

6
电加工和超声加工丛书

材料尺寸的 超声加工



[苏联] B. IO. 维罗曼著

国防工业出版社



电加工和超声加工丛书六

材料尺寸的超声加工

[苏联] B. IO. 维罗曼著

陶东生译

王树范校



国防工业出版社

5370

1965

0439/13
出版者的話

为了满足我国机械制造工艺人员的需要，我們准备将苏联机械工业出版社的“电加工和超声加工丛书”（Библиотечка электротехнолога и ультразвуковика）陸續翻譯出版。这套丛书共有七册，分別介紹金屬电流脉冲加工、金屬阳极机械加工、金属电化学加工、金属电接触加工、金属超声加工等問題，系統地叙述了加工基本方法、原理和工艺以及所用的设备。

这一册“材料尺寸的超声加工”叙述了利用弹性机械振动进行硬脆材料尺寸加工的物理基础，介绍了超声加工方法、所用的工具、设备及其应用于通孔和盲孔的插削、表面的成型加工、坯料和零件的切断、雕刻、超声铣削、磨削、車削、钻削、切断、切制螺紋等方面的实例。书中给出了很有参考价值的数据资料，可供工艺人員在生产中参考。

这套丛书适于机械制造工厂从事电加工和超声加工的工艺人員、技术工人和工长閱讀。

РАЗМЕРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

МАТЕРИАЛОВ

〔苏联〕В. Ю. Верещагин

МАШГИЗ 1965

材料尺寸的超声加工

陶东生译

王树范校

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第014号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印張 2 1/2 51千字

1965年2月第一版 1965年2月第一次印刷 印数：0,001—5,550册

統一書号：15034·727 定价(科六) 0.32元

目 录

绪言	4
一、超声加工原理	5
二、超声加工装置	7
振动系统	7
振动系统的固定方法	18
超声加工设备	21
超声发生器及其与磁致伸缩换能器的匹配	27
声学工具头	28
三、超声加工的工艺特性	44
超声加工的生产率	44
超声加工的精度	51
超声加工的表面质量	57
四、尺寸超声加工的应用	61
通孔和盲孔的插削	62
表面的成型加工	70
坯料和零件的切断	72
雕刻	72
超声铣削、磨削、车削、切割和切制螺纹的过程	73
结 论	77
参考文献	78

电加工和超声加工丛书六

材料尺寸的超声加工

[苏联] B. IO. 维罗曼著

陶东生译

王树范校



国防工业出版社

5370

1965

0439/13
出版者的話

为了满足我国机械制造工艺人员的需要，我們准备将苏联机械工业出版社的“电加工和超声加工丛书”（Библиотечка электротехнолога и ультразвуковика）陸續翻譯出版。这套丛书共有七册，分別介紹金屬电流脉冲加工、金屬阳极机械加工、金属电化学加工、金属电接触加工、金属超声加工等問題，系統地叙述了加工基本方法、原理和工艺以及所用的设备。

这一册“材料尺寸的超声加工”叙述了利用弹性机械振动进行硬脆材料尺寸加工的物理基础，介绍了超声加工方法、所用的工具、设备及其应用于通孔和盲孔的插削、表面的成型加工、坯料和零件的切断、雕刻、超声铣削、磨削、車削、钻削、切断、切制螺紋等方面的实例。书中给出了很有参考价值的数据资料，可供工艺人員在生产中参考。

这套丛书适于机械制造工厂从事电加工和超声加工的工艺人員、技术工人和工长閱讀。

РАЗМЕРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

МАТЕРИАЛОВ

〔苏联〕В. Ю. Верещагин

МАШГИЗ 1965

材料尺寸的超声加工

陶东生译

王树范校

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第014号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/32 印張 2 1/2 51千字

1965年2月第一版 1965年2月第一次印刷 印数：0,001—5,550册

統一書号：15034·727 定价(科六) 0.32元

目 录

绪言	4
一、超声加工原理	5
二、超声加工装置	7
振动系统	7
振动系统的固定方法	18
超声加工设备	21
超声发生器及其与磁致伸缩换能器的匹配	27
声学工具头	28
三、超声加工的工艺特性	44
超声加工的生产率	44
超声加工的精度	51
超声加工的表面质量	57
四、尺寸超声加工的应用	61
通孔和盲孔的插削	62
表面的成型加工	70
坯料和零件的切断	72
雕刻	72
超声铣削、磨削、车削、切割和切制螺纹的过程	73
结 论	77
参考文献	78

緒 言

硬脆材料的尺寸超声加工虽然应用的时间还很短，但已在工业中获得了普遍的推广。

现在已能利用超声加工方法实现各种不同的加工工序。其中最常见的有：精密的硬质合金冲模和光学工业玻璃零件的加工、精密的陶瓷和铁氧体无线电元件的制造及涡轮叶片的加工等等。

尺寸超声加工的迅速发展，促进了超声设备的日益完善和对这种新的加工方法所进行的研究以及建立新的工艺工序。

对制造设备和操作来说，超声技术要求具有高度熟练程度的人员。

这本小册子的目的是向读者介绍超声技术基础、尺寸超声加工的主要规律和工艺参数，给广大的生产者提供有关掌握专用设备、制造必要的声学工具以及正确拟定零件加工工艺规程方面的知识。

一、超声加工原理

硬脆材料的超声加工是由机械加工演变而成的。其原理是用磨粒的冲击作用来粉碎被加工材料表面的质点。由于大量磨粒 ($30,000 \sim 100,000$ 粒/厘米³) 高频率的 ($18,000 \sim 25,000$ 次/秒) 反复撞击, 使所加工的材料被强制剝落。磨粒的运动是由工具端面的振动而形成的。

根据理論得知 (这一理論已被苏联科学院声学研究所 [2] Л. Д. 罗金别尔格领导进行的实验所证实): 以很高的频率振动着的工具头像風鎚一样冲击着磨粒, 并迫使它們进入被加工的材料中去 (图 1)。

在磨粒悬浮液中进行超声加工最为有效。液体中的空化现象能够加强工具头上磨粒的搅动, 并迫使磨粒进入磨損的磨粒。为了用新磨粒去替换用过的磨粒,

应当随时更換加工区的磨料悬浮液。

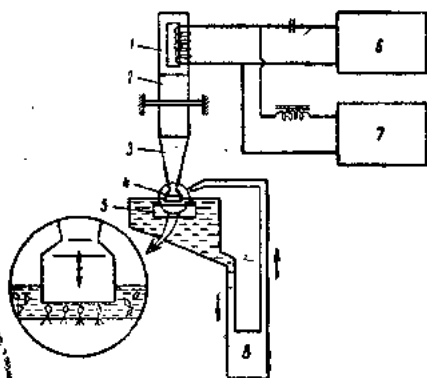


图 1 超声装置。

- 1—磁致伸缩换能器; 2—耦合杆; 3—压电换能器; 4—工具头; 5—被加工零件; 6—超声频率发生器; 7—直流电源; 8—悬浮液供给泵。

从上述情况可知, 超声方法只适用于脆性材料。脆而强

度不高的材料，例如玻璃、陶瓷、铁氧体等最宜用这种方法加工。

强度较高的材料，例如硬质合金，则较难加工。而塑性材料实际上是不能利用超声方法进行加工的。

在表 1 中列举出了在同一条件下，加工各种不同材料时所需的相对时间。

表 1

材 料	相对加工 时 间	材 料	相对加工 时 间
玻 璃	1	石 英	2
钛酸钡	1	硼 珐	3
陶 瓷	1.1	单斜刚玉	5
铁氧体	1.3	碳 化 钨	40
钨	1.3	波列基特合金	50
硅	1.5	工 具 钢	100

加工硬脆材料的超声装置中主要构件有：

1. 振动系统，利用它把超声频电振荡转换成同一频率的机械振动；

2. 激励振动系统的超声频发生器；

3. 向加工区供给磨料悬浮液的液压系统。

在振动系统中，由具有磁致伸缩效应（一种通过换能器磁通量的大小而改变其尺寸的效应）的材料制成的换能器来产生超声频的机械振动。当超声频发生器的电流通过磁致伸缩换能器的绕组时，换能器的长度与发生器的频率产生同步变化。

磁致伸缩效应与磁场强度具有非线性的关系。因此，除了交流磁场外，在换能器内还要有一个直流磁场，以便将

磁致伸縮換能器的工作點選定在有最好磁致伸縮效应的区域内。

調整發生器的頻率使之與換能器機械振動的固有頻率相等。這時，由於產生了諧振，所以換能器的振幅將增大。換能器端面的振幅為 10~12 微米。

由於在工作時磁致伸縮換能器變熱，所以為了防止過熱，要用流水不斷地進行冷卻。

在換能器下聯接有金屬的（通常是鋼質的）耦合杆，其長度為半波長的整數倍。當振動系統工作時，沿着振動系統形成交變波節波腹的駐波。在耦合杆的波節處，把振動系統固定在機床上。振動經過耦合杆傳給金屬的聚能器。在聚能器的末端裝有工具頭。

在聚能器上，振動的聲能集中於較小的面積上，同時增大振幅。這是提高加工生產率的必要條件。工具頭的振幅可達 100 微米。

當超聲設備工作時，工具頭以一定的壓力加在工件上。在加工過程中，工具頭逐漸深入到工件中，形成與工具頭截面相同的孔。

二、超聲加工裝置

振動系統

振動系統的功用，是把發生器的超聲頻電振蕩轉換成工具頭的機械振動。

此外，作為超聲頭主要構件的振動系統，應該保證在加

工过程中与工具头牢固连接。

振动系统的主要部分是：

1. 具有激励绕组的磁致伸缩换能器；
2. 固定振动系统的元件；
3. 带有工具头的聚能器。

现在对这些部分的计算、设计和制造的主要问题作一下研究。

磁致伸缩换能器 当把铁磁体（杆）置于磁场内时，由于磁场的变化而产生长度变化的现象，称为磁致伸缩或焦耳效应。

磁致伸缩变形的大小主要由磁芯的材料、热处理、预加磁化的大小以及温度来决定。

磁致伸缩效应是可逆的，且不受磁场极化的影响。

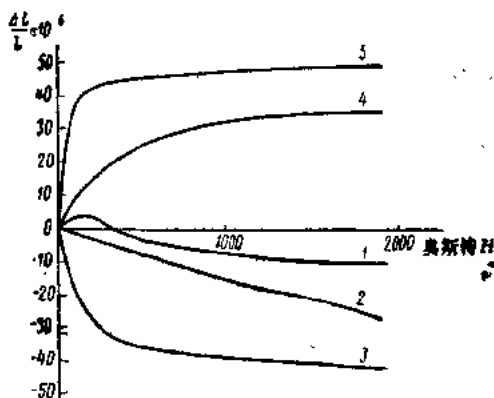


图2 磁致伸缩材料的相对延伸率 $\frac{\Delta l}{l}$ 和磁场强度 H 的关系曲线：

1—铁；2—钴；3—镍；4—铁镍合金（6%—Ni；94%—Fe）；

5—帕明杜尔铁镍合金。

图2所示为磁场强度和各種材料相对延伸率的关系曲线 [3, 5]。

在純金属中，磁致伸縮特性最好的是鎳。目前，在制造超声振动系统的磁致伸縮換能器时，鎳应用得最广泛。这主要是由于，鎳除了具有足够的磁致伸縮特性外，它还具有一系列的工艺上的优点。在迭片表面上能够形成氧化絕緣膜。而且，这种換能器能够与振动系统上的其他零件钎焊在一起。

对于換能器来说，只能采用牌号为 HO 或 H-1 (ГОСТ 2170-49) 的純鎳。

牌号为 K50Φ2, 49KΦ, K65 的铁鎳合金，也具有好的磁致伸縮效应。其中应用得最广泛的是牌号为 K50Φ2 的帕明杜尔铁鎳合金 (49% 鎳; 2% 钒; 49% 铁)。帕明杜尔铁鎳合金比鎳的磁致伸縮效应大一些 (鎳的 $\frac{\Delta l}{l}$ 为 40×10^{-6} ，

帕明杜尔铁鎳合金的 $\frac{\Delta l}{l}$ 为 $50 \sim 60 \times 10^{-6}$)。但因其表面不会生成永久性的絕緣膜，所以是不太适宜制造換能器的。因此，还必须采用特殊的方法来形成迭片間的絕緣。此外，帕明杜尔铁鎳合金比鎳的腐蝕性大。帕明杜尔铁鎳合金和鎳同样都能进行良好的钎焊。

铁鋁合金具有高的磁致伸縮特性，其中用得最多的是牌号为 Ю-12 或 Ю-14 的阿尔费尔 (альфер) 合金 (12~14% 鋁; 其余为铁)。阿尔费尔合金跟鎳具有相同的相对延伸率 (40×10^{-6})。同时它还有相当高的电阻系数。因此用它制成的換能器的能量損失比鎳质換能器要小得多。其缺点是它实

实际上不能經受釐焊，而只能采用对焊焊接。这在很大程度上使其制造工艺复杂化了〔17〕。

最有前途的磁致伸縮換能器材料是鉄氧体。在这种材料中电流的渦流損失最小。但是，現在所知道的各种鉄氧体的机械强度都不够高。因此，不能用作高功率振動系統中的換能器〔6〕。

磁致伸縮材料的热处理 材料的磁致伸縮性质，在很大的程度上决定于它的热处理质量。迭片經過最后的机械加工、矯平和除油后进行退火。退火规范系根据換能器的材料而定。

主要的磁致伸縮材料按下列规范进行热处理。

镍 在炉温为 100°C 时装料。以 $100\sim 200^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的速度加热到 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，再在 700°C 时保持 2 小时。然后再以 $150\sim 200^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的速度冷却到 150°C 。最后放在空气中冷却。

帕明杜尔鉄钴合金 加热到 850°C ，在这一温度下保持 5 小时。再以 $50^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的速度进行冷却。在真空中或在氢介质中退火。

阿尔费尔合金 在中性介质中加热到 750°C ，在这一温度下保持 2 小时。然后先以任意速度由 750°C 冷却到 600°C ，再以 $25^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的速度由 600°C 冷却到 250°C 。随后在关闭的电炉中冷却〔6〕。

磁致伸縮換能器的試驗 为了进行磁致伸縮換能器的动态試驗，需要专用的设备和水平相当高的技术人員。在生产条件下进行动态試驗通常是不可能的。然而，如能細心地执行換能器的制造工艺，来保証換能器迭片間的良好絕緣，使渦流損失減至最小时，則只进行磁致伸縮特性的静态試驗就

可以了。为此，把磁致伸縮換能器的端面固定在水平光学仪的两个触头間（其刻度值为 0.001 毫米）。利用开关把換能器的繞組通过可变电阻接到直流电源上（蓄电瓶）。把換能器长度的相对变化与安匝数的关系記下来。

具有正常磁致伸縮特性的換能器，当激励磁場的安匝数为 1000 时，其相对延伸率为 $(30 \sim 40) \times 10^{-6}$ 。对帕明杜尔鉄鈷合金來說，如获得与上述相同的延伸率，其安匝数只要 750 就可以了。

具有封閉磁路的換能器亦可进行同样的試驗。断开式磁路的換能器則应考虑激励繞圈磁通的漏泄量。

磁致伸縮換能器的磁化 因为磁致伸縮效应不受換能器中磁場方向的影响，所以如果換能器激励繞圈只通以交流时，則換能器的振动为倍頻。为了使它产生基頻諧振，应使換能器极化。因此，除了交流电外，还要向激励繞圈通以直流电。并且为了使基頻获得最大的振幅，应使直流电流值約等于交流电的振幅。

換能器的諧振曲綫 当激励頻率发生变化时，振幅随着图 3, a 所示的諧振曲綫而变化。

当把激励电流的頻率調整到跟磁致伸縮換能器彈性振动的固有頻率一致时，振幅最大。在頻率为 16~20 千赫工作时，換能器的通頻带 ($2\Delta f$) 为 100~200 赫。

当磁致伸縮換能器与声学工具头的耦合杆联接时，諧振頻率取决于整个振动系统的固有頻率。而不仅仅是由磁致伸縮換能器来决定。

由于极其精确地計算声学工具头是不可能的，所以系統的固有頻率可以跟磁致伸縮換能器的頻率有一定的差別。

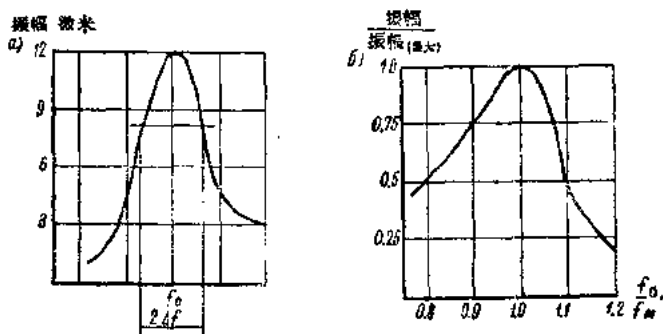


图3 a) 振幅跟激励电流频率的关系; 6) 振幅跟系统固有频率与磁致伸缩换能器频率之比的关系;

f_0 —谐振频率; $2\Delta f$ —通频带。

图3, 6所示的相对单位曲线是工具头的振幅跟振动系统的固有频率与换能器的固有频率之比的关系。

由曲线可知: 当频率一致时振幅最大。但是, 在足够宽的频率间隔内工作时, 整个系统也是令人满意的。

换能器的冷却 磁致伸缩效应跟换能器的温度有关系。

当换能器的温度升高时, 其相对延伸率下降。例如当镍加热到 100°C 时, 磁致伸缩效应就降低 $10\sim 12\%$ 。当加热到 200°C 时, 则降低 $30\sim 40\%$, 而当到达居里点 (353°C) 时, 就毫无磁致伸缩特性了。

在工作过程中, 换能器的温度要升高。为了不降低其磁致伸缩效应, 要用流水冷却。

帕明杜尔铁钴合金的磁致伸缩特性可保持到 700°C 。因此在换能器不能进行冷却的装置中, 例如超声钎焊烙铁和超声软轴钻机中都采用这种材料。

为冷却换能器而流经超声头的水, 根据换能器功率的大

小，水的流量为 0.5~2.5 升/分。

目前应用最广的冷却系统是环状喷头，它从四周向换能器进行喷射。

换能器中的损失 与有交变磁通通过的一切导体一样，在磁致伸缩换能器中也产生涡流和磁滞的能量损失。并且其中涡流的损失比磁滞的损失大得多。涡流损失和磁滞损失跟换能器的材料及其热处理有关。

阿尔费尔合金的磁滞损失最小。

材料经过退火后可以降低磁滞损失。

涡流损失取决于换能器迭片的材料和厚度。

换能器材料的电阻系数愈大，则损失愈小。

用阿尔费尔合金制成的磁致伸缩换能器电阻系数最大 (90×10^{-6} 欧姆·厘米)。用帕明杜尔铁钴合金制成的换能器的电阻系数为 54×10^{-6} 欧姆·厘米。镍的电阻系数最小 (7×10^{-6} 欧姆·厘米)。

为了减少涡流损失，应尽量使换能器迭片的厚度减小。对于在 15~25 千赫频段内工作的镍质换能器，其迭片厚度不应超过 0.08~0.1 毫米。帕明杜尔铁钴合金换能器的迭片厚度可增大到 0.2 毫米。

应当考虑到，由于集肤效应的结果，只有每一迭片的表层才最能发挥作用。为了增加换能器的有效表面，也同样需要把迭片的厚度尽量减小。从这一观点出发，采用的迭片厚度最好不大于交变磁场渗透换能器材料的深度。此渗透深度可由下式决定：

$$\delta_{\text{毫米}} = 16 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$