



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102519829 A

(43) 申请公布日 2012. 06. 27

(21) 申请号 201110368068. 1

(22) 申请日 2011. 11. 18

(71) 申请人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路
381 号

(72) 发明人 赵谋明 张丽达 赵海锋 崔春

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限
公司 44102

代理人 何淑珍

(51) Int. Cl.

G01N 7/00(2006. 01)

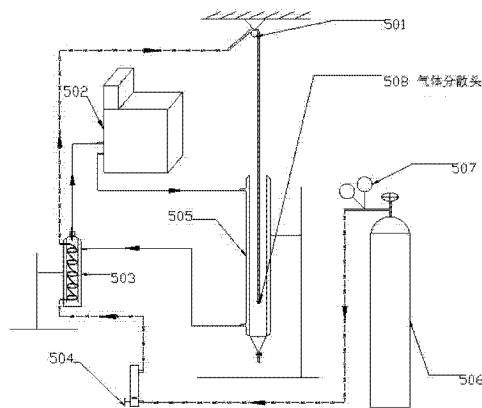
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 5 页

(54) 发明名称

一种用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法

(57) 摘要

本发明提供一种用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,包括步骤:S1、鼓入CO₂气起泡:S2、消泡过程的监测与记录:S3、计算泡沫稳定性大小;根据二阶导数的递变规律,将消泡曲线 $t-\ln V$ 分成三段,计算中间段的斜率,斜率绝对值越小,稳定性越好。本发明中由于各参数可控,可以研究不同参数组合下产生的泡沫的消泡特性。与手倒起泡相比,采用该装置所起的泡沫,其泡沫形态及消泡过程的重现性显著提高。本发明用于研究啤酒泡沫的动态消泡过程,评价啤酒泡沫的稳定性、泡沫活性物质的收集及其与泡沫稳定性的关系等,具有简便,适用,准确,且成本低,易操作的特点。



1. 一种用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,其特征在于包括以下步骤:

(1) 鼓入 CO₂ 气起泡:

(1.1) 调节低温恒温箱,使其温度稳定在设定值 15~65℃;

(1.2) 将脱气后的待测啤酒缓缓倾注入泡沫恒温仪中,预恒温 15~30min;

(1.3) 由气体管路通入 CO₂ 至气体分散头,调节减压阀及转子流量计旋阀,控制气体流速为 0.05~0.12L/h;

(1.4) 将气体分散头降至泡沫恒温仪底部固定位置,气体分散头浸入酒体,鼓泡计时开始;

(1.5) 将气体分散头拔离酒液及泡层,鼓泡计时停止,控制鼓泡时间在设定值 2~15s;

(2) 消泡过程的监测与记录:

(2.1) 消泡过程是一个上泡位不断下降、下泡位不断上升的过程,每当下泡位上升至一个整刻度线,记录当下时刻:由此可得下泡位随时间变化的整个动态过程;

(2.2) 计算得各时刻 t 对应的泡沫等效体积 V,绘制得反映整个消泡动态过程的消泡曲线 t-lnV,泡沫等效体积的计算公式如下:

$$V=V_0-V'$$

V₀——初始酒液量 mL

V' ——各时刻点所对应的下泡位所代表的体积;

(3) 计算泡沫稳定性大小

根据二阶导数的递变规律,将消泡曲线 t-lnV 分段,计算第二段的斜率,斜率的绝对值越小,啤酒泡沫稳定性越好。

2. 根据权利要求 1 所述的用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,其特征在于步骤 (1.2) 和 (1.3) 之间还包括调节气体分散头的松紧档位,来调节产生泡沫的直径大小,控制泡沫的细腻程度。

3. 根据权利要求 1 所述的用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,其特征在于所述气体管路绕过固定于泡沫恒温仪垂直上方的滑轮,能沿着泡沫恒温仪中线作上下位移。

4. 根据权利要求 1 所述的用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,其特征在于所述的泡沫恒温仪为圆柱型玻璃器皿;泡沫恒温仪末端开有用于收集消泡液取样口,取样口通过旋塞封住;泡沫恒温仪上标有均匀体积刻度线,配合下泡位升至每个体积刻线处时刻点的记录,实现对整个消泡过程泡沫体积变化情况的监测。

一种用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种测量啤酒泡沫测试技术领域,具体涉及用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法。

背景技术

[0002] 泡沫是啤酒区别于其它酒类的典型特征,也是啤酒质量的重要评价指标,更是决定消费者购买意愿的一项重要特质。从结构上看,泡沫是由气相、液相及稳定泡沫的表面活性成分构成的。传统的啤酒泡沫检测方法中,形成泡沫所需的气相由啤酒自身携带的 CO_2 提供。起泡过程中,啤酒自身的 CO_2 在外力(倾倒)或减压作用下释放出来,同时,啤酒本身固有的表面活性成分(如蛋白、 α -酸)游离至气相表面,固结成为泡壁,使泡沫在酒体(液相)中得到稳定,延缓其消泡过程。啤酒泡沫的生成及消逝过程是啤酒泡沫检测所涉及的两大主要过程。传统的啤酒泡沫检测方法(秒表法)借助手倒倾倒起泡,并在敞开的室温环境中自然消泡,记录泡持时间。该测量方法中,起泡力度不均、注流的速度、室温的波动及对露出酒面 0.05cm^2 的观察等等均会降低结果的重复性及可靠性,因此,偶然误差比较大。此外,由于传统啤酒泡沫稳定性检测方法是依赖于啤酒自身携带的 CO_2 ,其泡沫形态及起泡量的多少均受制于啤酒 CO_2 含量,不可调;并且,同一批次啤酒 CO_2 含量的不均,直接导致方法的重复性降低。更为重要的是,过多的 CO_2 将掩盖酒体中表面活性成分对泡持时间的贡献作用。而泡沫表面活性成分的特性及作用往往是啤酒泡沫稳定性研究所要特别关注和了解的。因此,开发一种可以排除酒体自身 CO_2 和环境温度波动影响的、重复性和可信度高的啤酒泡沫稳定性测量装置及方法,对于啤酒泡沫稳定性的评价,过程监测和泡沫活性物质的研究及指导工业实践具有重要意义。

[0003] 目前,国内外用于啤酒泡沫评价的试验装置和方法主要有以下几种:

1、秒表法。如图1所示,试验装置主要包括铁架台101,铁架环102,泡沫杯103,秒表104。

[0004] 泡沫杯内径60mm,高120mm。铁架环固定在距离泡沫杯缘1cm处。

[0005] 测量时,迅速将新开盖的啤酒瓶(罐)口置于铁环12,沿杯中心线(如图示),以均匀流速将啤酒注入杯中,直至泡沫高度与杯口相齐时止。同时按秒表开始计时,当液面露出 0.05cm^2 时计时终止,所记录的时间即为泡持时间。时间越长,说明泡沫的稳定性越好。

[0006] 2、Sigma法。如图2所示,试验装置主要包括sigma特制泡沫漏斗201,量筒202,秒表203。Sigma特制泡沫漏斗附带一条800mL的体积刻度线。测量时,关紧漏斗出口阀,啤酒启盖后立即沿着漏斗中心线匀速注入酒液,直至泡沫达800ml刻度线为止,记时开始。30秒后,打开出样阀放出液体,保留泡沫。秒表重新归零,200秒后,打开出样阀将消泡液分离至100ML量筒筒中,至刚有泡沫流出时,关闭开关,停表,记录时间 t 及体积 b 。最后,向漏斗内剩余的泡沫加3ml酒精消泡,使泡沫全部成为液体,用量筒测量总液体积,记录体积 c (总液体积减3ml)。根据如下公式计算sigma值:

$$\text{Sigma值} = \frac{t}{\ln \frac{b+c}{c}}$$

计算所得的 sigma 值越大,说明泡沫稳定性越好。

[0007] 3、NIBEM 法。如图 3 所示,试验装置主要包括气体分散头 301,压缩杆 302,泡沫杯 303,CO₂ 供给源 304,NIBEM 测量仪 305。测量时,首先利用压缩杆 302 将气体分散头 301 穿透啤酒瓶(罐)盖,插入酒液中,通入 CO₂ 鼓泡。并于泡沫杯中收集泡沫,直至与杯缘平齐。然后,将盛满泡沫的泡沫杯放入 NIBEM 测量仪 305 中,特制探头将跟踪上泡位的下降过程,上泡位衰减至距杯缘 10mm 处时,开始计时,以泡沫下落 30mm 所需的时间作为啤酒的泡持性。时间越长,说明泡沫稳定性越好。

[0008] 4、Rudin 改良法。如图 4 所示,试验装置主要包括发泡管 401,CO₂ 供给源 402,气体流量计 403,恒温水浴 404。测量时,先于发泡管底部引入已恒温过的啤酒,将液面调整到 100mL 刻度线处,从侧臂 C 处释放掉多余的酒样。然后,恒速缓慢通入 CO₂ 尽可能将啤酒全部转变成泡沫,当泡沫升至 350mL 刻度线时停止充气,于是泡沫开始塌陷,酒液在细管中上升。测定酒液通过细管上两个标记(50mL 及 75mL 两个刻度线)之间的时间间隔,时间越长,则表示泡沫越稳定。

[0009] 以上装置及方法存在的共同不足之处是未能实现动态监测泡沫消泡全过程。4 种装置和测定方法皆采用累积量(如总消泡时间)来描述及评价消泡这一动态过程,因此可能掩盖过程中诸多的差异性,难以准确阐明泡沫活性成分与泡沫特性间的关系。前两种试验装置均采用手倒倾倒的方式起泡,起泡力度、注流的速度及室温的波动等因素不可控,使得偶然误差大、方法的可信度降低。装置 3 及装置 4 虽然改进以鼓泡式起泡方式代替倾倒起泡,但仍在自然环境下消泡,温度等环境因素的波动仍未消除。可见,4 种装置都没有对消泡环境进行恒温控制,环境波动直接导致测量方法的可靠性降低。且装置 3 没有对鼓入的 CO₂ 压缩气体进行预先恒温,导致过冷的 CO₂ 气体直接通入酒液起泡,使得随后的泡沫塌陷过程受温度波动的影响较大。因此,提供一种能准确揭示啤酒泡沫动态消泡过程的试验装置及方法是啤酒泡沫评价及相关理论深入研究亟待解决的问题。

发明内容

[0010] 针对现有测定泡沫稳定性的试验装置的不足,本发明的目的是提出一种简便、适用、准确,且易操作的用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,具体技术方案如下。

[0011] 一种用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法,包括以下步骤:

(1) 鼓入 CO₂ 气起泡:

(1.1) 调节低温恒温箱,使其温度稳定在设定值 15~65℃;

(1.2) 将脱气后的待测啤酒缓缓倾注入泡沫恒温仪中,预恒温 15~30min;

(1.3) 由气体管路通入 CO₂ 至气体分散头,调节减压阀及转子流量计旋阀,控制气体流速为 0.05~0.12L/h;

(1.4) 将气体分散头降至泡沫恒温仪底部固定位置,气体分散头浸入酒体,鼓泡计时开始;

(1.5) 将气体分散头拔离酒液及泡层, 鼓泡计时停止, 控制鼓泡时间在设定值 $2\sim 15\text{s}$;

(2) 消泡过程的监测与记录 :

(2.1) 消泡过程是一个上泡位不断下降、下泡位不断上升的过程, 每当下泡位上升至一个整刻度线, 记录当下时刻 ; 由此可得下泡位随时间变化的整个动态过程 ;

(2.2) 计算得各时刻 t 对应的泡沫等效体积 V , 绘制得反映整个消泡动态过程的消泡曲线 $t-\ln V$, 泡沫等效体积的计算公式如下 :

$$V=V_0-V'$$

V_0 ——初始酒液量 mL

V' ——各时刻点所对应的下泡位所代表的体积 ;

(3) 计算泡沫稳定性大小

根据二阶导数的递变规律, 将消泡曲线 $t-\ln V$ 分段, 计算第二段的斜率, 斜率的绝对值越小, 啤酒泡沫稳定性越好。

[0012] 上述用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法中, 步骤(1.2)和(1.3)之间还包括调节气体分散头的松紧档位, 来调节产生泡沫的直径大小, 控制泡沫的细腻程度。

[0013] 上述用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法中, 所述气体管路绕过固定于泡沫恒温仪垂直上方的滑轮, 能沿着泡沫恒温仪中线作上下位移。

[0014] 上述用于测定啤酒泡沫稳定性的试验方法中, 所述的泡沫恒温仪为圆柱型玻璃器皿 ; 泡沫恒温仪末端开有用于收集消泡液取样口, 取样口通过旋塞封住 ; 泡沫恒温仪上标有均匀体积刻度线, 配合下泡位升至每个体积刻线处时刻点的记录, 实现对整个消泡过程泡沫体积变化情况的监测。

[0015] 与现有技术相比, 本发明的具有以下优点和技术效果 :

(1) 能够利用计算机快速准确记录整个消泡过程, 并能根据消泡曲线的特点进行分段, 显著提高了自动化程度和数据处理能力。

[0016] (2) 能用于研究表面活性成分的泡沫特性、消泡动态过程、不同啤酒泡沫稳定性的对比等, 具有简便、适用、准确, 易操作的特点。

[0017] (3) 本发明中, 泡沫恒温仪为直筒式圆柱型玻璃器皿, 其内径尺寸可以根据标准泡沫杯设计, 可以保证测量装置中的泡沫消泡现象与实际消费过程中泡沫杯中的消泡现象相似。泡沫恒温仪附带密集的面积刻度线, 配合下泡位升至每个面积刻线处时刻的记录, 可记录整个消泡过程中泡沫等效体积的变化情况。通过对整个消泡动态过程的描述, 实现基于动态参数全面评价泡沫特性的目的。

[0018] (4) 气体分散头为可调式气体分散头, 通过旋紧或旋松气体分散头, 可以调节产生泡沫的直径大小, 即泡沫的细腻程度。

[0019] (5) 初始酒液量、气流速度、通气时间、泡沫大小均为可调参数, 可分别对其进行调节以观察不同试验参数对泡沫特性的影响。

[0020] (6) 借助与该测量装置, 解决了手倒起泡及自然消泡引发诸多人为、环境干扰的问题, 消泡过程的重现性及检测方法的可靠性均显著提高。

[0021] (7) 在通气之前, 可以将脱气完毕的待测酒液预先注入泡沫恒温仪中恒温。采用封入 CO_2 气密封恒温的方法, 可以在实现待测酒液恒温的同时, 避免待测酒液的氧化。

附图说明

[0022] 图 1- 图 4 是现有几种测量泡沫稳定性试验装置结构示意图。

[0023] 图 5 是本发明的一种实施方式的结构示意图。

[0024] 图 6 是图 5 中气体分散头 508 的结构放大示意图。

[0025] 图 7 是本发明装置测得的典型的啤酒泡沫消泡曲线图。

具体实施方式

[0026] 以下结合附图和实例对本发明的实施作进一步说明,但本发明的实施不限于此。

[0027] 如图 5 所示,是用于实现本发明方法的一种试验装置,是在综合上述现有四种试验装置的基础上,根据试验的具体需要而制作而成的。

[0028] 用于测定啤酒泡沫稳定性的试验装置,包括泡沫恒温仪 505、气体分散头 508、恒温装置(502、503)、滑轮组 501、CO₂ 气瓶 506,所述泡沫恒温仪 505 为圆柱型玻璃器皿,圆柱型玻璃器皿侧壁设有水浴夹层;恒温装置由低温恒温箱 502 及温度交换器 503 构成;各部件是按照体系的气体管路及恒温水循环路径来分布和连接的;其中,CO₂ 气瓶的出口端经过减压阀 507 和转子流量计 504 后与温度交换器 503 的气体入口端相连;温度交换器 503 的气体出口端连接有硅胶管,此硅胶管绕过滑轮组 501 直伸入到泡沫恒温仪 505 中,硅胶管末端连有气体分散头 508;低温恒温箱 502 的冷却循环水出水口与温度交换器 503 的入水口相连,温度交换器 503 的出水口与泡沫恒温仪 505 水浴夹层的入水端相接;泡沫恒温仪 505 的水浴夹层的出水端又连于低温恒温箱 502,构成了体系中恒温冷却循环水的回路,实现对整个体系的恒温。

[0029] 泡沫恒温仪 505 的内径与国标(GB 4928-91)要求的泡沫杯的内径一致;泡沫恒温仪 505 侧壁标有密集且均匀的体积刻度线;泡沫恒温仪 505 下端设有用于分离气液相、收集消泡液的取样口。

[0030] 气体分散头 508,如图 6 所示,由两个塑料半球体和夹于两个塑料半球体之间的多孔海绵构成,直径约 1cm;两个塑料半球体通过螺纹旋结在一起,可以通过旋紧或旋松调控两个塑料半球体的间距,调节海绵孔道的直径,从而调节控制所起泡沫的细腻程度,即泡沫大小。按照所起泡沫的大小,气体分散头分为多个档位。

[0031] 恒温装置由低温恒温箱 502 及温度交换器 503 构成,其中,低温恒温箱 502 为具有外部循环功能并带有制冷器的恒温箱,为整个体系提供恒温冷却循环水。温度交换器 503 为蛇管式冷凝管,管程为气路,壳程为冷却循环水。CO₂ 气体流经蛇管时,与恒温冷却循环水换热,实现气体的恒温。

[0032] 气体分散头 508 通过滑轮组实现以位于泡沫恒温仪 505 正上方的设定位置为起点到以设定深度浸渍到啤酒中的下点之间的上下往复运动。

[0033] 减压阀 507 和转子流量计 504 串联于气路,可以实现对 CO₂ 流速的调节。

[0034] 上述装置中,流出低温恒温水浴箱 502 的低温恒温循环水,流经泡沫恒温仪夹层及温度交换器 503 恒温整个体系。最后,所起泡沫在泡沫恒温仪 505 中进行恒温消泡。

[0035] 各部件的作用进一步说明:

- (1) CO₂ 气体,由 CO₂ 气瓶提供,并流经减压阀和转子流量计通入泡沫仪中;
- (2) 泡沫仪是带水浴夹层及体积刻线的直筒式圆柱型玻璃器皿,其内径大小与标准泡

沫杯一致。泡沫仪末端开有取样口，结构类似分液漏斗下端的分液旋塞。

[0036] (3)低温恒温装置。由于温度对消泡过程有较大的影响，因此用带有外部循环的低温恒温水浴箱来控制体系温度，并可以研究不同温度下消泡情况的差异。

[0037] (4)温度交换器。结构为类似蛇管式冷凝管。过冷的压缩气体在温度交换器中与流经的低温循环水进行换热恒温后才通入泡沫仪内，避免了过冷压缩气体直接鼓入酒体可能引起的体系温度波动。

[0038] (5)气体分散头。连于气体管路的末端，使泡沫细腻化。调节不同的档位，可以测量不同大小的泡沫的消泡情况的差异。

[0039] (6)滑轮组。固定于泡沫仪中线的垂直上方，气体管路绕过滑轮组导入泡沫仪内。可以实现气体分散头沿泡沫以中线垂直升降。当气体分散头垂直上升，脱离酒体及泡层时，鼓泡结束。

[0040] 实施例 1

1.1 试验目的：啤酒泡沫动态消泡过程评价

1.2 试验原理：消泡过程是一个上泡位不断下降、下泡位不断上升的过程。记录下泡位每上升一个体积刻度所用的时间，可继续计算得每时刻点对应的泡沫等效体积，观察泡沫量随时间的动态变化情况。消泡过程中泡沫量及消泡速率的波动情况皆可以由与之配套的消泡曲线分析软件获得。

[0041] 1.3 试验步骤如下：

1.3.1 鼓入 CO₂ 气起泡：

- (1) 调节低温恒温水浴箱，使其温度稳定在设定值 15~65℃；
- (2) 将脱气后的待测啤酒缓缓倾注入泡沫恒温仪中，预恒温 15~30min；
- (3) 调节沙头档位到预设值(可以有 1~7 档)；
- (4) 开启气瓶总阀，调节减压阀及转子流量计旋阀，控制气体流速在设定值 0.05~0.12L/h；
- (5) 将气体分散头降至泡沫恒温仪底部固定位置，气体分散头浸入酒体，鼓泡计时开始；
- (6) 一定时间后，将气体分散头拔离酒液及泡层，鼓泡计时停止，控制鼓泡时间在设定值 2~15s；

1.3.2 消泡过程的监测与记录

(1)消泡过程是一个上泡位不断下降、下泡位不断上升的过程。每当下泡位上升至一个整刻度线，记录当下时刻。由此可得下泡位随时间变化的整个动态过程；

(2)计算得各时刻 t 对应的泡沫等效体积 V，绘制得反映整个消泡动态过程的消泡曲线 t-lnV，泡沫等效体积的计算公式，如下；

$$V=V_0-V'$$

V₀——初始酒液量 mL

V' ——各时刻点所对应的下泡位所代表的体积

由图 7 可知，啤酒泡沫的完整消泡过程是一个典型的三段曲线，分别代表沥液阶段、起泡物质的消泡阶段、稳定物质的消泡阶段。该消泡曲线各参数可以全面反映啤酒泡沫稳定性，诸如：沥液的时间 T₁——沥液速度的快慢；起泡物质消泡斜率 k₂——啤酒中起泡物质的

泡持性质；总泡沫物质含量 V_1 ——啤酒中总泡沫物质含量；稳定物质消泡斜率 k_3 ——啤酒中稳定物质的泡持性质；稳定物质含量 V_2 ，稳定物质占总泡沫物质的比例 V_2/V_1 ——啤酒中稳定物质的多少。

[0042] 实施例 2

2.1 试验目的：不同品牌啤酒泡沫稳定性的评价

2.2 实验原理：啤酒泡沫的消泡曲线是一个典型的三段曲线，其中第二段曲线的拟合直线的斜率可以反映啤酒中起泡物质的泡持性，并与秒表法测定的泡持时间有显著的相关性，故可用消泡曲线第二段的斜率表征泡沫稳定性的大小。

[0043] 2.3 试验步骤如下：

2.3.1 鼓入 CO_2 气起泡：

- (1) 调节低温恒温水浴箱，使其温度稳定在设定值 $15\sim 65^\circ C$ ；
- (2) 将脱气后的待测啤酒缓缓倾注入泡沫恒温仪中，预恒温 $15\sim 30min$ ；
- (3) 调节沙头档位到预设值（可以有 $1\sim 7$ 档）；
- (4) 开启气瓶总阀，调节减压阀及转子流量计旋阀，控制气体流速在设定值 $(0.05\sim 0.12L/h)$ ；
- (5) 将气体分散头降至泡沫恒温仪底部固定位置，气体分散头浸入酒体，鼓泡计时开始；
- (6) 一定时间后，将气体分散头拔离酒液及泡层，鼓泡计时停止，控制鼓泡时间在设定值 $2\sim 15s$ ；

2.3.2 消泡过程的监测与记录

(1) 消泡过程是一个上泡位不断下降、下泡位不断上升的过程。每当下泡位上升至一个整刻度线，记录当下时刻。由此可得下泡位随时间变化的整个动态过程；

(2) 计算得各时刻 t 对应的泡沫等效体积 V ，绘制得反映整个消泡动态过程的消泡曲线 $t-\ln V$ ，泡沫等效体积的计算公式，如下：

$$V=V_0-V'$$

V_0 ——初始酒液量 mL

V' ——各时刻点所对应的下泡位所代表的体积

2.3.3 泡沫稳定性的计算

根据二阶导数的递变规律，将消泡曲线 $t-\ln V$ 分段，计算第二段的斜率，斜率的绝对值越小，稳定性越好。表 1 为不同啤酒的泡持时间、消泡曲线的各段斜率及它们之间的相关系数。

[0044] 表 1

啤酒样品	泡持时间(s)	1 段斜率	2 段斜率	3 段斜率
样品 1	194	-1.9993	-0.7751	-0.2177
样品 2	236	-1.3491	-0.6065	-0.2749
样品 3	246	-1.4398	-0.5843	-0.3074
样品 4	263	-0.9704	-0.5617	NO
样品 5	264	-1.3517	-0.5284	-0.1921
各段斜率与泡持时间的相关系数		0.903*	0.984**	0.064

由表 1 结果可知，消泡曲线的第一、二段的斜率与泡持性显著相关，尤其是第二段的

斜率,即起泡物质消泡阶段的消泡速率,与秒表法所测泡持性高度相关($r=0.984$, $p < 0.01$),故可以用来表征泡沫稳定性的大小。斜率的绝对值越小,啤酒泡沫的稳定性越好。因此,通过本发明,可以对成品啤酒的泡沫稳定性、发酵液的泡沫稳定性、及泡沫表面活性成分形成泡沫的泡持特性进行准确测定,从而指导工业实践,且为进一步探究泡沫表面活性成分的作用机制奠定了基础。

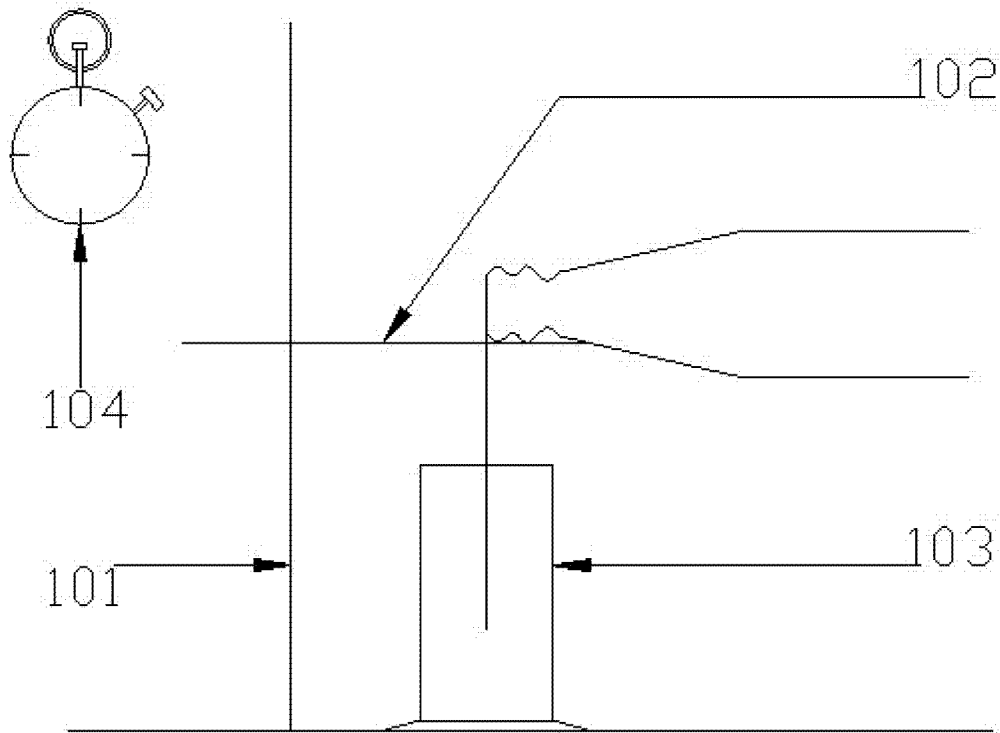


图 1

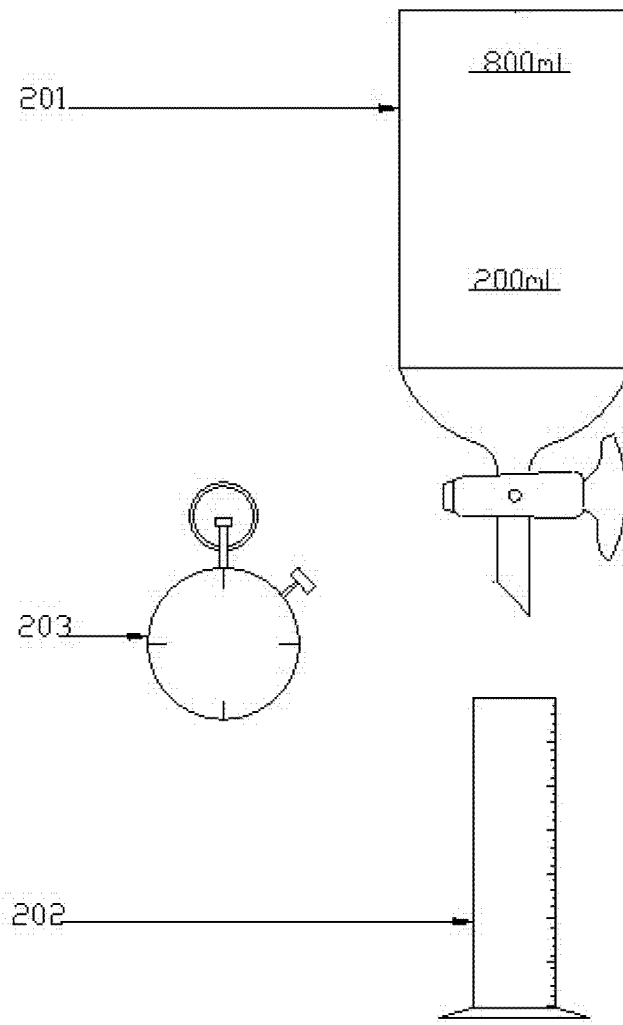


图 2

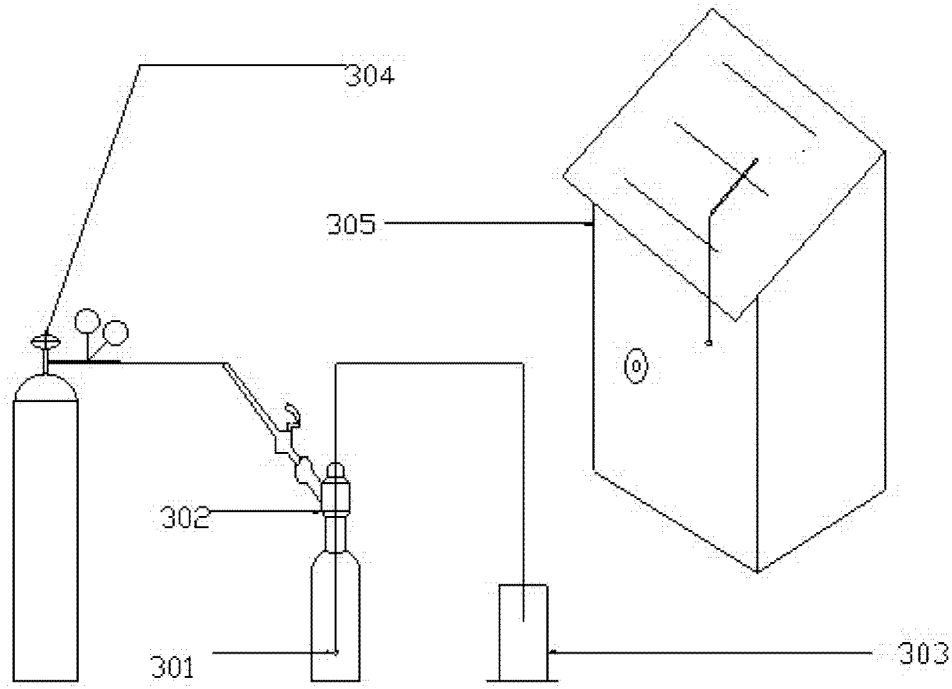


图 3

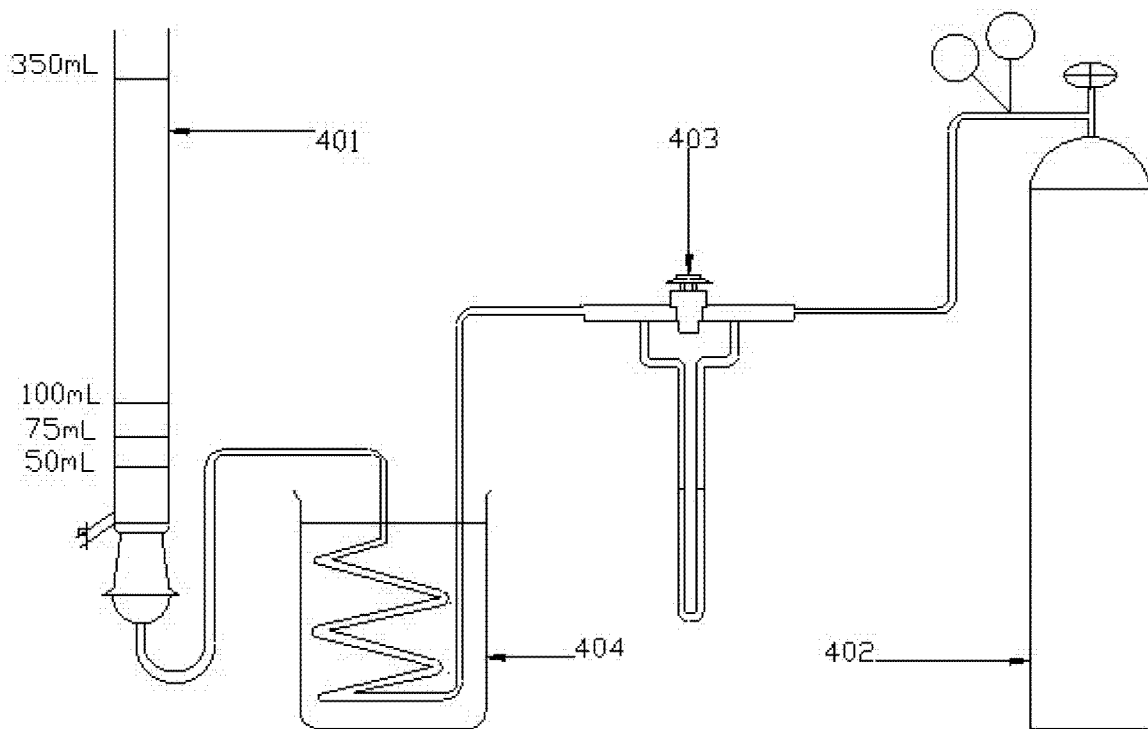


图 4

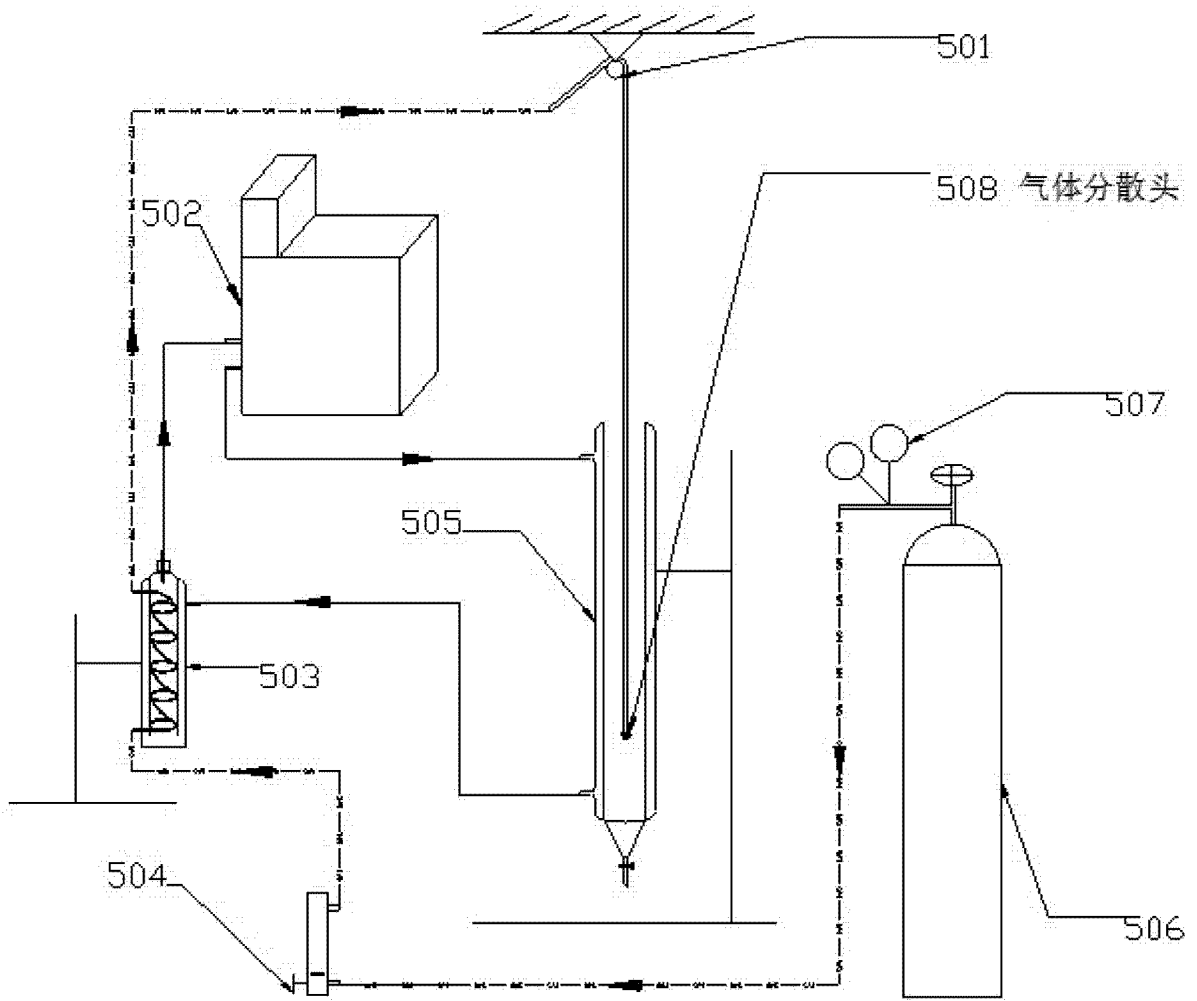


图 5

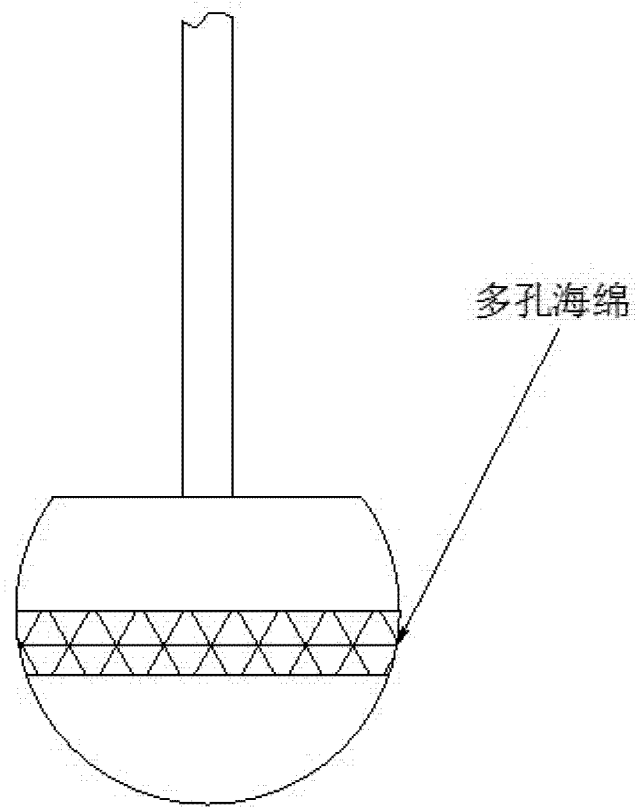


图 6

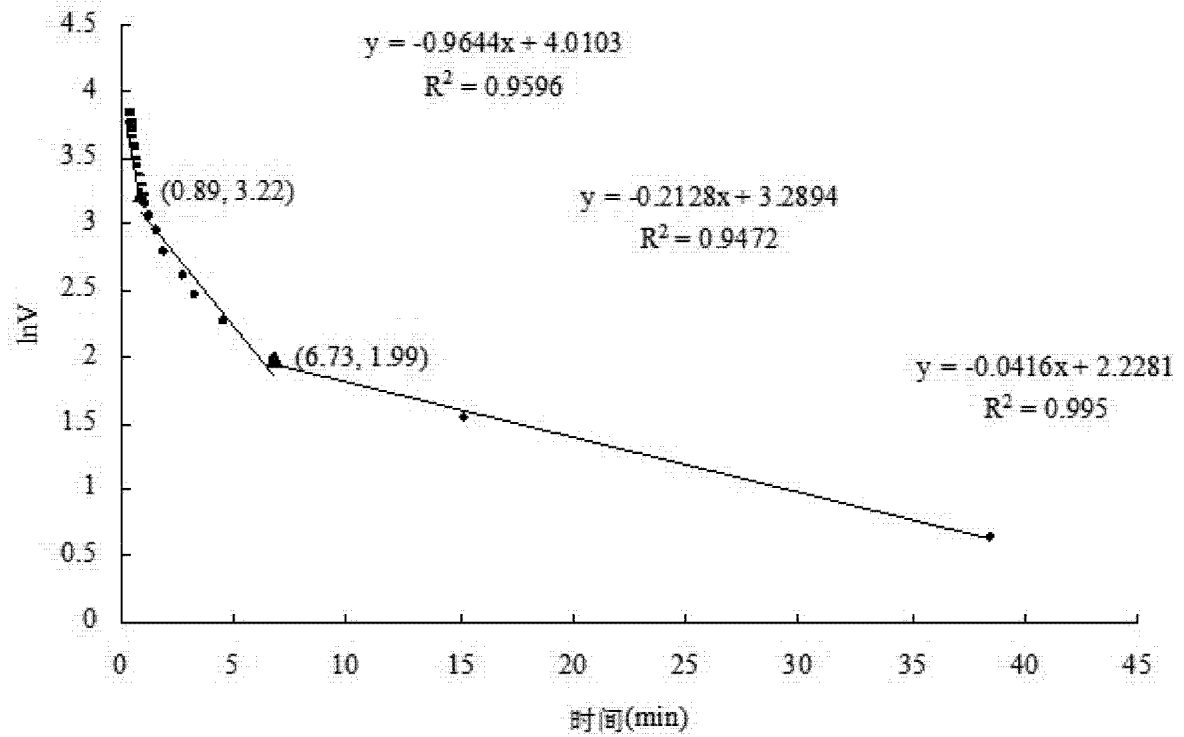


图 7