

汽水灌装过程中防反喷机理的探讨

安徽省宿县地区科委情报所 王景彬 盛国英 宋光生

摘要: 本文首先根据亨利定律对汽水在灌装过程中产生反喷的原因进行了分析,并对目前生产中采用的几种防止反喷机构的工作原理和性能进行了评述,在此基础上,提出一种新型的防止反喷机构,并对其设计原理及主要技术参数计算进行了探讨。

汽水灌装后出现的反喷现象,不仅浪费了大量的成品汽水、给工作环境带来一定的污染,而且由于大量 CO_2 气的逸出,造成汽水中的 CO_2 含量不足,影响汽水的产品质量。

长期以来,许多科技工作者对汽水灌装后产生的反喷现象从理论上进行了大量探讨,并对混合机构,灌装机构以及工艺流程等方面采取了相应的技术措施,以达到防止汽水灌装后产生反喷之目的,但应用效果往往有一定局限性,都不够理想。为此,笔者根据多年的学习体会,并在模拟实验的基础上,对防止反喷机构原理进行了探讨,在此作引玉之砖,以供同行专家赐教。

一、汽水灌装后产生反喷的原因

采用等压灌装时,汽水灌装完毕后,灌装头脱离汽水瓶口的一瞬间,瓶内常会出现大量的泡沫并涌出瓶外,这种现象习惯上称为反喷现象。反喷现象是一种物理变化,实质是气体在溶液中溶解过程的变化。汽水是 CO_2 汽溶于水溶液后而得到的一种碳酸饮料,因此, CO_2 气

在溶液中的溶解情况可用亨利定律来说明。

在一定温度条件下,在单位液体中溶解的气体量与气液体系保持平衡时的绝对压力成正比,称为亨利定律。对于 CO_2 气来说,在压力小于 $4.9 \times 10^5 \text{Pa}$ (5kg/cm^2)时服从亨利定律。

亨利定律的表达式为:

$$W_0 = KP = K(p + P_0) \dots\dots\dots (1)$$

W_0 : 单位量液体中溶解的气体量;

P : 气液体系平衡时的绝对压力;

p : 气液体系平衡时的表压力;

P_0 : 大气压强、一个标准大气压强 $P_0 = 101 \text{KPa}$, 工程上习惯于使用工程大气压、其值为 98KPa ;

K : 亨利常数, 其值表示在一定压强下,不同温度时,气体在液体中的溶解度。表1列出一个大气压下 CO_2 气的亨利常数。

当某一液体体积为 V 时,其溶解的气体量为 W :

$$(W = K, P, V = K(p + 9.8 \times 10^4) V \dots (2)$$

显然,当汽水灌装完毕后,灌装头脱离瓶口的瞬时,瓶内液面上部的压力气体与大气相

表1 一个大气压下 CO_2 的亨利常数

温度 $^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
溶解度	1.713	1.646	1.585	1.527	1.473	1.424	1.377	1.331	1.282
温度 $^{\circ}\text{C}$	9	10	11	12	13	14	15	15.56	16
溶解度	1.237	1.194	1.154	1.117	1.083	1.050	1.019	1	0.985
温度 $^{\circ}\text{C}$	17	18	19	20	21	22	23	24	25
溶解度	0.956	0.928	0.902	0.878	0.854	0.829	0.804	0.781	0.759

通,因此具有一定压力的 CO_2 迅速从瓶内逸出,并使瓶内汽水液面上的压力骤然下降,直至与大气压强平衡。由于这一过程时间极短,因此可认为温度不变。

根据亨利定律可知:汽水液面压力降低时,瓶内汽水成为过饱和碳酸化溶液,气液体系失去了平衡,为了达到气液体系新的平衡, CO_2 在汽水中的溶解度必需相应减少,所以在瓶内的压力气体向外冲击时,溶解在汽水中的 CO_2 亦随之大量涌出,并形成大量泡沫喷出瓶外,这就是汽水产生反喷的根本原因。

二、常见的几种防止反喷方法浅析

1. 节流排气法

目前采用等压灌装法生产汽水时,当灌装汽水至一定量后,灌装机上凸轮打开排气阀,将汽水瓶中液面上部的压力通过节流排出,以避免灌装头脱离瓶口时产生反喷现象,正如日常生活中开汽水瓶盖或啤酒瓶盖一样,如骤然打开,则会有大量泡沫向外喷出,如将瓶盖开一隙缝,使瓶内的压力气体通过节流排出,然后打开瓶盖,瓶内将不会有大量泡沫涌出,这种节流排气的物理现象如下:

在某温度 T (假设 $T=\text{常数}$)和 P_0 的作用下,溶解于溶液中的 CO_2 为 α_0 ,当压力降为 P_1 时, CO_2 有可能并未从溶液中解吸(溶解于溶液中的气体分子返回气相,物理学中称为解吸),此时溶液中的实际溶解度仍为 α_0 ,但由于液体表面压力的降低,因此根据亨利定律,溶液中 CO_2 的溶解度应下降为 α_1 ,则 $\alpha_0 - \alpha_1$ 为溶解于该溶液中 CO_2 的过饱和量。当压力继续降到某一 P_f 值时,溶液中过饱和的 CO_2 将突然由溶液中迅速分离,以混入溶液中的微细气泡为核心聚集成核,使溶液中产生大量的气泡,我们称压强 P_f 为该溶液在 T 温度下的气体分离压。对于不同的溶液其分离压值不同,溶液的温度愈低,其分离压值愈低。显然,对溶液进行冷冻处理,不仅提高了 CO_2 在溶液中的溶解度,而且降低了 CO_2 的分离压,提高了

CO_2 在溶液中存在的稳定性。

分析上述物理现象可知:采用节流排气,主要是控制泄压过程中,不致使 CO_2 同时迅速到达分离压值,而是在节流中逐步分离,所以不会有大量泡沫涌出瓶外,从而实现防止反喷的目的。

但是,由于不同品种的汽水其含气量要求不同,因此在灌装完毕后,汽水瓶中液面上部的 CO_2 压力值也各异。而在排气机构中,排气阀的开启时间和开启大小往往是定值,所以对于要求含气量低的汽水,可能在灌装头未脱离瓶口之前,瓶内的压力气体已通过节流排完,而对于要求含气量高的汽水,则可能在节流排气时间内尚未排完,因此在瓶口脱离灌装头时,致使瓶内残存的压力气体突然释放出来,造成汽水大量反喷。这就是采用节流排气,防止反喷效果不稳定的原因。所以,节流排气法对要求含气量少的汽水防止反喷效果比较理想,而对于含气量大的汽水则效果不佳。

2. 冷却工艺法

在生产中,混合机和灌装机的连接一般采用直接连接法,如果混合机混合出来的溶液为饱和碳酸溶液,则由混合机输送至灌装机的过程中,液体的温度会自然升高,使饱和碳酸化溶液变为过饱和碳酸化溶液,因此在灌装过程中, CO_2 会从溶液中涌出,尤其在灌装压力降低时会产生过多的泡沫,使瓶中汽水无法灌装,即使采用等压原理灌装并进行节流排气,有时也很难达到理想的效果。

为了克服由于温度或压力变化所引起的反喷现象,可以利用比混合时更低的温度对已混合好的饱和碳酸化溶液再进行一次冷却。由表1可以看出,当温度降低时, CO_2 的亨利常数增大,因此溶液中可以溶解更多的二氧化碳气,但由于二次冷却是在混合后进行的,因此没有 CO_2 进行补充,故溶液变为不饱和碳酸化溶液,反之,如假设仍为饱和碳酸化溶液,由于亨利常数值的增加,则其所需的气液体系平衡压力必然降低。另外,由于温度的降低,使液体

分子间距减小,分子间引力增大,提高了溶解于液体中CO₂的稳定性。所以采用冷却工艺法,在一定条件下,能有效地防止反喷现象的产生。

例如:在生产柑桔汽水时,要求汽水中的含气量(容积倍数)为1.5~2.5倍,设CO₂与溶液的混合温度为20°C,如灌装前将碳酸化溶液冷却至0°C再进行灌装,是否会产生反喷现象呢?

如取柑桔汽水的含气量为1.713倍,则CO₂在单位量液中的溶解度 $W_0=1.713$, 20°C时所需的混合压力值 $P=\frac{W_0}{K}$ 。

由表1查得, 20°C时 $K=0.878$,

$$\therefore P=\frac{1.713}{0.878}=1.951\text{kg/cm}^2(190\text{kPa})$$

由于灌装前将碳酸化溶液冷却至0°C,因此亨利常数由0.878增至1.713,又因为单位量液中CO₂含量 W_0 未变,故此时单位量液中CO₂溶解度所需的压力为:

$$P'=\frac{W_0}{K_0}=\frac{1.713}{1.713}=1\text{kg/cm}^2(98\text{kPa})$$

由于 P' 值与一个标准大气压基本相等,所以在灌装完毕后,不会产生反喷现象。

上述分析虽然是一个特例,但理论与实践均证明:对常温下混合的碳酸化溶液进行再冷却,在灌装时有比较理想的防止反喷效果,但对0~4°C状态下混合的碳酸化溶液,若采用再冷却,由于其亨利常数值变化不大,所以防止反喷效果不佳。另外,对某些要求含气量大的碳酸化饮料,如苏打水、矿泉水等,由于其含气量为4~5容积倍数,因此即使采用常温混合后再进行低温冷却,使其变为不饱和碳酸化溶液,但因冷却后含气量仍然较高(气体分压较高),所以在进行等压灌装时,仍需使瓶内比较高的压力气体进行节流排气。当然,在此种情况下,对缩短排气时间,防止反喷产生,也有一定的效果。

采用冷却工艺法虽然在一定条件下具有比较理想的防止反喷效果,但是由于在灌装之前进行冷却,因此增加了设备和工艺的复杂性。

3. 过压力法

采用过压力法防止汽水灌装后产生反喷,在生产实践中已经取得较好的效果。所谓过压力法即在已饱和的碳酸化溶液液面上,再施加一个额外压力 P_A ,这时饱和碳酸化溶液面上的压力变为 $P+P_A$,其中 P 为气液体系平衡时气相中的气体分压,亦称平衡分压, P_A 为过压力。由于气相中过压力的存在,使原有的气液体系平衡状态失去了平衡,气相中一部分CO₂分子在原气相分压 P 和过压力 P_A 的共同作用下,进入并溶解于液体内部。由亨利定律知,此时碳酸化溶解由饱和状态转变为不饱和状态。由于液体分子之间引力较大,并且密度又远远大于气体(一般比气体大一千倍左右),所以,分子在液体中的扩散要比在气体中的扩散慢得多。因此,虽然液面上具有一定的CO₂过压力,但在没有进行充分混合的条件下,不可能在短时间内使溶液全部变成为饱和碳酸化溶液。图1中曲线表明了增加过压力后,CO₂在溶液中的溶解度变化。

由于增加了过压力,液体表面CO₂溶解度增大,并逐渐向液体深度扩散,其扩散方向如图中箭头所示。所以在灌装完毕泄压时虽然大量的压力气体由瓶中迅速排出,但首先排出的是过压力,另外由于惯性的作用,液体中CO₂分子扩散的方向不可能迅速转变为相反的方向(与泄压的气体方向一致),因此,溶液中溶解的CO₂,不能迅速从液体中分离而产生反喷。

为了得到所需的过压力,目前生产中取混合机的压力高于灌装机压力19.6kPa(0.2kg/cm²),灌装机的压力又比最终产品含气量的压力高98kPa(1kg/cm²)。为了解决混合机和灌装机之间的压力差,采用把混合机安装在高位的办法来实现(图2)。灌装机所需要的过压力,可用一个过压力泵(有的叫做去沫泵)安装于混合机和灌装机之间(图3),该泵要求有一个平滑曲线,使不同含气量的产品得到同等的过压力。

采用附加过压力泵产生过压力增加了设备投资和消耗,增加了生产成本。

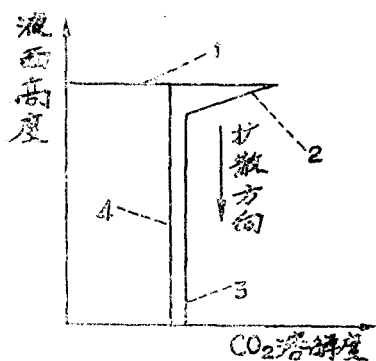


图1. 过压力引起的溶解度变化曲线

- 1: 灌装于汽水瓶中的汽水到达预定高度后, 液面上 因附加 CO_2 气过压力而增大的 CO_2 溶解度。
- 2: CO_2 气溶解度向深度扩散的曲线
- 3: 灌装过程中因气液体积交换增大的 CO_2 气溶解度
- 4: 混合机混合后得到的饱和碳酸化溶解度

三、防止反喷机构原理的探讨

在上述几种防反喷机构中, 采用过压力法对不同含气量的汽水产品和不同温度下混合的汽水, 都具有较好地防止反喷效果, 但由于过

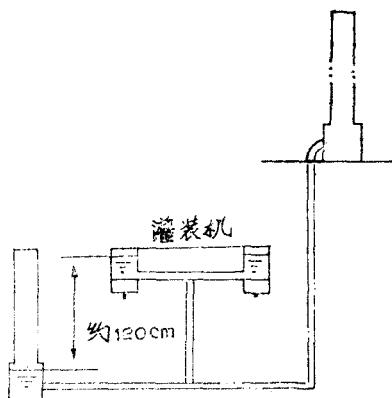


图2. 提高混合机位置形成过压力

压力泵安装在混合机和灌装机之间, 得到的过压力施加在灌装机料液槽上部空间, 因此在采用等压原理灌装时, 由于灌装过程中产生液体体积交换, 所以一部分 CO_2 被吸收, 致使过压力下降。为了克服上述过压力法存在的问题, 笔者设计了一种新型防反喷机构, 图4为其结构示意图, 工作原理为:

在托瓶机构的作用下, 汽水瓶向上运动直至顶住瓶口密封, 此时, 控制气阀凸轮4 和控制液阀凸轮7与机架上撞块相碰, 将进气阀3和

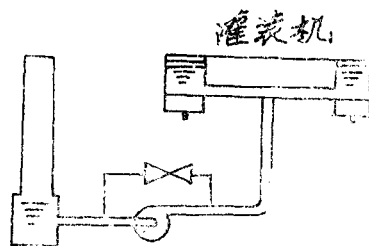
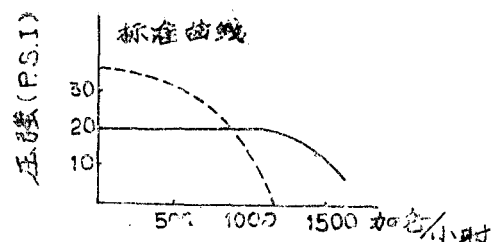


图3. 使用过压力泵形成过压力

进液阀6打开, 压力气体随之进入汽水瓶内和 V_1 、 V_2 空间, 由于气体压强在阀芯活塞上产生的作用力大于“0”密封圈9.14与阀座之间产生的摩擦力、弹簧11的压缩力和阀芯挡板8上作用力三者之和, 所以阀芯12向上移动, 当阀芯上进液孔10移出阀座13时, 将进气管与进液管连通, 气液压力平衡, 这时在位差的作用下, 灌装机料液槽中的料液经孔10流入瓶中, 而瓶中气体通过液面控制进(回)气管17, 经阀3和气管2回入料液槽上部, 与流入瓶中的汽水溶液进入体积交换。当瓶内液面高于管17下端时, 瓶中气体回路被堵死, 若溶液继续向瓶中流入, 则瓶中气体压力升高, 到一定值后则阻止溶液流入瓶内, 灌装即告终止。随之, 在机架撞块的作用下, 使柱塞22向下移动, 压缩 V_1 、 V_2 和瓶上部空间的气体, 使瓶中液面上部的压力增高而产生过压力。据实验, 一般产生大于 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ (98kPa) 的过压力, 即有较好的防反喷效果。如过压力值更高, 虽然防反喷效果良好, 但当灌装头脱离瓶口时, 随着过压力的增大, 而发出的响声增强。

为了使过压力柱塞泵产生的一定的过压力, 根据理想气体状态方程可求得柱塞所需要的行程, 其公式推导如下:

由于工作时间较短, 设温度 $T = \text{常数}$, 则:

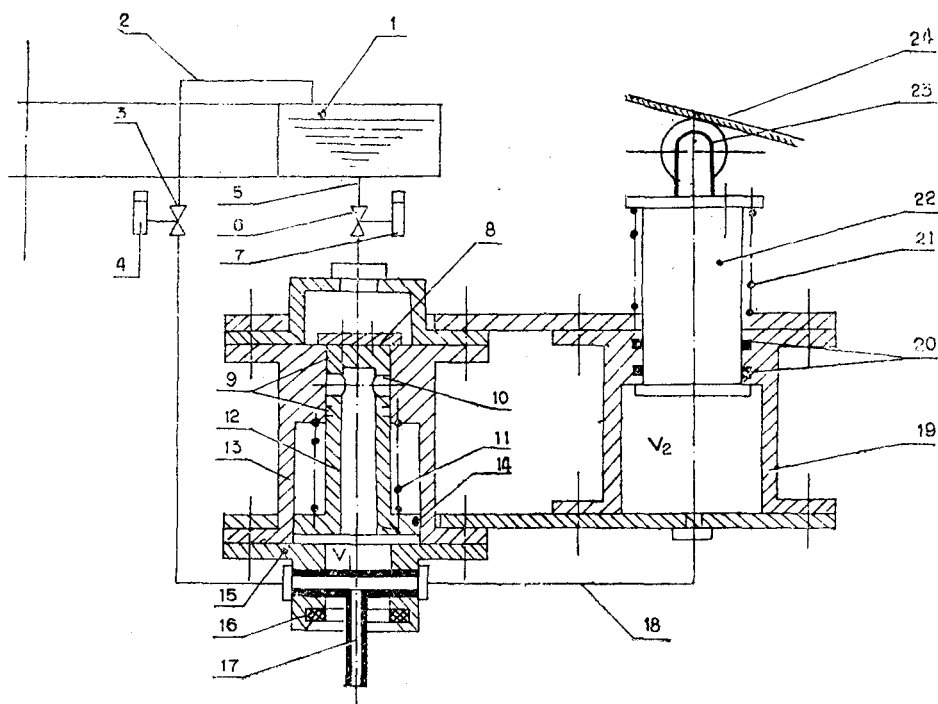


图4. 具有附加过压力柱塞泵的灌装机构

1—汽水机环形料液槽 2—进(回)气管 3—进(回)气阀门 4—气阀控制凸轮 5—进液管 6—退液管阀 7—液线控制凸轮 8—阀芯挡板 9—“O”密封圈 10—阀芯进液孔 11—弹簧 12—阀芯 13—阀座 14—“O”密封圈 15—灌装头 16—瓶口密封 17—液位控制进(回)气管 18—过压力气输送管 19—过压力泵座 20—“O”密封圈 21—弹簧 22—柱塞 23—滚轮 24—机架

$$PV = P_k \cdot V_k$$

P : 灌装机料液槽中气液体系平衡时的绝对压力, 等压灌装时与汽水瓶中液面上气体分压相等;

V : 关闭气阀与液阀后, 在灌装头、过压力泵室、汽水瓶中液面上部以及管道封闭空间中, 具有压力 P 的 CO_2 气体积;

P_k : 压力 P 与过压力 P_A 之和, $P_k = P + P_A$;

P_A : 由过压力泵产生的过压力;

V_k : 体积 V 与柱塞下降至过压力泵室内的体积 V_c 的差值, $V_k = V - V_c$;

V_c : 过压力泵柱塞下降至泵室 S 行程时的体积。

$$\therefore PV = (P + P_A)(V - V_c) \dots\dots(3)$$

为了产生大于 1kg/cm^2 (98kPa) 的过压力, 上式可改写为:

$$P_A = \frac{PV_c}{V - V_c} \geq 1 \dots\dots(4)$$

$$\therefore V_c \geq \frac{V}{P+1}$$

$$\text{已知 } V_c = \frac{\pi d^2}{4} \cdot S$$

d : 柱塞的直径;

S : 柱塞的行程;

$$\therefore S \geq \frac{4V}{\pi d^2 (P+1)} \dots\dots(5)$$

在(5)式中, 由于 P 、 V 和 d 均为已知, 所以可直接计算出柱塞的行程, 然后根据柱塞的行程, 调整机架上斜面的斜度, 使其满足柱塞行程的需要, 这样便可使汽水液面得到一定的过压力。

参 考 文 献

- [1] 王景彬: 汽(水)酒灌装机构原理的探讨, 食品与发酵工业, 3, 1983.
- [2] 邵长富, 赵晋府主编: 软饮料工艺学, 轻工业出版社, 1987.