

强电场和强磁场液体杀菌技术研究

白希尧 陈天明 李明 白敏冬 张芝涛

(鞍山静电技术研究设计院,鞍山 114011)

本文论述了获得强电场和强磁场方法及液体杀菌机理。文中阐述通过提高高电压大电流的上升速率 $\frac{di}{dt}$ 、幅值 I_0 和降低漏感等因素,增大电场、磁场场强。文中介绍了在常温条件下应用强电场和强磁场对啤酒、鲜桔汁等进行杀菌,均可以达到国家食品标准,同时保持原色泽、原品味,维生素 C 及氨基酸等几乎没有改变。

目前,果蔬汁液、啤酒以及饮料发展成为重要的大批量生产的食品,因此提高果蔬汁液饮料的质量,降低成本是一个非常重要课题。当前决定果蔬汁液、啤酒以及饮料质量主要因素之一是杀菌工艺。现有高温、薄膜过滤、紫外光、超声波、微波等^[1]方法杀菌、滤菌……^[1,2]。由于产量、成本等因素影响,通常都采用高温杀菌。为了把高温杀菌对果蔬汁液质量影响降到最低程度,从常规间接高温高压杀菌工艺发展到直接高温杀菌和直接巴氏杀菌新工艺。果蔬汁液饮料的温度变化从 $3^\circ\text{C}/\text{s}$ 提高到 $150^\circ\text{C}/\text{s}$,只需 0.2s 的加热时间,便可以使果蔬浓缩汁液的温度跃变到 100°C 以上^[2]。尽管如此,热量也会引起质量下降,只不过把其影响减少到最低程度。高温导致果蔬汁液饮料芳香成分变化,引起味道改变,失去原有品味;氨基酸等受热易破坏,失去了一些原有的营养成分;失去原有色泽;破坏维生素 C 等。

人们在寻求一种高温液体杀菌新技术。美国、苏联学者用超声波杀菌系统,1989 年日本学者水野彰、速水光浩教授在很小聚烯容器(内径为 44mm、高度为 5mm)中充以含有酵母菌的纯水(去离子水),用极短高压脉冲(最大幅值为 20kV)杀死纯水中酵母菌^[1,2]。真实的果蔬汁液是含有大量离子及果酸,果蔬汁液的电阻率低于 $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$,去离子的纯水电阻率在 $10^5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,果蔬汁液电阻率远远低于纯水电阻率,相差千余倍。杀菌效率也随着电阻率下降而明显下降,因而低电阻率的果蔬汁液常温杀菌是十分困难的,人们一直在寻找可行

杀菌新技术。

一、强电场和强磁场杀菌方法

应用强电场和强磁场液体常温杀菌原理如图 1 所示。L 是产生恒定、交变、脉冲强磁场的线圈,固定在输送液体管路外面,使被杀菌液体流过强磁场。供给 L 的高电压大电流的发生器 1,根据自动控制器的指令,对线圈 L 供给定时、定量、定型的电流,产生人们需要的恒定、脉冲、变化的强磁场,能产生高达 $10^4\text{—}10^6\text{A}$ 电流脉冲(宽度在 $1\text{—}10\mu\text{s}$)的强磁场(50T),在此强磁场中的液体里的细菌大部或全部致死。高电压真空开关 6 是控制磁场型式的执行器件。电场 E 设置在输送液体管路中的管路里,它能在管路内产生恒定、变化、突变的强电场。高压

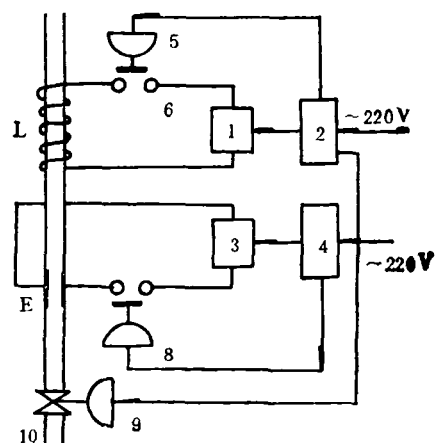


图 1 强电场和强磁场液体杀菌原理图

1.3.高压发生器; 2.4.自动控制器; 6.7.高压真空开关
5.8.自动执行器; 9.电动机执行器; 10.阀门

- 1) 水野彰等,静電気学会講演論文集 86(1986), 405.
- 2) 速水光浩,静電気学会誌, 13(1989), 322.

发生器 3 供给电场 E 电能, 输出电压 100V—100kV。自动控制器 4, 根据电场需要, 指令高压发生器对电场定时、定量、定型供给电压、电流, 产生所需要的强电场。在按一定型式变化强电场中的液体细菌大部或全部致死。

强电场和强磁场液体杀菌系统的电场强度为

$$E = E_m \sin \omega t, \quad (1)$$

式中 E_m 为电场强度最大值, 可以产生静电、交变或突变强电场。

磁场强度为

$$H = H_m \sin \omega t, \quad (2)$$

式中 H_m 为磁场强度最大值, 可以产生恒定、交变、脉冲强磁场。

储存巨大能量的高压发生器 1、3 与动作执行器 5.8 以及高压真空开关 6.7 组成了高压大电流脉冲发生器, 产生上百万安培脉冲幅值电流, 脉冲宽度为 1—10 μ s。真空开关控制了脉冲电流幅值, 进而控制了磁场强度、电场强度。它瞬间放电功率可达 1—25 个百万千瓦电站发生的功率。

当真空开关 7 闭合(击穿后, 形成高压电路通路), 脉冲大电流能量全加在电场 E 上, 产生激烈的脉冲高压放电, 这一过程发生在 10⁻⁶—10⁻³s 瞬间内, 其功率为

$$N = 4.5 \times 10^5 C U_{GK}^2, \quad (3)$$

式中 C 为高压脉冲电容器电容值, U_{GK} 为高压真空开关击穿瞬间电压值。当电场击穿放电时, 将使液体气化成温度高达数万度以上的等离子体, 形成高压通路, 或多或少产生出一些气体, 形成极薄“气套”包围着火花。压力由薄薄的“气套”传给果蔬汁液, 果蔬汁液可以认为不可压缩的介质(果蔬汁液压缩系数为 0.000048)。由于高速绝热膨胀形成超高速液压缩冲击波, 冲击波压力瞬间值可达 10⁵—10⁶atm。放电终了的瞬间, “气套”处形成空穴, 由于压力突然减少, 使果蔬汁液又以超高速回填空穴, 形成了第二个超声回填空穴的冲击波。

由于果蔬汁液不可压缩, 瞬间冲击波压强达 10⁵atm 以上, 高脉冲能量直接转换成爆炸式的冲压机能, 产生 4—5km/s 的强大冲击

波, 并以 10³kg/cm² 的压强作用到细菌体上^[3], 细胞膜破裂, 并被压碎, 细胞内部的强迫振动等作用使细菌致死。在细菌受到损伤后, 电场电击细菌容易得多, 它的致死几率增多, 细菌致死所需电流、电压大大减低。

在有限能量的条件下, 应尽量获得最大的工程效率、瞬时功率和冲击波力等, 以便有效地应用到果蔬汁液杀菌中去^[3]。

高电压大电流发生器产生的脉冲电流的幅值和前沿上升速率决定了电场和磁场效应的强弱^[1,2]。脉冲电流最大幅值为

$$I_m = U_{GK} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (4)$$

放电脉冲电流最大上升速率为

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_m = \frac{U_{GK}}{L}. \quad (5)$$

从公式可知, 放电脉冲电流最大幅值 I_m 取决于电容器的电容量 C 、隔离间隙临界击穿电压值 U_{GK} 和放电回路中电感量 L 。 I_m 与 U_{GK} 及 C 的平方根成正比, 与 L 的平方根成反比。脉冲电流最大上升速率 $\left. \frac{di}{dt} \right|_m$ 与放电回路的电容量 C 、总负载电阻 R 无关, 只与 U_{GK} 成正比, 与 L 成反比。 L 企图阻止脉冲电流的变化。当电容器选定后, U_{GK} 和 C 就确定了。为了提高放电电流的幅值和质量, 关键在于减少放电回路各部分的电感。回路结构形式决定回路电感大小, 在设计放电回路时, 要从结构上认真考虑, 以减少回路电感。

充电电压 U 对脉冲放电效应强度的影响最大。放电脉冲电流最大幅值和放电脉冲电流最大上升速率均与 U_{GK} 成正比。所以增强电场和磁场效应的最有效、最经济的办法是提高 U_{GK} 。当前高电压技术进展迅速, 高电压电源的获得和绝缘处理比以前容易得多, 成本也大大

- 1) 鈴木秀雄, 根岸秀明, 日本機械学会論文集(第三部), (昭和 48 年 1 月), 432.
- 2) L. E. Gilbert and W. N. Lawrence, Proc. 2nd International Conference on High Energy Forming, 5-2 (1969), 1.

降低。

高电压大电流脉冲在线圈上产生恒定、交变、突变的强磁场,高达 50T。产生的强磁场强度最大值为

$$H_m = \frac{NI_m}{d}, \quad (6)$$

从(6)式中可知,磁场强度最大值 H_m 与线圈匝数 N 和通过线圈的脉冲电流幅值 I_m 成正比,与线圈长度 d 成反比。穿过线圈磁通量为

$$\phi = \frac{\mu N^2 IS}{d}, \quad (7)$$

式中 S 为线圈的横截面积。单位面积最大电磁力为

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_0 I^2 m = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{I_m N}{d} \right)^2. \quad (8)$$

为了得到强磁场,最大电磁力,必须尽力提高脉冲电流幅值 I_m 、线圈匝数 N 和上升速率 $\frac{di}{dt}$ 。在制作电感线圈时,采用高绝缘材料处理线圈,并使其具有很高的机械强度。由此也带来线圈散热难题,难以解决。通常采用较少匝数线圈(最多也只有几十圈)。为了得到强磁场和最大电磁力,只能提高脉冲电流幅值和它的上升速率。

二、实验结果与讨论

实验装置如图 1 所示。试料为鞍山矿泉啤酒(生)、鲜桔汁液(当日压榨的)、自来水、甜高粱汁液等。有时为了夸大细菌沾污程度,特配制含菌量为 10^2 — 10^4 个/ml,经无菌操作取样,培养箱恒温培养 24h,按中华人民共和国卫生部《啤酒检验标准》进行生物统计分析其杀菌效率:

杀菌率

$$= \frac{\text{对照组菌落个数} - \text{处理组菌落个数}}{\text{对照组菌落个数}} \%$$

1. 啤酒电场和磁场杀菌工业性实验

用鞍山产的矿泉啤酒(生)为试料,每小时处理量为 3.5t,进行工业性实验。实验结果如

物理

图 2、表 1 所示。从图 2 和表 1 中可知,当杀菌

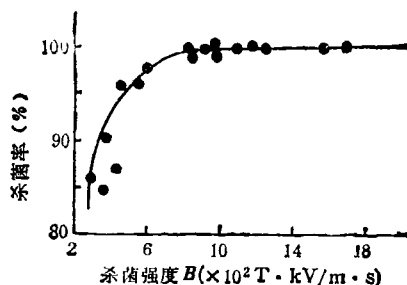


图 2 杀菌率与杀菌强度关系曲线

强度 B 达到 $10 \times 10^2 \text{ T} \cdot \text{kV/m} \cdot \text{s}$ 时,杀菌率可达 100%,此时菌落总数为 0 个/ml,大肠杆菌落为 0 个/100ml,酵母菌落为 0 个/100ml。当杀菌强度大于 $8 \times 10^2 \text{ T} \cdot \text{kV/m} \cdot \text{s}$ 时,均能达到国家规定的检验标准(菌落总数 ≤ 5 个/ml、大肠杆菌落数 ≤ 5 个/100ml)。从图 2 中可见,杀菌率与杀菌强度呈指数函数关系。数据是在连续不间断的工业性流程条件下测得的,其中啤酒理化指标是:酒精含量及其浓度、麦汁浓度、真正发酵度、色度、总酸、双乙酰、苦味质等没有明显变化。啤酒中氨基酸大多没有变化,只是甘氨酸、丙氨酸有一定程度下降;而赖氨酸、苯丙酸有一定程度增加。

经电场和磁场杀菌后贮存 60 天,再测鞍山矿泉啤酒的总细菌落数。结果是大肠杆菌落数、酵母菌落数均为 0。这说明应用此技术可以大大延长生啤酒贮存期。经过电场和磁场处理后的啤酒成为对人体有益的磁(场)处理的啤酒。

2. 鲜桔汁液强电场和强磁场杀菌工业性实验

鞍山市场购买福建产鲜桔压榨成桔汁液,用图 1 所示工业性实验装置进行连续流动杀菌。

在常温条件下,对新鲜桔子汁液进行了强电场和强磁场杀菌实验,其测试数据如表 1 所示。当杀菌强度达到 $4.3 \times 10^2 \text{ T} \cdot \text{kV/m} \cdot \text{s}$ 时,总菌落数、大肠杆菌数从 2.53×10^3 个/ml 和 3.40×10^3 个/100ml 降到 1 个/ml 和 < 3 个/100ml,杀菌率达到 99.9%、99.9%。远低于

表1 矿泉鲜啤酒、鲜桔汁电磁场杀菌实验数据表

序号	液体种类	杀菌强度 ($\times 10^2 T \cdot kV/m \cdot s$)	原样含菌数			强电场、强磁场处理后菌数			杀菌率(%)		
			菌落总数 ($\times 10^3$ 个/ml)	大肠菌落 ($\times 10^3$ 个/100ml)	酵母菌落 ($\times 10^2$ 个/100ml)	菌落总数 (个/ml)	大肠菌落 (个/100ml)	酵母菌数 (个/100ml)	菌落总数	大肠菌落	酵母菌落
1	鲜桔汁	3.50	2.53	2.51		50	9		98	99.6	
2		4.00	2.53	3.10		5	<3		99.8	99.9	
3		4.30	2.53	3.40		1	<3		99.9	99.9	
4		4.70	2.53	3.10		1	<3		99.9	99.9	
5		5.04	2.53	3.40		0	<3		100	99.9	
6		5.64	2.53	3.10		0	<3		100	99.9	
7	矿泉鲜啤酒	7.27	4.8	0.39	7.7	100	4	0	97.9	98.9	100
8		7.32	5	0.75		100	7		97.9	99	
9		7.35			8			0			100
10		8.5	5	0.75		30	3		99	99.6	
11		8.56	5	0.75	8	27	0	0	99.4	100	100
12		8.78	5	0.75		45	3		99	99.6	
13		10	5	0.75		0	0		100	100	

于国家卫生部《食品检验标准》最高允许细菌数 ≤ 100 个/ml 和 ≤ 6 个/100ml。鲜桔汁中维生素 C 12.40mg/100ml、总酸为 5.579g/l、总糖 20.23g/l；经杀菌强度 $4.0 \times 10^2 - 8.06 \times 10^2 T \cdot kV/m \cdot s$ 的常温条件下处理后的鲜桔汁中的维生素 C 为 12.70 mg/100 ml、总酸为 5.23 g/l、总糖为 19.70g/l。杀菌处理前后鲜桔汁液中维生素 C、总酸、总糖含量几乎毫无变化。从数据中可以看到鲜桔汁中物理、化学成分几乎没有什么明显变化，保持了原有的品味、色泽及其成分，维生素 C 一点不被破坏，保持了原有值。

用脉冲电流幅值 $I_m = 9.59kA$ ，磁场强度峰值 $H_m = 12.4A/m$ ，磁感应强度

$$B = 15.57T,$$

电磁压力 $P = 96.41N/m^2$ 的强磁场进行鲜桔汁液杀菌实验，在鲜桔汁温度为 4℃ 时，杀菌率可达 94%。磁感应强度再稍提高，杀菌率可达 100%。

3. 糖水、甜高粱汁液杀菌实验

以悬浮在含有 10% 糖的自来水中的杂菌、悬浮在甜高粱汁液中醋酸杆菌为试材做实验。当突变电场的脉冲能量达到 900J/l 时，能把汁液中菌落总数 6×10^4 个/ml 的总菌数杀死到 0 个/ml，杀菌率达到 100%。当突变电场

的脉冲能量达到 1500J/l 时，醋酸杆菌从 440×10^4 个/ml 降到 0 个/ml。杀菌率达到 100%。

4. 自来水杀菌实验

以大肠杆菌悬浮在自来水中为试材进行实验，水的电阻率为 $590k\Omega \cdot cm$ ，水的 pH 值为 6，实验前后的温度 26℃。用突变的电场脉冲(脉宽为 1—10 μs) 杀菌。当突变电场脉冲能量达到 240J/l 时，试液中的大肠杆菌从多不可口(稀释 100 倍)到全部杀死，杀菌率达到 100%，这一效率很稳定。对 E 电场施加变化的电场时，当电场杀菌强度达到 108kV \cdot °C/m 时，把试液中大肠杆菌 1800 个/ml 杀死到 0 个/ml，杀菌率为 100%。一吨自来水消毒杀菌消耗低于 20kW \cdot h，很有实用价值。

突变电场脉冲产生冲击波压强与被处理的液体电阻率 pH 值等物理关系十分密切，如图 3、表 2 所示。从图中可见，随着电阻率增加，杀菌消耗脉冲能量线性下降。果蔬汁液是低电阻率、低 pH 值的，杀菌所需脉冲能量明显增加。对低电阻率液体施加大的杀菌脉冲能量是十分困难一项技术。

可以用臭氧水 (1ppm) 在几秒钟内把总菌、大肠杆菌、酵母菌、枯草杆菌芽胞、金黄色葡萄球菌等百分之百杀死。产生一吨臭氧水需

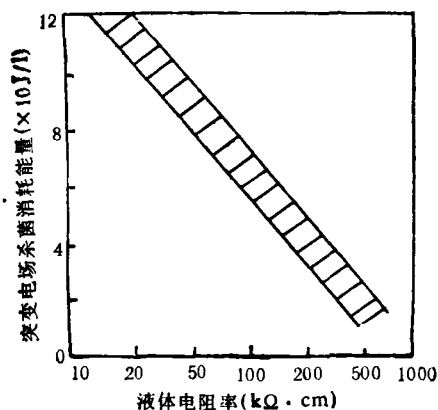


图3 应用突变脉冲电场杀菌率100%时液体电阻率与杀菌所需能量的函数图

0.1kW·h 电能,成本不到5分钱。用臭氧水对瓶罐、流程设备进行消毒灭菌,使强电场、强磁场杀菌工艺完善,实施也方便了。

表2 不同载菌液体能量表

载菌液体种类	电阻率 (kΩ·cm)	pH 值	杀菌100%时 所需能量 (×10³J/L)
去离子纯水	≥10000		
自来水	456-600	6	2.4
含10%糖自来水	80-100	4-5	7.2
甜高粱汁液	15-30	4-5	12

该技术所消耗能量较少,是高温杀菌消耗能量的千分之一以下。一瓶啤酒的电场和磁场杀菌所消耗能源成本为人民币0.005元,也远低于超声波杀菌、微波杀菌等。再降低杀菌消耗能量可能性极大。运行维护成本极低。

- [1] 张凌飞等,电子科学技术8-6(1986),28.
 [2] 杜朋,食品工业科技, No. 3 (1987), 37.
 [3] 白希尧等,自然杂志,10(1987),190.

第三届半导体超晶格微结构学术讨论会简讯

第三届半导体超晶格微结构学术讨论会于1990年10月16日至18日在中国科学院半导体研究所召开。会议收到文章120篇,出席会议代表共90名,来自全国20个研究所、大学。会议报告了近两年来我国在半导体超晶格微结构研究领域内所取得的进展。著名的固体物理学家、学部委员黄昆教授在闭幕式上作了精辟的总结发言。他指出从参加大会代表的人数和单位分布情况来看,国内从事半导体超晶格研究的队伍在过去二年内十分明显地更加壮大了。从会上报告所反映的情况来看,近二年所取得的研究成果无论在数量上、广度上、深度上均比二年前有了较大的发展。总的情况是令人满意的。

两年来的主要进展具体表现在下述几方面:

1. 半导体超晶格材料研制工作显得更为活跃,有了很大的发展。主要的特点是完全打破了以往那种半导体超晶格就等于GaAs加AlGaAs的局面,在Ge/Si应变层超晶格和II-VI族应变超晶格的材料生长和物性研究方面取得了明显的进展。另一方面材料质量控制和测试分析工作受到普遍重视,克服了以往对材料质量往往容易过高乐观估计的倾向,做了大量细致深入的材料物性测试分析工作,使材料的研制建立在更加科学的基础上。

2. 半导体超晶格物理的实验研究在光学声子模的观察, I-II型短周期超晶格转换的压力荧光光谱的研究,量子阱中非线性光学效应的研究和应用,共振隧穿

效应中纯二维至二维隧穿模式的研究和应用,掺杂多量子阱的共振隧穿和红外吸收以及中子辐照对异质结输运性质影响等方面取得了富有特色的好研究成果。

3. 半导体超晶格的电子态和声子谱方面的理论研究继续保持着较高水平,特别是拉曼散射的微观理论达到了国际先进和领先水平。

4. 自电光效应器件(S-SEED)、AlGaAs/GaAs多量子阱激光器等器件的研制成功不仅是在跟踪国外高科学技术道路上迈出的重要一步,而且它也反映出国内物理研究和器件研制密切结合的良好趋势。

大会在总结二年来所取得的成绩的同时,清醒地指出目前国际上半导体超晶格、微结构研究的发展十分迅速,国内在这方面的研究工作无论在广度、深度上尚和国际水平有不少的差距,同时还面临着材料制备和实验测试分析手段短缺和落后的严重困难。这要求国内的同行、专家继续加倍的努力奋斗。特别是1992年8月将在中国北京第一次举办国际半导体物理会议(第21届),这是放在我们面前既光荣而又艰巨的任务。黄昆教授号召全国的同行、专家们应当振奋精神、努力拼搏争取有更多的中国科学家在第21届国际会议上作邀请报告。

大会对中国物理学会的大力支持,对举办这次会议的中国科学院半导体所,半导体超晶格国家重点实验室表示感谢。

(中国科学院半导体所研究所 郑厚植)