
第一章

现代物理技术在染整 加工中的应用

第一节 纺织品超声波染整加工

一、超声波简介

1. 超声波的概念 不同频率的振动传输到人耳中，引起对鼓膜的刺激而形成了对高低不同音调的感觉，这就是我们所能听到的声音。在我们生活的空间里存在着各式各样的振动，自然界就像一个庞大的声场，有些我们能够听得到，有一些我们不能感知，这取决于振动的频率。与太阳光谱按我们的感知可分为可见光（红 紫）和不可见光（红外与紫外）一样，我们也将能够听到的和不能够听到的声音总频谱做一个划分，见表 1-1。

表 1-1 声音总频谱

声波名称 性能特征	次 声 波	音 频 声 波	超 声 波
振动频率 (Hz)	<20	20~20000	>20000
感知状况	无听觉	有听觉	无听觉

由此可知，超声波就是声波的一种，只是振动频率很高，超出了人类所能感知的范围，它具备和符合普通音频声波的一般性质和规律，同时又具有自己独特的性能和特点，为人们所广泛利用。

2. 超声波的传播 与普通音频声波一样，超声波是在气体、液体和固体等弹性介质中传播的机械波。

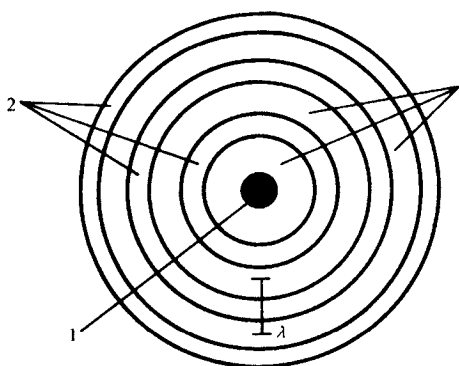


图 1-1 超声波传播示意图
1—超声源 2—压缩区 3—稀疏区
 λ —超声波波长

为了便于说明，我们用一个可周期性膨胀与收缩的（弹性）球表示一个超声波源，球的周围充满了弹性介质，如图 1-1 所示。

在振动过程中，弹性球做着膨胀与收缩的周期往复运动。当球膨胀时，它压缩与其相邻接的一层介质，而这层介质又将同一压缩传递给邻接的下一层介质，如此递推，最终此压缩传遍于全部介质空间。当球收缩时，与其直接相邻接的曾被压缩的那一层介质又会被拉伸而变得稀疏，同样通过各层介质间的联动，这一稀疏也要传遍整个介质空间。如

此呈周期性反复，不断进行着这种压缩和稀疏的交替，并向介质空间各个方向传递。由此形成了超声波的传播。

在超声波的传播中，两个相邻的压缩或两个相邻的稀疏之间的距离为波长。在超声波传播辐射过程中，声源要对外做功。把单位时间里由超声源向外辐射出的能量称为超声波的功率。单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积上的平均能量称为声强。按声强的大小超声波又可分为低强度超声波和高强度超声波，在染整纺织品加工中应用的一般为高强度超声波。超声波 1s 内完成压缩与稀疏的振动的次数称频率。

与普通音频大的声强声波相比，超声波具有高的频率，短的波长，大的声强。声强 I 的计算公式为：

$$I = \frac{1}{2} (A^2 \omega^2 \rho v)$$

式中： ρ ——介质密度；

A ——振幅；

ω ——频率；

v ——声速。

由公式可知，声强与频率的平方成正比，超声波频率越高，声强越大，可以产生很大的功率，近代超声波技术能够产生几千瓦的功率。

超声波传播空间中的任一点在某一时刻具有的压强 P_1 与该点没有超声波存在时的静态压强 P_0 之差，称为（超）声压 P ，其中 $P = P_1 - P_0$ 。声压 P 的计算公式为：

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} (A \omega \rho_0 v)$$

式中： ρ_0 ——静态介质密度。

可以看出声压与频率成正比，超声波频率越高，声压越大；由于超声波的频率要高于普通音频声波，故其声压也大于普通音频声波的声压。

超声波的传播依赖于介质，在真空中是不能传播的。在传播过程中，超声波的能量可部分被传播介质吸收，被吸收能量的多少与介质有关：气体介质吸收超声波能最多，液体次之，而在固体中超声波能被吸收的最少。此点与电磁波恰好相反。超声波传播时介质粒子的振动方向可垂直于波的传播方向，称为横向波；也可平行于波的传播方向，称为纵向波。在固体内横向波、纵向波均可传送，而在气体和液体中只有纵向波可以传送。同样，超声波的传播速度也取决于介质性质和种类；在密度大或弹性大的介质中，传播速度快，反之，则具有较慢的传播速度。此外超声波的传播速度还与介质温度、压强及介质含杂状况有关。一般在空气中传播速度较慢（约为 340m/s），在水中传播速度较快（约为 1500m/s），而在固体中，特

别是金属材料中，传播速度最快（约为 5800m/s ）。从以上分析来看，用超声波对纺织品进行染整湿加工是最为合适的。

3. 超声波的集束与聚焦 我们知道光可以形成光束，当可见光线照到一定体积的不透明物体时，不能绕过物体而被物体所阻挡，会在屏幕上留下物体的阴影。而声波能否也像光波那样形成声束而使物体留出声影呢？这实际上取决于波长与阻碍物的大小。当声波长大于或接近阻碍物的线性长度时，声波便可绕过阻碍物，传向四周而不留影子；反之当波长小于阻碍物的线性长度时，声波则被阻碍物阻碍，而留下影子（即声影）。

音频声波波长从几十厘米至几米，因而一般的物体对音频声波是不会构成阻碍的，更不能形成声影。而超声波的波长要短得多，数量级在几毫米，甚至更短，因此它与光波类似，可以产生声影，像光束一样，我们可以得到窄束的超声波，此过程称为集束，这种窄束称为超声束。

实践表明，超声束与光束在传播性质上有很多类似的地方，如超声束在入射到两种介质的界面时，也会产生入射束、反射束和折射束，而且符合几何光学的规律，并和光束一样，人们也可通过声透镜对超声束进行聚焦，将超声波全部能量聚集到一个不大的范围内和所需要的方向上，减少能量耗费，提高超声波强度。超声束的更优越之处还在于它既可在透明的介质中传播，也可在不透明的介质中传播，便于利用超声束研究、加工不透明的物体。

通常从超声波辐射器发射出来的超声波，强度和功率均较低。而实际应用过程中，一般都需要超声波具有较大的功率和声强度，因而往往需要对超声波进行聚焦，以将能量集中使用。聚焦的方法有多种，如可采用声凹面镜法、声凸透镜法、聚焦辐射器法等给超声束聚焦。聚焦辐射器有抛物面式、管式、球面式、半柱面式等等。超声束经聚焦后，声强可以增大数十倍，可提供巨大的声场密度。一般聚焦点的直径近似等于超声波波长，因此振动频率越高，聚焦点的直径越小。

4. 超声波的“空化效应” 高强度超声波在液体中传播时，能够产生能量的激化和突发，这就是著名的超声“空化效应”。

超声波在液体中传播时，液体中某一点 A 要受到交变的声压与该点处液体静压力的综合作用，我们知道当液体静止时， A 点处的静压力与液面高度 h 和液面上的大气压 P 有关，见图 1-2。为了便于分析，假定 A 点位于液面附近， $h \approx 0$ 此时 A 点处静压力近似为外界大

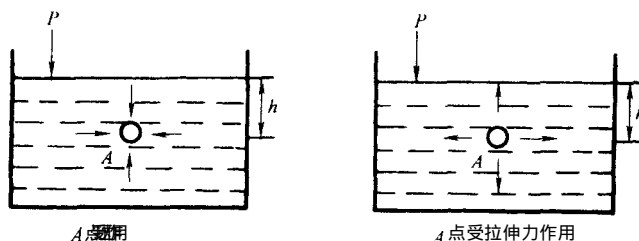


图 1-2 液体中的 A 点在超声场中的受力状态

气压力即 101.33kPa。当液体中有超声波传播时，液体介质要做压缩与稀疏的周期振动，超声波交变的声压也要叠加在 A 点处，我们假定声压为 50.66kPa。那么当处于压缩阶段时，A 点处总压力为 151.98kPa；当处于稀疏阶段时，声压变向，A 点处总压力为 50.66kPa。改变声压，A 点在压缩和稀疏阶段所处的压力状况如表 1-2 所示。从表 1-2 可知，在所示的声压变化范围内，A 点在压缩阶段均受压力作用，但在稀疏阶段 A 点的受力性质却随声压的变化有所改变。在稀疏阶段，当声压小于 101.33kPa 时，A 点处受压力作用；当声压等于 101.33kPa 时，A 点处不受力，处于零压力状态；当声压大于 101.33kPa 时，A 点处受力性质由压力转变为拉伸力，且随着声压的增大拉伸力也加大。

表 1-2 A 点在压缩和稀疏阶段所受的压力变化情况

阶段 \ 声压 (kPa)	50.67	101.33	152	202.66
压缩	152	202.66	253.33	303.99
稀疏	50.67	0.0	-50.67	-101.33

液体对这个拉伸力的作用极为敏感，也就是说当超声波在稀疏阶段通过液体时，拉伸力的作用会将大量液体撕裂，并形成大量极其微小的气泡，即空化泡。这些空化泡虽迟早要膨胀破裂，但它们有的存活时间极短，仅存于压缩与稀疏振动的半个周期内，有的却可以保持相对较长的时间不破裂，存活时间达几十个甚至几百个周期。当这些巨量的空化泡破裂时，能释放出巨大的能量，可以产生高达几百个大气压的局部瞬间压力，形成冲击波，并可使液体温度升高，这就是高强度超声波特有的“空化效应”。由这个“空化效应”所造成的冲击波，可以使处于其作用范围内的固体表面及液体介质受到极大的冲击力作用和机械的“破坏”，它的能量足以打断很强的化学键结合，使超声波具备了许多可被广泛利用的特殊功效，这也是超声波能被应用于染整湿加工的理论基础。

研究表明液体的撕裂将首先发生在介质相体不均匀处，通常是气泡杂质微粒存在的区域，被称为空化核。

“空化效应”的产生及其“破坏”程度与超声波的频率、强度、液体温度及种类等多个因素有关。铝材表面在不同液体中受“空化效应”破损程度与温度的关系曲线如图 1-3 所示。空气（或其他气体）在液体中的溶解状况对空化破损程度有很大影响。当液体温度升高时，气体溶解度降低，溶解的气体以气泡形式被释放出来，空化核数目增多，故空化破损程度增大。从图 1-3 中可以看出，随着温度的提高，空化的破损程度增大，但存在一个最大值。达到最大值后，破损程度随温度的提高反而下降。这可能是由于温度过高，液体蒸汽及溶解在液体里的空气弹性增大，并向空化泡扩散，对空化泡的破裂形成压制作用，抑制了空气泡的破裂，而不能形成强大的冲击波，冲击力大大降低，因而达到最大值后，继续升高温度，破

损程度要下降。不同的液体对应不同的峰值温度和最大破损程度值，水在温度为 50 时，产生的“空化效应”最为强烈，破损程度最高；同时也可以看到在同一温度下，水的空化破损程度要远大于其他有机溶剂，这是由于空气在水中的溶解度较小，水中空气微小气泡较多，而易于诱发“空化效应”的缘故。

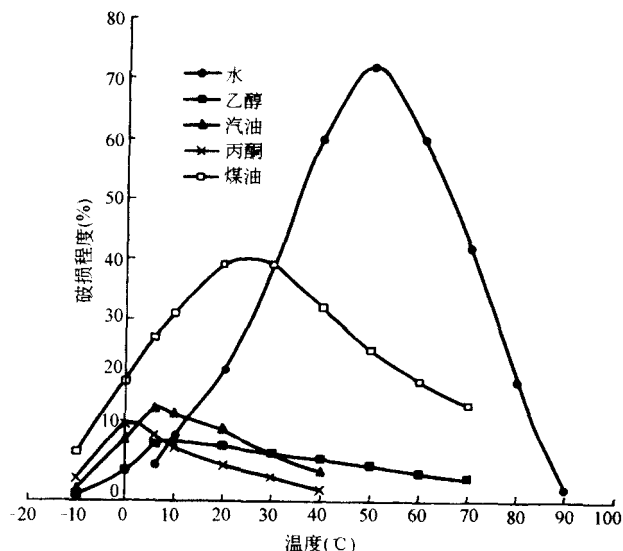


图 1-3 不同液体的“空化效应”破损程度与温度的关系

实践证明，通过调节参数，我们可以对超声波的“空化效应”予以合理控制，对“破坏”性强度予以调节，使得“空化效应”可以被各个行业领域所利用，超声波加工技术被合理开发。超声波“空化效应”就是通过这种参数调节手段被应用到染整湿加工上的。

5. 超声波的产生 在我们周围的环境中充满了超声源，大自然本身就是一个天然的大超声场。风声、海浪拍击声、火车的噪声等都有超声波的存在，许多昆虫、动物都可发出超声波，这些都是被实践证明了的。但天然的超声波强度和功率一般都很小，只是在某些特殊的环境中，才会有高强度的超声波。如：喷气式飞机的噪声，大型工程机械的噪声等等。哪些真正可以应用于各种领域中的超声波还需要用特定的超声波辐射器发射出来。

目前的超声波辐射器主要有机械型、电磁型和电磁—机械型。

机械型超声波辐射器，成本低，结构简单，易于操作，但它产生的效率较低，发射功率也较低。

电磁—机械型超声波辐射器又可分为：电动式、磁致伸缩式和压电式三种。这类辐射器可以发出频率很高的超声波，发射功率也较大，工作状态很稳定。在它的结构中无需气体流或液体流，也没有任何转动部件，体积可以做得很小，但它的成本较高，操纵较复杂。在染整加工中以磁致伸缩式超声波辐射器最为适宜，它发射出的频率在 20kHz~150kHz 之间。

二、超声波在染整加工中的应用

(一) 超声波基本性能与染整加工

强超声波在周期性的压缩和稀疏传递过程中，能产生高能的“空化效应”，空化泡的膨胀与破裂会引起一系列的力学、热学、化学等方面的反应。单个粒子在强超声场内可以获得巨大的能量和加速度，可以引起液体的剧烈搅拌并产生超声喷泉现象。强超声波对物质及加工介质一系列综合作用，对纺织品的染整加工有着十分重要的意义。染整加工中所涉及到的强超声波的性能作用，主要有以下几个方面：

1. 分散、稳定作用 可以利用空化泡膨胀及破裂时产生的巨大压力和拉伸力来粉碎和冲击颗粒物质、分散相及分散介质，使颗粒或液滴更为细小，所得悬浊液或乳浊液更加稳定。

在染整加工中，染料的聚集状态对染色效果有直接的影响。染料的上染必须以单分子态来完成。染液中染料分子或离子的聚集体颗粒越细小，染料消耗越少，所得到的颜色越鲜艳、饱满，牢度越好。为了证明超声波粉碎颗粒的作用，在国外有人用颗粒大小分布不均匀的分散染料做了实验。这些染料中约有 50% 颗粒直径小于 $1\mu\text{m}$ ，有 30% 左右大于 $20\mu\text{m}$ ，经过 50kHz、150W 的强超声波处理 15min 后，有 90% 的颗粒直径小于 $1\mu\text{m}$ ，而只有不到 2% 的颗粒直径大于 $20\mu\text{m}$ 。显然经超声波处理后，染料颗粒明显变小了，而红外光谱分析实验表明染料的分子结构却没有发生任何变化，仅仅是聚集态的改变，这也表明超声波对染料有很好的解聚作用，从而使染料在分散介质中分布更均匀，悬浊液更稳定。

在染整加工中，经常要用到各类乳浊液，特别是在后整理工序中，整理剂工作液等乳浊液的分散状态与稳定性对加工效果有很大的影响。超声波处理是产生稳定乳浊液的极佳方法之一，它可以得到大小均匀、极为微小的油滴，使得乳浊液相当稳定，能保持很长时间。由于微小的油滴比表面积很大，因而使得染化药剂与纤维间化学反应进行得快而变得容易。应特别指出的是，一般的乳化方法只能获得比重相近的两种不互溶液体的乳浊液，而只有超声波可将比重相差甚远的两种互不溶液体乳化、稳定分散。超声波这种极佳的分散乳化作用，在染整前处理的精练过程中，也具有十分重要的意义。

2. 均化作用 超声波空化泡的膨胀与破裂可以产生强大的力学效应，不仅可将分散在液体中的颗粒粉碎，还可使分散相与分散介质、溶剂与溶质快速均匀地混合，以使在整个工作液体系统中，不产生浓度梯度或浓度差，此称为超声波的均化作用。

在染整加工中，随着生产过程的进行，在织物纤维表面附近的工作液浓度要低于主体工作液的浓度而产生浓度梯度，这将降低染化药剂与纤维表面接触而发生物理、化学反应的效率，使得染整效果受到影响。为使工作液均匀，传统的方法是采用简单的机械搅拌以及靠浓度梯度的自发迁移的方式。这些方法往往操作不方便，所需时间相对较长，均匀化速度慢。若在染色过程中配以超声波处理，强大的冲击波对工作液形成剧烈搅拌，产生“超声喷泉”

现象，使工作液体系瞬间同化、均匀，而保证了良好的染整加工效果。

超声波在化、配料过程中也可使各类染化药剂在极短的时间内稳定分散、均匀混合。

3. 破坏边界层作用 当液体与固体接触时，液体沿液—固界面附近的流动速度要远低于液体主体流动速度，而且在界面处的流动速度趋于零，这是液体的粘滞性所决定的。液体的这种粘滞作用，使得在固—液边界面上形成了一个边界层，它就像贴在边界面上一样。在边界层内，液体的流动极为缓慢，几乎趋于停滞状态。边界层的厚度与液体粘度、固体表面光滑性以及液体主体的流动速度等因素有关。由于这个边界层的存在，阻碍了液体主体与固体表面的接触，对固体表面形成了封闭作用。

从染整加工上看，染液（或其他工作液）与织物纤维表面同样存在着扩散边界层，阻止着染料向纤维表面的扩散，对染料的上染速度有很大的影响。

超声波的“空化效应”，使得固体或纤维表面受到极大压力的冲击，强大的激流使得边界层被打破，因而改变了液体在固体表面的流动状态。染色时经超声波处理，随着扩散边界层的打破，消除了染料向纤维表面扩散的障碍，使得染料的上染易于进行。

4. 加速扩散作用 实践表明，超声波可以加速液体向具有多孔性疏松结构的物质内部扩散的进程。这个特性对于纺织品染整加工及皮革的鞣制与上色等有着十分重要的意义。

有报导说，在超声波的作用下，皮革的熟化过程可以从 10h 缩短至 2h，鞣制过程可从 10h 缩短至 4.5h，染色过程可从 4h 缩短至 1h。

由于超声波“空化效应”的影响，液体中的分散相（颗粒或油滴）被充分“击碎”，变得极其微小，使得它们易于运动，扩散系数增大，扩散速率加快，可进入到纤维物质内部；同时又由于比表面积的增大，加速了它们在纤维内部的化学反应；而超声波对扩散边界层的破坏，更加促使这些微小粒子向纤维物质内部加速扩散。从染色过程来看，超声波能够促进染料上染，打破染料上染时的阻碍层，加速了主体染液在纤维表面区域的交换和补充，促进染料向纤维内部的扩散；同时超声波还能降低染色活化能，使纤维变得易于上染。如：超声波可使人棉的上染速率提高 30%~40%。

特别提及的是，超声波可能会增大无定形区域，提高大分子链段的活性，使侧序度降低，分子结构变得相对“膨化、疏松”，另外还可能使纤维的结晶度和取向度降低。所有这些，使得原本很难上染的合成纤维（如涤纶等）变得相对容易染色，纤维的可染性大幅度提高。

5. 除气作用 在超声波的作用下，溶解残留在液体中的小气泡，呈周期性的压缩和膨胀，自身引起振动，这种高频振动的结果，会导致气泡之间相互吸引，并彼此结合在一起，形成大的气泡，从体系中排出。

在染整加工中，超声波的这种除气作用，可将织物纤维毛细管及经纬结点处溶解、截留的空气（或其他气体）从织物内部赶至工作液中，并连同工作液原有溶解的小气泡一起排出

至大气中，从而有效地消除了由于各类气体（泡）的存在，对纺织品染整加工带来的影响，进一步增强了工作液对纤维的渗透和润湿作用，有利于工作液与纤维的充分接触和纤维对于染化料的吸收，使染整加工效率和效果得到提高。超声波的这种除气作用对于厚密织物的染整加工，显得尤为重要。

6. 清洗作用 超声波空化泡在破裂瞬间，对浸在液体内的固体物质表面形成的强大的冲击和破坏，可以去除固体表面上的各类污垢层，且去除效率之高是一般洗涤剂远不能及的。当所用洗涤剂不能与污垢物质发生化学反应时，超声波特有的清洗作用的优越性就被充分地体现出来了。

超声波的去污清洗被称为“爆炸型”的剥离过程。它首先可使污垢层（或膜）产生大量的裂缝，然后在空化泡进一步连续作用下，形成大量碎片，并使之成片剥落而进入液体中。借助超声波的分散、稳定作用，脱落的较大污垢块又继续被超声波粉碎成极小的颗粒（或油滴），被稳定地分散在液体中，完成污垢的溶解过程。超声波清洗的最大优点是清洗速度快，效率高，可获得很高的净洗质量。另外简便、成本低也是其一大特点。它被广泛应用于精密零件、电子仪器仪表、光学器件的清洗，在轻、化工生产中超声波的清洗作用也被广泛应用。

在染整加工中，利用超声波的清洗作用，可进行苧麻纤维的脱胶、羊毛纤维的脱脂，对于天然纤维的蜡质、果胶、高级醇及脂肪类非水溶性有机物乃至纺织品上的淀粉和化学浆料均有良好的去除作用，对于辅助前处理的精练加工，提高精练效果有着十分重要的作用。对于染整后处理水洗过程，超声波清洗可以大大提高水洗效率，配合超声波的其他性能，可使水洗更为彻底，水洗质量大幅度提高，更能达到节水、降耗的目的。

7. 热效应 超声波的高频振动可引起水分子的极化，导致水分子不断取向，产生热运动；空气泡的破裂给毗邻液体造成巨大的压力，将使部分动能转换成热能，强大的超声场被液体吸收后也会将部分能量转变成热能。所有这些综合的效果，最终可使处于超声场中的液体温度大幅上升。

染整加工中，工作液温度是一个重要参数。在通常情况下，提高温度是使纺织品获得良好的染整加工效果的重要手段。利用超声波处理产生的热效应，实现超声波升温，提高工作液温度，在增强精练效果、加速染料上染等方面有着十分重要的意义。

从以上的论述可以看出，纺织品染整加工中的许多工序都能涉及到超声波种种特性的应用，如染整工作液的配制、精练前处理、染色、水洗后处理等等。其中可以是超声波某一性能单独起作用，但更多的是各个性能综合作用的结果。超声波对于染整加工的多种促进作用及对产品质量的改善和提高，已被实践所证明。国内、外有很多人从事这方面的研究工作，焦点集中在工艺参数和影响因素的探索以及生产实施过程中的一系列难题的解决，并取得了

一些可喜的成果。目前认为超声波在纺织品染整加工中的功效主要有：

(1) 改变纤维高分子材料表面及微结构。如前所述，强超声波在液体中产生“空化效应”，形成空化泡或气穴。空化泡在闭合或破裂时，可以产生几百个大气压的局部瞬时压力。形成的冲击波可使作用范围内的固体表面受到剧烈的冲击和损伤，损伤程度的大小与超声波强度、液体介质种类、温度、时间等因素有关，也就是说“空化效应”对固体表面的损伤程度是可以通过合理调节各影响参数予以控制的。从染整加工的角度出发，合理利用超声波的“空化效应”，按需要对纤维高分子材料表面进行一定程度刻蚀或糙化是我们最感兴趣的工作，它可以使纺织品的染整加工易于进行，并可获得具有某些特殊功能的纺织品。

有资料表明，超声波糙化处理，可以引起纤维的原纤化，提高纤维的比表面积，当频率达到 100kHz 以上时，还可能导致大分子断链，聚合度下降。

羊毛纤维经超声波处理后，观察其表面，发现羊毛鳞片变钝，尖部受损，鳞片层之间有开裂现象，从而说明了超声波对羊毛纤维表面的刻蚀作用。羊毛鳞片的这种损伤可降低羊毛的定向摩擦系数，赋予羊毛防毡缩性能；同时由于膨润性的增加，提高了羊毛的可染性。红外光谱分析表明，羊毛纤维经超声波处理后主要官能团吸收峰无明显变化，但相应基团的波数有所提高，这说明超声波处理可削弱分子间作用力及分子内的氢键。

由超声波引起的“空化效应”，对纤维的超分子结构也有一定影响。国外学者认为，由于在纤维微结构存在着某些不均匀性和不确定因素，使得超声波处理对纤维结晶的进程有一定的削弱作用。在纤维微结构中有能量集中，使结晶中心及体积较大的晶体受到机械冲击，导致晶区“开裂”，晶体单元间产生滑移，且裂缝逐步扩展，产生新的表面。纤维微结构的这种变化，扩大了染料分子的可及区域，提高了染料对纤维的吸附和上染能力。有关超声波对纤维微结构的影响，目前尚无定论，尚需进一步的研究和证明。

(2) 提高前处理精练效果。由超声波的“空化效应”而产生的分散、乳化及净洗作用，对染整前处理加工有着良好辅助作用，在不同方面能够促进和改善退浆、精练和漂白的效果。

通过超声波的净洗作用，能促使织物上的淀粉及化学浆料膨化、剥离，特别是对一些用常规方法难于去除的浆料，用超声波处理可获得良好的退浆效果。在棉织物退浆过程中，配以超声波的作用，结果发现退浆率有一定程度提高，并可减少染化药品的用量，降低处理温度，削减能耗，而退浆后织物获得的白度和润湿性均在常规退浆方法之上。国外有资料报导，超声波有助于棉织物的双氧水漂白，其实验结果表明超声波可降低双氧水的分解率，提高漂白剂的利用率，可使织物获得更高的白度。在达到相同白度值的前提下，与常规双氧水漂白工艺相比，超声波漂白消耗小，可明显减少试剂用量，并具有相对较低的漂白温度，在漂白时间上也明显缩短。对于提高白度值，提高生产效率，节能、降耗、降低成本有着积极的意义。国内学者在对羊毛纤维超声波条件下的氧漂进行研究时也得到了类似的结果。

有实验表明，超声波在苧麻脱胶处理中有着明显的作用。通过合理选择适当频率和功率的超声波，可以大幅度提高脱胶率，缩短脱胶时间，特别是能有效避免传统的化学脱胶工艺对苧麻纤维的损伤。

(3) 提高染料的染色性能。超声波可被应用于多个染整加工工序之中，但从加工效果、生产效率和成本等方面综合考虑，将超声波技术用于染色工序是最为有利的。

苏联学者在很早就对超声波染色进行了深入研究，并率先将超声波技术推向了实际生产，取得了较好效果，为超声波染色的理论与实践奠定了良好的基础。

超声波的分散乳化及稳定作用、破坏边界层作用、除气作用和加速扩散作用等综合性能，为超声波染色提供了坚实的理论依据。

总的来讲，超声波染色能够提高染料的上染速率和上染百分率，提高染料和助剂利用率，减少染化药剂的用量，降低上染温度，与常规的染色工艺相比，具有较低的上染工艺条件，使得工艺更易于控制。另外它的生产效率高，节能降耗，特别是可减少染化药剂的排放量，减轻环境污染，这对于实现染整加工的清洁生产有着十分重要的意义。

首先用超声波化料或处理染浴，可使染料被充分溶解、分散，且十分均匀，这可直接导致染料上染速率和上染百分率的提高。在对直接染料超声波条件下上染棉和粘胶纤维的研究中，发现可使染色速率提高 2~3 倍，且随着超声波频率和功率的增加，染料的亲和力和上染百分率也随之增大。低频超声波对直接染料的上染影响不大，当频率达 20kHz，功率到 180W 时，直接染料对丝光棉的亲和力有明显提高。在常规的染色过程中，若染液中染料浓度高，染料分子结构大，则会造成染料的大量聚集，从而给染色带来很大的负面作用，严重影响染色效果。当用超声波辅助染色时，超声波对染料的解聚作用最大程度地减少或避免了染料的聚集，使得染料能保持以单分子状态上染纤维，因而使得染色效果得到明显改善，这是常规染色方法所不及的。超声波的这种促染作用对于染浴浓度高、分子结构大的染料显得尤为突出。

国外有研究表明，超声波作为有效的染色促进剂，在较低的温度下对丝绸、锦纶等纤维的染色有很好的促染作用。分别用碱性、酸性及金属络合染料，在超声波存在下对丝绸进行染色，其结果见表 1-3。

表 1-3 超声波对不同染料上染丝绸的影响

染料	超声波染色			对照染色样品 剥色液吸光度	吸光度增量
	温度	时间	纤维剥色液吸光度		%
	℃	min			
C.I. 碱性蓝 9	35	15	0.031	0.020	55.0
	45	30	0.039		95.0

续表

染料	超声波染色			对照染色样品 剥色液吸光度	吸光度增量
	温度	时间	纤维剥色液吸光度		%
	℃	min			
C.I. 碱性绿 4	50	15	0.468	0.199	135.1
C.I. 酸性蓝 45	35	15	0.049	0.032	53.1
	45	30	0.063		96.9
C.I. 酸性红 106	50	15	0.388	0.176	120.4
C.I. 媒染红 19	50	15	0.088	0.047	87.2

注 超声波染色条件为 26kHz, 120W, 浴比 50:1。对样品染色条件为 60℃, 30min, 浴比 50:1。

从表 1-3 中可以看出, 超声波染色时染料的上染量明显高于无超声波条件下的对照染色样品, 染料的上染量与温度、超声波染色的时间等因素有关。与对照样品相比, 超声波染色的温度更低, 所需时间更短, 染料上染量更高。

(二) 超声波染整加工的特点

在纺织品的纺、织、染一整套生产过程中, 染整作为美化纺织品的加工环节, 占有极其重要的地位。传统的染整加工为典型的化学处理过程, 需要使用大量的染化药剂(无机物、有机物、高聚物等), 配合以较高的温度及足够长的时间, 实现染化药剂由介质相向纺织纤维材料内部的迁移, 来完成纺织品的染整加工过程。这期间要耗费大量的水、电、热能, 有许多的染整废弃物(以印染废水为主)被排放到自然环境中去而带来严重的环境污染问题。进入 20 世纪 80 年代, 随着科学技术整体水平的提高, 带动了纺织染整新技术的发展, 从物理的角度审视化学问题, 节能低耗, 高效少排放或无排放的染整加工方法一直是染整工作者的追求。特别是现代高新物理技术的发展, 使人们将物理方法运用到染整加工中去成为可能, 超声波染整加工就是在这种形势下为人们所关注的。与传统染整工艺相比, 超声波染整具有无法比拟的优点, 概括起来主要有以下几点:

1. 实现低温染整加工“空化效应”是超声波应用于染整加工的基础, 它的形成与发展直接关系到超声波染整的效果。实践表明“空化效应”的产生与液相介质的温度有关, 产生“空化效应”的最佳液体温度为 50℃。这就意味着染整工作液为 50 时, 超声波染整的效果最好, 实现低温染整。

2. 对织物纤维损伤小 超声波的“空化效应”与声强度及功率有关, 在合理的声强度的功率下, 超声波对纤维不会有明显的损伤。通过观察发现经超声波处理的纤维横、纵向截面与普通的非超声波处理几乎一致。红外光谱测定表明, 超声波处理对纤维分子结构也没有什么显著影响, 更重要的是由于属于低温加工, 可避免传统高温处理方法给纤维带来的各种损伤, 使纺织纤维得以保留其固有的物理机械性能, 减轻织物的各种折、皱痕。

3. 降低染化药剂用量 节省能耗 总体来讲，超声波染整具有速度快、效率高的特点。如前所述，超声波能提高染化药剂扩散系数、降低染料上染活化能、染色速率快、染料上染百分率高等等。由于大大提高了染化药剂的利用率，故在保证同样的染整加工效果的前提下，染色药剂的用量要低于传统的染整加工，有些助剂甚至可以不用，因而大大降低了染化药剂的消耗；另外由于可实现低温加工，并且与传统染整工艺相比，大大简化了生产流程，可以明显缩短加工时间，使得对能源的消耗显著减少，总的结果使加工成本大幅度降低，这对于现代企业生产具有十分重要的意义。

4. 生产清洁、环保 就超声波本身的产生及在染整加工中效应的发挥而言，它是属于纯物理加工，本身不涉及到任何化学药剂，同时又可大大降低织物染整所必须的染化药剂用量，使得废水浓度低，对外排放少，减少了对环境的污染，有利于实现染整清洁生产，有助于解决或缓解传统染整加工的环境污染问题。

（三）超声波染整的影响因素

研究表明，影响超声波染整效果的因素有多种，但主要是超声波强度、功率、频率、染料及纤维基质种类及处理温度和时间的影响。

超声波并非在全频谱范围均能产生良好的“空化效应”，频率过低引发的“空化效应”强度弱、能量小，不利于空化作用的发挥。频率过高的超声波，获得难度大，消耗能源也较大，同时“空化效应”也难于产生及有效发挥，因大部分的超声能被转换成了热能并为液相介质所吸收，使介质温度大幅提高。对不同液相介质来说，有效的空化作用频率一般在 5~50kHz 之间。对于介质水相来说，频率在 20~50kHz 范围内能产生较好的“空化效应”。

超声波强度及功率对平衡染整效果及纺织纤维机械强度的关系起决定性作用。合适的声强度及功率，可以产生理想的“空化效应”及适宜的冲击力，使超声波对纤维及染化药剂的各种作用得以充分发挥，同时又避免了冲击对纤维高分子材料的降解及原纤化等副作用，这一点显得尤为重要。在一定范围内，染料对纤维的上染百分率随超声波强度的增加而提高。有资料表明强度在 $1\text{W}/\text{cm}^2$ 左右时，比较适合于染色工序。

纤维及染料的品质，对于超声波染整也有一定影响，不同结构的纤维及染料对应不同的处理工艺（如超声波频率、强度、介质温度处理时间等），才能获得满意的加工效果。一般来讲，超声波的分散乳化作用对于难溶易聚集型染料最有效，对于结构大、上染困难、上染速度慢的一类染料具有更明显的促染作用。超声波对纤维素纤维的促染效果十分明显，如它可以增大直接染料对纤维素纤维的亲合力，使染料的上染速率及上染百分率均随超声波功率及强度的增加而提高。非水溶性染料上染疏水纤维时，用超声波染色法效果最突出，如：对聚酯和醋酯纤维的分散染料超声波染色来讲，相对于传统染色法，超声波对分散染料的上染率几乎没有增加作用，而对于分散染料的上染速率则有明显的提升，对染色速度影响极大。有

资料报导，对于丝绸织物，在 26kHz、120W 的超声波存在下，用酸性染料进行低温、短时染色，上染速率较传统丝绸染色法有明显提高。对于醋酸纤维素而言，在 24kHz 的超声波条件下，可以显著提高染料对其上染的百分率，得色量增大。

工作液温度及处理时间也是影响超声波染整效果的重要因素。实践证明，在 40~50 的水相工作液下，最易于产生合适的空化作用。在其他因素不变的情况下，温度过高或过低都不会产生良好的染整效果。目前在所涉及的范围内各类纤维的超声波染整加工，都是在低温条件下进行的，低温加工是超声波染整的突出特点之一。通常随着处理时间的延长，有助于染整效果的提高，但过长的处理时间可能会引起对染料及纤维的破坏，特别是纤维强力的损伤。但过短的处理时间同样也不能完成超声波加工过程，使空化作用不充分，导致染整效果下降。速度快、时间短也是超声波染整的突出特点，在达到同样的染整效果前提下，超声波的存在可使加工时间较传统染整工艺缩短很多，因而超声波染整往往处理时间相对较短，但需要视具体的染料、纤维织物结构状况、超声波强度及功率的情况而定。

三、超声波染整的发展前景

从上面的论述我们知道，超声波的染整加工主要是基于强超声波“空化效应”。实际上这种“空化效应”的形成与作用是一个非常复杂的机理，它集声学、光学、力学及化学等于一体，涉及到多方面的学科。随着对超声波的研究和认识的不断深入，它已被许多领域所应用，并证明具有良好的应用效果和广阔的发展前景。利用超声波可以改善和加速许多生产的工艺过程，这是被理论与实践所检验了的。对于超声波染整加工中应用的研究也一直被人们关注，研究表明超声波染整具有很多优点和独特的地方，有些效果是其他染整加工方法所不能达到的。特别是在当前对环保指标要求很高的形势下，超声波染整对于染整清洁生产、减少染整废水排放、节能降耗有着十分重要的意义。

但是在开发和实施超声波染整技术的同时，我们不得不承认该项技术的实际应用离我们所预计和期待的还相差较远，这主要是由于目前的设备、噪声及加工成本等方面的因素造成的，使得超声波染整技术国内至今尚未能在实际生产中批量应用。人们已经认识到，欲将该项技术真正实施到生产中，除了必要的基础理论及实验室研究工作外，更重要的还是要解决适于工业化生产的超声波发生设备、劳保方面的措施以及各实践环节的匹配和畅通等问题。有关这方面国外已有多个专利，并用于解决实际问题，实现了批量生产。染整界内人士认为超声波染整独特的加工方式及作用机理对于加工观念的变革有着十分积极的推动作用，它给人们带来了较大的想像空间，为纺织品染整加工开辟了一条物理与化学“相结合”的新途径，具有很大发明潜力，亟待开发挖掘。相信经过人们的不懈努力，随着超声波技术及设备的不断完善和推广，一定能彻底解决阻碍该项技术推广的难题，将设备投资和加工成本降下来，

在我国真正将超声波染整技术推向实践生产，发挥其应有的作用。

第二节 纺织品电磁波辐射染整加工

一、概述

物质经电磁波辐射后，能够引起内部结构产生物理及化学的变化，而使得物质的可应用或可加工性能得到综合改善。对于那些用常规方法难于进行和操控的加工，用电磁波辐射法往往很容易实现，通过辐射处理我们可以引发、催化、控制某些反应，实现对物质的改性和制造出新的产品。从广义上看，不同波长和能量的电磁波都可作为辐射源，但它们对物质辐射所产生的结果却有着差异。电磁波谱及其波长能量见表 1-4。

表 1-4 电磁波谱

电磁波种类	波长 (nm)	能量 (eV)	电磁波种类	波长 (nm)	能量 (eV)
无线电波	$>10^8$	$<10^{-5}$	γ 射线	<100	$10^3 \sim 10^6$
红外线	$780 \sim 10^4$	0.01~1.6	α 射线		$10^6 \sim 10 \times 10^6$
可见光	380~780	1.6~3.3	β 射线		$10^3 \sim 3 \times 10^6$
紫外线	40~380	3.3~310	加速电子		$0.25 \times 10^6 \sim 15 \times 10^6$
X 射线	<100	$10^3 \sim 10^6$	中 子		$1 \times 10^6 \sim 12 \times 10^6$

电磁波辐射能目前已被广泛应用于医药卫生、轻化工程、冶金机械、电子电信及农业生产等各个领域，并取得了很好的效果。特别是随着物理高新技术的发展，作为一种新颖能源，在保证安全的前提下，合理开发和利用辐射能，对解决和缓解当今日趋严重的环境污染问题有着十分重要的意义。传统的纺织品染整加工主要是湿热条件下的化学加工，整个染整加工过程需要添加和排放大量的染化药剂，耗费大，对环境的污染严重，为此如何将电磁波辐射能应用到纺织品染整加工上来，实现高效安全、节能、环保的染整加工方法，一直是广大纺织染整工作者所关注的问题。自从 20 世纪 50 年代人们开始对纺织品的电磁波辐射能染整加工进行研究起，几十年来辐射能已涉及到练漂、染色、印花、整理等各个工序，并取得了可喜进展。前苏联对高能射线纺织染整、纤维接枝变性等领域的应用进行了深入系统的研究，并实现了批量生产。美国曾对 N-羟甲基丙烯酰胺进行辐射处理，用于涤棉织物的防皱整理，生产出了兼有耐久压烫和易去污性能的双功能产品，取得了良好的经济效益。日本、英

国、德国等纺织发达国家通过电磁波辐射能处理，改善天然和合成纤维的染色性能，并进行了大量研究工作，研究成果近年来被逐渐推向实际大生产我国科技工作者目前在辐射能染整加工方面也做了很多有意义的工作。在辐射能的应用上许多科研单位和企业都有自己的独特见解，有些已取得实质性进展并用于生产。辐射加工的最大优点是常温下就能引发那些通常条件下难于或根本就不能发生的化学反应。电磁波最终是以能量形式参加反应的，它本身不具有任何化学的东西，是目前最清洁的反应物。因而从环保角度上看，辐射能的利用为染整清洁生产开辟了新途径。

用于纺织品染整加工的电磁波主要有微波、红外线、紫外线、高能射线（ γ 射线、 β 射线、电子束等）、激光等。其中微波及红外线主要用于染整加工中的热处理，在微波场的作用下，水分子发生极化，将能量的热的形式放出产生热运动，使水升温发热，利用微波辐射的这个特征可以用于使染色工作液快速升温，加快反应速度，提高染料固色率，而且微波加热均匀，可使织物获得良好的匀染性。同时微波也可用于练漂、印花、整理等工序的升温，它具有清洁、高效、简便、易于实施的特点。红外线烘烤是应用最广泛、最普遍的一种辐射能烘烤方式，它主要用于织物的脱水烘烤，高效、均匀，可有效地防止染色“泳移现象”，是目前染整加工不可缺少的一环。鉴于微波及红外线辐射多限于它们的热效应，且加热机理相对简单，未涉及过多的反应，故不做重点介绍，本章将就高能射线、激光及紫外线在染整中的应用做较为详细的讨论。

二、电磁波辐射性能与染整加工

随着科学技术的发展，人们对电磁波辐射领域的研究已走向深入，相关理论也逐步趋于完善。辐射化学就是一门专门研究电磁波辐射对物质引起化学作用的一门学科。研究表明，这些电磁波或粒子流均具有很高的能量，在加工过程中当它们与被加工物发生碰撞时，这些能量被释放，并转移给被加工物质中的分子、原子，从而引发一系列复杂的化学反应，导致被加工物质发生化学变化，这些是将辐射能应用于染整加工中的理论依据。目前研究最多的是纤维高分子材料在辐射能作用下的氧化、聚合、降解和交联、接枝、固化。

（一）辐射催化氧化

在氧气（或空气）存在下，高分子材料经紫外线辐射后，能加速结构中某些基团被氧气氧化，发生一定程度的氧化反应。在染整加工中利用辐射氧化反应，可局部改变纤维组成结构，转化或引进某些基团（如： $-\text{COOH}$ ， $-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}=\text{O}$ ， $-\text{OH}$ ， $-\text{SH}$ 等基团），提高纤维的染色性能，改善纤维的服用性能指标。同时研究还表明，电磁波辐射也可促进练漂中的氧化过程，提高漂白白度和煮练效果。

(二) 辐射交联和降解

高聚物经电磁波辐射后,可能会发生两种截然相反的变化。有的高聚物经一定条件辐射后,机械强度增加,且不可被溶解或熔融。从大分子结构上看,大分子发生链间交合,分子量随辐射强度的增大而增大,结构上最终形成三维网状,此网状结构具有极强稳定性,不可被溶剂溶解,也不能受热熔化,这就是所谓“辐射交联”反应。高聚物的辐射交联无需任何添加剂,且常温下即可交联。此外还有一些高聚物经一定条件辐射后,主链断裂,分子量随辐射强度的增大而迅速下降,最终可裂变成单体分子,在结构上大分子链高聚物每次断裂成两个小分子链高聚物,平均分子量下降与辐射交联相反,易被溶剂溶解或加热熔融,发生了所谓“辐射降解”现象

在高聚物被辐射处理过程中,交联和降解往往共同存在,但有一个主次关系。有的高聚物以辐射交联为主,有的高聚物则以辐射降解为主,这主要取决于高聚物的分子结构。研究表明,高聚物经高能电磁波辐射时,发生降解的可能性与高聚物分子结构存在下列关系:

1. 高聚物结构单元中,主链含有季碳原子时 ($\text{—R}_1\text{—}\overset{\text{—}}{\underset{\text{—}}{\text{C}}}\text{—R}_2\text{—}$), 主要发生辐射降解反应。 R_1 、 R_2 为 —Cl 、 —F 、烃基等。
2. 聚合热较低或热裂解时可被还原成聚合单体的高聚物, 主要发生辐射降解。
3. 含有支链结构的高聚物, 主要发生辐射降解。
4. 在结构中, 主链以 —C—O— 为重复单元结构或主链中的支链为 —C—O— 结构的高聚物, 主要发生辐射降解。

在常见纺织材料的染整加工中, 主要发生辐射交联的材料有聚乙烯、聚丙烯、聚酯、聚酰胺、聚氯乙烯等。主要发生辐射降解的材料有: 纤维素、纤维素衍生物、含氟高聚物等。

利用电磁波的“辐射交联效应”, 可以在常温下进行丙烯酸系列粘合剂或涂层剂的交联, 而回避了常规工艺高温焙烘的苛刻条件, 降低了印花、涂层整理等工艺要求, 便于操作、控制, 高效节能。同时, 利用“辐射交联效应”还可以增强某些纺织材料的物理机械性能。

对于某些常规煮练方法难于去除的浆料、糊料, 可以利用电磁波的“辐射降解效应”, 通过辐射的办法, 在常温下促使降解, 达到良好的退浆、去浆效果。

(三) 辐射接枝

高分子材料经电磁波辐射后, 可以将某些特殊结构和性能的基团引入高分子结构中, 使得高分子材料具有某些特殊的性质, 实现对高分子材料的改性, 这就是所谓辐射接枝。在纺织品染整加工中, 采用辐射接枝技术处理纺织纤维材料, 可以明显改善纤维的服用技术指标, 提高纤维的导水性、可染性等, 使纺织品的服用性能有很大的提高。

高分子材料的辐射接枝分为共辐射接枝和预辐射接枝两种方式: