

超声波在材料工程中的应用研究进展

田德祥,刘新利*,王德志

(中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙410083)

摘要: 超声波是一种波长极短的机械波,基于其空化和共振等效应衍生开发的超声技术已应用于材料工程各个领域。介绍了超声波的作用原理,即空化效应和共振效应。空化气泡的形成、塌陷或消散会在气泡附近形成高温高压,同时生成巨大的冲击力和微射流,这种现象即超声波的“空化效应”。当材料受到和固有频率相同的超声波振动时,材料被激励形成共振现象,材料内部应力增加或释放,其结构便可能被破坏,这种现象即超声波的“共振效应”。详细总结了近年来超声波在材料制备、加工、检测及回收方面的部分应用,同时指出了超声波应用所临的问题,以及展望了超声波在材料工程中的应用前景。

关键词: 超声波;材料制备;材料加工;材料检测;材料回收

中图分类号: TB3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2022)06-0942-17

引文格式: 田德祥,刘新利,王德志. 超声波在材料工程中的应用研究进展[J]. 材料研究与应用,2022,16(6):942-958.

TIAN Dexiang, LIU Xinli, WANG Dezhi. Research Progress of Ultrasonic Technology in Materials Engineering Applications [J]. Materials Research and Application, 2022, 16(6): 942-958.

超声波一般指频率高于20 kHz的声波(工业上15 kHz以上的声波即称为超声波),是一种波长极短的机械波。超声波的产生是利用超声振动工具,通过超声波发生器将供电频率放大,频率放大后传递至超声换能器,换能器将高频的电转换成机械振动,并在纵向做周期性的伸缩运动,其振幅一般在几个微米,这种振幅的作用较小,可以通过变幅杆将换能器的振幅放大,传递至介质中传播。超声波作用的原理主要是空化效应和共振效应,超声波在液体介质中可以形成声场,以驻波的形式交变周期传播,在这个周期内形成正压区和负压区,当声波达到一定强度,介质分子在正压区会被压力压缩变小,在负压区会被拉力拉伸变大,不断地拉伸和压缩最终导致介质分子间距超过临界分子间距,介质分子断裂形成微泡,拉力的作用下微泡变大并形成空化气泡,其中一部分空化气泡上浮破碎消散,一部分重新溶于液体,或离开超声场的共振相位而塌陷。空化气泡的形成、塌陷或消散会在气泡附近形成高温高

压,同时生成巨大的冲击力和微射流,这种现象称为超声波的空化效应^[1]。空化效应在材料的浸出、清洗、分散、焊接及金属熔体处理等方面均有应用。

物理学中定义任何一个系统都存在一个固有频率。当材料受到和固有频率相同的振动时,材料被激励形成共振现象,材料内部应力增加或释放,其结构便可能被破坏,因此被应用到材料疲劳试验、检测等领域中。超声波的机械效应和声流现象可以促进反应速率,超声波在固体介质中的传播机制促进了超声无损检测技术的发展。此外,超声波在涂层剥离回收方面也有应用。由于超声波在液体介质、涂层和基体材料中的传播速度不同,速度差会在界面处形成强大的剪切力,从而减小基底和涂层材料之间的结合强度,使涂层更容易脱落。

本文对超声波在材料制备、材料加工、材料检测及材料回收方面的应用进行回顾和总结,并提出超声波技术发展面临的问题,对超声波在材料中的应用前景进行展望。

收稿日期:2022-09-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1901700)

作者简介:田德祥(1997-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事难熔金属基涂层研究,E-mail: 213111068@csu.edu.cn。

通信作者:刘新利(1985-),女,山西朔州人,博士,副教授,主要从事稀有金属研究,E-mail: liuxinliu@csu.edu.cn。

1 超声波在材料制备中的应用

1.1 超声分散

颗粒粒径越小,颗粒均匀分散的难度就越大。纳米颗粒材料的分散性往往很差,如常见的纳米金刚石粉末因为粒径较小、比表面积大,表面存在大量不饱和键等因素,会形成较大的表面活性,同时微粉颗粒间的相互作用力及溶液中溶剂的表面张力,使细颗粒在沉降分级的过程中容易与粗颗粒发生团聚现象,凝聚在一起形成较大尺度的颗粒^[2]。大尺寸的颗粒在使用过程中会对工件表面造成严重的影响,出现凸凹、划伤,甚至造成报废,对于高精尖制造领域的纳米材料影响危害极大。超声波的空化效应

可以有效地提高微粉颗粒的分散性,超声波在液体介质中可以产生空化气泡,空化气泡的形成、塌陷或消散可以使其附近瞬时温度达到 5000 °C、压力达到 500 kPa,这种高温高压形成的冲击力和微射流可以分散团聚的微粉颗粒。

Asadi 等^[3]分析了不同超声方式对纳米流体分散性能的影响,纳米流体经过超声探头直接分散比超声浴间接分散具有更好的分散性和粒径分布,其原因是超声浴装置中流体分散具有随机性,受到空化效应的影响减小。而超声探头装置中,强超声区位于探头正下方,超声效果更强烈、更集中,工艺控制更加稳定、重现性好及颗粒分布更均匀(见图 1)。超声波浴装置可提供大约 20—40 W·L⁻¹的弱超声波,而超声波探头装置可向探头下方流体中提供 20 000 W·L⁻¹的超声波。

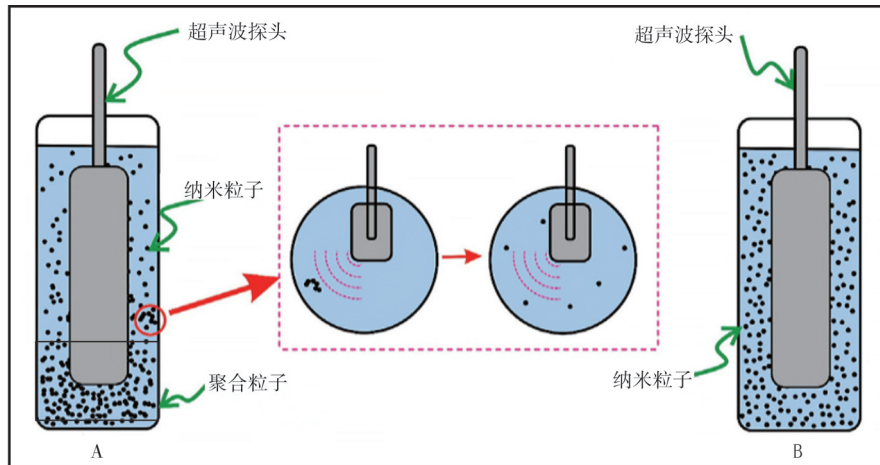


图 1 超声处理分解纳米颗粒团聚的过程^[3]

Figure 1 Ultrasonic treatment of the de-agglomeration process of the nano particles

Uchida 等^[4]将超声换能器安装在水箱中形成驻波声场,通过 20 min 的声空化处理,使金刚石颗粒的平均粒径从 5 μm 减少到了 100 nm 以下,并且空化处理后金刚石表面的 ζ 电位提高,纳米金刚石的分散性至少可以维持 150 d。王沛等^[5]研究了抛光用纳米金刚石颗粒在超声处理后的分散性能并发现,纳米金刚石抛光液中颗粒平均尺寸随着超声波作用时间的增加逐渐下降,同时超声波强度增大和分散时间延长均有利于金刚石颗粒在水介质中的分散。徐雅琪等^[6]研究了超声波对碳纳米管材料分散性能的影响发现,经过超声处理的碳纳米管镁基复合材料的平均晶粒尺寸可以细化至 100 μm 以下,晶粒更均匀,团聚形成的大尺寸颗粒数量和粒径也较处理之前减小,且碳纳米管的抗拉强度、弹性模量比超声处理前分别提高了 11.6% 和 8.5%,断裂应变

降低了 16.2%。Reinforcement 等^[7]对含有二氧化硅气凝胶和玻璃泡(SG-PUF)的纳米增强颗粒在聚氨酯泡沫(PUF)中进行分散,超声处理显著改善了 SG-PUF 的力学和热特性,降低了 SG-PUF 的应变和能量吸收效率,提高了其强度。Mahbulul 等^[8]测试了不同超声时间下 TiO₂-H₂O 纳米流体的分散效果,超声 150 min 的分散效果最好,但是超声处理时间超过 150 min 后分散的纳米颗粒会重新团聚。Zhu 等^[9]研究了超声作用时间对 CaCO₃水纳米流体粒径的影响,超声时间对颗粒的粒径分布没有明显影响,当超声时间增加到 20 min 时,CaCO₃水纳米流体的平均粒径减小到 36 nm,随着时间继续延长粒径变化不大。

为了增强空化效应,超声波的功率、频率及作用时间也应随之提高,但是过强的声场对于一些硬度

较低的纳米材料容易造成负面影响。Bhaga等^[10]发现当金属长时间处于空化效应中时,金属的表面会因为空化作用产生形变,相位也会发生变化。Diodat等^[11]发现,经过20 h、19.5 kHz频率的超声作用后,石墨系统由于长时间且强烈的空化作用,其内部形成了不同的原子排列,产生了各种形状的化合物。王建强等^[12]研究了超声对环氧树脂中碳纳米管的影响,超声波功率提高及作用时间延长,均能使碳纳米管的分散效果变好,但设备功率过高和时间过长会造成碳纳米管的损伤断裂。碳纳米管的损伤断裂是“气蚀”现象造成的,空化气泡的产生、破碎会造成碳纳米管和液体之间形成速度差,表面流体摩擦产生的粘性力足以切割颗粒,造成碳纳米管的断裂和表面损伤,改变其表面性能^[13]。Sesis等^[14]使用一种新型声波反应器和原位技术测量了超声处理过程中的声学空化活性,通过拉曼光谱、原子力显微镜表征发现,空化效应可以分为稳定空化和惯性空化,前者会导致碳纳米管表面的化学侵蚀,后者则利于碳纳米管的分散。Zang等^[15]提出了一种减少空化损害的方法,即通过更宽的声耦合(扩大振子面积和声波浴等)降低超声功率密度,功率密度的降低可以提高惯性空化,减少气蚀,降低纳米材料的断裂和损伤。彭昀^[16]发现,钛酸铅压电陶瓷材料(PZT)在超过1000 °C时会熔化结块,若使用较低频率超声,

空化形成的高温反而会使粒径增大。他设计了一种浴槽式脉冲兆赫超声系统,在分散系统中引入600 kHz以上的超声波,随着超声波频率的提高,超声波的空化效应降低,声流作用增强,尺寸超过10 μm的团聚体全部消除。杨柳^[17]使用兆赫级超声法制备纳米PZT材料,成功制得粒径在200—700 nm范围的立体结构PZT颗粒,且团聚颗粒较少。

超声波的空化效应对颗粒的具有较好的分散效果,应用在各种微粉颗粒尤其是纳米微粉中(如纳米金刚石,碳纳米管,陶瓷材料),同时随着空化原理研究的进展,对于不同材料可以选择合适的超声功率、频率及时间,实现更好的分散效果。

1.2 超声熔体处理

金属熔体凝固过程中容易出现粗大柱状晶、裂纹和气孔等缺陷,对金属性能造成影响。传统的接触式超声处理(UST)技术使用一个超声探针(见图2)浸入液体熔体中诱导超声,依靠超声的空化效应和声流作用(超声波在液体介质中传播会发生声强的衰减,形成声压梯度,引起液体流动,声流可破坏边界层加速传质、传热)促进熔体脱气,提高铸件密度,减少气孔的生成,并进一步促进形核,细化晶粒,达到组织均匀的目的^[18-19]。

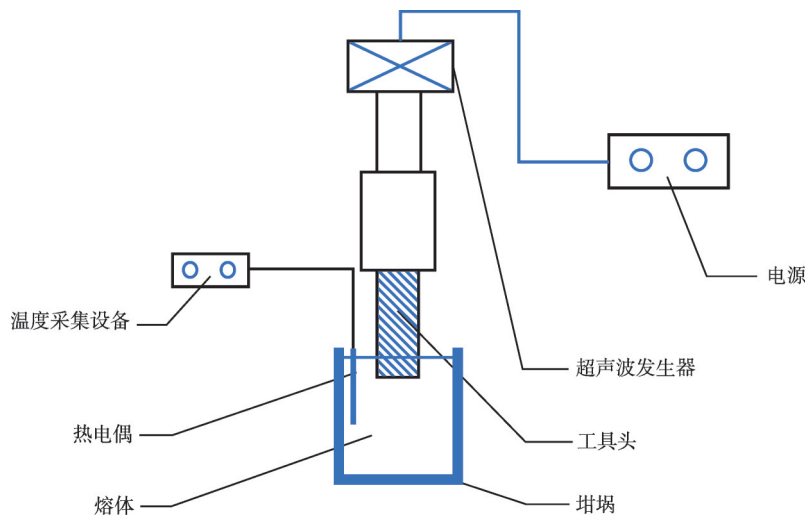


图2 铝合金超声熔体处理设备^[19]

Figure 2 Ultrasonic aluminum alloy melt processing equipment

Joaquim等^[20]研究了超声处理对铸造AlSi9Cu3合金的影响,结果表明:超声处理可以使AlSi9Cu3合金达到理论密度的98.5%,同时可控制初生Al晶粒的形貌和尺寸,细化和使金属间相分布均匀,促进共晶Si变质,得到尺寸小于50 μm的α-Al晶粒和面

积小于10 μm²的共晶Si颗粒;AlSi9Cu3合金经T6热处理后力学性能大幅提升,特别是延展性得到显著提高。孙永强等^[21]使用2000 W超声进行Al-2Si熔体除氢处理,经过120 s处理的熔体凝固后铸锭断面近似呈100%的细小等轴晶,这是由于超声产生

的空化气泡在上浮脱离熔体过程中可以吸附因对流和扩散迁移至空化气泡气-液界面附近的氢原子,并使氢原子之间结合形成氢分子而进入空化气泡中,在声流作用下可促进气泡流动融合而加快脱出熔体。Huang等^[22]在1050铝合金带材双辊铸坯(TRC)工艺中引入超声处理,结果显示在轧制前引入超声双辊铸坯(UA-TRC)工艺可以提高熔体中溶质元素的均匀性和流动性,有效地消除边缘裂纹,促进溶质的再分布,抑制中心线偏析,改善带钢的中心线偏析和宏观边缘裂纹,生产出基体均质化的无裂纹带材。Kim等^[23]研究了超声熔体处理对Al-7Si-2Cu-1Mg合金拉伸性能的影响,超声处理可以降低固溶处理后的金属间化合物体积分数,提高合金强度,同时缩短镁合金达到最大强度的固溶处理时间,使其达到最大强度的时间从8 h降低到2—4 h。

超声熔体处理的效率与超声波设备的形状、频率等参数密切相关。Chen等^[24]在1060铝合金连铸连轧过程中,将L形超声棒置入添加不同数量Al-Ti-B变质剂的熔融铝液中,L形超声棒产生的弯曲振动可以在变质剂添加量相同的条件下细化铸轧带钢晶粒、使析出相分布更加均匀和减少夹杂缺陷,从而改善带钢力学性能。贾征等^[25]研究了超声功率2000和3000 W的超声探头对7116铝合金DC(Direct Chill 直接冷却)大铸锭凝固组织晶粒细化的影响后发现:两种探头单独作用下均可以细化晶粒,但是只有小部分晶粒尺寸下降,大部分晶粒尺寸未改善;而在两种探头叠加作用下,大部分晶粒细化,铸锭边缘晶粒尺寸下降60%,1/4直径部位的晶粒尺寸下降近80%,中心部位晶粒尺寸下降55%。Qi等^[26]采用定频超声技术(FUT)和变频超声技术(VUT)对AZ80镁合金进行直冷铸造,FUT和VUT均能细化 α -Mg晶粒,VUT具有更好的效率,将晶粒尺寸从679—1454 μm 减小到150—241 μm ,同时提高了晶粒的均匀性,改变了 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的分布。Chen等^[27]采用新型交流频率超声熔体处理技术细化晶粒,使用15和20 kHz两种频率的超声设备交替处理Mg-Al-Si熔体,设置交替时间分别为30、60和150 s,与传统的20 kHz单频超声熔体处理方法相比,交变频率增强的空化进一步细化了晶粒,消除了 Mg_2Si 的团聚,提高了AS41镁合金的抗拉强度和延伸率。

接触式超声熔体处理适用于低中温熔体,并且处理的液态金属一般在探针附近的小范围内。针对大量金属熔体及高温和活性合金的熔体处理,Kou-

lis等^[28]研究了非接触式超声熔体技术,他们在合金熔体中加入高频调谐电磁感应线圈,由于电磁感应线圈会产生快速变化的洛伦兹力,从而激发诱导超声压力波产生空化效应,该方法具有传统超声处理熔体技术的脱气、晶粒细化和分散效果,同时又可以避免电极探针污染熔体,处理更大体积、更高温度的熔体。但是非接触式超声熔体技术是一个动态系统,空化过程并不是恒定的,这种现象会增加能耗。Tonry等^[29]针对非接触式超声处理熔体中声速变化引起的空化共振间断现象进行了研究,建立了可以引入超声共振的数值模型声场,通过实验证实了模型可以准确预测工艺参数的最佳范围,通过微调线圈的交流供电频率可以引起共振现象,在最小电能的情况达到空化压力阈值,实现更好的超声处理效果。超声还可以与其他技术耦合,进一步提高熔体处理水平。费卓铭等^[30]对铝合金熔体进行超声与电磁场耦合处理的数值模拟及试验,数值模拟结果表明超声与电磁场耦合作用下铝合金凝固熔体的晶粒比超声单独处理时进一步细化,同时试验结果验证了数值模拟的合理性。超声波的空化效应和声流作用可以促进金属熔体的均匀化,细化晶粒,促进组织均匀性。

目前,超声熔体处理主要是接触式超声,作用于较少量的低中温熔体。通过在合金熔体中引入高频调谐电磁感应线圈,这种非接触式超声可以处理更大体积和更高温的金属熔体。此外,通过数值模拟解决了非接触式超声熔体技术中声速变化引起的空化共振间断现象,进一步提高了熔体处理效果。

2 超声波在材料加工中的应用

2.1 超声焊接

超声波焊接是一种复合材料连接技术,主要包括热塑性超声焊接和金属超声焊接等。

2.1.1 热塑性超声焊接

热塑性超声焊接是通过安装在变幅杆前端的工件将高频振动的机械能转化为热能,使塑料温度提高至熔点将组件粘结在一起^[31]。图3为超声焊接设备示意图。

超声焊接可以焊接不同的热塑性塑料,如尼龙、聚醚醚酮(PEEK)、聚乙烯亚胺(PEI)、聚丙烯(PP)等,并具有良好的焊接效果。根据超声距离,超声波焊接又分为远场焊接和近场焊接。超声近场焊接,接头的距离不超过6.35 mm,一般用于软质和多孔热塑性塑料;超声远场焊接,接头的距离超过

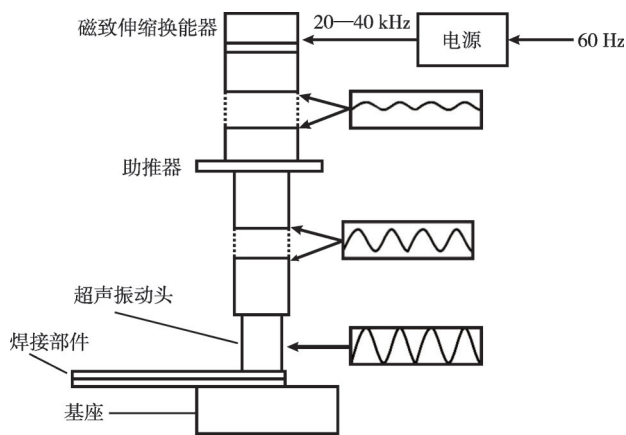


图3 超声焊接设备简图^[31]

Figure 3 Schematic diagram of ultrasonic welding equipment

6.35 mm,一般用于刚性和非晶热塑性塑料,而20 kHz频率的超声波发生器适用于大多数热塑性复合材料的焊接^[32]。Wang等^[33]研究了固定超声频率下不同焊接时间对碳纤维增强PEEK复合材料焊接强度的影响,结果发现:焊接时间超过0.7 s后,焊接质量随时间增加逐渐提高,0.9 s是焊接质量最好的时间;焊接时间超过1.1 s,焊接界面会形成较大的裂纹和空洞。Kumar等^[34]对玻璃纤维增强聚酰胺复合材料(GF/PA)层板进行了超声波焊接,焊接后材料的重量损失可以忽略不计,并且降解温度远高于材料熔点,适用于高温应用。Leong等^[35]研究了碳/钕复合材料层板的超声波焊接特性,超声焊接复合接头的搭接剪切强度为17.5 MPa,比粘接接头的14.2 MPa提高了23%。Gao等^[36]采用超声振动对焊接的碳纤维增强尼龙66复合材料焊缝进行修复,改善了焊缝的准静态性能,减少了焊缝结果的分散。Jiromaru等^[37]研究了聚丙烯和聚甲基丙烯酸甲酯在不同超声频率下的连接强度,高频(67—180 kHz)焊接的连接强度高于低频(27和40 kHz)焊接的连接强度。Skorová等^[38]评估了焊接长度对PP材料焊接强度的影响,证明焊接长度的增加并不能增加焊接强度。

2.1.2 超声金属材料焊接

超声金属材料焊接是将表面机械振动耦合到夹紧系统施加的压力,打破接触面间的氧化层,同时在接触区域产生热量,使材料软化,随着微焊缝扩展到整个焊缝界面,促进焊缝的形成。Tilahun等^[39]发现,造成超声焊接极端变形的关键是快速位错同化促进的动态扩散,这种扩散现象会降低原材料金属的熔点,证明了超声波焊接“熔化焊接”的观点。

Bates等^[40]推导了焊缝界面剪切应变率与超声波频率之间的依赖关系,得到了焊接所需要的超声波频率范围,证明20 kHz是金属焊接通常采用的频率。

超声波金属焊接的低热量输入可缓解铝合金局部变形、性能恶化的问题,同时也适用于铝-镁合金异种连接。曹秒艳等^[41]对6061铝合金和AZ31B镁合金板材进行超声焊接试验并发现,在超声波焊接过程中,焊接面间的焊接线分为弱连接、波浪形、折叠形3个阶段,波浪形阶段具有最好的焊接效果和力学性能。Takehiko等^[42]使用A5052含镁铝合金板材和SS400低碳钢板材,研究了超声辅助对铝/钢钎焊焊接强度的影响,结果表明:当夹紧力为588 N时,2.5 s的钎焊时间可以达到最佳的焊接强度;当夹紧力大于588 N时,焊接时间超过3 s时接头强度便会降低,其原因是 Fe_2Al_5 金属间化合物在焊接界面处形成。金属焊接过程中,不同的金属或合金组合中会形成金属间化合物(IMCs)并沉淀,IMCs通常会导致冶金破坏以及焊缝和机械性能的恶化,降低接头强度,选择可以生成较薄IMCs层的原材料金属能够减少IMCs的生成,提高接头强度。Patel等^[43]将锡作为中间层放置在镁和钢之间,焊缝剪切强度明显高于无锡中间层的镁钢接头。Hong等^[44]使用超声辅助搅拌摩擦焊技术,对6061-T6铝与301L钢合金进行焊接发现,机械搅拌和超声振动的双重作用使铝材料强塑性流动抑制了焊接界面Al-Fe IMCs的过度生长。

超声波焊接中的超声功率、方向和频率等工艺参数至关重要,而焊接过程中由于温度变化急剧、塑性变形严重、接触面复杂等原因,无法采集到实时数据,因此需依靠数值模拟来获得这些参数已优化超声波焊接工艺。最常见的数值模拟方法是热力耦合模拟,其已经成功地用于分析超声金属焊接过程^[45]。李欢等^[46]使用有限元方法模拟及分析了Cu-Al超声焊的过程,结果表明铜和铝的块体温度均低于熔点,Cu-Al连接界面最高温度出现在焊接区域中心处。Shen等^[47]研究了多层复合材料超声焊接中的动态行为并建模和仿真,结果表明:当超声焊接频率为20 kHz时,在短焊接时间(0.1—0.5 s)内,使用ABAQUS/Explicit软件进行有限元模拟;当焊接时间大于0.5 s,使用ABAQUS/Explicit和DEFORM软件混合的方法进行有限元模拟,这不仅降低ABAQUS/Explicit软件的计算成本,同时还证实了两种模型的准确性。

热塑性超声焊接主要分为远场焊接和近场焊接,对软质、刚性、多孔非晶等热塑性塑料具有良好

的焊接效果。超声金属焊接被应用在多种金属材料中,但是超声材料焊接过程中由于温度变化、塑性变形、接触面复杂等原因,无法采集到实时数据去选择合适的超声功率、方向和频率等工艺参数,需要大量的实验去验证,费时费力,而热力耦合模拟的应用可以获得焊接过程中准确的数据,更好的选择工艺参数,提升焊接效果。

2.2 超声磨料加工

超声磨料加工(见图4)是通过超声波振动工具产生的机械效应、空化效应等使磨料液体介质或干磨料中的磨粒对工件表面锤击、抛光、冲击,达到去除或修整工件表面材料和形状的目的(水是最常用的介质,磨料一般选择碳化硼、氧化铝、碳化硅和金刚石颗粒),或直接对镶嵌磨料的刀具或工件施加某一特定方向的超声振动进行加工^[48]。材料的硬度大于40 HRC时,可以有效地进行超声波加工,因此超声加工通常用于工业中使用的非晶、硬脆性难切削材料(玻璃、陶瓷、钛、钛合金等)。近年来,超声波振动被广泛用于开发具有复杂几何形状、精密微结构及较高表面光洁度要求的材料系统中,是现代加工行业的重要发展方向。

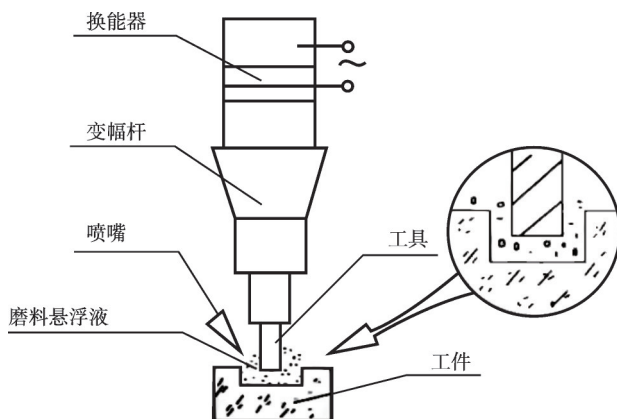


图4 磨料冲击超声加工示意图^[48]

Figure 4 Schematic diagram of ultrasonic impact grinding^[48]

超声加工形成的切削力小、切削热低、刀具磨损小、表面粗糙度高、稳定性强、效率高。超声加工对于脆硬材料主要通过断裂效应产生侵蚀,对于韧性材料通过剪切效应产生侵蚀。侵蚀包括磨料颗粒直接敲击工件表面的机械磨损、自由运动的磨粒的冲击产生的微小碎片,以及磨料浆体中的空化效应^[49]。同时,磨料浆体的适当流动可以提高材料去除率。超声加工中刀具旋转形成重叠轨迹切割材料,并且在轴向方向产生振荡,从而降低切削温度和

刀具磨损,使表面粗糙度略有降低,切削力也随着加工过程而降低,因此超声波加工在刀具磨损和表面光洁度方面优于传统加工,可产生传统加工无法获得的高表面质量。

2.2.1 超声辅助磨削

超声辅助磨削通过超声振动作用在工件上,使其沿着纵轴和弯曲轴振动,振动过程中磨削方向的反转会导致切屑在切削循环中塑性流动,从而起到润滑、减小磨削力、降低磨削工具损耗的作用。Zhang等^[50]发现,在超声辅助磨削加工中,较高的砂轮速度会削弱超声振动而减小磨削力,超声振幅和频率的提高也有助于减小磨削力。目前,硬脆性材料的超声辅助磨削加工通常采用接触式超声磨削,接触式超声波磨削需要精确控制磨削工具在工件上的预压力,当预压力控制不当时容易磨损工件。Huang等^[51]提出了一种非接触超声磨削方法,对蓝宝石晶片进行了非接触超声磨削实验,表明与接触磨削相比,非接触式超声磨削使蓝宝石晶片表面粗糙度降低48.6%,材料去除量为12.9 mg,同时加工效率和工件表面质量均匀性方面均得到提高。

2.2.2 超声辅助钻削

超声辅助钻削硬脆材料时,一般使用游离磨料,通过游离于液体中的磨料对工件表面加工,而塑形材料的加工一般使用麻花钻超声振动钻削^[52]。超声工具头钻杆沿轴向以一定频率振动,同时主轴做旋转运动,通过轴向进给运动使钻杆端面上的磨粒对工件进行高频撞击和磨削,高频振动的引入使钻削过程中刀具不断与工件接触和分离,形成间歇式的切削过程,促进切屑断裂和冷却液流入,降低钻削力、扭矩、温度,减小钻杆磨损,降低加工孔的表面粗糙度^[53]。

2.2.3 超声辅助切削

超声辅助切削加工是在切削刀具上施加超声振动,通过机械切削作用和高频撞击作用进行材料的去除,在加工过程中磨粒浆料被连续送入刀具和工件之间充当切削工具。超声波辅助切削可以显著降低切削力、更好地去除切屑和减少刀具磨损,适用于高硬度金属合金,脆性塑料等材料的切割^[54]。高速超声加工是近年来发展起来的超声加工技术,高速超声加工可以超过传统超声的临界切削速度,并且具有优异的切削效果。张德远等^[55]首先提出了高速超声振动切削(high-speed ultrasonic vibration cutting, HUVVC),高速超声振动切削钛合金和镍基高温合金等难加工材料的切削速度比常规车削速度高出3—6倍。

2.2.4 超声抛光加工

超声抛光加工的传统方式如图5所示。工件固定不动,仅通过超声作用下磨粒的运动对工件表面进行抛光。万宏强等^[56]研究了超声复合抛光加工技术,超声复合抛光中的工件会在振动作用下做垂直方向的周期性运动,磨料和工件之间形成速度差,相对运动使工件表面频繁的被磨粒刮擦、碰撞,提高了接触面积,因此超声复合振动抛光的加工效率是纯超声波抛光的3倍以上,工件表面粗糙度可以降低14.3%,达到0.08—0.16 μm ,工件表面材料去除量提高24.5%。

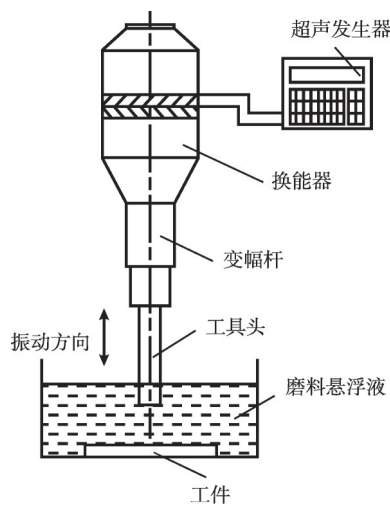


图5 超声抛光加工装置示意图^[56]

Figure 5 Schematic diagram of ultrasonic polishing device

传统超声加工适用于加工硬脆材料,旋转超声加工(RUM)是一种新型混合加工工艺,RUM可以进一步降低切削力,提高加工表面质量。RUM中金刚石磨料被浸渍在旋转钻头的顶端,其替代传统超声中的磨料浆料,以减少磨粒分布造成的加工误差,钻头旋转时在超声波振动频率下以恒定的进给速度(或恒定的压力)向工件轴向进给,在切削区不会产生热应力和残余应力,也不会发生化学变化和热变化,工件表面上也不会出现冶金变化,表明RUM可钻削脆性材料(如氧化铝、氧化锆、硅、碳化硅等)、韧性材料(钛和不锈钢合金)和复合材料(陶瓷基复合材料和碳纤维^[57])。超声波振幅是RUM中最重要的输入变量之一,几乎影响了RUM中的所有输出变量。Wang等^[58]通过切削力建立了脆性材料RUM中的机械振幅模型并通过实验验证了模型,表明模型模拟的超声振动幅值与实验值没有明显的差异,同时模型可以提供超声振动幅度与输入

变量之间的关系,可预测RUM中其他输出变量。Fernando^[59]研究了刀具固有频率对RUM中超声振幅的影响并发现,刀具固有频率对超声振动幅度有显著的影响,其固有频率接近超声波频率(20 kHz)的刀具在每种超声波功率下均可以达到最高的超声波振动幅度。

传统的超声磨料加工包括超声磨料磨削、切削、钻削、抛光等,通常用于非晶、硬脆性难切削材料。为了获得更好的加工效率和加工质量,出现了一些新加工技术。高速超声振动切削,其比常规车削速度高出3—6倍;超声复合振动抛光,其加工效率是纯超声波抛光的3倍以上;旋转超声加工(RUM),其可对脆性材料和复合材料进行加工,并且加工出的材料不会出现冶金变化。

2.3 超声复合加工

超声波复合加工技术与其他加工技术相结合,可以综合两种工艺的优点,进一步提高加工精度、效率和质量。超声波电火花复合加工技术是超声波加工与电火花加工(EDM)技术相结合的新型加工技术,主要包括超声波电火花线切割复合加工和超声波电火花复合抛光。

超声波电火花线切割复合加工又分为电极丝振动和工件振动2种类型。电极丝振动是将超声波振动施加到电极上,在切割方向和垂直切割方向上振动,工件振动是将超声波振动施加在工件上,电极丝振动和工件振动均能提高超声波复合加工效率和加工质量。林本刚等^[60]使用工件超声振动电火花加工技术加工镍基高温合金,与普通EDM相比,该技术加工的工件表面粗糙度降低约10%,在特定参数下甚至可降低30%,平均加工速度可以提高13%以上。赵玉田等^[61]使用电极丝超声复合电火花混合介质加工TC4钛合金,在混合介质电火花加工过程中加工速度提高了20.7%,表面粗糙度值降低了11.1%。

超声波电火花复合抛光是靠超声抛磨和电火花放电来修整工件表面,除了抛光头的振动外,还需在工件和抛光头之间加脉冲电压和介质-工作液,工具对工件的抛磨和放电腐蚀是交错进行的。工作液的电解效应可以使阳极工件在抛光时产生阳极溶解,超声空化效应会使工件表面产生软化,从而加速表面金属材料的剥落,同时空化作用使得电火花放电加工的分散性大大增加,提高了火花放电的影响^[62]。

2.4 超声挤压加工

超声挤压加工是一种新型表面强化技术,传统

挤压工艺可以减少工件表面的微观缺陷而产生残余压应力,使工件金属硬化而提高疲劳强度,其可进一步降低工件表面粗糙度、细化晶粒、减少工具损耗^[63]。超声挤压加工(见图6)时,可对工件施加超声振动。超声振动产生的应力可与模具静应力相加,从而细化晶粒、促进金属变形,超声能可被晶界和位错吸收,使变形抗力下降,提高塑性;超声振动会在工件之间产生离合作用,降低工具头和工件间的摩擦系数,减少工具头损耗;超声振动使金属材料晶粒间产生离合作用,促进晶间滑移,使晶粒变得更均匀,利于金属变形;超声能使金属表面活化,促进润滑剂流动,增强润滑效果。程明龙等^[64]发现,超声挤压时高挤压速度下晶粒细化程度不明显,低挤压速度则可以更好的细化晶粒,因此在小的挤压速度、较大的超声振幅下,可以得到更深的流变组织,从而在工件表面产生宽度较细的叠层纤维组织,促进表面组织的有效细化。

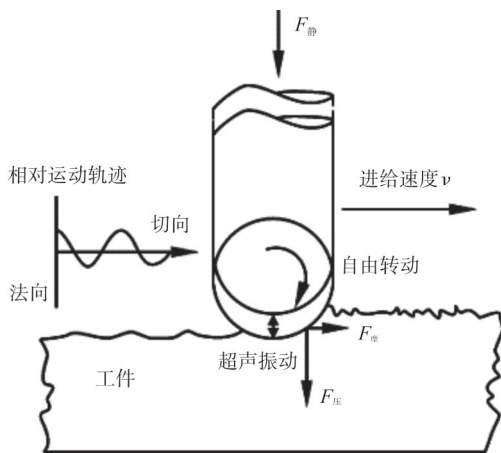


图6 超声振动滚挤压基本原理示意图^[64]

Figure 6 Schematic diagram of the working principle of ultrasonic vibration roll extrusion

3 超声波在材料检测中的应用

3.1 疲劳试验

材料的疲劳失效是材料内部结构组织在循环交变应力的作用下逐渐发生变化而产生裂纹损伤,裂纹扩展到一定程度后,会在其内部产生损伤的累积,材料产生疲劳断裂^[65]。传统的材料疲劳测试,一般是在振动载荷频率为 1×10^7 次循环周期下进行。但在某些特定的环境下,如飞机、火车、轮船工作时,由于自身高速运转、声波振动及空气动力学等因素,会

使自身的工件承受高频率、小振幅的载荷,这种载荷周期往往会超过 1×10^9 次,会引起材料疲劳断裂而造成工件失效,从而引发事故,因此超高周疲劳实验的应用便尤为重要。超声波的频率大于15 kHz时,其已远高于传统加载频率,能够大幅减少测试时间。超声疲劳实验的首次应用是于1950年,Mason^[66]利用压电陶瓷磁致伸缩原理,使疲劳实验频率达到了20 kHz,并根据超声谐振波传播原理和共振理论建立了超声疲劳测试系统,该系统已成功地应用于材料疲劳寿命曲线(S-N曲线)的测定,以及疲劳裂纹扩展行为和腐蚀疲劳测量中。在超声疲劳实验中,组成试验谐振系统的换能器、变幅杆、试样应满足谐振条件,即具有相同的固有频率(见图7),实验装置一般包含超声发生器、换能器、变幅杆等。

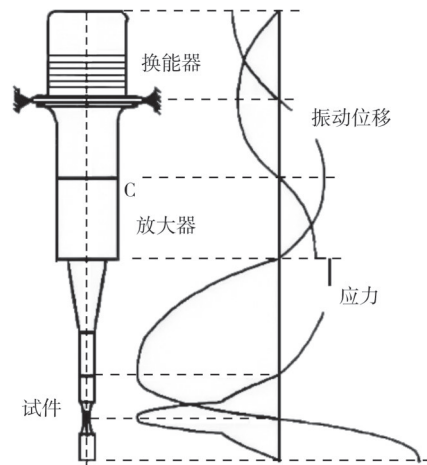


图7 超声谐振波传播原理示意图^[66]

Figure 7 Schematic diagram of the propagation principle of ultrasonic resonant wave

基于低频振动测试结果,研究者普遍认为材料疲劳裂纹的产生是从材料表面开始的,但是随着超声技术在材料疲劳断裂实验中应用的发展,超声疲劳试验证明材料裂纹产生的机制为裂纹从材料表面产生和裂纹从内部无损伤部位产生。因材料自身的特性,在超声加载实验和低频振动实验中测量得到的疲劳性能可能会出现差异。吴涛等^[68]对纤维增强树脂基复合材料(FRP)进行了超声高频加载,在超声加载过程中材料出现了基体裂纹、分层及纤维断裂等损伤。HOSOI等^[69]发现,超高周疲劳载荷下碳纤维增强复合材料(CFRP)分层损伤会先于或与基体裂纹同时扩展,超高周疲劳载荷下材料内部的应力集中会直接导致分层损伤的产生。Szczepanski等^[70]研究了在20 Hz和20 kHz的循环载荷下 α - β 钛

合金(Ti6Al2Sn4Zr6Mo)的疲劳性能,两种频率下裂纹均在 α 晶粒内部先出现,且20 Hz和20 kHz的S-N曲线没有明显差异, α - β 钛合金的疲劳寿命对于超声频率的变化不敏感。Fitzka等^[71]研究了混凝土在19 kHz和60 Hz循环频率下混凝土的S-N曲线,由于19 kHz循环频率下循环应力的降低及应变速率的增加,混凝土的疲劳寿命会高于60 Hz频率的寿命。Fitzka等^[75]使用95 Hz和20 kHz的循环频率,对18Ni马氏体时效钢氮化后进行疲劳实验发现,相同形状试样在95 Hz和20 kHz循环频率下S-N曲线相似,对于不同形状的具有不同应力体积的样本,大样本的平均寿命比小样本的平均寿命低一个数量级,马氏体时效钢存在强烈的尺寸效应。此外,马氏体不锈钢超高周疲劳实验的多项研究^[76-78]均证明:当马氏体不锈钢材料失效由非金属夹杂等固有缺陷造成时,超声频率不会影响疲劳寿命;奥氏体不锈钢AISI904L制成的管状试样,在160—200 Hz下的弯曲疲劳实验和在20 kHz下的超声疲劳实验中的S-N曲线没有明显差异,不存在频率效应。镍合金、镁合金、石墨及玻璃纤维增强聚合物,在超声疲劳实验与伺服液压实验中的疲劳寿命相同,均不存在频率效应,高频疲劳实验均适用于这些材料^[79-81]。

试样的形状会影响超声疲劳测试的结果,Pedro等^[83]通过有限元模态分析了不同形状铁素体-珠光体钢试样的疲劳寿命,在20 kHz循环频率下铁素体-珠光体钢的疲劳寿命提高,多轴试件相较于单轴试件的频率效应进一步增强。疲劳寿命和疲劳断裂行为与外加温度有关,罗娟等^[84]对复杂环境下材料的超高周疲劳试验进行研究,在开发的高温超声疲劳实验系统中分别于室温、250和350℃下进行疲劳试验,发现高温加快了试样的断裂,同时也加速了裂纹的萌生,疲劳极限随温度的升高而减小。

基于超声波的谐振波传播原理和共振理论建立了超声疲劳测试系统,成为材料超高周疲劳检测领域中最主要的检测手段。目前,超声疲劳的应用主要问题在于所试验的材料是否存在频率效应,即高低频下具有不同的疲劳寿命,同时材料的形状、实验温度都会引起实验结果的变化。研究人员通过大量的研究,证明了镍合金、镁合金、石墨等材料不存在频率效应,还证实了温度对疲劳裂纹的影响,拓展了超高周疲劳试验的应用范围。

3.2 超声波探伤

超声检测是利用超声波频率高、波长短、穿透能力强、可以定向传送,以及在界面上产生反射和折射

及波形转换的特性,检测材料内部缺陷的方法。超声检测方法主要分为接触式超声检测和非接触式超声检测,接触式超声检测包括常规超声检测、超声导波检测和超声阵列检测,非接触式超声检测有电磁超声检测、激光超声检测、空气耦合检测等^[85]。

常规超声检测中超声波由探头传入测试材料,当超声波传播过程中遇到损伤或缺陷,便会产生反射,反射波被探头接收后经过数据处理形成冲击波形,再通过反射波的形状进一步判断缺陷的类型、大小、位置等。接触式检测系统的灵敏度和分辨率较高,但是在探头和测试材料表面需要液体耦合剂,探头与测试材料的接触状态,测试材料表面的形态对测量结果有非常大的影响,并且耦合剂会造成试样的污染及破坏损伤,使检测结果出现误差。

超声导波检测主要用于较长管道和钢轨的缺陷损伤检测^[86]。超声导波检测相较于传统检测传播距离更长、超声衰减更少,但是超声导波在传播中可能存在许多模式波形,大多数基于超声导波的无损评估需要繁琐的计算步骤实现。Michaels等^[87]利用啁啾激励进行多个频率下的超声导波测试,在最小采集时间内实现了较高的信噪比和分辨率。路祥等^[94]用超声导波进行复合材料结构中的疲劳损伤探测,通过PZT压电元件和马氏平方距离确定疲劳损伤的产生与发展,有效地判断了复合材料中疲劳损伤的发生。

超声波阵列检测由多个单独连接元件的换能器组成。超声波阵列在提高检测质量和缩短检测时间方面具有巨大的潜力,与单探头超声检测方法相比有更高的灵活性,并且能够即时生成测试结构的图像,提高结果的准确性^[88]。

电磁超声检测的超声波由导电介质的电磁感应在测试材料中激发产生,因此主要应用于金属材料的管道裂纹检测、脱粘缺陷检测、焊缝检测及钢轨检测等方面。由于电磁超声检测为无表面接触、无需耦合剂,所以能够快速准确的检测材料损伤^[89]。周海强等^[90]使用电磁超声共振法(EMAR)用于环-含能复合材料的脱粘缺陷检测(见图8)时发现:超声波在发射至粘接良好部位时,大多数超声可以传至胶粘层和基底,少部分超声波能量会在基层发生反射,无法形成共振;超声波在发射至脱粘区域时,超声在金属层下表面发生全反射,形成强烈的共振效应和重复反射,根据超声检测信号的幅值和能量大小可准确识别脱粘区域。

空气耦合超声检测系统主要用于层状复合材料的无损探伤,空气耦合超声检测是一种用空气作为

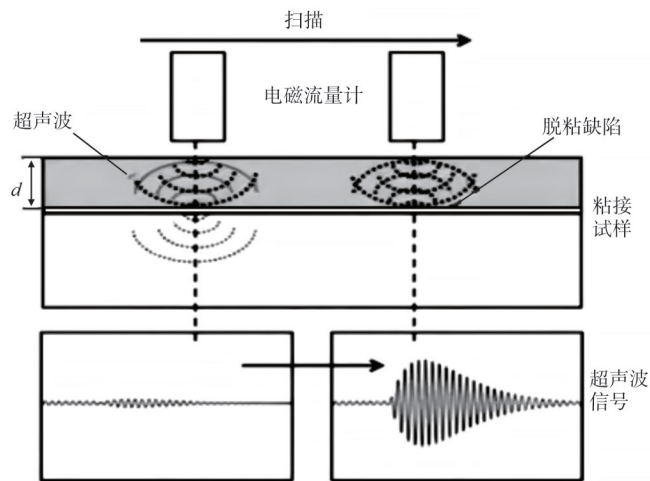


图 8 界面脱粘缺陷电磁超声共振检测方法^[90]

Figure 8 Adhesive debonding inspection with the electro-magnetic ultrasonic resonance method^[90]

耦合介质的检测方法,可以减少接触式超声检测耦合剂的影响。但是由于传播介质的变化,在空气中产生高振幅声波需要重新设计换能器^[91]。多层复杂结构的材料,由于反射波的叠加和材料声阻抗的差异,超声波检测会更加困难。危荃^[92]、董方旭等^[93]分别使用自制的空气耦合超声换能系统对多种复合材料(蜂窝夹芯和蒙皮蜂窝夹芯材料、陶瓷基和环氧树脂基复合材料、碳纤维等)进行测试,其结果准确,同时具有很高的分辨力和信噪比。

Kim等^[95]使用超声共振方法,放大超声波去测试多层结构橡胶与胶粘剂之间的脱粘界面。当超声波频率和复合材料层频率相近时产生的共振效应会减少声波损失,提高实验精度。

超声波在不同材料中的传播行为有着巨大差异,探明超声波在各种材料中的传播行为对于超声波检测技术的成功应用至关重要。通过有限元分析建立模型进行数值模拟来研究超声波的传播行为是一种较为准确的方式,从而进一步应用在复杂形状的复合材料无损测试中。徐志祥等^[96]对镍涂层铝板的超声检测进行了有限元方法模拟发现,超声波在涂层中的传播会发生色散现象而形成高频声波,超声波传播到缺陷时则发生反射与透射,超声扫描图像在缺陷区域会形成一条直线。杨理践等^[97]对超声波在钢板和防腐涂层内的传播进行了ANSYS仿真研究,验证了超声波的纵波和横波在钢板内传播时出现了模式转换现象,根据这种传播规律和双层介质交界面处的应力、位移连续条件,可以得出超声波在双层介质中的波动方程。Ryuzono等^[98]通过数值模拟,建立了人工裂纹铝板中超声波传播的模

型,利用两个方向的超声波传播数据高精度地识别损伤,计算出铝板实际损伤状态。Maio^[99]和Moon^[100]分别对石墨/环氧复合材料板中超声波的传播进行了数值模拟和分析实验,确定了超声波在复合层压板传播中的特征。Shivaprasad等^[101]使用有限元法、射线追踪法和时域有限差分法,研究了超声波在多晶介质中的传播,证实了这些方法可以更好地理解在具有简单和复杂晶粒形貌的材料中超声波传播的相互作用,同时可以扩展到纹理介质、双相材料中超声波的传播研究,以及在通过微孔、微裂纹时超声波的相互作用。

超声波探伤检测形式多样,在各种材料的无损检测中具有较好的效果,但是随着材料工艺的不断发展,材料本身结构的复杂性使得超声检测更加困难。一些新型换能器的发明和数值模拟,以及对超声波在不同类型材料中传播行为的分析,进一步优化了无损检测系统,提高了超声波探伤检测的应用范围和准确度。

4 超声波在材料回收中的应用

资源的回收利用一直是工业中的关键问题。机械回收处理效率低、能耗大,热处理回收容易引起能源消耗和空气污染,有机溶剂溶解和浮选方法在二次污染和化学试剂浪费方面存在一定的局限性。超声波作为一种无污染、低能耗、低成本的技术手段,在材料回收领域的应用也越来越广。

4.1 超声辅助浸出

超声波辅助浸出是提取物质的一种有效方法,

超声波能加速各种固-液化学反应速率和强化传质过程,主要是通过超声波的机械效应(声流、冲击波和微射流)、热效应(局部高温高压)、活化效应(水溶液中产生自由基)3种效应实现的^[102]。超声波的机械效应可形成搅拌作用,增强物质扩散能力;超声波的空化效应可在水溶液或有机溶液和固体基质之间的界面处产生高温高压,加快物质渗透和传输,提高溶解度和扩散性;超声作用下的水溶液可产生自由基(H^{\cdot} , OH^{\cdot} , $O^{\cdot-}$),自由基的氧化能力可以提高萃取能力。超声频率的变化,会使浸出体系中出现不同的效应(见图9),超声辅助浸出一般使用中频超声。超声波辅助浸出,一般分为水浴式超声辅助和探头式超声辅助,探头式超声的效果明显优于水浴式超声,能够更有效的浸出物质。

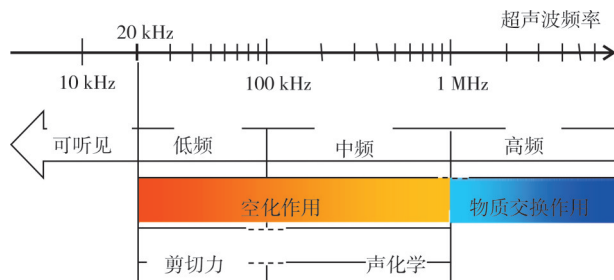


图9 超声波频率范围及各频段主要作用^[102]

Figure 9 Ultrasonic frequency range and the main functions of each frequency band

郭雅峰等^[103]使用超声辅助在强极性溶剂(DMAc)中溶解锂离子电池正极涂层并回收正极材料(钴、铝及锂),经过20 min的超声作用和60 min的静置后,10 mL的DMAc可以从1.5 g正极材料中回收1.14 g的钴酸锂及乙炔黑。Zhao等^[104]使用超声处理辅助回收废旧锂离子电池中的 $LiCoO_2$,在最佳工艺条件下,当超声功率为270 W时,超声处理后分离回收的 $LiCoO_2$ 比例可达99.98%。Li等^[105]研究了超声辅助浸出碳化硼废渣中铁的工艺条件,当其余工艺参数相同时,80 min常规浸出和50 min超声辅助,浸出铁的最大浸出率分别为87.4%和94.5%。Kong等^[106]研究了超声辅助下去除硅粉废渣中铁的工艺,结果表明:与常规浸出相比,相同除铁率下浸出时间可以缩短37.5%;当超声频率为80 kHz、超声功率270 W、反应温度60℃、酸浓度(质量分数)12%时,铁的去除率可以达到95.24%。Utomo等^[107]利用超声波清洗机辅助酸浸,从石油生产废料中回收铂。Lim等^[108]对比了传统机械搅拌法与超声辅助浸出法提取废硅负载镍氢化催化剂中镍的能力,当超声振幅为20%时超声辅助浸出法的

回收率低于机械搅拌法,当超声波振幅大于20%时该法的镍回收率提高,同等条件下回收70%镍的时间可以减少2 h。Zhang等^[109]以盐酸作为浸出剂,使用超声辅助从废弃液晶显示器中回收铜,超声空化效应形成的高压区加速了In和Al的浸出,最佳工艺条件下铜的回收率可达96%。陈丰羽^[110]通过超声辅助强化 H_2SO_4 酸浸脱除制革污泥中的Cr,提高超声功率和超声时间均可以提升有机结合态Cr和残渣态Cr的浸出率,Cr浸出率可达95.62%,并且剩余污泥中Cr全部处于稳定残渣态。Li等^[111]研究了超声强化回收废共生铅锌矿中银的工艺,在其余工艺参数相同下,传统浸出2 h时银浸出率仅为72.51%,而超声强化条件下浸出5 min时银浸出率即可达到73.88%。Xiao等^[112]采用超声辅助碱浸工艺,回收铝电解过程中产生的有害物质废阴极碳(SCC),传统碱浸工艺中会生成大量反应物(OH^- 、 F^- 、 Al 、 Na^+ 、 CN^-),根据氟元素(F)浸出速率和浸出渣中碳含量可判断碳回收效率,结果(见图10)表明:随着超声发射功率的提高,F的浸出率从79.35%提高到91.67%、残余碳含量从81.26%提高到94.54%;当超声功率达到400 W时,F的浸出率和残余碳含量变化趋于平缓,浸出的固渣含碳量为94.72%,同时浸出粒径减少,此外溶液中 CN^- 与超声作用产生的过氧化氢反应减少了污染。

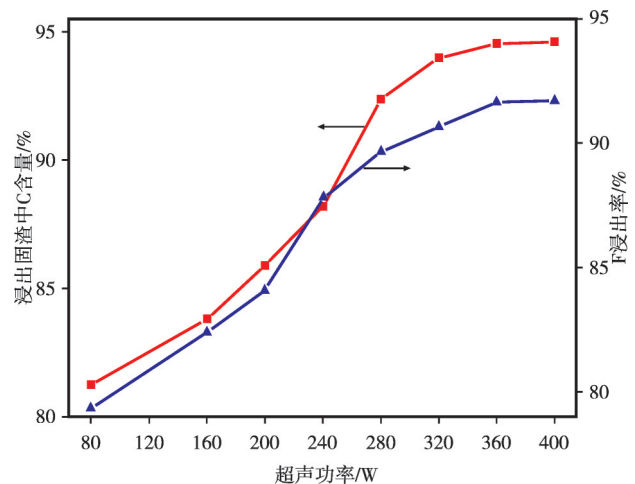


图10 超声功率对碱浸的影响^[112]

Figure 10 Effect of ultrasonic power on alkaline leaching

4.2 超声剥离涂层

超声波剥离涂层主要是在液体中引入超声场,使液体中的涂层在强声场作用下变得疏松甚至剥离。所有物质自身都有特定的振动频率,涂层材料与基体材料的振动频率存在差异,超声波产生的振

荡信号使材料发生共振,涂层逐步脱离结合表面。由于超声波在液体介质、涂层材料、基体材料中的传播速度不同,其速度差在界面处形成强大的剪切力而减小材料之间的结合强度。超声振动冲击会减弱涂层与基体间的结合强度,也会降低涂层内聚力,从而使涂层更容易脱落。超声波振动是间歇性振动,该方法对陶瓷等坚硬的脆性涂层材料进行破碎剥离时效果明显。与激光剥离相比,超声波剥离不会损伤基体,剥离后可得到纯净的基体与涂层材料,但剥离效率低于激光剥离。此外,剥离涂层时超声波频率不宜过高,因为频率越高,空化气泡越小,空化强度减弱,但频率过低也同样无法起到剥离效果,超声波对涂层的剥离效率不一定与超声频率和作用时间成正比^[113]。

Ruhge 等^[114]通过超声振动原理发明了一种从基材结构上去除高分子涂层的方法。将界面材料片定位在基板结构上,界面材料的第一内表面与涂层的预定区域啮合,再用超声波激励界面材料的第二外表面,界面材料的内表面接触的涂层区域在超声能量下完全去除。郭双全等^[115]使用 20 kHz 频率的超声波,与 35—36 MPa 的高压水耦合形成高压脉冲水射流,利用超声波振动和高压水冲击的双重作用去除发动机涂层,相较于传统的超高压水枪去涂层方法,这种方式使高压水压力降低到 40 MPa 以下,降低了设备成本,提高了剥离效率。陈浩等^[116]通过数值模拟对废 MoSi₂/Mo 涂层热震后施加不同频率的声波振动,结果如图 11 所示。从图 11 可见,应力波在涂层中传播而引起共振,在一定的加载时间下,

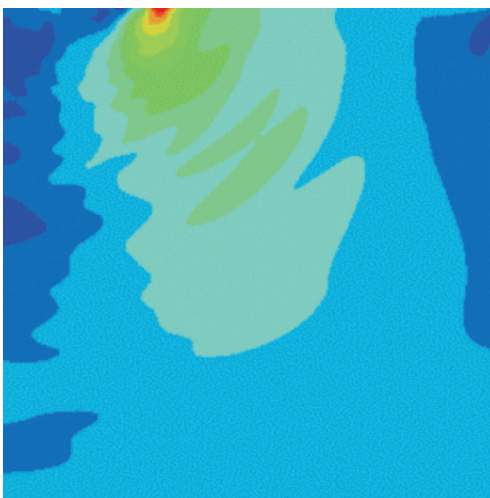


图 11 应力波在 MoSi₂/Mo 涂层中的传播^[116]

Figure 11 Propagation of stress waves in the MoSi₂/Mo coating

15 kHz 的超声波引起了 MoSi₂ 涂层的共振,共振使 MoSi₂ 涂层裂纹处的能量提高,裂纹进一步拓展,减小两相界面间的结合强度,MoSi₂ 涂层更易从基底上剥离。

4.3 超声回收的其他应用

吴佳等^[117]用超声脉冲电解法从含铜电镀废液中回收铜粉,超声的空化和声流作用搅拌溶液,使电解体系中扩散层的厚度减小,同时破坏浓度梯度,加快电解物质的转移速度,离子可以更容易、更快速到达电极表面,在阴极表面放电提高铜的沉积速度。Qiu 等^[118]研究了超声辅助对磷酸铵镁(MAP)结晶的影响,结果表明:MAP 可用于从废水中回收磷,超声空化引起的超临界环境可以使得溶液中的离子在低过饱和度的条件下形成晶体,随着超声功率的增加亚稳区宽度(MZW)变窄,诱导成核时间从 340 s 缩短到 38 s,结晶速度加快;当功率达到 350 W 时,超声波的作用逐渐恒定,过强的空化效应反而会破坏结晶过程,同时 SEM 图像中显示超声功率的增加使得 MAP 晶体趋于菱形,表面光滑。

赵平等^[119]使用超声清洗法回收磁过滤物中的纳米铁粉,超声空化形成的微射流冲击材料表面,破坏附着物在工件表面的结合力达到清洗回收的目的。当超声频率为 40 kHz,功率密度为 0.44 W·cm⁻²,以及其余工艺参数与机械搅拌法相同时,超声清洗法的时间明显缩短,且有效减少了纳米铁粉表面的油污吸附,铁粉中铁元素的质量分数可以达到 95.75%,而机械搅拌清洗所得铁粉铁元素的质量分数仅为 81.43%。

张新月等^[120]使用超声氧化消解法从含铼离子液体中分离回收铼,利用超声作用形成的自由基破坏高度稳定的有机分子结构,以 H₂O₂ 及冰醋酸为氧化剂,对高铼酸盐离子液体超声氧化 24 h,得到的铼产物为高铼酸铵,粗产品的纯度为 99%,铼的最佳回收率可以达到 69.07%。超声氧化消解法回收铼省去了传统回收铼的复杂步骤,可以在一个容器中实现含铼离子液体的消解及高铼酸铵的回收,减少对环境的污染。

随着资源、环境问题的日趋严重,超声波由于其环保、节能的特性,其对各种金属尤其是贵金属材料的浸出、清洗等回收技术已经趋于成熟,但是在剥离涂层方面,超声电解法、超声氧化消解法只是在回收领域中仅有的很少一部分应用,需要进一步发展和完善。超声波在材料回收的方面,有着广阔的发展前景。

5 结语

超声波凭借其独特的优势在材料制备、加工、检测及回收中得到广泛地应用。超声处理可以提高纳米材料的分散性,辅助细化金属熔体晶粒,辅助加工塑性材料、金属材料;超声波的高频率振动实现了材料的超高周疲劳测试,大幅缩短了疲劳测试时间,超声无损检测更是当前无损检测领域中应用最频繁、发展速度最快的一种检测技术;超声辅助浸出依靠其低能耗、无污染、高效率的特点,逐渐替代传统浸出方法,用于有色金属、稀有金属、涂层材料及有害材料的回收。

超声技术仅仅是超声波在材料工程中的部分应用,超声波依然有着很大的发展前景,如超声波可用于剥离石墨烯而获得横向尺寸更大、更完整的石墨烯,超声波测厚度的技术也日渐完善,超声辅助激光熔覆可促进金属均匀成核、细化晶粒及提高金属涂层的强度和塑性。超声波还可应用在岩石钻探方面,尤其是地外天体钻探取样,超声换能器对于地外天体环境有更好的适应能力可减小钻探设备的体积和重量、降低能耗而使取样过程更加稳定。但是超声波发展应用中的一些关键问题仍有待解决和验证。

(1)提高材料分散性时,应减少或避免分散过程中空化效应对材料的损伤。

(2)结合数值模拟软件,提高金属熔体细化的效率,减少超声焊接过程中IMCs的出现,探究多层复杂结构材料的超声波传播方式,提高无损检测准确性。

(3)进一步确定不同材料在低频和低频循环载荷下的疲劳寿命,减少频率效应对疲劳试验中疲劳寿命的影响。

(4)空气耦合超声检测需要研发新的超声换能器,超声加工的机床技术仍不够成熟,配套的超声加工装置仍待开发完善。

(5)充分发挥超声波在材料回收过程中的优点,逐渐取代传统工业中能耗高、污染严重、效率低下的回收技术。

参考文献:

[1] SUSLICK K S. Sonochemistry[J]. Science, 1990, 247(4949):1439-1445.
[2] ZHANG Yumin, LIU Guihua. Size detection of diamond powder by laser particle size measurement[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2007(2):20-22.

[3] ASADI A, POURFATTAH F, SZILÁGYI I, et al. Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58:104701.
[4] UCHIDA T, KIKUCHI T, AOKI T, et al. Effects of ultrasound exposure time on nanometer-sized diamond particles dispersion[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 48:48.
[5] 王沛, 朱峰, 王志强. 超声波以及分散剂对纳米金刚石在水性介质中分散行为的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(2):46-50.
[6] 徐雅琪, 宋宇, 王大耿, 等. 超声处理对CNTs/Mg复合材料力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(16):62-65.
[7] REINFORCEMENT P F, KIM J Y, KIM J D, et al. Effects of ultrasonic dispersion on nanoparticle based[J]. Polymer Testing, 2021, 99: 107210.
[8] MAHBUBUL I M, ELCIOGLU E B, SAIDUR R, et al. Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂-water nanofluid[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37:360-367.
[9] ZHU H T, LI C J, WU D X, et al. Preparation, characterization, viscosity and thermal conductivity of CaCO₃ aqueous nanofluids[J]. Science China, 2010, 53(2): 360-368.
[10] BHAGAT R B. Cavitation erosion of composites-a materials perspective[J]. Journal of Materials Science Letters, 1987, 6(12): 1473-1475.
[11] DIODATI G, GIANNINI F S. Complex particles produced from graphite powder by acoustic cavitation in water[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2002, 9(4): 215-217.
[12] 王建强, 丁玉梅, 马昆, 等. 碳纳米管在环氧树脂中无溶剂超声分散[J]. 塑料, 2013, 42(6):5-8.
[13] LUCAS A, ZAKRI C, MAUGEY M, et al. Kinetics of nanotube and microfiber scission under sonication[J]. J Phys Chem, 2009, 113:20599-20605.
[14] SESIS A, HODNETT M, MEMOLI G, et al. Influence of acoustic cavitation on the controlled ultrasonic dispersion of carbon nanotubes[J]. J Phys Chem, 2013, 117:15141-15150.
[15] ZANGHELLINI B. Dispersion state and damage of carbon nanotubes and carbon nanofibers by ultrasonic dispersion: A review[J]. Nanomaterials, 2021, 11(6): 1469.
[16] 彭响. 兆赫超声分散系统的设计及试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
[17] 杨柳. 纳米PZT颗粒的兆赫超声制备及压电力显微研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.

- [18] 刘欢,龚文邦,高辉武,等.金属熔体超声细化处理技术及其应用[J].铸造,2015,64(10):1013-1016.
- [19] 张平.超声处理对铝合金凝固过程与力学性能的影响研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [20] JOAQUIM B, HÉLDER P. Ultrasonic melt treatment of light alloys [J]. International Journal of Metal casting, 2019, 13(1): 180.
- [21] 孙永强,黄松林,贾征,等.高强超声波处理对Al-2Si合金凝固组织及除气效果的影响[J].轻合金加工技术, 2019, 47(11): 11-15.
- [22] HUANG Jinxian, LI Jianguo, LI Cong, et al. Elimination of edge cracks and centerline segregation of twin-roll cast aluminum strip by ultrasonic melt treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5034-5044.
- [23] KIM S B, CHO Y H, JO M S, et al. The effect of ultrasonic melt treatment on solid solution treatment temperature and/or time for an Al-7Si-2Cu-1Mg alloy [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2020, 33(2-3): 61-71.
- [24] CHEN Shi, FAN Gaofeng, MAO Xuqiang, et al. Effects of ultrasonic bending vibration introduced by an L-shaped ultrasonic rod on the microstructure and properties of a 1060 aluminum alloy strip formed by twin-roll casting[J]. Materials, 2020, 13(9): 1-12.
- [25] 贾征,喻兵,付丽.双超声探头处理对7116铝合金DC铸造大铸锭凝固组织的影响[J].铸造技术, 2021, 42(8): 672-675.
- [26] QI Chile, XING Ruichen, SHAO Chenning. The effect of variable-frequency ultrasonic melting treatment technology on microstructure and properties of AZ80 magnesium alloy [J]. Key Engineering Materials, 2019, 4830: 209-214.
- [27] CHEN Xingrui, YIN Chaoyang, LE Qichi, et al. The microstructure refinement and strength enhancement of Mg-Al-Si alloy subjected by alternating-frequency ultrasonic melt treatment [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(1): 474-480.
- [28] KOULIS P, VALDIS B, GEORGI D, et al. Contactless ultrasonic cavitation in alloy melts [J]. Materials, 2019, 12(21): 3610.
- [29] TONRY C E H, JAMBAZOV G D, DYBALSKA A, et al. Acoustic resonance for contactless ultrasonic cavitation in alloy melts [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104959.
- [30] 费卓铭,林冲,李浩,等.超声及电磁场对铝合金熔体影响的数值模拟及试验研究[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 435-440.
- [31] 卓鹏.热塑性复合材料超声焊接技术[J].航空制造技术, 2012(18): 92-95.
- [32] SOMEN K, BHUDOLIA, GORAM G, et al. Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: A review [J]. Materials, 2020, 13(6): 1284.
- [33] WANG Tao, XUAN Su, WANG Haohan, et al. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 196-202.
- [34] KUMAR R K, OMKUMAR M. Investigation and characterization of ultrasonically welded GF/PA6T composites [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 282-286.
- [35] LEONG K F, BHUDOLIA S K, GOHEL G, et al. Investigation on ultrasonic welding attributes of novel carbon/elium composites [J]. Materials, 2020, 13(5): 1117.
- [36] GAO Y H, ZHI Q, LU L, et al. Ultrasonic welding of carbon fiber reinforced nylon 66 composite without energy director [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(5): 1-11.
- [37] JIROMARU T, MISUGI H, MASAFUMI Y, et al. Frequency characteristics of ultrasonic plastic welding: 27 kHz to 180 kHz ultrasonic plastic welding systems (advanced technology of vibration and sound) [J]. JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2006, 49(3): 634-641.
- [38] SKOROVÁ L, UBA O, ALUDEK M, et al. The strength study of ultrasonically welded thermoplastic [J]. Materials Science Forum, 2019, 952: 135-142.
- [39] BATES P J, MACDONALD J, SIDIROPOULOS V, et al. Comparison of experimental and analytical vibration welding meltdown-time profiles for nylon 66 and polypropylene [J]. Polym Eng Sci, 2005, 45(6): 789-797.
- [40] TILAHUN S, VIJAYAKUMAR M D, RAMESH K C, et al. A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 988(1): 12113.
- [41] 曹秒艳,田少杰,胡晗,等.铝-镁异种合金板材超声焊接工艺[J].中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2789-2797.
- [42] TAKEHIKO W, HIDEO S, ATUSHI Y. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15-16): 5475-5480.
- [43] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Characterization of ultrasonic spot welded joints of Mg-

- to-galvanized and ungalvanized steel with a tin interlayer [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4):811-817.
- [44] HONG K, WANG Y, ZHOU J, et al. Investigation on ultrasonic assisted friction stir welding of aluminum/steel dissimilar alloys [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2021, 40(1):45-52.
- [45] ZHANG Chen. Numerical analysis of temperature distribution during ultrasonic welding process for dissimilar automotive alloys [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(6):522-531.
- [46] 李欢, 曹彪, 杨景卫, 等. Cu-Al异种金属超声焊接过程模拟[J]. *焊接学报*, 2017, 38(8):5-9.
- [47] SHEN N, SAMANTA A, CAI W W, et al. 3D finite element model of dynamic material behaviors for multilayer ultrasonic metal welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 302-312.
- [48] 曹凤国. 超声加工[M]. 北京: 化工出版社, 2014:99.
- [49] XIAO, QIANG. Research on the machining principle and experiment of ultrasonic machining [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 373-375:1983-1986.
- [50] HANG H L, ZHANG J H, HUO M Y. Study on ultrasonic vibration assisted grinding in theory [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 532-533:773-776.
- [51] HUANG W, ZHONG Q, AN D, et al. Mechanism and Experiment study of non-contact ultrasonic assisted grinding[J]. *Actuators*, 2021, 10(9):238.
- [52] 张园, 康仁科, 刘津廷, 等. 超声辅助振动钻削技术综述[C]. 大连: 中国机械工程学会, 2016:157-165.
- [53] 柏广才. 超声钻削研究综述[J]. *内燃机与配件*, 2021(8):96-97.
- [54] PARK K H, KIM K T, HONG Y H, et al. Study on effect of ultrasonic vibration in machining of alumina ceramic [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 516: 311-316.
- [55] 张德远, 黄志勇, 张翔宇. 超声加工的技术发展与行业应用[J]. *电加工与模具*, 2021(4):1-14.
- [56] 万宏强, 韩佩瑛, 葛帅, 等. 超声复合振动抛光中材料去除原理及力学分析[J]. *煤矿机械*, 2018, 39(11): 64-67.
- [57] SINGH R P, SINGHAL S. Rotary ultrasonic machining: A review [J]. *Materials & Manufacturing Processes*, 2016, 31(14): 1795-1824.
- [58] WANG H, HU Y, CONG W, et al. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: Effects of ultrasonic frequency [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9): 3759-3772.
- [59] FERNANDO P K S C, ZHANG M, PEI Z. Rotary ultrasonic machining: Effects of tool natural frequency on ultrasonic vibration amplitude [J]. *Machining Science & Technology*, 2019, 23(4):595-611.
- [60] 林本刚, 李丽, 刘云, 等. 超声振动对电火花加工效果的影响[J]. *工具技术*, 2017, 51(11): 79-83.
- [61] 赵玉田. 超声复合混介质电火花加工 TC4 合金试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [62] 冯真鹏, 肖强. 超声加工技术研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(4):161-172.
- [63] 张勤俭, 王会英, 徐文胜, 等. 超声挤压强化技术的研究现状及发展前景[J]. *电加工与模具*, 2013(6): 11-14.
- [64] 程明龙, 肖勇, 刘康宁, 等. 超声振动滚挤压对金属表面微观组织的影响[J]. *工具技术*, 2019, 53(7):73-76.
- [65] 胡燕慧, 张峥, 钟群鹏, 等. 金属材料超高周疲劳研究进展[J]. *机械强度*, 2009, 31(6):979-985.
- [66] 王清远. 超声加速疲劳实验研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2002(3):6-11.
- [67] 李群. 超声疲劳试验装置及试件设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [68] 吴涛, 姚卫星, 黄杰. 纤维增强树脂基复合材料超高周疲劳研究进展[J]. *材料导报*, 2022(6):1-18.
- [69] HOSOI A, SATO N, KUSUMOTO Y, et al. High-cycle fatigue characteristics of quasi-isotropic CFRP laminates over 108 cycles (initiation and propagation of delamination considering interaction with transverse cracks)[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(1):29-36.
- [70] SZCZEPANSKI C J, JHA S K, LARSEN J M, et al. Microstructural influences on very-high-cycle fatigue-crack initiation in Ti-6246[J]. *Met Mater Trans*, 2008, 39:2841-2851.
- [71] FITZKA M, KARR U, GRANZNER M, et al. Ultrasonic fatigue testing of concrete [J]. *Ultrasonics*, 2021, 116: 106521.
- [72] STANZL-TSCHEGG S E, MAYER H R. Fatigue and fatigue crack growth of aluminium alloys at very high numbers of cycles [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23:231-237.
- [73] ZHU X, JONES J W, ALLISON J E. Effect of frequency, environment, and temperature on fatigue behavior of E319 cast aluminum Alloy: Stress-controlled fatigue life response [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(11): 2681-2688.
- [74] ZHU X, JONES J W, ALLISON J E. Effect of frequency, environment, and temperature on fatigue behavior of E319 cast aluminum alloy: Small crack propagation met [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(11): 2666-2680.
- [75] FITZKA M, PENNING S B, KARR U, et al.

- Influence of cycling frequency and testing volume on the VHCF properties of 18Ni maraging steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 216:106525.
- [76] CARSTENSEN J, MAYER H, BRONSTED P. Very high cycle regime fatigue of thin walled tubes made from austenitic stainless steel [J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2002, 25, 837-844.
- [77] KOVACS S, BECK T, SINGHEISER L. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime [J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 49(Apr.):90-99.
- [78] SCHMID S, HAHN M, SSSLER S, et al. Effect of frequency and biofuel E85 on very high cycle fatigue behaviour of the high strength steel X90CrMoV18[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 60, 90-100.
- [79] STÖCKER C, ZIMMERMANN M, CHRIST, et al. Localized cyclic deformation and corresponding dislocation arrangements of polycrystalline Ni-base superalloys and pure Nickel in the VHCF regime [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33:2-9.
- [80] CERVELLON A, CORMIER J, MAUGET F, et al. Very high cycle fatigue of Ni-based single-crystal superalloys at high temperature [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(9): 3938-3950.
- [81] FITZKA M, SCHÖNBAUER B M, RHEIN R K, et al. Usability of ultrasonic frequency testing for rapid generation of high and very high cycle fatigue data[J]. *Materials*, 2021, 14(9): 2245.
- [82] 郭思廷. 材料超声疲劳试验中试样的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [83] PEDRO R. COSTA D, HENRIQUE S, et al. Ultrasonic fatigue testing under multiaxial loading on a railway steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 136:105581.
- [84] 罗娟, 万良友, 韩冬桂, 等. 高温超声疲劳试验系统设计及应用[J]. *武汉纺织大学学报*, 2020, 33(2):70-73.
- [85] 敬人可, 李建增, 周海林. 超声无损检测技术的研究进展[J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(7):28-30.
- [86] CAWLEY P, LOWE M J S, ALLEYNE D N, et al. Practical long range guided wave testing: Applications to pipes and rail[J]. *Materials Evaluation*, 2003, 61(1):66-74.
- [87] MICHAELS J E, SANG J L, CROXFORD A J, et al. Chirp excitation of ultrasonic guided waves [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1):265-270.
- [88] BRUCE W, DRINKWATER, PAUL D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review [J]. *NDT and E International*, 2006, 39(7): 525-541.
- [89] 陈鹏, 韩德来, 蔡强富, 等. 电磁超声检测技术的研究进展[J]. *国外电子测量技术*, 2012, 31(11):18-21.
- [90] 周海强, 刘天浩, 裴翠祥. 基于电磁超声共振的金属环-含能材料界面脱粘缺陷检测[J]. *功能材料*, 2020, 28(10):1010-1016.
- [91] 刘磊, 杨扬, 潘永东, 等. 空气耦合层状复合材料的声传播研究[J]. *固体力学学报*, 2014, 35(1):8-14.
- [92] 危荃, 金翠娥, 周建平, 等. 空气耦合超声技术在航空航天复合材料无损检测中的应用[J]. *无损检测*, 2016, 38(8):6-11.
- [93] 董方旭, 凡丽梅, 赵付宝, 等. 空气耦合超声检测技术在复合材料检测中的应用[J]. *无损探伤*, 2022, 46(1): 10-13.
- [94] 路祥, 严刚, 汤剑飞. 基于超声导波的复合材料结构疲劳损伤监测实验研究[J]. *中国测试*, 2019, 45(9): 38-44.
- [95] KIM D R, KIM J H. Disbond detection technique for liner/propellant interface using ultrasonic resonance and lamb waves [J]. *International Journal of Modern Physics Conference*, 2012(6):49-54.
- [96] 徐志祥, 王铮恭, 王雨, 等. 激光激发超声波检测带涂层铝板的表面缺陷[J]. *机械工程与自动化*, 2019(5): 162-163.
- [97] 杨理践, 张晓丹, 高松巍, 等. 超声波在管道防腐层剥离内检测中的传播特性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(1):14-23.
- [98] RYUZONO K, YASHIRO S, NAGAI H, et al. Topology optimization-based damage identification using visualized ultrasonic wave propagation [J]. *Materials*, 2019, 13(1): 33.
- [99] MAIO L, MEMMOLO V, RICCI F, et al. Ultrasonic wave propagation in composite laminates by numerical simulation[J]. *Composite Structures*, 2015, 121:64-74.
- [100] MOON S M, JERINA K L, HAHN H T. Acousto-ultrasonic wave propagation in composite laminates [M]. Boston: Acousto-Ultrasonics, 1988:111-125.
- [101] SHIVAPRASAD S, KRISHNAMURTHY C V, PANDALA A, et al. Numerical modelling methods for ultrasonic wave propagation through polycrystalline materials [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, 72 (11): 2923-2932.
- [102] 李伶俐. 超声波污泥减量化技术的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [103] 郭雅峰, 夏志东, 毛倩瑾, 等. 超声辅助处理回收锂离子电池正极材料[J]. *电子元件与材料*, 2007(5): 36-38.
- [104] ZHAO Siqi, ZHANG Wenxuan, LI Guangming, et al. Ultrasonic renovating and coating modifying spent lithium cobalt oxide from the cathode for the recovery and sustainable utilization of lithium-ion battery [J].

- Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120510.
- [105] LI Xin, XING Pengfei, DU Xinghong, et al. Influencing factors and kinetics analysis on the leaching of iron from boron carbide waste-scrap with ultrasound-assisted method [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38:84-91.
- [106] KONG J, XING P, WEI D, et al. Ultrasound-assisted leaching of iron from silicon diamond-wire saw cutting waste [J]. JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2021, 73(3): 791-800.
- [107] UTOMO J, KURNIAWAN R, NURONI M S, et al. Recovery of platinum from spent removing catalyst of Pt/Al₂O₃ by ultrasonic-assisted acid leaching[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 515(1):12052.
- [108] LIM M, YANG C K, YAP Y H, et al. Intensification and optimisation of nickel recovery from spent hydrogenation catalysts via ultrasound-augmented hydrometallurgy [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105771.
- [109] ZHANG Kaihua, LI Bin, WU Yufeng, et al. Recycling of indium from waste LCD: A promising non-crushing leaching with the aid of ultrasonic wave [J]. Waste Management, 2017, 64:236-243.
- [110] 陈丰羽. 制革污泥中铬的超声酸浸氧化回收方法研究[D]. 西安:陕西科技大学,2020.
- [111] LI Haoyu, LI Shiwei, SRINIVASAKANNAN C, et al. Efficient cleaning extraction of silver from spent symbiosis lead-zinc mine assisted by ultrasound in sodium thiosulfate system [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 118-127.
- [112] XIAO Jin, YUAN Jie, TIAN Zhongliang, et al. Comparison of ultrasound-assisted and traditional caustic leaching of spent cathode carbon (SCC) from aluminum electrolysis[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018,40: 21-29.
- [113] 梁治齐.实用清洗技术手册(第二版)[M].北京:化工出版社,2005:150.
- [114] RUHGE F R, HATCHER C. Ultrasonic coating removal method: US20100275949 A1 [P]. 2010-11-4.
- [115] 郭双全,李俊辰,冯云彪,等.一种航空发动机风扇机匣内壁封严涂层的去除方法:CN106623177A [P].2017-05-10.
- [116] 陈浩,吴壮志,刘新利,等.800℃热震与声波振动对MoSi₂/Mo涂层损伤的有限元模拟[J].中国铝业,2021,45(2):55-61.
- [117] 吴佳,张振忠,赵芳霞.超声脉冲电沉积法回收含铜电镀废液中铜的工艺研究[J].材料导报,2010,24(4):102-105+114.
- [118] QIU Liping, SHI Liang, LIU Zhi, et al. Effect of power ultrasound on crystallization characteristics of magnesium ammonium phosphate [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 36:123-128.
- [119] 赵平,赵立宁,张月萍.超声清洗法回收冷轧厂磁过滤物中的纳米铁粉[J].中国粉体技术,2012,18(6): 53-57.
- [120] 张新月,周明东,臧树良.超声氧化消解法从含镉离子液体中分离回收镉[J].石油化工高等学校学报,2012,25(6):10-13.

Research Progress of Ultrasonic Technology in Materials Engineering Applications

TIAN Dexiang, LIU Xinli*, WANG Dezhi

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Ultrasonic is a kind of mechanical wave with very short wavelength. The ultrasonic technology based on the effects of ultrasonic cavitation and resonance has been applied in various fields of material engineering. This review mainly summarized some applications of ultrasonic in material preparation, machining, characterization and recycling in the recent years. Moreover, the existing problems of ultrasonic applications were pointed out, and the future potential applications of ultrasonic in material engineering were prospected.

Keywords: ultrasonic; materials preparation; materials machining; materials characterization; materials recycling

(学术编辑:孙文)