

超声波机械加工及其在 工业上的应用

第一机械工业部技术情报所编

1960.8. 北京

超 音 波 机 械 加 工 及 其 在 工 业 上 的 应 用

第一机械工业

編 者 的 話

超音波的技术应用，目前还是一个新的科学部門，但它在生产中所起作用已經日漸显著，例如它能解决机械制造方面无法或很难加工的特殊工艺問題，并且可达到很高的精度和光洁度。为了适应国内各工厂、学校及研究单位需要，我們收集了一些国外資料，編成此书，内容主要介紹超音波机械加工原理、各影响因素、个别部件的設計計算。对特殊工艺、超音波在机械制造中各方面的应用以及国外的一些超音波机床，也作介紹。

由于編者业务水平及時間所限，錯誤一定不少，希讀者指正和批評。

編者 1960.1.

目 次

第一章 緒論	(1)
§ 1. 超音波及超音技术的应用	(1)
§ 2. 超音波加工的主要优缺点	(2)
§ 3. 世界各国超音波技术应用的研究概况	(2)
第二章 超音波加工的原理	(3)
§ 1. 超音波加工的简单工作原理	(3)
§ 2. “抛扔”和“連續冲击”的初步研究	(5)
§ 3. “空化”现象的研究	(7)
简单的理論分析	(9)
工作情况的預測	(10)
切削速度的测定	(11)
§ 1. 測定方法	(12)
§ 2. 工作頻率的影响	(12)
§ 3. 工作振幅的影响	(14)
§ 4. 靜負荷的影响	(15)
§ 5. 磨料粒度大小的影响	(20)
§ 6. 工具和工件的性质的影响	(21)
§ 7. 坚硬的尖头工具	(22)
§ 8. 工具材料的影响	(22)
§ 9. 工具的面积和形状的影响	(23)
§ 10. 工件材料的影响	(23)
§ 11. 切削加工时工件中的应力情况	(25)
§ 12. 切削速度和切削介质的关系	(25)
§ 13. 磨蚀剂供給对切削速度的影响	(26)
§ 14. 磨蚀剂濃度的影响	(26)
§ 15. 磨蚀剂液体介质的影响	(27)
第四章 超音冲削的精度和光洁度	(29)
§ 1. 影响加工精度、光洁度的一些因素	(29)
§ 2. 多次冲削和精度，光洁度的关系	(34)
§ 3. 超音冲削的光洁度	(35)
§ 4. 空化作用和表面光洁度的关系	(37)

§ 5. 在超音冲削中使用多阶段的单件工具	(38)
§ 6. 結論	(38)
§ 7. 加工实例	(38)
第五章 超音冲削的工具	(40)
§ 1. 在超音加工中工具的使用情况	(40)
§ 2. 工具的形狀、尺寸以及材料的選擇	(44)
§ 3. 側向振動和磨損	(46)
§ 4. 工具的連接方式	(48)
第六章 超音波換能器, 發生器的設計和計算	(50)
§ 1. 超音波換能器的設計和計算	(50)
§ 2. 超音波變壓器的設計和計算	(54)
§ 3. 超音波發生器的設計和計算	(58)
第七章 超音波加工中的振幅擴大器的設計和計算	(62)
§ 1. 概述	(62)
§ 2. 擴大原理	(63)
§ 3. 設計和計算方法	(64)
第八章 超音波加工中的特殊工藝	(72)
§ 1. 深孔冲削	(72)
§ 2. 金屬延接綫	(73)
§ 3. 彎曲孔加工	(73)
§ 4. 制模及浮雕工藝	(73)
§ 5. 切胚片	(74)
§ 6. 極小的孔加工	(75)
§ 7. 切片	(75)
§ 8. 碳化鎢拉絲模的加工	(76)
§ 9. 擠壓模的加工	(78)
§ 10. 複式鑽	(79)
§ 11. 切削螺紋	(80)
§ 12. 超音鑽孔的新方法	(81)
§ 13. 表面加工	(81)
§ 14. 犬試料的切斷	(84)
§ 15. 超音振動切削	(84)
§ 16. 用超音波振動切削齒輪	(85)
§ 17. 超音波磨削	(85)
§ 18. 超音加工的發展情況及電火花加工的比較	(86)
第九章 幾種外國超音波加工機床	(-99)
§ 1. 蘇聯“4770”型超音波加工機床	(99)
§ 2. 蘇聯“УЗП-1”型超音波加工機床	(100)

§ 3. 美国 “Sheffield-Cavitron” 多工位超音波加工机床	(105)
§ 4. 苏联 “JIM3” 型超音波加工机床	(105)
§ 5. 日本 “USM” 型超音波加工机床	(108)
§ 6. 西德Lehfeldt公司 “Diatron” 型超音波加工机床	(111)
§ 7. 苏联 “4772” 型万能超音波钻孔机床	(114)
§ 8. 苏联 “Y3C-3M” 型超音波加工机床	(119)
第十章 超音波在工业上的应用举例	(122)
§ 1. 鑄造工艺	(122)
§ 2. 电鑄	(123)
§ 3. 金属学及热处理	(126)
§ 4. 测厚	(128)
§ 5. 探伤	(129)
§ 6. 清洗	(131)
§ 7. 焊接	(133)

第一章 緒 論

§1. 超音波及超音技术的应用

人的耳朵能听到的振动频率范围是20~20,000周/秒。但每个人的听觉器官对于高频率的感受程度并不一样，例如，随着年龄的增長，可聞界限便会降低到12,000周/秒左右。

20周/秒以下的频率称为亚音波，而20,000周/秒以上的频率则称为超音波，这两种频率范围的振动以及20~20,000周/秒的声频都可以应用于工业技术中，例如将亚音波应用于筑路工程和石油钻探的試驗工作中，已取得很大的成績。

至于声频的应用就更为广泛，例如在洗衣机这样的机械上，就是利用一个振动膜使洗涤剂产生一个100周/秒的声频。

获得超音波的方法有机械与机电型幅射两种。前者是利用高速气流、液流喷射谐振腔或谐振片产生的，后者又可分为压电、电动与磁致伸缩型幅射三类。

超音波广泛应用于机械化学、化工、鋼鐵冶炼、医疗、农业、除尘、水下通信、軍事、浮选、沉淀、浮化、浸潤、除水垢……等各方面。本文仅就超音波在机械工业上的某些应用作简单的介紹。

超音波在机械工业上的应用，早于1927年已经开始，但其工艺的研究和工业方面的应用却是1953年以来的事。

超音波用于机械加工中，由于它具有一般切削加工所沒有的特点，能对鋸、硬質合金、石英、陶瓷、玻璃、金鋼石、水晶、鉄淦氧磁体、硅、藍寶石、钻石、淬火鋼……等硬而脆的材料进行加工。特别是非金屬硬脆材料的精密加工或特形加工时，采用切削加工或电加工是很困难的，而用超音波加工则可大大提高加工速度，并且可获得很高的精度和光洁度，对加工材料的结构也无任何影响。例如，对硬質合金阴模的制造和修理，硬質合金拉絲模和压模的制造。刃磨工具、切割卷屑槽和碎屑，光学仪器的玻璃及无綫电和电气设备的陶瓷件的制造。精制石英和半导体材料的零件、宝石的加工、在鋼鑄件中切槽以及在硬合金和陶瓷件中切螺紋等等工艺上均已获得良好的效果。

至于超音波在鑄造、焊接、清洗、金相热处理、探伤、电镀、測厚及机械加工中的一些特殊工艺，則只能根据我們蒐集到的点滴資料作一概括的介紹。

§2. 超音波加工的主要优缺点

(一) 优点:

- ①磨削工具剛性好, 价格一般都很低廉;
- ②操作简单、工具更換容易, 灵活性大;
- ③加工的精度較高, 在工件上能保証准确地复制出刀具的形状;
- ④由于工件的被加工处和工具形状一致, 因而能磨削的形状就没有限制, 工具可以用圓形的、方形的、三角形的或任何其他形状的;
- ⑤因为磨削时所用的磨蝕剂粒度很小, 加工表面很光洁, 只需要小量的表面研磨。

(二) 缺点:

- ①設備不完善, 并缺乏准确性;
- ②加工的效果与大的参数值有关, 其中与工具质量的变化有关。

尽管如此, 超音波加工仍是非常有价值的加工方法; 在机械制造工艺中是很有发展前途的一种新工艺方法。

§3. 世界各国超音波技术应用的研究概况

超音波技术是近十几年来进行研究的新技术之一, 它已发展成为一门独立的科学技术部門。目前世界上很多国家对超音波的性质正在作进一步的研究。

超音波在国民經济生活中的应用是多方面的, 对生产的发展已經起了巨大的作用, 赫魯曉夫同志在苏联七年計划报告中曾讲到: “要特別着重設計和生产利用科学技术方面, 尤其是电子学、半导体、超音波、放射性同位素方面的新成就和发现的最新式机器。”由于超音波具有种种其他方法难以代替的优点和潛力, 因而其发展前途是广闊的。

在苏联、美国、英国、德国、日本等工业发达的国家已經試制成功了超音显微鏡、大小功率的超音钻、超音厚度計、超音粘度計、超音警报装置、以及超音清洗、焊接、探伤等設備, 这些設備均已先后投入生产, 成为商品, 开始使用。利用在軍事技术方面, 更是各国科学家的注意中心之一, 例如声納, 超音測深仪等等。

第二章 超 音 波 加 工 的 原 理

§1. 超音波加工的簡單工作原理

超音波机械加工是利用超音波振动来进行的，即是在机械振动工具（振动频率在16,000周/秒以上，振幅约10微米以上）与固定在台面上的工件之间注入一定的加工液体及磨粒后，利用磨粒的运动及空隙现象等作用而进行加工的。

关于加工的基本性质、目前尚不够明确，但已知有下列几种：（1）在加工液体中，由于超音波所引起空隙现象的效果；（2）由于磨粒运动的动能而产生的磨磨作用，也就是速度效果；用工具将磨粒打入工件的连续冲击作用，也就是磨粒的加速度效果。

下面我们举一个超音波机床为例来作简单的说明：

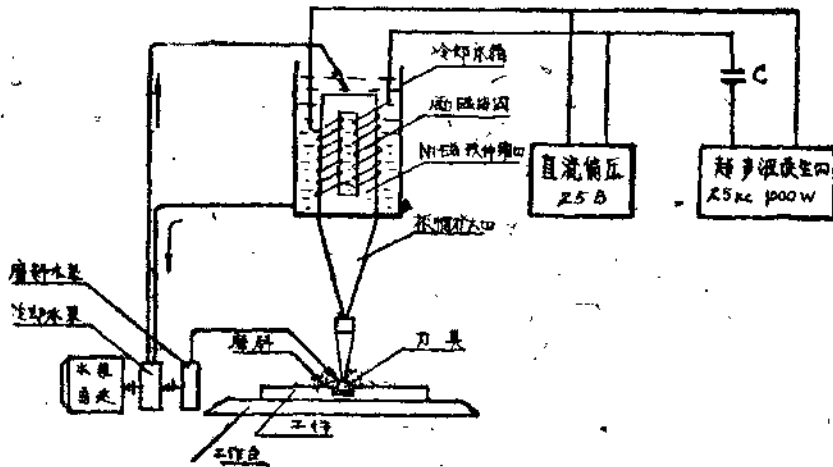


图 2-1.1 华工—5801型超音波机床工作原理示意图

发生器发出的高频电能送给能量变换器（磁致伸缩变换器），变成其本身伸缩的机械振动，与此同时，在其周围的弹性介质中便形成了超音波，再经过与磁致伸缩变换器连接在一起的振幅扩大器和工具传给处于工具和被加工工件之间的磨料溶液。在超音波作用下，液体分子和混合在其中的固体磨料微粒，便获得一个相当于重力加速度几千倍的加速度，磨料微粒则以超过本身自重几千倍的力量打入被加工材料，并从其中剥去部分材料颗粒，借进刀机构的作用，工具能以垂直方向进入工件。因此加工的力是由液体分子和磨料微粒的打击作用共同形成的，但实验证明，磨料微粒起着主要作用。每个磨料微粒在每秒钟内将完成两万多次的打击，由于液体中有大量的磨料微粒，因而这种加工方法的效率是非常高的。

超音波加工实际上是一般磨削加工的变形，一般磨削加工时，工作的微粒常在其切入被加工材料的垂直平面内具有很大的速度。而超音波加工时磨料微粒则是在其切入被加工材料的方向具有很大的速度。另外，超音波加工和工业上常用的喷砂加工金属，及用水或气流中的微粒打击金属的方法是相似的。在这种加工方法中，微粒所必需的动能是由水或气流的运动产生，而在超音波加工中，则是由与换能器连接在一起的扩大器和工具的超音频振动所产生的。

发生器是由主振荡回路及功率放大级所组成。主振荡回路 1 是高频电能的发生器，工作频率可借改变振荡回路的参数来确定，主振荡回路 1 发生信号，经功率放大级 2 加以放大后，便送入能量变换器 3 的线圈中。（见图 2-1.2）

能量变换器的种类很多，如晶体变换器、磁致伸缩变换器等，用于加工硬而脆的材料多采用后一种变换器，这是因为：

1) 磁致伸缩变换器的频率范围 $f = 10 \sim 150$ 千周/秒，符合于加工的需要频率 $f = 18 \sim 25$ 千周/秒同时加工时，变换器要承受很大的动态负荷，而大多数磁致伸缩材料都能傳送这种负荷。

2) 磁致伸缩变换器制造简单，价格便宜，工作可靠。

3) 借声扩大器可以把变换器的振动能集中在一个小面积上，从而提高加工效率。

铁、钴、镍及其合金等材料在磁场的作用下，其长短要发生伸长或缩短，当去掉磁场时，便恢复到原来的尺寸。把这些材料制成的变换器，加上交变磁场，它便能产生伸缩，由超音频的电能到超音频的机械振动的变换就是借助它们的这种作用完成的。

各种材料的相对伸长和磁场强度的关系如图 2-1.3 所示。

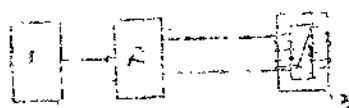


图 2-1.2

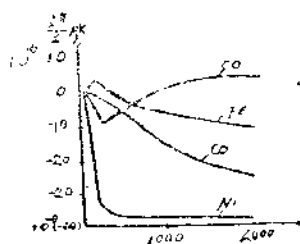


图 2-1.3

未磁化的磁致伸缩元件放在交变磁场中时，其尺寸则向一个方向变化，例如镍是缩短，而波莫合金则是伸长，因此当线圈中的电流变化的半个周期内，它们则完成了一个周期的振动，因而铁心的伸缩频率，比电源的频率大两倍。

为了避免这种倍频效应和增加振动强度，在交变磁场上再加一个直流磁场，把工作点移到磁致特性的直线部分，如图 2-1.4 所示。

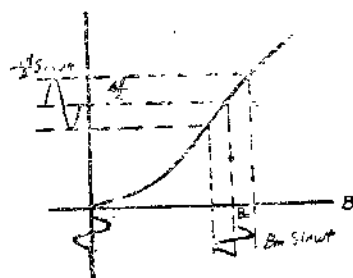


图 2-1.4

铁制变换器的振动频率受温度的影响很大，温度升高时，振动子频率便降低，因而在

加工过程中, 要进行冷却, 由于在变换器线圈上的电压不高, 故一般就把变换器放在流动的水中。

磁致伸缩器的变形很小, 一般在5~10微米的范围内, 为了把振动的幅度扩大3~5倍去进行加工, 采用了振幅扩大器, 此扩大器要和能量变换器紧密地固结在一起, 以减小超音波传播路径上的阻力。扩大器可用黄铜, 弹簧钢655, 606a, 或碳化物的工具钢制造, 扩大器的形状可作成圆锥形或指数曲线形。根据研究, 后者的工作效率差不多比前一种大两倍多(至于具体如何设计计算, 在第七章将有专门论述)。

超音波加工的直接切削作用, 是由磨料产生的, 因而磨料的硬度和粒度对加工效率及光洁度都有很大的影响。用于进行加工的磨料的硬度应大于或至少要等于被加工材料的硬度。因具有尖锐角的磨粒存在于工具与工件之间, 因此, 加工时工具与工件皆受到磨粒的磨损。但在加工中所使用的工具材料, 一般都比工件材料软, 因此, 磨粒碰撞工具和工件时, 硬工件不发生塑性变形, 而成细末脱落, 而软工具则有塑性变形, 所以磨损较小, 并且磨损多在工具的端面, 这在加工中对工件质量的影响不大, 因此超音波加工出来的工件, 棱角尖锐, 边缘方向准确。

超音加工时需在工具与工件之间给以一定浓度的磨蚀剂, 以利于加工的正常进行。磨蚀剂的作用在于:

- ①作为工具与工件的冷却剂;
- ②使磨粒以毛细管现象的作用流向工作面;
- ③在工具与工件之间构成良好的传声物, 并有较好的功能传导;
- ④在工件面上产生空隙, 保证磨粒有效的循环。

一般用的磨料有碳化硼和碳化硅细粒, 当加工金刚石时, 则用金刚石粉末。作为混合磨料的液体有: 水、煤油、变压器油、蓖麻油、酒精等。实验证明, 用水的加工效率最高, 精加工时可用油作混合液体。

加工过程中液体具有很大作用, 有人只用磨粒而不用水所做的加工实验, 发现工件材料几乎没有磨损。反之, 工具材料则有微量磨损。另外, 在加工过程中, 磨粒在工件与工具之间有布朗运动——极猛烈振动的现象。因此, 水的存在和磨粒的振动, 对工件磨损起着重要的作用是可以肯定的。

§2. “抛扔”和“连续冲击”的初步研究

关于超音波加工的原理, 不久前Milton C. Shaw曾发表了“Ultrasonic grinding”一文, 其中虽不能完全说明超音波机械加工的原理, 可是明确了加工的主要作用, 亦即是说明了研究材料和工件系由于冲击而进行加工, 并肯定了连续冲击为加工的主要作用。现将其加工的各种作用分述如下:

(一) 抛扔作用:

当一个磨料运动的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ (m ——粒子的质量, v ——粒子的速度), 磨料进入距离 $\delta = \delta_r$ 时, 即假定加工部分被破坏, 参照图2-2.1

$$F_r \delta_r / 2 = \frac{1}{2} \times mv^2 = \pi r^2 / 12 \times \rho d^3 a^2 f^2$$

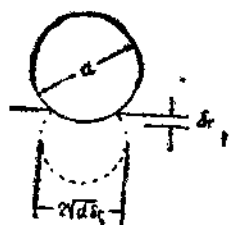


图 2-2.1

式中: F_r ——加工破坏时的最大压力;

ρ ——粒子密度;

d ——粒子的平均直径;

a ——工具的全振幅;

f ——工具的振动数。

设: 平均表面应力为 $\bar{\sigma}$, 则:

$$\bar{\sigma} = F_r / \pi d \delta_r = (\pi^2 \rho d^2 a^2 f^2) / (6 \delta_r^2)$$

又设: 深入距离为 δ_r , 则:

$$\delta_r = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \times \frac{\sqrt{\rho} d a f}{\sqrt{\bar{\sigma}}}$$

$K_1(d\delta_r)^{3/2}$ 是一个磨粒的体积, 其中 K_1 是常数。 K_2/d^2 是1周波加工的粒子数。

K_2 =粒子所占有效面积。

因此在一周波间隔内, 从工件上取下的体积是 $K_1 K_2 K_3 \frac{(d\delta_r)^{3/2}}{d^2}$ 。

而 K_3 =工件产生碎片的冲击有效率。

利用此式, 设加工速度为 R_1 , 则:

$$R_1 = \frac{K_1 K_2 K_3 \delta_r^{3/2} f}{d^{1/2}} \quad (1)$$

将 δ_r 代入, 则:

$$R_1 = K_1 K_2 K_3 \{ \pi^2 \rho a^2 / (6 \bar{\sigma}) \}^{3/4} f^{5/2} d \quad (2)$$

(二) 連續冲击作用 (见图2-2.2)

$$F = \bar{F} \times 4a / (\delta_r + \delta_r')$$

其中: F ——工具和工件之间的最大压力;

$\bar{F}$ ——在振动1周波内, 工具与工件之间的平均压力。

设: 工具所受最大应力为 $\bar{\sigma}'$

则:

$$\bar{\sigma}' = \frac{F}{n} \times \frac{1}{(\pi d \delta_r)} = 4a \bar{F} / \{ n \pi d \delta_r (\delta_r + \delta_r') \} = \bar{\sigma}' \delta_r' / \delta_r$$

设: 磨粒有效数为 n ,

则: $n = K_2/d^2$

此 K_2 相当于抛扔作用时的 K_2

又设: $\delta_r' / \delta_r = \bar{\sigma}' / \bar{\sigma} = K_3$

$$\bar{\sigma} = 4a \bar{F} d / \{ \pi K_2 (1 + K_3) \delta_r^2 \}$$

$$\delta_r = [4a \bar{F} d / \{ \pi K_2 (1 + K_3) \bar{\sigma} \}]^{1/2}$$

将此式代入(1), 根据連續冲击作用的加工速度为 R_2 , 则:

$$R_2 = K_1 K_2 K_3 [4a \bar{F} / \{ \pi K_2 (1 + K_3) \bar{\sigma} \}]^{3/4} f \times d^{1/4} \quad (4)$$

为了比较(2)的 R_1 和(4)的 R_2 , 现以实际研磨材料320*的碳化硼作实验, 此时:

$\rho = 0.00024$ 磅·秒²/时⁴

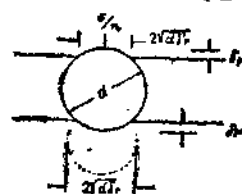


图 2-2.2

$$a = 0.003 \text{ 吋}$$

$$f = 25,000 \text{ 周/秒}$$

$$d = 0.0012 \text{ 吋}$$

$$\overline{F} = 10 \text{ 磅}$$

$$K_2 = 0.35 \text{ (水 3 磅, 研磨材料为 2 磅吋)}$$

$$K_s = \overline{\sigma} / \overline{\sigma'} = 650 / 160 = 4$$

$\overline{\sigma}$ 为被加工物的布氏硬度

$\overline{\sigma'}$ 为工具的布氏硬度

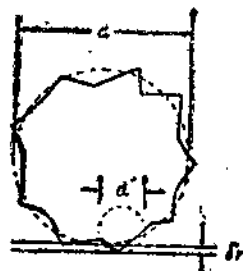


图 2-2.3

将以上各值代入 (2) (4) 式, 取 R_1/R_2 , 则 $R_1 = 0.17R_2$ 。当研磨材料为 800[#] 吋, 则 $R_1 = 0.035R_2$ 。

以上是假设研磨材料为球状体, 亦即较理想的精细结构时的情况, 如图 2-2.3。

设磨粒系有锐边、锐角, 而突起部分的有效直径为 d' , 则:

$$R_1 = K_1 K_2 K_3 (d' / \overline{\sigma'})^{3/4} \times (\pi^2 \rho a^2 / 6)^{3/4} f^{3/4} d^{1/4} \quad (5)$$

$$R_2 = K_1 K_2 K_3 (d' / \overline{\sigma'})^{3/4} [4a / \{\pi K_2 (HK_s)\}]^{3/4} \times f / d^{1/2} \quad (6)$$

将各数值代入 (5) (6) 式, 计算 R_1/R_2 , 则磨粒为 300[#] 吋, $R_1 = 0.2R_2$; 800[#] 吋, $R_1 = 0.04R_2$, 这就是说: 磨粒的抛扔作用较连续冲击作用的效果为小, 且磨粒愈细则此作用愈显著。

§3. “空化”现象的研究

超音波是一种具有一定物理特性的能量形式, 它的工作能力取决于有功功率。

$$N = \frac{Pl}{S}$$

当功率 N 不变时, 如果路程 l 很短, 而且作用的时间 S 也同样很短, 那么为了保持这一不变功率的作用, 就需要一个更大的力 P 。

超音波产生于一个由介质的压缩和膨胀而构成的声场中。压力随着振动频率的节奏而改变。频率愈高, 压力变换一次所需的时间就愈短, 这就是说, 在声功率不变的条件下, 振动力将随着频率的升高而增加; 这样便能产生一个极高的压力。

在液体介质中, 压力变化将引起一种“空化”现象, 这一现象在超音波应用的许多场合下都起着重要的作用。

这种空化现象是以成旋气泡的形式出现在工具尖端与工件之间的。这种现象不难理解, 因为在有限的容积内, 液体压力是很大的。当工具贯穿一定的深度后, 空化现象的强度大为增加, 这是由于液体的流动受到孔壁的限制而引起的。

空化现象的气泡, 包含许多强烈运动的泡沫。这种泡沫对固体表面是会产生磨蚀作用的, 可以说, 有些工具的磨损也是由于这种作用而来。另一方面, 试验又证明, 这种磨蚀作用在除掉工件材料的过程中不起有效的作用。这个试验是在一个中等功率的钻床上焊接一个直径为 $\frac{1}{8}$ 吋的圆形工具在一块 $\frac{1}{4}$ 吋厚的玻璃板上进行的。试验时, 在工具与工件之间给以用水混合的 100 号碳化硼磨粒。当工具接触到工件之后再退回到 0.005 吋, 用振幅为

0.002吋进行加工半小时以后,玻璃表面只稍稍变毛。当工具接触到工件及压力为3磅时,所产生的穿入率大约为每分钟0.1吋。第二次檢驗是在开始穿入一部分之后,再把工具退回,結果测量不出工件的磨蝕。当工具退回量与振幅相比很小时,空化現象的磨蝕作用不会受到很大的妨碍。因此可以得出这样的結論:空化現象的磨蝕,在切削工件的工作中不起重要的作用。同时容易冲削加工的硬脆材料是那些对于空化現象的磨蝕有較大阻力的材料。

不过,在檢查工具及工件时,常常发现有些磨损痕迹与空化或旋气泡的形状相近似。这些磨损痕迹好像是带有磨料的空化或旋气泡在材料上切出的槽。这种磨损当从碎除材料的方面去考虑是不重要的;但它严重地影响到所获得的表面光洁度;当表面光洁度很重要时,这些磨损痕迹必須去掉或防止其产生。这可用快速冲削来避免,因在快速冲削时,稳定的成旋的气泡来不及形成。

磨蝕的試驗也同时确定了在加工过程中沒有喷射或噴砂現象,而实际上只有工具与磨粒和工件的接触来作切削工作。用显微镜檢查工件表面的結果表明,沒有其他的空化磨蝕的現象,也沒有典型的不成比例的分散的麻点。同时,如果空化現象的磨蝕在工作过程中起着重要作用的話,这就不可能得到一个良好的,一致的表面光洁度。

很清楚,空化或旋气泡所产生的扰动,保证了旧的磨料被新的磨料混合物所代替,因而空化現象結果增加了切削的速度。这也可以用阻止空化現象来証明:假如我們用粘滯性大的磨料混合物,切削速度就相应地降低了。在很大的程度內,測量出来的切削率是符合于观察到的空化現象的强度的。



图 2-3.1 超声冲削工作所完成的几个工件

可以想象,工具表面的冲击作用对磨料的循环是很重要的。在低頻率大振幅中,这种冲击作用是非常重要的,但在超音頻率中,由于時間过短,辨别不出液体的流动,并且还由于空化現象的本身阻止液体內部压力的增加,所以真正的冲击作用在高頻率中是非常小的;但同时空化現象是很强的。

用各种不同的工具冲削玻璃时,从侧面直接观察,証明了上述各种事实。直到穿入深度大于磨粒的大小之后,空化現象的强度便增大,而最大是在孔底与孔壁。气泡大部分是从工具的底部向上流动,尽管也有些泡沫是向下流动的。去气作用帮助了气泡的向上流动。当用花鍵形工具时,泡沫主要是在鍵槽中上下流动。这个动作往往是非常快的,与形状較簡

的工具相比較，成流气泡带着磨粒产生更有效的循环。这解释了一个重要的事实，工具的切削面积相等时，花鍵形工具的切削速度較形状简单的工具为大。結論是，切削率随空化强度的增加而增加，特别是冲削深孔。当工具采用比較大的振幅时，孔深虽然增大，切削率仍保持不变。

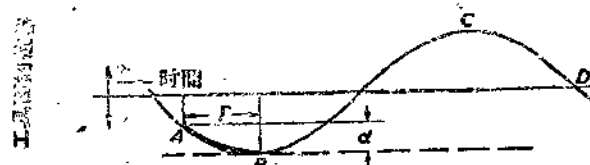


图 2 3.2 切削工具只在每周振动中的一部分产生切削作用。在图中A至B能发生切削作用。在B、C、D段工具在总負荷作用下可以自由移动，不发生切削作用。

§4. 简单的理論分析

这种冲削技术包括很多互相关連的变数，因此在这里只应用简单的动力学原理說明工作頻率、振幅和所加靜負荷之間的关系。

在討論超音加工中使用下列的符号：

号：

- A —— 振幅（波峯到波峯）；
- φ —— 粘滯負荷；
- n —— 工作頻率（周/秒）；
- R —— 发生纵向压力的負荷；
- ω —— 角頻率 $2\pi n$ ；
- S —— 工具面积；
- L —— 加于工具与工件之間的靜負荷；
- P —— 大气压力；
- g —— 磨粒的平均直徑；
- a —— 加速度；
- d —— 穿入深度（吋）；
- r —— 阻抗阻尼；
- λ —— 单周波长；
- M —— 冲削头的总质量。

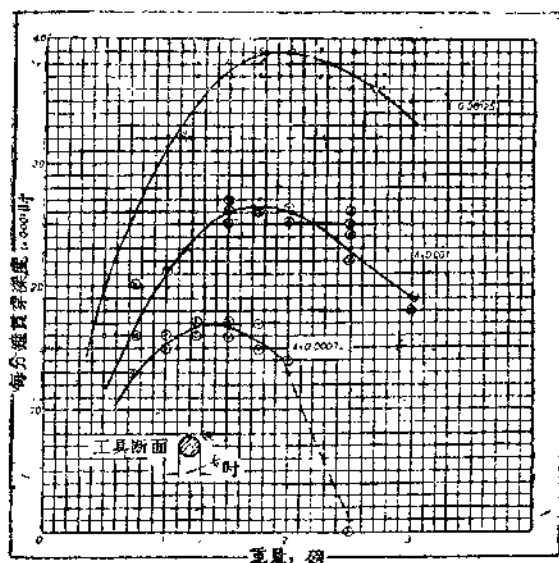


图 3 当頻率为每秒19.5千周在不同的振幅A时，切削率与靜負荷L的关系。这些曲线表明当靜負荷L增加时，切削率上升得很快而下降得較慢

图 2-4.1

首先考虑冲穿工序，已經看到靜負荷L有一个最适当的数值。当靜負荷L从零逐渐增加，切削率跟L差不多直綫关系上升，当上升到最大数值之后，就緩慢地下降，切削率随負荷的变化曲线便漸趋于零。当冲削工具在靜負荷作用下进入工件时，这个負荷受下列各作用力的均衡。

粘滯阻力 φ 是由液体加在工具側面上的，仅在冲削深孔时才显得比較重要。

发生纵向压力的負荷R 是由液体加于工作面上的，正比于工具表面面积，而又为液体

介质特有的阻抗力、工具表面的质点速度及工具表面与工件之间的距离的函数。

工作负荷是在研磨过程中所产生的阻力，等于在短时间工作中传递到磨粒的冲击力的统计总和。

反作用力 R_e 。当外负荷超过最佳值之后，保持工具下面磨料的自由流动就有一定的困难，这是切削速度降低的主要原因。所增加的负荷本身产生了一个对振动的反作用力 R_e ，附加在工作负荷上。

在运动方程中，有五种力：(1) φ ，(2) R ；(3)工作负荷，(4) R_e ，及(5)在周波不工作部分中加速冲削工具的力，这全是对抗 L 及 r 的。当在低负荷切削浅孔时， $\varphi=0$ 及 $R_e=0$ ，(3)及(5)是在振动周波中一部分有效的，可以彼此相等并等于 $L+r$ 。

实际上， L 是用以下两个方法得到的：

①用力臂及平衡重锤来平衡冲削工具头 假使 M 及 m 为支点距离相等的两个质量时，对于小面积的工具来说， SP 和 L 比较是很小的，则 $L=(M-m)g$ 及 $a=(M-m)/(M+m) \cdot g$ 。

②用气压方法平衡 对于小面积的工具来说，如果使用的平衡力等于 F ，则：

$$L=(Mg-F) \text{ 及 } d=L/m_0$$

§5. 工作情况的预测

从上述问题的分析中，我们可能预测到主要参数的变化对于切削速度的影响如下：

(一) 振幅——在频率一定时，振幅 A 的增加使质点速度 ωA 及传递到工件的冲击力成比例地增加。同时，相应的更大尺寸的磨粒，会被使用到研磨过程中去。所以工作负荷的增加就会比与 A 成比例地使速度增加更快一些。但是没有考虑到由于磨料循环困难所引起的复杂情况，所以外加负荷 L 的数值需小于或接近于最佳负荷值。外加负荷 L 的最佳数值，就随 A 的增加而增加，增加速度大约与振幅 A 成正比。

(二) 工作频率——当没有复杂影响、振幅不变时，工作负荷随工作频率的平方而增加，因为冲击力与每秒钟冲击的次数都是与频率成比例增加的。最佳负荷值亦随频率的增加而增加。

(三) 外加负荷——当 L 值较小时，切削率主要依靠 ω 、 L 及 A ，同时与 L 、 A 直接成正比。加于工具上的负荷限制了工具下面磨料的流动，这个影响随 L 的增加而增长。当 L 值高于最佳值之后，同时切削率很快地下降，这时的影响是很显著的，虽然振动有一个缓慢增加的阻尼作用，也对减低切削效率发生影响。对运动方程的影响就是增加了一个反作用力 R_e ，而且它增加的速度比 L 大。

(四) 磨粒尺寸——减小磨粒的尺寸会引起切削速度的减低。当磨粒尺寸与振幅相比很小时，这一点特别显著。为了最适当的工作使用较细的磨料时，需要减低静负荷 L 的值。增加磨粒尺寸会增加切削速度，但只有当工具断面尺寸在每个方向与磨粒比较都是较大才行。用粗磨粒时，最好使振幅 A 有较大的值。

以上的叙述只适用于冲削加工。当研磨孔及扩孔时，情况更为简单。冲削工具负荷的直接的及交变的分力，只被粘滞阻力及工作负荷所平衡。

第三章 超音波冲削的切削速度

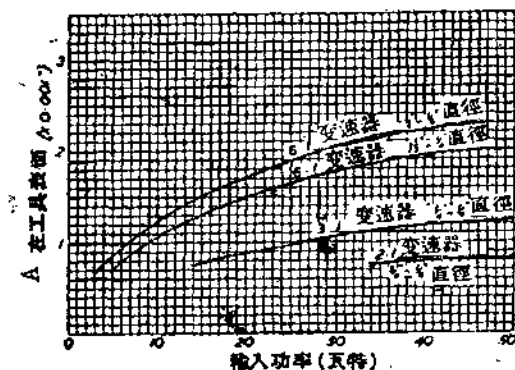
在理想条件下，超音波冲削的切削速度应该是很高的。但在实用中，由于很多原因而降低。切削速度由很多参数来决定，这些参数之间的相互关系极为复杂。现在就实际测定的结果来初步探讨这些主要影响的因素。

表3-0.1是一些主要的相互有关系的影响切削速度的参数以及它们的主要组别。

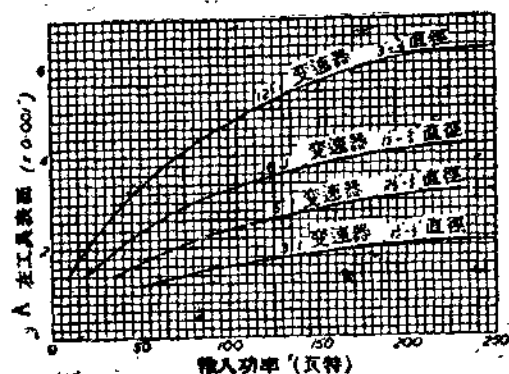
影响切削速度的诸因素	
1. 工作频率 (n)	—
2. 工具质点的运动 (振幅) (A)	
3. 直接的静电荷 (L)	
4. 工具的材料	—
5. 工具的形状	
6. 工具的面积	
7. 切削深度 (d)	—
8. 工件材料的性能	
9. 磨料的硬度与物理性能	
10. 磨料的颗粒尺寸 (g)	—
11. 悬浮介质的性能	
12. 悬浮液的浓度	

表中括号表示相互间有影响的因素及其主要组别，在某种程度上全部因素都互相影响着。所选出的几组系对切削速度，工具设计，精研度及光洁度等有较大的影响。

定标曲线如图3-0.1及图3-0.2中所示。



(图 3-0.1) 50瓦特钻孔设备所选用的变速箱的定标曲线。



(图 3-0.2) 250瓦特钻孔设备所选用的变速箱的定标曲线