

〔苏〕 耶·伊·加尔林斯卡娅 合 著
阿·德·别 祖 博 夫

超声波及其在 食品工业中的应用

輕工业部科学研究设计院食品所 译

輕工业出版社

內 容 介 紹

超声波及其在食品工业方面的应用，在我国食品工业中已經引起了广泛的注意，迫切需要这方面的参考书。为此，我們特約譯出版此书。书中介紹了超声波的基本概念，声波的一般物理知識，各种类型的超声波发生器，以及超声波对物理、化学和生物过程的作用及其在食品工业中应用的途徑和具体事例。书末还附錄了各类型主要超声波发生装置原理图和零件表。可供食品工业工程技術人員以及其他从业人員閱讀。

Е. И. ГАРЛИНСКАЯ, А. Д. БЕЗЗУВОВ
УЛЬТРАЗВУК И ПУТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ
В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ПИЩЕПРОМИЗДАТ МОСКВА 1955

本书根据苏联食品工业出版社1955年莫斯科版譯出

超声波及其在食品工业中的应用
〔苏〕耶·伊·加尔林斯卡娅 合 著
阿·德·别祖博夫
輕工业部科学研究設計院食品所譯

輕工业出版社出版

（北京市廣安門內白廣海）

北京市書刊出版業營業許可証出字第000号

輕工业出版社印刷厂印刷

新华書店科技发行所发行

各地新华書店經銷

787×1092毫米1/32×3² 印張·68,000字

1960年9月第一版

1960年9月第一次印刷

印数：1—48,500 定价：(10)0.44元

統一书号：15042·1158

超声波及其 在食品工业中的应用

[苏] 耶·伊·加尔林斯卡娅 合著
阿·德·别祖博夫

轻工业部科学研究设计院食品所译

轻工业出版社

1960年·北京

目 录

绪 论

第一章 超声波的物理性质

波长	15
声波的速度	15
波的速度、频率和波长	16
纵波	17
横波和其他类型的波	17
声压	19
声的功率和声强	21
声的传播	22
声波的吸收	25
空化作用	26

第二章 声波和超声波振盪的来源

气体中的发生器	29
液体和固体中的发生器	32
压电式振盪器	34
磁致伸縮式振盪器	38
液哨式换能器	42

第三章 超声波在食品工业中应用的途径

1. 超声波振盪对化学过程和理化过程的作用	45
溶解气体的作用	46
频率	46
强度	47

处理时间	48
外界压力	48
温 度	50
2. 超声波对扩散过程的作用	51
3. 乳化、分散、凝聚	54
4. 超声波对物质结晶的作用	59
5. 脱气作用	62
6. 分馏	62
7. 聚合作用	63
8. 解聚作用	63
9. 油脂的裂解和皂化	64
10. 氧化过程	64
11. 杀菌作用	66
12. 超声波探测鱼群	67
13. 超声波洗滌	68
14. 超声波对植物早期生长阶段的影响	70
15. 用超声波沉降悬浮微尘	72
16. 超声波防止生成积垢	74
17. 超声波焊接和鍍錫	75
18. 超声波钻孔	76
19. 超声波粘度計	76
20. 超声波探伤器	77
21. 化学产品质量及化学反应过程的檢驗	81
22. 超声波液面仪	81

緒 論

化学和工艺的发展与物理的进展有密切关系。近二十五年以来化学反应过程和工艺过程中广泛采用物理因素作用的情况愈来愈多了。关于高压、高温、低温、高真空的技术已在各个工业部門工艺过程中很巩固地掌握了。現在正蓬勃地发展着物理的另一新領域，即关于超声波的学說。关于在获得超声波振盪方面的物理技术成就也正在化学和工艺上采用。一系列的試驗研究証明：超声波能改变物质的組合状态，使物质分散和乳化，改变物质扩散、結晶和溶解的速度，加速反应和强化某些工艺过程。

苏联学者在超声波方面的研究，使苏联科学在这个領域中稳居領先的地位，給超声波的学說奠定了良好的基础，他們找到了許多物理規律，从而有可能研究在各个工艺过程中应用超声波的問題。在这以前超声波的应用比較少，只广泛地应用于水中探索和鑄件探伤，主要是因为能使超声波在生产設備中相当經濟地使用所需的換能器的結構未研究出来。現在已有許多使用超声波振盪以强化包括食品工业在內的各种工业部門的工艺过程的报导。

首先讓我們先了解一下“超声波”的基本概念，了解如何得到超声波和它与普通声音的區別。大家知道，所有的声音的物理性质是一样的，但一般都将它們分成听得見的和超声的声音。象日光光譜分为可見部分和两个不可見部分——紅外線和紫外綫一样，声音也可分为三个部分：每秒振動頻率20次以下的人听不見的声音，即超低声，每秒振動20次至20,000

次的可听见的声音和每秒振动频率高于 20,000 次的听不见的超声波。最高振动的界限尚未确定，但已知可以得到每秒振动几十亿次的。

因此所谓超声波就是指人的耳朵所不能听到的高频率的声音。

举一个获得超声波的最简单的例子^①。设一圆盘的圆周上钻一定数量的孔，譬如说钻 100 个孔。将圆盘装在电动机的轴上，电动机则经过一电阻器与电路相连，电阻器可使电动机的旋转速度改变，因此圆盘的旋转速度也随之改变。由空气压缩机引来一根橡皮管，同时送入压缩空气（见图 1）。

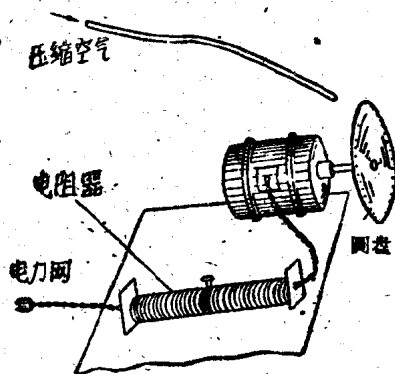


图 1

旋转的圆盘将间歇地切断气流。一个接着一个迅速地通过空气即可变成声音。这些声音的音调（低音或高音）取决于空气通过孔的次数。这样，如电动机每分钟的转速为 3000

^① 用气笛的例子是引自 1955 年莫斯科工业和科学知识普及协会主办的恩·恩·多尔戈波洛夫主讲的公开演讲。

轉，或每秒钟50轉，則空气通过的次数为每秒 $50 \times 100 = 5000$ 次，这种设备是原始形式的普通气笛，它能发出频率为5000的声音。这不是很高的声調。現在，如我們提高圓盘的轉速至150轉/秒，則可得到频率为15000的声音，这将是一个很高的尖叫声。假如我們再提高圓盘的轉速，譬如达到250轉/秒，則我們將得到25,000次/秒的振动。这样的声音我們的耳朵已听不到了，这就是听不見的声音——超声波①。

許多动物和鳥类可以听到比人能听到的频率为高的声音，如鳥类可以听到3~4万赫兹频率的声音。这点可以用来防护露天人工水池的水不被鳥类弄污，在池岸上安一个3~4万赫兹的超声波气笛，人听不見，却能吓退鳥类。

現在讓我們用同一例子来研究如何发射声波。

管上的圓孔 盘上的圓孔

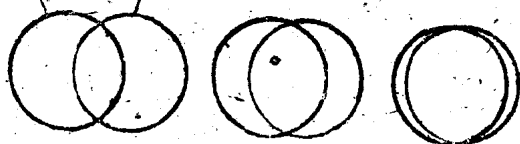


图 2

橡皮管的接头具有与盘上同样的圓孔。当接头与盘上的圓孔逐步接近时，它們就重合起来，如图2所示。同样的，也会逐渐地盖住圓孔。如果把这个过程用图加以表示，以水平直綫表示時間（秒），而以垂直綫表示一定時間內圓孔打开的面积，則可获得一正弦曲綫，其上升部分相当于圓孔面积增加，而下降部分相当于面积的减少。然后孔眼被关闭，

① 在工业上一般的表示方法是每秒振动一次或一个周期叫做一赫兹，千周的为千赫兹（KHz），百万周的为兆赫兹（MHz）。

那时空气微粒就不能通过了。这时由于自己的弹性，它們向相反的方向运动，也就是由空气微粒的密集轉变成稀疏，这时就相当于位于水平綫下方的曲綫部分（见图3）。

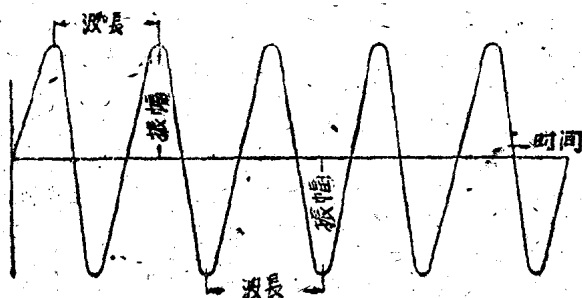


图3

气哨如有25000赫兹的超声波频率，则在图上的正弦曲线在一秒钟之内重复25000次。如果向同一的圆盘使空气通过的不仅是一个圆孔而是许多圆孔，则放出的声音就会相应地增加，但声音的音调，也就是频率不变，因为每秒钟空气的振动数并未改变。

普通的气笛由两部分组成：即不动部分（定子）和旋转部分（转子）。具有几个大气压的空气由空气压缩机送入筒内，再由筒经过定子的孔眼并连续通过转子。气笛发出声音的强度主要取决于通过空气的数量来决定。超声波的气笛可以发出强度为 $1 \sim 2$ 瓦/厘米² 的超声波振荡。

如果气笛放出的声音是低频率而强度仍是那样大时，人耳就承受不了。只要声音的强度在 0.02 瓦/厘米² 左右，就使耳朵感到疼痛。这样，火车汽笛或轮船汽笛发出的声音，在 $10 \sim 15$ 米的距离内听来，就会使人们的耳朵感到疼痛。超声波气笛可以发出强几百倍的声音，但它对我们的耳朵没有作

用。但我們把手伸进作用区域中，則会感到很燙，細微物体如在相当强的超声波作用区域中則会“悬浮”在空气中，并被声压托住，如将一小块棉花拿进超声波場，它会不冒火而发烟燃烧。那样强的声音会对周围介质产生各式各样的作用。例如，它能使悬于空气中的烟和灰尘等微粒析出。

如取长 1 米的粗玻璃管，其两端用玻璃盖紧。經接管向玻璃管中通入烟气，譬如香烟的烟。烟充滿整个玻璃管，呈灰白色。这时如开动气笛的电动机，使气笛发出频率为 30,000 赫兹的超声波。超声波穿过玻璃并进入玻璃管内部。稍等一会儿马上可以看到：烟捲的烟消散了，而玻璃管内壁上生成一条条規則的黑条（见图 4）。

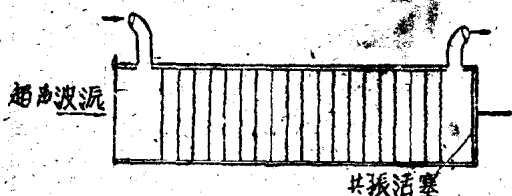


图 4

微細的固体烟粒被超声波作用聚成較大的顆粒，并很有規則地沉积于管壁上。測量黑条間的距离，得知是 1.1 厘米。

我們的气笛放出 3 万赫兹频率的超声波，也就是說每秒 3 万个周期，或 3 万次振动。大家都知道，声音在空气中每秒走 332 米远，或 33,200 厘米。低频率超声波在空气中的传播速度与声波相等，也是 33,200 厘米/秒。也就是說在一秒钟的时间里，超声波经过了 33,200 厘米的时候一共振动了 30,000 次，所以每次振动平均传播 1.1 厘米，这个距离也就是我們在玻璃管中所发现的沉烟黑条間的距离。这个距离等于 3 万赫

茲頻率超声波在空气中的波长。

所以 $\text{波长} = \text{波速} / \text{频率}$ ，这个关系式对这种声波、超声波，对空气和对水、对金属等均适用。

这样说来，超声波可使烟呈间距一个波的黑条状炭黑沉降。为什么会发生这个现象呢，这就是因为声和超声波都是波形振盪，也就是说超声波在烟中的传递是使烟粒不断地被压缩和稀疏，就象海水波浪中的泡沫都集中到浪头上一样，烟的微粒也集中到超声波的某一部位，也就是在曲线（图 3）上最大值的部位。曲线升高时的最大值叫做振幅，它对各方面应用超声波时有很重要的意义。

超声波这种能从空气中沉降悬浮物的性质对实际应用有很大的意义：能够净化电站和工厂的烟；可以沉降微细的水泥灰尘；可以沉降炭黑厂的炭黑，可以沉降磨房的面粉，等等。大家都知道，雾是在空气中悬浮的极微细的水滴，超声波经过雾后可以使这些微滴集聚成较大的水滴，它们由于本身的重力下降成雨。因此可以在大雾迷漫时打通“一个通道”，以观察海港海岸和机场上的降落符号。

高强度超声波在液体介质中又有其独特的作用，如我们将超声波振盪通入水中，在水中将会发生仿佛水剧烈沸腾的现象，然而水仍是冷的，可能是超声波赶出了溶于水中的空气，超声波的这种作用与加热现象无关，而是因为超声波振盪在液体中传布的特点，水中所含微小的空气泡，好象是密集了，体积增大了并由水中排出。这就是说超声波作用于液体的第一个效应是脱气作用。超声波脱气作用可应用于许多工艺操作中，特别重要的是金属和玻璃熔体的脱气，用这种方法可以得到无孔眼的铸件，使铸件不出废品。

此外，超声波的空化作用对乳化、分散、萃取以及其他

各种工艺过程有很大的作用。这现象将在第一章加以较详细地介绍。这里主要是要指出空化气泡的巨大破坏作用，粒子运动速度大大加快，破坏粒子的力的形成以及空化效应时所发生的其他现象，使许多物理化学和化学过程急剧强化。

如果我们取两种不能互相混合的液体如水和变压器油，用超声波振荡处理，差不多在一瞬间就会形成油在水中的稳定乳胶体，用一般方法搅拌时这两种液体仍会分层的，在超声波场中乳化和分散时，可以使颗粒分散程度达到1微米以下。这可以用来进行许多过程，如可用于药剂的生产，使药物在水中或油中成微细的悬浮液是很重要的，也可用来制取分散度高的染料、制取均质牛奶等。

高强度的超声波振荡可以破坏细菌的细胞，水呈强度为3~6瓦/厘米²的超声波处理2~3分钟基本上可达到消毒目的。用同样的方法可以对牛奶、果汁以及其他液体杀菌。由于这种杀菌法不需加热，所以可以保持食品原来的风味和全部维生素。

超声波另外能作用于各种化学物质发生聚合、解聚、氧化和水解等过程，或使这些过程得到强化。研究超声波在这方面的作用可以发现许多新的工艺线索。1952年就曾建议将物理化学科学中研究声音与超声波对各种过程和反应所起作用的部分命名为“声化学”^①。

现在我们还想介绍超声波振荡与一般声波振动的区别。

从物理学得知：如果波动之源比波长大得很多时，则其放射是有方向性的，这时波呈射线（或多或少有上下的边）传播。光波由于其长度甚短，所以是以有方向的射线形式传播

^① 声化学是恩·恩·多尔戈波洛夫1952年在超声波探伤和超声波一般问题会议上提出的（见物理科学的成就，1953年，49卷，第4期601~611页）。

的。低頻率的声波波长很大，所以空气中声音向各个方面传播，譬如打开开灯房間的窗子，房中有人在弹鋼琴，則鋼琴声在离窗不远的各处都可听到，但是光亮則从窗內向外一个方向呈帶形射出。我們知道頻率愈大，其波长也愈短，因此为了使声音有方向性，必須增加其頻率，也就是要轉入超声波的范围。超声波的性质与光波相似，可以聚焦，也可反射。

如果超声波在中途遇到障碍物，而障碍物比其波长长，則发生反射，而且反射角等于入射角。超声波的这种性质可以用于水中探索和鑄件探伤。如果以一定方向放出超声波，并用接收器接收反射波，就可以发现中途的障碍物并能測定到达障碍物的距离。

不久以前刚揭破的关于蝙蝠之迷是非常有趣的。蝙蝠在飞行中是怎样确定方向的呢，显然在蝙蝠体内有一种巧妙的超声波器官发射超声波，超声波遇到其飞行中途的障碍物就会反射回来，蝙蝠的听觉器官收听到反射的声波以后就能在黑暗中自如地确定方向。

超声波的水中探索器或回声测深器有很广泛的应用。用它可以进行海底的研究，发现冰山和寻找海中魚群。

超声波在两种介质交界处能反射的性质可以用来发现金属、橡胶、塑料和其他材料中的伤痕。

利用超声波探伤的方法不需切断样品和破坏制件就可以鑑定各种产品。超声波探伤已在生产檢驗中起着愈来愈重要的作用。譬如，已推广了蒸汽鍋炉的超声波探伤法，可以在生产上防止发生事故，鋼筋混凝土、軋鋼板、金属鑄件、輪胎等等方面也采用了超声波探伤法。

超声波振盪不仅可以在工业、技术上使用，而且可以用于农业和医学。譬如有趣的是用超声波处理种子，可以縮短

禾本科，十字花科，豆科以及其他科植物的生長時間。在醫學上超聲波受到極大的重視，已經試驗了利用超聲波治療癌症、關節炎、坐骨神經痛等重病。可以寄予希望的是在不久的將來超聲波將變成與疾病作鬥爭和防治疾病的新的有效的工具。

在食品工業中應用超聲波的可能性是相當大的，上面我們已經談到，它可以用來對牛奶、罐頭、果汁等進行殺菌。此外如牛奶、人造奶油、香料和其他行業中乳膠液的製備，糖汁的提淨和糖的結晶，以及許多其他過程都已處於能夠提出使用超聲波擬定工藝設備問題的研究階段了。

有些食品行業已廣泛地應用了超聲波，如在海洋中探測魚群的工作。利用超聲波探測魚群可以大大提高捕魚量。

在食品工業的其他部門中，正在試驗室研究利用超聲波，試驗的結果大都有效。蘇聯和國外專家進行的關於在啤酒工業中萃取酒花、酒類老熟、改善巧克力風味等方面的工作都為進一步改善工藝過程提供了可能性。

還有許多工藝過程用非食品原料試驗能否利用超聲波。這些試驗的經驗也可轉用於食品生產。蘇聯已對萃取、擴散、分子蒸餾、水解、聚合等過程予以注意。

還要提出的是可以利用超聲波測量儀表使食品生產全盤自動化。例如，可以製造控制工藝過程進行、測量密閉容器液面、測定粘度等的儀器。

由此看來，使用超聲波的可能性是非常廣泛的，但是實際應用方面還是不夠廣，主要原因之一就是因為它比電能還要貴2~3倍，其次是有效的聲波發生器設計做得不夠。沒有工業規模的生產也是不能使超聲波在工業上推廣的嚴重障礙。

获得超声波振盪的方法有数种，究竟选择那一种方法，要看要求的功率和频率范围而定。所有的方法，都是利用特制换能器将能由一种形式变成另外一种形式。

换能器可分为二类：机械型换能器和机电型换能器。

气笛是在空气介质中发生超声波最有效的机械型发生器。气笛的效率为30~60%，而频率范围可达200~300千赫兹。直到目前为止尚未研究出使气笛超声波用于液相介质方面的有效方法，因此气笛的应用范围是有限制的。

为了处理液体可以采用另外一种机械型发生器——液哨式振动器（或液哨式发生器），该类振动器利用被处理液体本身的流体能发生超声波。其强度可达1~2瓦/厘米²，频率达40~50千赫兹。液哨振动器的特点是结构极其简单，它们主要用于乳化和脱气。

还有几种机械型发生器，但是本书不打算介绍了，只想指出目前已有的几种机械型超声波发生器在结构上都是简单而有效的换能器，能在低超声波和声波范围下使用。

机电型发生器是把相当频率的电流振盪转换成超声波振盪，交流电的发生器广泛地用于现代新技术并可用来制造频率范围很大的超声波振盪。这一种发生器可以分成三种主要的类型：电动和电磁式、磁致伸缩式和压电式。

第一种类型的发生器——电动和电磁式——可用来发生低频率声波和超声波振盪（100~2万赫兹），它们的效率为30%左右，强度为1~2瓦/厘米²。

第二种类型的发生器——磁致伸缩式——使用的频率范围是20~100千赫兹，效率为50%，振盪强度为每平方厘米几瓦。

高频率振盪——10万赫兹及10万赫兹以上（一般可达到

2 百万赫兹)——是由压电式发生器发生的,该发生器可以发生几十瓦/厘米²的强度的超声波,效率是30~60%。

用机电型发生器发生的超声波比机械型振荡器贵得多,这类复杂的设备要求技术熟练的人操作,因此它们主要用于试验室和控制设备中。

到目前为止,大家认为在工艺应用上,电机型换能器只能用于小量生产和用别的物理作用因素不能解决必须用超声波才能引起特殊作用的过程中。

现在正在设计大功率的这类型的超声波装置——几十千瓦以至几百千瓦。例如苏联有一个研究所现在正设计一个功率为200千瓦的磁致伸缩式装置。

应用钛酸钡瓷质作新型压电式发生器,为制造大功率超声波装置提供了可能。用钛酸钡制造管形发生器可以使工艺过程连续化。

由于最近在制造大功率超声波换能器方面取得了巨大成就,使我们能够设想,在不久的将来工业上一定能充分利用超声波作为强化工艺过程的新因素。

第一章

超声波的物理性质

超声波是指我們耳朵听不見的、頻率为2万赫茲以上的有彈性的机械振盪，在試驗室的条件下可以得到頻率为数亿赫茲的超声波振盪，各种不同頻率的超声波振盪可用于不同的目的。

低頻率超声波振盪的性质与声波的区别不大，但是高頻率的超声波則在某些物理性质上与声音有显著的区别。

波 长

波长是指一个完整的振动時間中声波所經過的距离。

超声波的波长 $\lambda = \frac{c}{f}$ ，其中 c 为传播速度， f 为頻率，当頻率为 20 千赫茲时，在固体物质中的波长为 20 厘米左右，在液体中为 6 厘米，在气体中为 1.5 厘米，在 5 千万赫茲的最高頻率时在固体中的超声波波长 $= 8 \times 10^{-4}$ 厘米，而在液体中 2.5×10^{-4} 厘米，在气体中 0.6×10^{-4} 厘米。

声波的速度

声波的传播速度与介质的彈性和密度有关。

在密度小的介质中，声的传播速度与单位時間內振动的次数 f 无关，与声源的距离也无关。根据牛頓公式，有彈性的波

速 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ，其中 E 为介质的彈性系数， ρ 为介质的密度。