

CSB 经典案例分析—米勒德冷藏服务公司制冷系统水击导致液氨泄漏事故

唐彬¹ 天津市居安企业管理咨询有限公司
网站：www.justsafety.com.cn
电话：13802084672
邮箱：tangbin@justsafety.com.cn
何琛² 上海于睿商务咨询有限公司



扫描二维码关注我们吧!

1. 事故摘要

2010年8月23日早上9:00左右，位于美国阿拉巴马州的米勒德冷藏服务公司（以下简称“米勒德公司”）正在对装有冷冻家禽肉的两艘国际船舶进行装载作业。此前米勒德公司发生电力故障持续了7小时，在制冷系统重启过程中发生严重的水击事件，造成制冷管线系统发生灾难性失效，约14.6t的无水氨泄漏。泄漏的大部分氨源于安装在制冷系统顶部的直径约300mm的低温吸入管线破损处，如图1所示。大约同一时间，水击形成的高压还造成系统内部气流冷冻器的蒸发器盘管破裂，如图2所示。空气监测设备检测到高浓度氨气启动报警，3名米勒德公司人员立即找到泄漏地点，试图关闭向气流冷冻器输送氨的手阀来控制泄漏。下午1:20左右泄漏得到控制，此时距离泄漏发生时已4小时。



图1：直径约300mm的低温管线破裂



图2：蒸发器盘管焊接位置失效

蒸发器盘管失效泄漏的氨造成约3629t的冷冻家禽肉和包装材料受到污染。泄漏形成的无水氨蒸气云随风向南扩散穿过厂区旁边的西奥多工业运河，扩散到下风向400m处，如图3所示。氨泄漏事故造成1名米勒德公司员工由于吸入氨气短时间失去意识，位于泄漏地点下风向的9名船舶机组人员和143名在“深水地平线”溢油事故清理场地作业的户外人员遭受不同程度的氨气暴露。其中，32人需要住院治疗，4人情况严重，进入重症监护室。



图3：事故发生区域平面布置

2. 米勒德公司液氨制冷工艺

米勒德公司主要向海外供给冷冻肉类食品，采用液氨制冷工艺，制冷系统中大约存有64.86t

的液氨，为5个产品储存冷库和3个气流冷冻器降温制冷。制冷系统处理液氨的设计最低温度为-40℃，设计最高温度为43℃，正常情况下操作压力为29.8kPa~1447.89kPa。

米勒德公司液氨制冷工艺流程如图4所示。液氨经蒸发器作用由液态转化成气态的过程中，冷库中的热量被带走，温度降低；然后低压氨气经压缩机加压成为高压蒸汽，在冷凝器中经换热重新凝结为液体。制冷流程是一个循环的封闭系统，在制冷循环过程中不会生成也不会消耗氨。

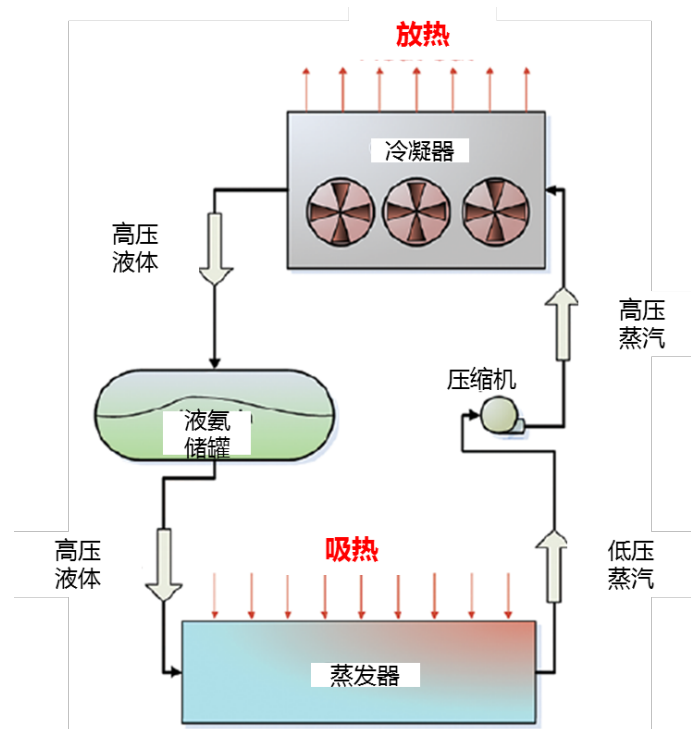


图4：制冷工艺简化流程图

3.1 无水氨特性

常温常压下无水氨（ NH_3 ）为气态，无色，具有刺激性气味。气态条件下无水氨密度略轻于空气，且易溶于水。液氨泄漏到空气中时，会形成带有水分的白色气雾，由于密度较大，氨气云团趋于沿地表扩散，这种现象对于周围区域的暴露人员非常危险。氨对眼睛和呼吸系统有刺激作用，如果暴露在较高浓度条件下会有致命危险。检测结果显示当天泄漏事故发生后气流冷冻器内部的氨气浓度高达7275ppm。根据美国国家职业安全与健康学院的应急手册，氨对人员生命或健康造成危险的暴露浓度限值是300ppm（暴露30分钟），如果暴露在2700ppm浓度环境中10分钟，人员有生命危险。无水氨与空气混合物浓度达到可燃范围且遇

到点火源的情况下，还会发生严重的爆燃事故。2007年6月，一家冷冻食品厂发生一起由蒸气驱使的液体段塞导致的水击事件，产生瞬态高压，造成螺旋冷冻机盘管失效，液氨泄漏，氨气云团扩散并达到爆炸浓度时，附近自动饮水机电线产生的电弧成为点火源，发生爆燃。

3.2 除霜循环流程

大型制冷系统冷却模式运行过程中，由于温度较低，空气中的水分会在蒸发器盘管外表面上结霜凝结。如果不定期进行除霜，盘管表面逐渐积累的霜最终会降低热传递效果，蒸发器冷却能力大大降低。热气除霜循环工艺通过暂停正常冷却模式，利用压缩机排放的高温气态制冷剂在盘管内循环，蒸发器表面温度升高，定期融化盘管表面积累的霜。

除霜循环工艺流程如图5所示。除霜开始时，关闭向蒸发器输送液氨的供给阀，同时允许蒸发器风机继续运转，直至盘管内残余的液态制冷剂完全蒸发。然后，吸入截止阀关闭，将蒸发器盘管与系统的低温部分隔离，同时旁路管线上的热气阀打开，将来自压缩机的高温氨气通入蒸发器盘管。热气的引入通常分为2步：第1步，称为“软气”，在打开热气主阀前，通过小阀门慢慢把高压高温气态制冷剂引入蒸发器盘管内；第2步，打开较大的热气主阀通入更大速率的热气流，加热蒸发器盘管表面，凝结积累的霜被融化，同时高压气体制冷剂在盘管内冷凝为液体。冷凝而成的液态制冷剂连同未完全冷凝的气态制冷剂通过除霜泄压阀恢复至装置的中间压力等级。除霜完成后，热气阀关闭，打开压力平衡阀使得盘管内部缓慢降压。然后，打开吸入截止阀和液氨供给阀，对蒸发器进行再降温。最后，风机重新供电，继续常规的冷却模式制冷循环。

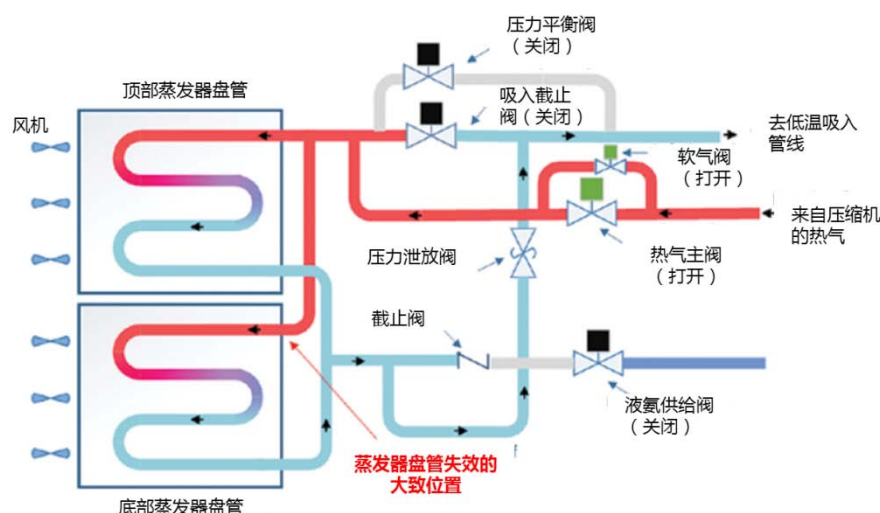


图5：热气除霜简化流程图

3. 水击形成机理

水击（“水锤”）是一种异常的瞬态条件，通常发生在管道或设备内部，当液体流速发生急剧变化时会突然形成局部的压力峰值。在液氨制冷系统中，水击事件能够产生非常高的压力，严重时可能造成管道、阀门和其他设备部件发生灾难性失效。当蒸汽和液氨同时存在于同一管线中，且受到体积突然变化的干扰时，通常能产生最高的瞬时压力值。实验证明，从管线或阀门处产生的敲打声也能形成比较温和的水击现象，产生一定压力。

液氨制冷系统中，三种常见的干扰机制能够产生水击现象：

- **液体突然减速或“水锤”**：输送液态流体的管道阀门快速关闭，液态流体突然停止，阀体和相连管线内部产生压力峰值，形成水击。
- **蒸汽驱使的液体段塞**：含有部分液体的输送管道内的高压蒸汽可能携带充足体积量的液体，充满整个管道断面，产生液体段塞。这些液体段塞快速移动，碰到障碍物（如阀门或管端盖板），流动液体的动量传递给阻塞部件，导致压力急剧上升，形成水击。
- **冷凝导致的冲击**：同时含有液体和蒸汽的管道内，高压制冷剂蒸汽快速冷凝液化。随着氨蒸汽的冷凝，蒸汽体积急剧减小（约降低1000倍），导致液体局部加速。当加速的液体遇到障碍物，形成瞬时高压。

液氨制冷系统中造成冲击的一个常见原因是连接高压管段和低压管段的阀门快速打开。如果盘管迅速降压，液态和气态制冷剂加速通过吸入截止阀进入下游管线。气态制冷剂突然降温凝结成液体，被限制的气体空隙形成压力并迅速凝结，产生局部真空，形成冷凝引发的水击现象，如图6所示。在-40℃条件下，氨由气态变成液态，体积将减小约1000倍。体积的降低会导致系统其他部分流体的引入，当液体流动加速后以较高速度遇到障碍物，例如管端盖板时，液体被突然停止并在管线上施加较大的冲击力，严重时可能导致系统部件的失效。米勒德公司制冷系统发生的水击很可能是由于冷凝和气体驱使联合作用形成的，这两种机理在液氨制冷系统水击事件中通常是同时作用的。

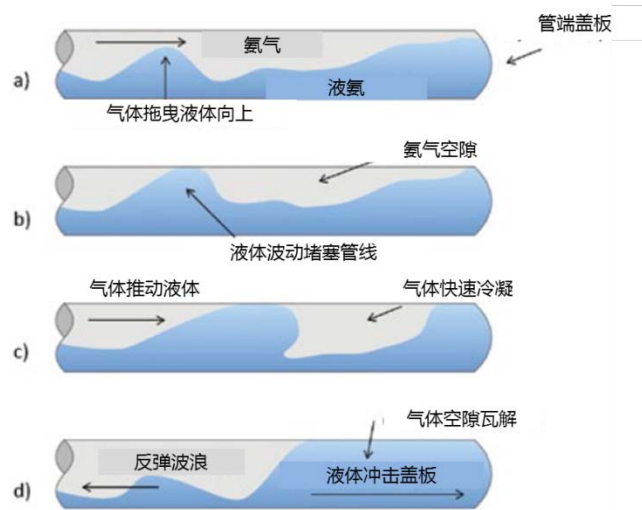


图6：冷凝导致的冲击发展过程

4. 米勒德公司制冷系统水击导致液氨泄漏事故原因分析

4.1 电力故障

事故发生前，米勒德公司制冷系统出现电力故障，时间长达7小时。系统恢复供电后试图寻找设备故障问题时，制冷系统操作员手动清除了报警信息，导致正在进行的气流冷冻器蒸发器除霜循环中断。在没有完成蒸发器盘管热气泄压情况下，蒸发器直接从除霜模式转换成制冷模式。为了防止盘管内压力迅速下降，当低温吸入截止阀打开前，泄压操作是必须的。盘管内压力迅速降低增加了蒸发器盘管和相连管线发生水击的风险。

由于操作员手动干涉清除了报警，重置了控制系统，导致系统没有识别到重启过程中打开吸入截止阀时气流冷冻器蒸发器单元内还存有高压热气。控制系统发出信号同时打开吸入截止阀和液氨供给阀，将蒸发器转入冷却模式运行。自动设置好的除霜过程被手动旁通，导致低温液氨和高温热气在同一管道内混合，热气迅速液化，形成水击现象，由此产生了极具破坏性的高压。

4.2 蒸发器设计

造成这起事故的另一个原因是米勒德公司制冷系统气流冷冻器蒸发器的设计和配置问题，特别是将4组蒸发器盘管连接到一个控制阀组上，包括2组蒸发器，每组蒸发器垂直安装2组盘

管。液氨从盘管底部进入，热气从顶部进入盘管，如图5所示。在冷却模式和除霜循环过程中，一个阀组控制了所有4组蒸发器盘管的液体供给和热气。

这一设计方法减少了蒸发器需要安装的控制阀的总体数量，降低了系统成本。但是当吸入截止阀突然打开时，4组蒸发器盘管内的物料总量（热气体积为 1.70m^3 ，压力为 483kPa ）进入低温吸入管线，4组蒸发器盘管内储存的大量能量在吸入管线内迅速液化，形成水击现象，巨大冲击力造成蒸发器管线网和顶部管线破损。因此，考虑到较差的控制能力和较大的内部盘管体积，应避免采用这种将多个蒸发器组连接到同一控制阀组的做法。

4.3 操作问题

（1）泵出时间过短

泵出作业是除霜循环的第一步，目的是在引入热气前消耗蒸发器盘管内残余的液氨，这样热气即可直接加热盘管表面，增加除霜效率。在关断或者低负荷运行过程中，液态制冷剂会在蒸发器盘管底部聚集。如果蒸发器经长时间低负荷运行后进行热气除霜作业，通入热气时残留液体可能引起水击现象。因此，确保足够长的泵出时间非常重要，将盘管内残余液氨抽出。根据米勒德公司文件，气流冷冻器蒸发器除霜定时器最初设定泵出循环是20分钟，而CSB调查员通过查阅控制系统数据，发现事故发生前很长一段时间泵出循环时间均为15分钟。

（2）液氨系统紧急关断

泄漏事故发生后，米勒德公司员工立刻试图通过手动关闭阀门把设备与工艺过程隔离，控制泄漏，而与低温吸入管线相连的所有其他设备仍然在运行中，而且氨液继续进入已经破损的失效管线中。如果操作人员使用米勒德公司控制室内的紧急停车按钮，关闭压缩机和机泵，关闭阀门，阻止氨液循环进入其他蒸发器，可以有效减少从失效管线泄漏出来的氨液量和泄漏持续时间。

米勒德公司应急程序指导作业人员应找到并隔离泄漏位置，规定“要求通过关闭阀门隔离管线或设备控制氨泄漏”，应急程序也确定了紧急停车按钮启动的标准，包括自然灾害和停车被授权人员视为必要措施的其他任何紧急情况。然而，事故当天，装置工程师选择找到并隔离泄漏的应急措施，而不是关断系统。

5. CSB 调查组建议

- (1) 关于液氨制冷系统的设计，应避免多个蒸发器组与同一组控制阀相连，特别是对于容量超过20t的大型蒸发器，这一点尤为重要。配备热气除霜系统的蒸发器应通过与每个蒸发器盘管配对的单一控制阀组进行控制。
- (2) 除霜控制系统应设置联锁保护，确保在出现电力故障、循环中断或其他异常情况时，热气除霜循环启动和结束过程中低温液氨供给和热气保持隔离状态。
- (3) 应避免除霜循环过程中出现人为手动干扰情况，控制系统设置密码保护，确保只有经过培训和被授权的人员才有权限手动重置系统程序。
- (4) 对于以时间为基准的热气除霜系统，应确保足够长的泵出时间，在通入热气前（特别是经过低负荷运行或电力中断后）把蒸发器盘管内残留的液态制冷剂抽出。
- (5) 氨泄漏事故中，如果不能迅速隔离泄漏设备，应及时启动紧急停车开关，关停机泵、压缩机和相关阀门，不要在制冷系统仍然运行状态下试图隔离泄漏设备。关停设备能够停止氨液的循环，有效限制从失效设备或管线中泄漏的物料量。

居安咨询与2015年7月成立微信公众平台，旨在提升化工各行业企业安全管理绩效为目标，以整合专业安全资源为途径，致力打造国内具有实用性的安全理念，安全知识，安全技术以及安全良好实践发布、共享、传播、在线交流互动平台。在我们平台上有我们原创的安全相关的知识性文章发布，若您感兴趣也可以给我们投稿，我们会有相应的稿费哦，投稿邮箱：tangbin@justsafety.com.cn。扫描下面的二维码加入我们吧！

