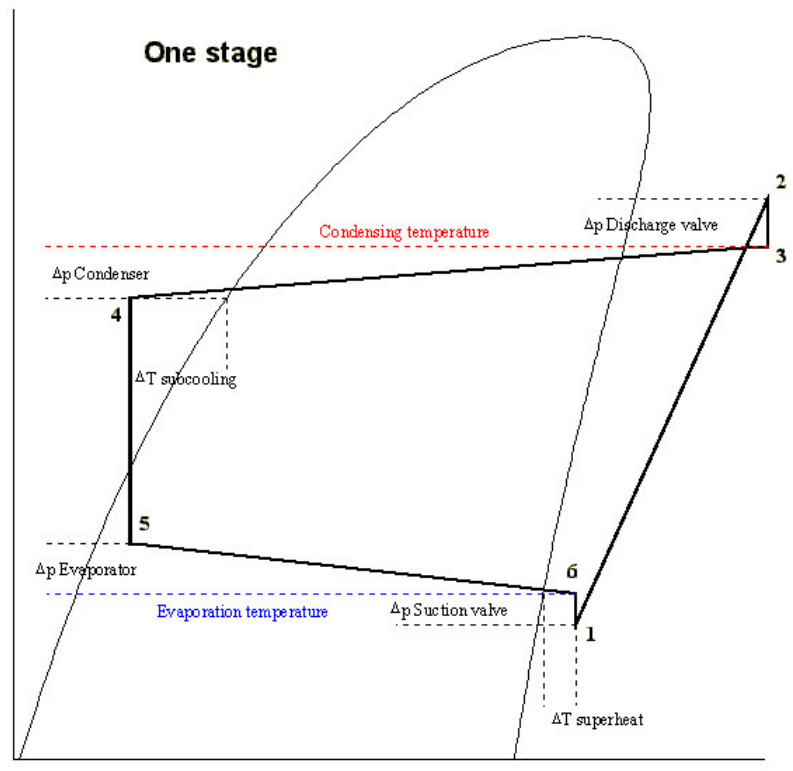


图1 单级压缩制冷系统实际热力循环图

1.3 能量守恒

冰箱制冷系统采用的是有回热的朗肯循环，制冷系统从箱内吸收的热量和压缩机消耗的电能，最终都以热量形式排放至环境中，具体来讲：存在以下几个热量的传递和转化的环节：

1.3.1 压缩机能量的转化

压缩机获得的电能，最终一部分转化为有用功传递给制冷剂，另一部分转化为电机发热和摩擦热，传递给机壳并散发到环境中，另外从气缸排出的高温高压的制冷剂蒸汽也会在压缩机机壳内排放部分热量，最终也会传递给机壳并散发至环境中去。

压缩机的有效功：

$$W_{is} = \dot{m}_{ref}(h_{2s} - h_1)$$

压缩机的输入功为：

$$P_{el} = \frac{W_{is}}{\eta_{is}} = \frac{\dot{m}_{ref}(h_{2s} - h_1)}{\eta_{is}}$$

$$\eta_{is} = \eta_2(T_{cond}, T_{evap}, N)$$

无效功转化为机壳的得热量为：

$$\dot{m}_{ref}(h_{2s} - h_1)\left(\frac{1}{\eta_{is}} - 1\right)$$

压缩机内排气侧散热量为：

$$\dot{m}_{ref}(h_{2s} - h_2)$$

通过压缩机壳向环境排放的热量为：

$$Q_{comp} = UA_{comp}(T_2 - T_{amb}) = \dot{m}_{ref}\left[(h_{2s} - h_1)\left(\frac{1}{\eta_{is}} - 1\right) + (h_{2s} - h_2)\right]$$

注意上式中，定义压缩机排气与环境温度差值作为传热温差（参考EMBRACO研究论文的处理方式）。

1.3.2 冷凝端散热

冷凝器排热量为: $Q_{cond} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_3) = UA_{cond}(T_{cond} - T_{amb})$,此处数学描述上做了简化，以饱和冷凝温度与环境温度的差值作为平均传热温差。

1.3.3 毛细管回热

毛细管与回气管的回热量为: $Q_{ihx} = \dot{m}_{ref}(h_3 - h_{4'}) = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_5)$

1.3.4 蒸发器吸热

蒸发器吸收的热量为: $Q_{evap} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_3) = UA_{evap}(T_{air} - T_{evap})$

1.3.5 箱体漏热

$$Q_{cab} = \sum_{i=1}^n K_i A_i \delta T_i$$

$$\delta T = T_{out} - T_{in}$$

制冷系统的能量传递与转化关系示意图2，制冷剂循环状态可在压焓图上用图3进行标示：

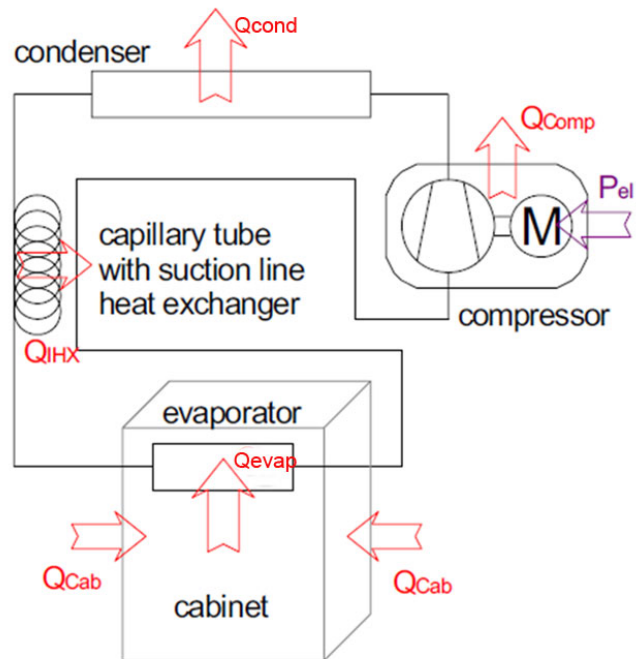


图3 制冷系统的能量转化示意图

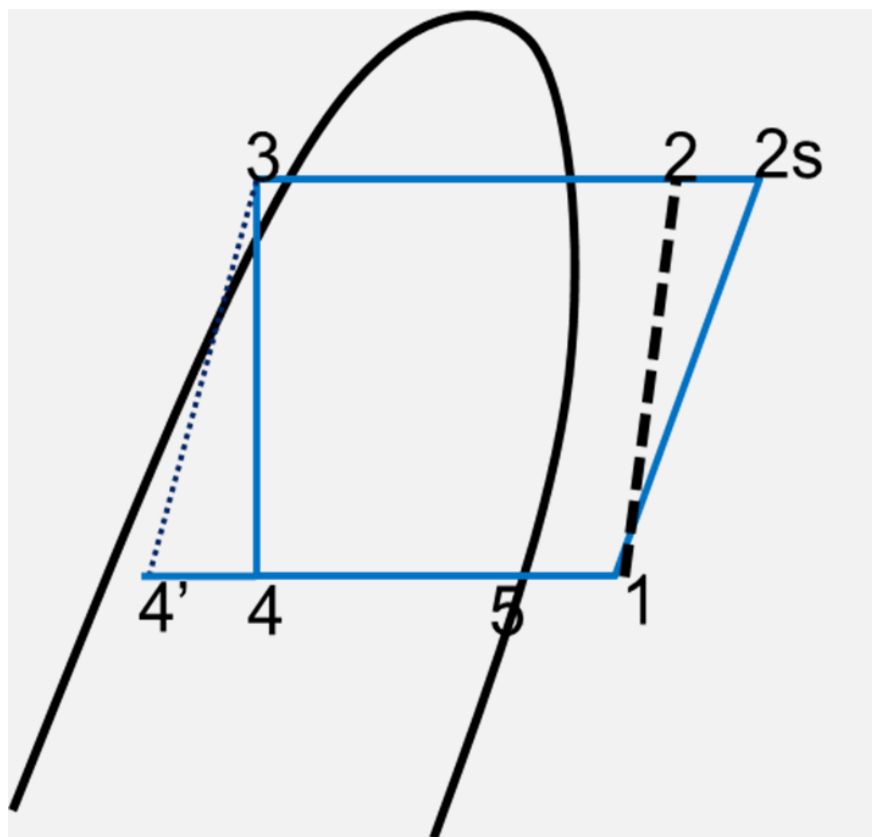


图4 制冷剂循环在压焓图上的表示

1: 压缩机吸气入口 2s: 压缩机排气出口 2: 压缩机排气管出口 3: 过滤器（毛细管入口） 4':蒸发器入口（毛细管出口） 4:绝热节流过程毛细管出口 5: 储液器入口（蒸发器出口）

二、制冷剂在系统中的运动和循环

蒸汽压缩式制冷循环（朗肯循环）利用制冷剂的流动和状态变化，实现能量的转化和运输。其优点在于气体-液体的相变转化过程吸收/释放的热量要远大于显热的吸收和释放，从而实现了系统的小型化。理解制冷系统运行过程中制冷剂的运动和变化规律，是理解制冷系统设计原理的基础。

2.1 拉低温过程制冷剂的迁移

当冰箱处于未启动状态，箱体内外温度、制冷系统高低压力平衡的状态下，制冷剂除部分溶解在压缩机润滑油内，其它全部以气态存在于系统中。

从压缩机启动到运行约1min的时间内，瞬间蒸发器内气态制冷剂被抽进压缩机，此时蒸发器侧制冷剂的压力/温度都会急剧下降，由于蒸发器内没有液态制冷剂，压力下降会造成压缩机吸气流量迅速衰减；此时冷凝器侧因为高温制冷剂排入，压力迅速升高，由于毛细管的阻力作用，大量制冷剂滞留在冷凝器内，在毛细管两侧很快形成压差，驱动制冷剂通过毛细管流向蒸发器侧，刚开机的1min之内是没有液态制冷剂流过毛细管的，有液态制冷剂流过大约需要3min以后，在过滤器内会形成稳定的液位。

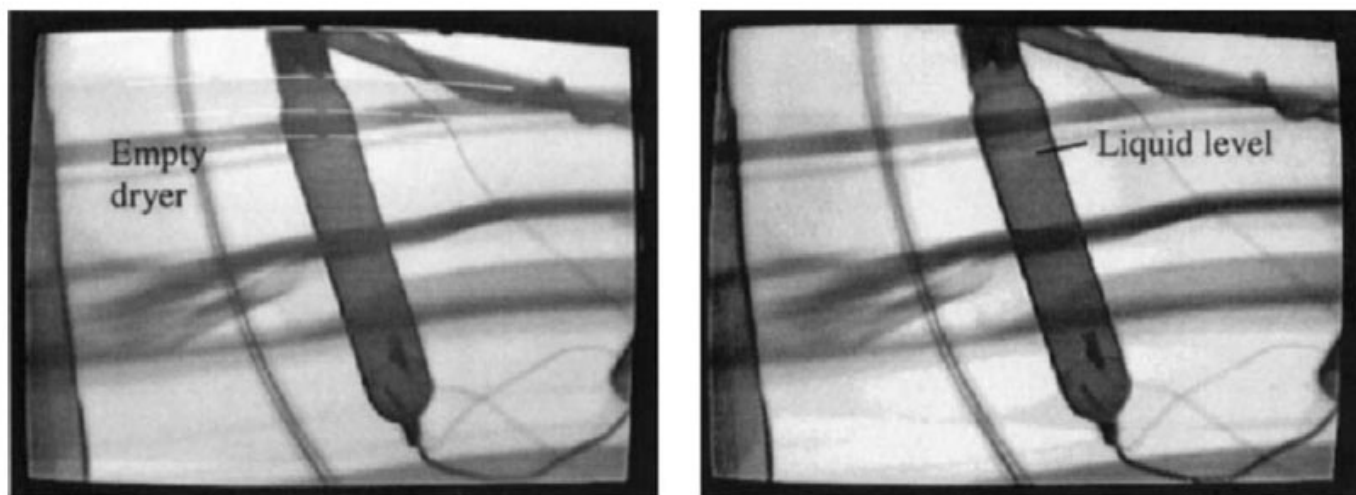


Fig. 5. Dryer images when it is filling with refrigerant liquid.

图5 过滤器内液态制冷剂的形成（左-未开机；右-开机3min以后）

此后由于蒸发器开始和箱内热空气换热，流经蒸发器的制冷剂的温度和压力开始回升，压缩机吸气流量开始增大，导致冷凝器侧压力继续上升，冷凝器侧过冷度会呈现增大的趋势；大约20~30min后，系统的冷凝压力会达到拉低温时的峰值，此时就是系统的最大负荷点。

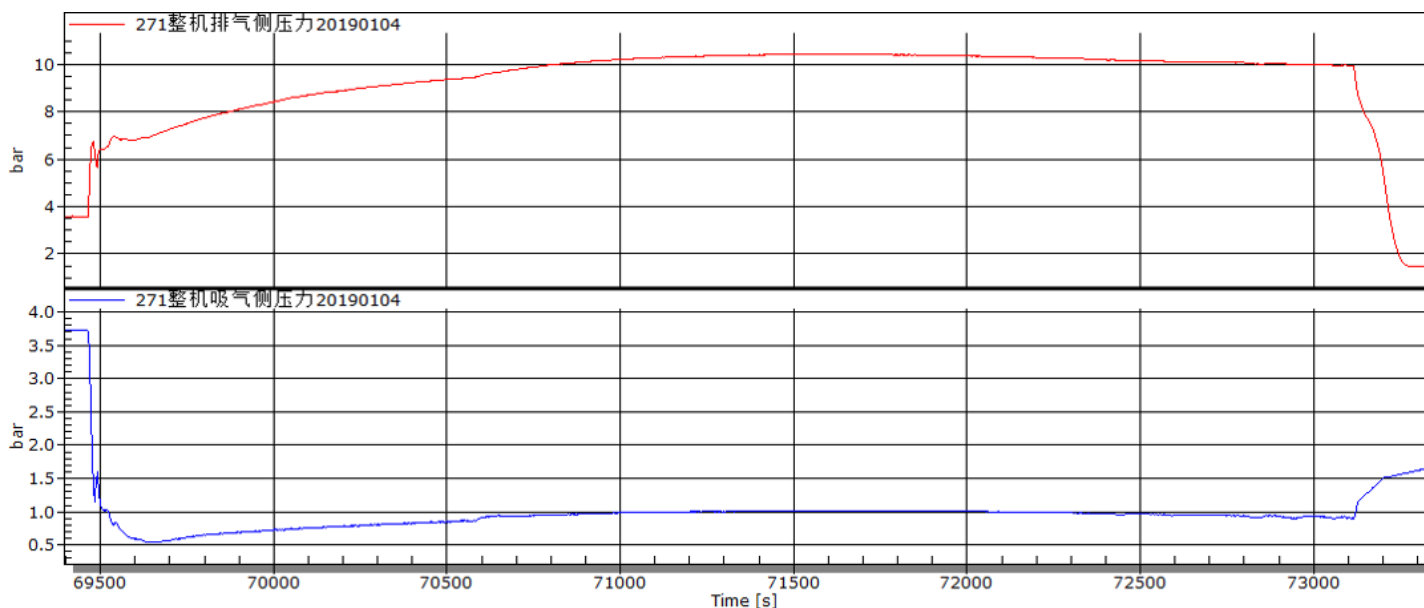


图6 某冰箱43度拉低温过程高低压力曲线

当系统过了最大负荷点后，冷凝器侧/蒸发器侧压力均下降，此后箱内空气的温度会主导系统工况的变化；冷凝器的过冷度开始变小，制冷剂开始由冷凝器侧迁移至蒸发器侧，可以观察到蒸发器的过热度逐渐减小直至消失。毛细管与压缩机的质量流量趋于平衡。

每当系统出现压缩机流量突然增大的情况，就会出现制冷剂从蒸发器迁移，冷凝器过冷度升高的情况，同时可能伴随着蒸发器短暂过热。

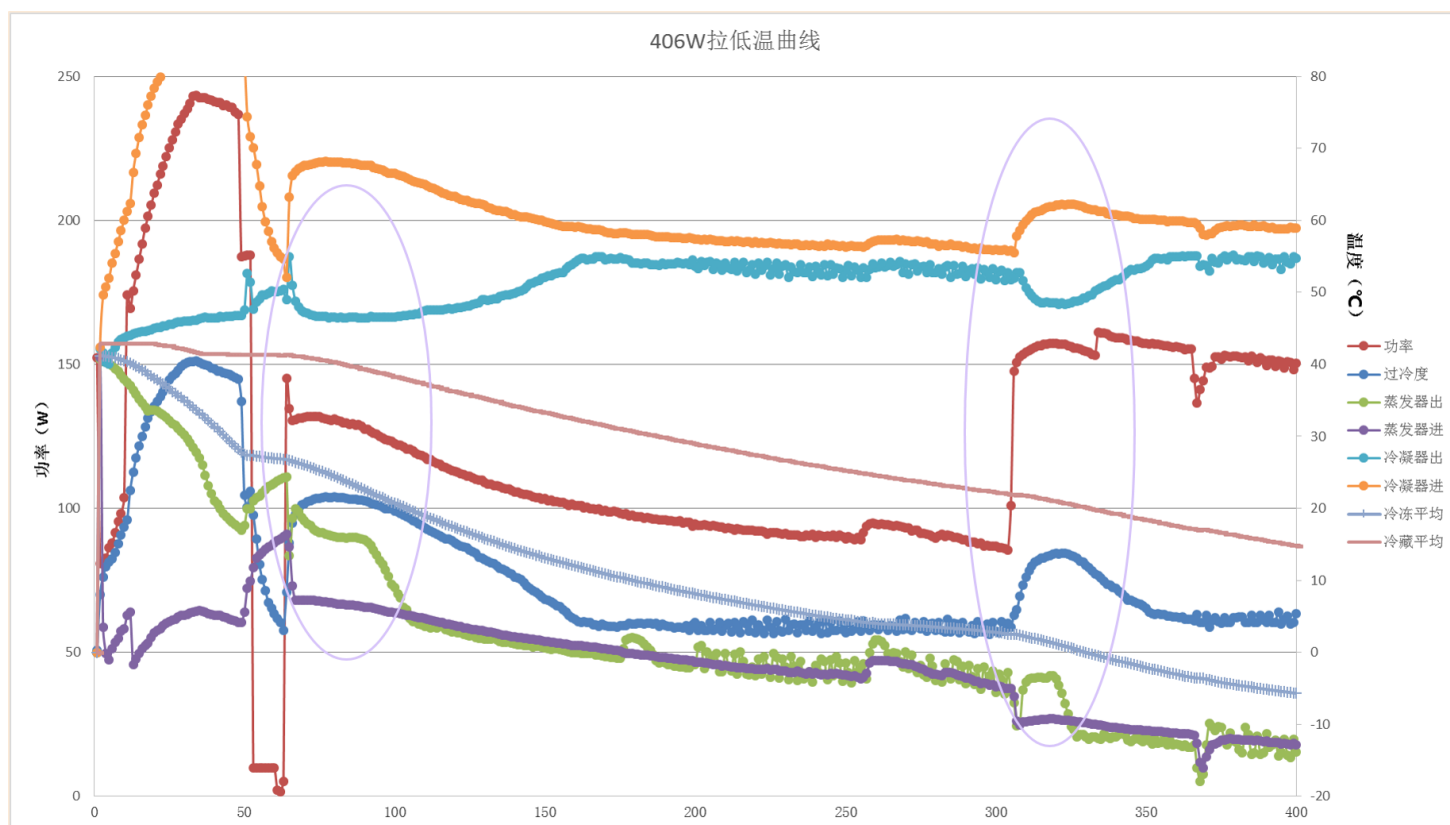


图7 某冰箱43度拉低温过程工况温度曲线

2.2 开停机过程的制冷剂迁移

当冰箱运行稳定后，冷凝器过冷度降至稳定值，液态制冷剂从冷凝器中迁移至蒸发器中，蒸发器和储液器的液态制冷剂量逐渐增加直至达到稳定。

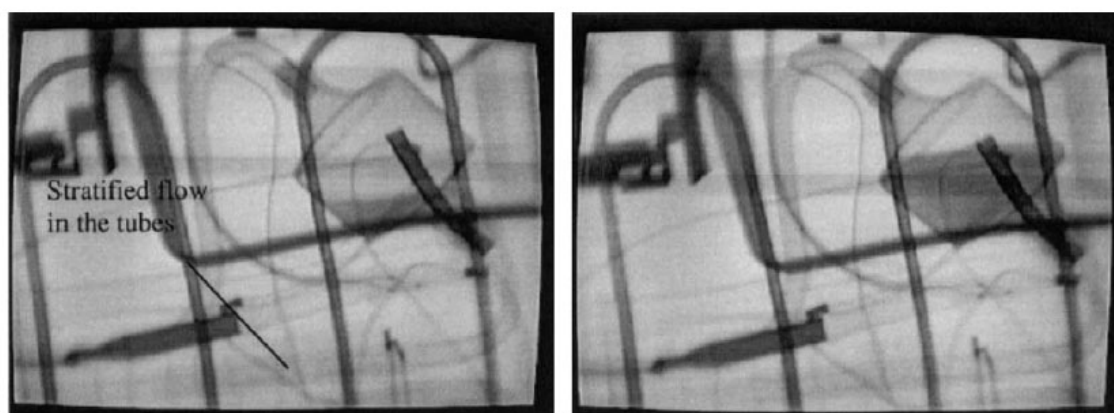


Fig. 6. Liquid level in the accumulator. Left: In the beginning of liquid accumulation. Right: the maximum liquid level in the accumulator (Because of x-ray probe view-angle, evaporator tubes are looking tilted. They are normally in horizontal position).

图8 停机前蒸发器及储液器X光照片

当压缩机停机后，压缩机流量瞬间停止,但此时毛细管两侧压差仍然存在，所以仍然会有制冷剂从冷凝器向蒸发器内迁移，从蒸发器入口温度曲线可以观察到；此时过滤器内剩余的制冷剂会随着压力降低而汽化，造成过滤器的温度在压缩机停机后突然降低至环温以下，甚至可能产生凝露或结冰现象。一般情况下，在停机段，会有大量的制冷剂滞留在蒸发器内，储液器内的制冷剂会通过回流孔倒灌回蒸发器

内。当压缩机再次开机，则会将液态制冷剂赶向压缩机吸气侧，储液器会出现一个充液的过程，储液器内液位升高，如果此时漫过内插管，则会有液滴被吸入压缩机，有潜在的液击风险。

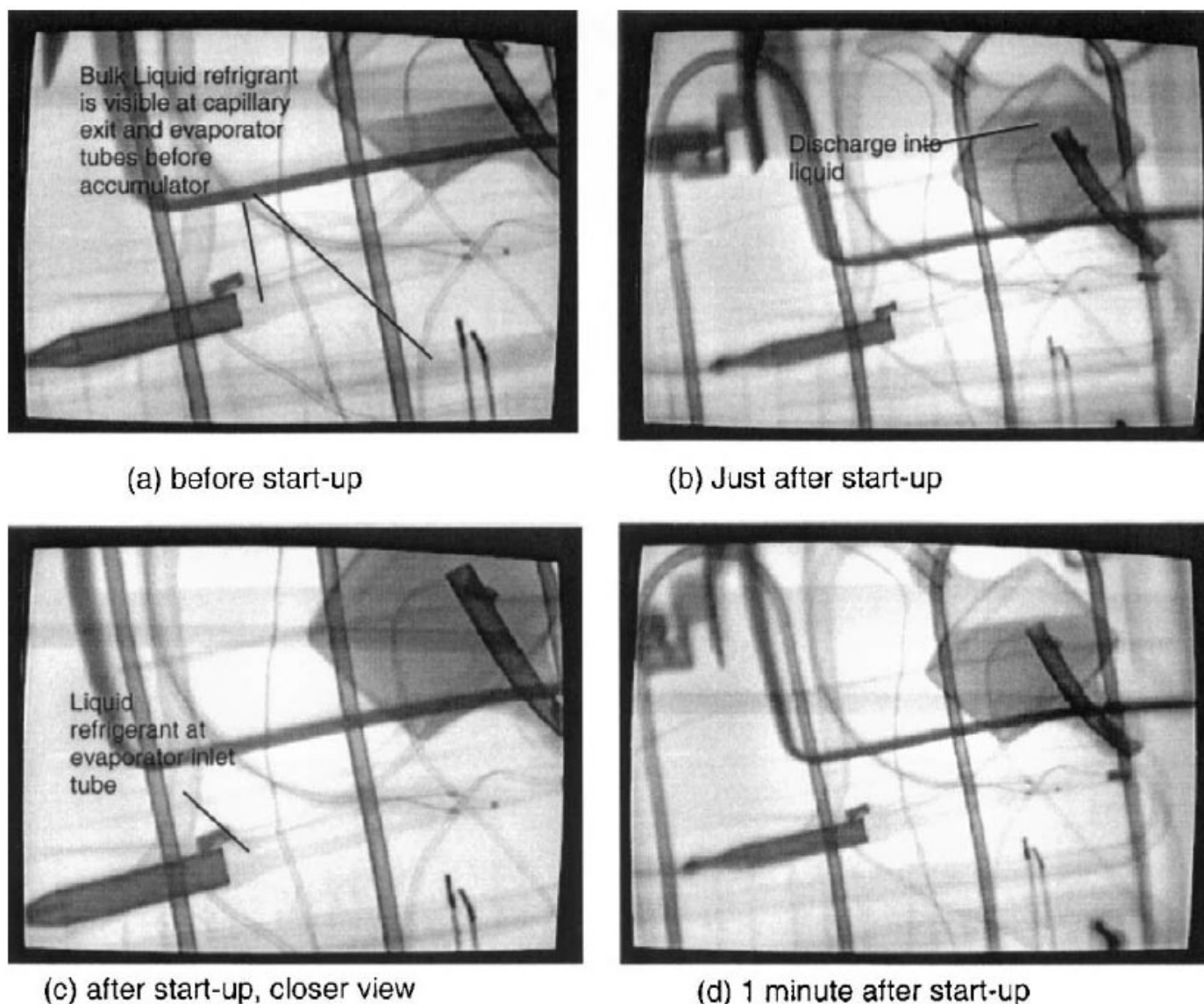


Fig. 8. Accumulator and capillary exit sections' view when compressor starts after first period.

图9 开机过程蒸发器及储液器X光照片

2.3 保压原理

如前所述，当制冷系统停机后，由于毛细管进出口压差仍然存在，冷凝器内制冷剂继续向蒸发器内迁移，同时由于冷凝压力下降，原来存储在冷凝器末端的液态重新汽化；毛细管两侧压力平衡后，随着停机时间的延长，冷凝器内压力和蒸发器内压力都升高，下次开机则会有更高的吸气流量瞬时排向压缩机，导致压缩机功率远高于稳定状态；同时由于停机时间较长，冷凝器内制冷剂量很少，需要较长的压缩机运行时间才能被“激活”，产生液态制冷剂供给蒸发器实现制冷。也就是说：刚开机的若干分钟，压缩机的能量会被用来将制冷剂重新搬运至冷凝器侧，而这一过程不会产生显著的制冷量，降低了系统COP。

如果在冷凝器和毛细管之间加一个阀门，在压缩机停机后切断制冷剂流向蒸发器，则可以在相当长

一段时间内保持冷凝器侧压力高于蒸发器侧，蒸发器侧压力上升速率变慢，当下次开机时，不会产生大吸气流量冲击导致压缩机功率升高的现象，同时由于冷凝器内仍然留存了大量制冷剂，产生有效制冷量的时间提前，压缩机提供的电能得到有效利用。

保压阀在压缩机停机时间较长的情况下能够产生可观的节能效果；在变频冰箱系统中应用时，32度由于停机时间短，节能效果不明显，但16度环温时可以节约1W左右的功耗。

2.4 系统制冷剂灌注量

制冷剂的充注量匹配，就是要保证制冷系统在各种状态下，蒸发器维持最低的过热度，同时不会有液态制冷剂通过回气管线进入压缩机内。

而蒸发器的管内容积对制冷剂充注量的多少影响较大，而冷凝器影响较小，但如果冷凝器设计容量过大，过冷段管线太长，则系统在低环温运行时，制冷剂长时间存在于冷凝器内部，造成蒸发器严重缺液，系统蒸发压力过低，流量太小，冰箱将无法正常运转。