

SIV

71.213
SWX

声学译丛之三

超声加工及处理

上海市物理学会声学工作委员会 主編

上海市科学技术編譯館

声 学 译 丛 之 三

超声加工及处理

上海市物理学会声学工作委员会 主編

*

上海市科学技术編譯館出版

(上海南昌路59号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

*

开本850×1168 1/16 印張4 11/16 字数200,000

1962年9月第1版 1962年9月 次印刷

印数 1-2,500

书 号 : 5006 • 48

定 价 : 0.90 元

目 录

1. 超声切削方法的目前情况及今后发展任务	1
2. 应用超声法加工耐熔金属陶瓷材料的某些问题	7
3. 振动切削的效果	10
4. 超声焊接设备	16
5. 声及超声能应用于工业过程的物理与经济条件	23
6. 超声波能量对液-液萃取传递速率的影响	27
7. 超声波在化学工艺过程中的应用	30
8. 在熔融金属中引入弹性振动的方法与特点	41
9. 论超声清洗作用的机理	45
10. 工业应用的间隔叠片式换能器	48
11. 高能超声波	56
12. 超声波除尘	63
13. 利用超声作用以清除钢的锈皮	68

1. 超声切削方法的目前情况及今后发展任务

Л. Д. Розенберг, Д. Ф. Яхиллович

Применение ультразвуковых колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов, стр. 5~21, (1960) [俄文]

自从第一次发表有关超声加工材料的方法报导以来, 超声加工经过不断发展已成为一个硬脆性材料切削工艺的独立部门; 这是因为超声具有比较容易加工硬脆性材料和各种形状的孔眼的特性, 并能得到高的加工精度和表面光洁度而不会使被加工材料的结构受到影响。

超声加工是利用高频振动的工具头进行切削的, 工具头的振幅不大, 一般在 0.1 毫米以下。加工时在切削区域中加入液体和磨料混合的悬浮液 1, 并在工具头振动方向加入一个不大的压力(图 1)。

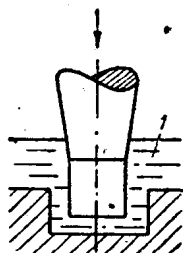


图 1 超声切削图

超声加工只适合加工这样的硬脆性材料, 这些材料不会溶解在悬浮液中或和悬浮液进行化学反应。材料被加工成和工具头横截面形状相同的孔眼, 在加工过程中, 工具头同样会被磨损, 因而加工出来的孔眼亦稍有减小。超声加工法是一个复杂的、研究得还远远不够的方法, 有关这方面的资料都是从实践方法得来的。材料首先受到磨粒敲打而碎裂下来, 至于传递给加速磨粒的力的性质, 到目前为止还没有相同的看法。这些力的来源可能是工具头端部的机械打击、空化引起的冲击波或者是超声场力。想来材料的剥落(съем)基本上是由于工具头端部的磨料直接打进材料去的结果。计算出来的各个参量和切削速度的关系为实验结果所证实[1], 但是实验材料有较大的不确定性, 这是由于在加工过程中磨料浓度的影响较大, 而我们又不能精确地决定切削区域内磨料浓度的缘故。图 2~5 表示这些切削速度和某些参量的相互关系。

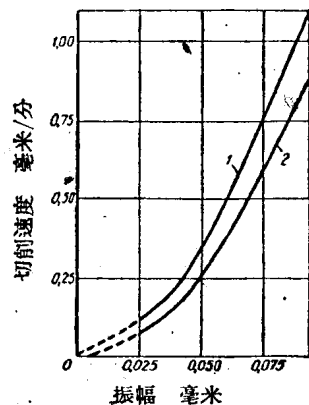


图 2 切削速度与工具头振动频率和振幅的关系
1—频率 25 千赫 2—频率 15 千赫

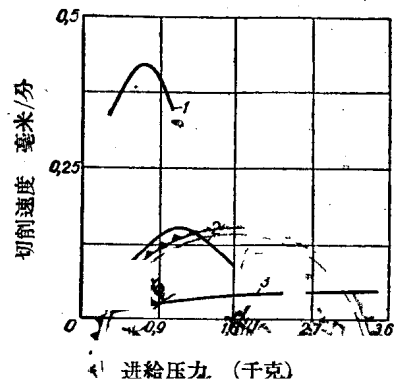


图 3 不同直径工具头的进给压力和切削速度的关系
1— $\varnothing 6.4$ 毫米, 2— $\varnothing 12.7$ 毫米
3— $\varnothing 38$ 毫米

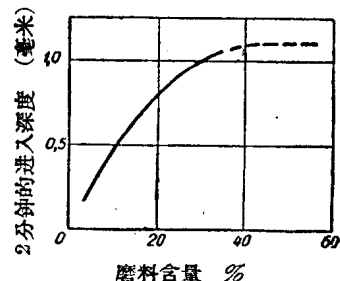


图 4 切削速度和悬浮液中磨料浓度的关系

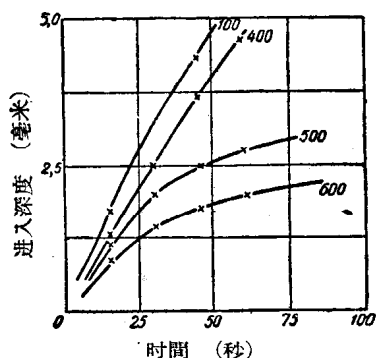


图5 切削速度和磨粒大小的关系

在切削过程中同时发生激烈的空化，空化产生腐蚀，如果没有磨料，材料的剥落是不大的，然而在人工抑制空化的情况下，切削速度会大大降低。

毫无疑问，空化会增加磨料悬浮液的循环（在液体中出现声风），从而有助于磨料进入加工区域中和加速切削过程，但是从另一方面来看，在工具头侧面局部地方形成一定方向的悬浮液的循环，会引起工具头和制品沟槽的出现，使表面光洁度恶化。因此，切削的进行应该尽可能快，以减少空化所引起的腐蚀[2]。

设备

超声机床由下列几个基本部分组成：声学头子、支架、工作台、磨料悬浮液供给系统和机座。

在头子的振动系统中包括有：作为电机换能器用的振子和变化截面的棒状聚焦器，聚焦器把振动传至工具头上，它具有振幅放大作用。图6表示各种不同结构形式的换能器以及各种支撑头子的方法的振动系统。

磁致伸缩换能器差不多都是采用镍、铁钴钼、铁铝合金和铁钴合金（65% Co）所构成，镍的采用较多，这是由于缺乏其它合金和这些合金热加工的复杂性和机械加工的敏感性（铁铝合金）的缘故。

在小功率的头子中，采用体积不大、具有断开励磁系统的换能器（图6，б）和具有铁轭的换能器（图6，e），而在功率较大的头子中（0.3~0.5千瓦以上）则采用双杆式换能器（图6，z）。

均匀棒状换能器的长度可按下式计算：

$$l = \frac{c}{2f}, \quad (1)$$

式中 c 为制造换能器用材料的声速（表1）（厘米/秒）， f 为工作频率（赫）。

双杆式换能器的长度可按近似公式计算：

$$h = \theta \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0.56c}{f\theta} \right)^2} - 1 \right], \quad (2)$$

式中

$$\theta = \frac{3}{4} \frac{2bdm\rho \times G}{am\rho} \quad (3)$$

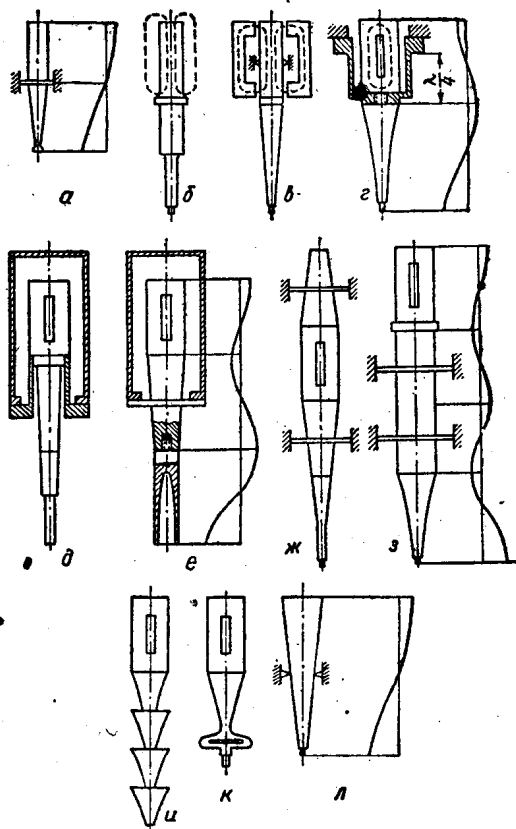


图6 振动系统图

a—半波长系统；б—具有断开磁流线的两个半波长系统；e—有铁轭的两个半波长系统；z—具有 $\frac{1}{4}$ 波长支撑套筒的二个半波长系统；u, e—具有支撑法兰盘的二个半波长系统；k, n—四个半波长系统；u, k—具有复杂形式聚焦器的振动系统；n—具有可变截面换能器的振动系统。

表1 磁致伸缩材料的常数

材 料	牌 号	声速 $c \times 10^5$ 厘米/秒
铁 铝 合 金	Ю 14	5.04
镍	H-1	4.81
铁 钴 钼 合 金	K 50 Φ 2	5.13
铁 钴 钼 合 金	K 65	4.92

这里 ρ 为换能器材料的密度（克/厘米³）， G 为法兰盘的重量（克），其余符号可参阅图7。

振动系统的总长应该为弹性振动半波长的倍数，图6a为应用在细小头子上的半波长系统。

在两个半波长系统中，不大的法兰盘叠片焊接

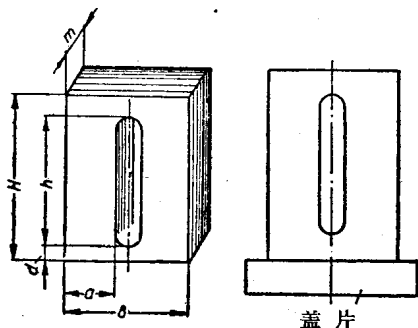


图7 双杆式换能器

在换能器的端部上,每个聚焦器可以撑紧在法兰盘上(图6,б)。在三个半波长系统中(图6д和e),半波长传递棒焊接在振子上,各种不同的聚焦器可撑紧在棒上。

四个半波长系统及其它形式的系统在图6ж、з、и、к、л中表出。

在振动系统中采用直径按各种规律[3]变化的聚焦器,例如按指数形、双曲线形、悬链形和双直线形。在大振幅下加工小孔时,使用指数形聚焦器的效果很好(切割硬质合金)。利用曲线图大大简化指数形聚焦器的实际计算(图8~9)。双直线型聚焦器的计算和制造都是十分简单的,在振幅不大的情况下,它可以有效地用来加工玻璃、陶瓷等材料,而不用耽心阶梯联结点的折断。

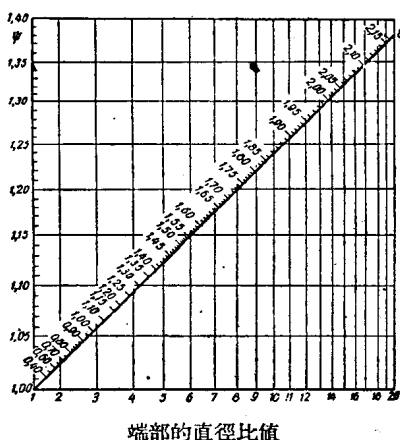


图8 决定半波长指数聚焦器长度的曲线图;对于常用的端部直径比率 $K = \frac{D_0}{d}$ 和长度的关系按 $l = \psi l_0$ 计算,式中 $l = \frac{c}{2f}$, 其中 c 为棒中之声速(厘米/秒); f 为振动频率(赫)

悬链式聚焦器的性能介于双直线形和指数形之间。悬链式聚焦器可用 60C2、65Г、40X 钢制造,而在功率较大的机床中则采用 40 和 50 号钢制造。

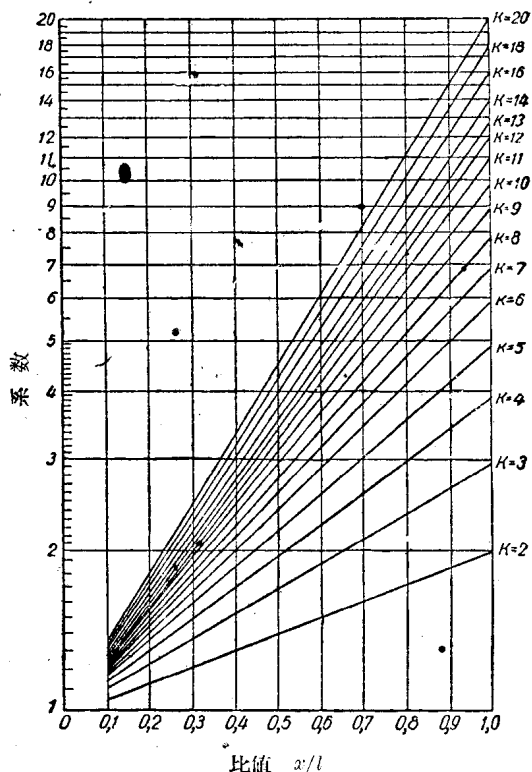


图9 决定半波长指数聚焦器横截面的直径的图解;从聚焦器宽的一端至距离为 x 的横截面的直径按公式 $d_x = \frac{D_0}{\nu}$ 计算,其中 D_0 为聚焦器输入端的直径 ν 为无因次系数,对于常用的 $K = \frac{D_0}{d}$ 和不同的 $\frac{x}{l}$ 值所对应的 ν 值可由图中求得。

聚焦器牢固地连接在换能器的法兰盘上,而工具头则用螺丝撑接在聚焦器上。工具头的紧固可以使用锥形连接或焊接,工具头和聚焦器亦可以由一个整体构成。

难于进行超声切削的地方,可以用钢丝把换能器的振动传到工具头上。

几乎所有的超声钻床都用拖板实行声头的垂直进刀,对于拖板的导轨要求它有高的精度和小的摩擦力,一般采用滚动导轨。进刀是在重力、弹簧、气动、液动等方法的作用下进行的。最近采用小功率控制的电动机,获得很大的方便和控制灵敏度。

图10表示这种调节装置的简图。声头10通过弹簧9支靠在螺母8上,当工具头没有接触到零件上时,电动机6通过一对蜗杆4、5转动螺杆7,那么,螺母8和头子10一起下降。进给压力的数值由断开接触点1和2与支撑3的位置来决定,接触点1、2接在电动机6的线路中。

当材料从零件上加工下来时,声头下降,支撑3

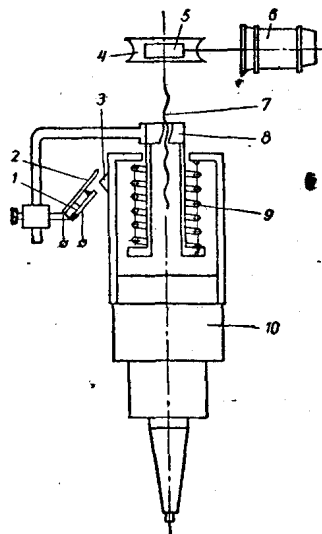


图 10 进刀压力自动调节器图

接通接触点 1、2 马达转动维持进给压力的数值不变。

在苏联及国外制造了许多各种型号的超声机床,其中功率最大的达到 4 千瓦,切割玻璃速度达到

3,000 毫米³/分(用 120* 碳化硼),切削硬质合金 BK-20 时切削速度为 30~35 毫米³/分,这是世界上最大的超声波钻床。

加工速度和很多参数有关,基本上与工具头的振幅、频率、磨料的硬度及大小、液体中磨料的含量、溶液的粘滞度,进刀压力、工具头的形式、加工表面的大小、切割深度、零件的材料等有关。

在其它条件相同的情况下,剥落的速度和被加工材料的机械性能有关,大致上与振幅的平方成正比,亦即与功率成正比。

在某一确定的进给压力下,切削速度达到最大的数值,而这个进给压力和加工表面的形状有关。进给压力一般在 0.1~4.5 公斤范围内(当加工陶瓷,铁氧体时压力小于 0.1 公斤,加工玻璃时为 0.5 公斤,硬质合金为 1.5 公斤)。

切削速度和剥落同样有赖于磨粒的大小。当使用较粗大磨粒时,材料的取下量增加。为了工作时声音较小以及头子结构的紧凑性,振动频率选择在 18~25 千赫范围内。

表 2

制造者或商店	型 号	功 率	加工孔径	频 率	附 注
«Маллард»(英国)	E 7680	0.05 千瓦	0.15-12.5 毫米	20 千赫	重力进刀
	E 7690	0.25 千瓦	0.15-51 毫米	17 千赫	气动进刀
«Маллард и Керри»(英国)	—	2 千瓦	达 76 毫米	—	垂直铣床式
«Лефелдт»(法国)	Днатрон	0.5~0.7 千瓦	25 毫米	22~25 千赫	重力或弹簧进刀
	TM-400(II 型)				
«Кевитрон»(美国)	—	0.2	—	27~29 千赫	牙 钻
Шеффилд Кевитрон(美国)		0.6, 1.0	—	18~30 千赫	重力进刀
		和 2.4 千瓦	0.15-90 毫米	18~30 千赫	
美国 Рейтнен	500	—	—	27 千赫	
	2-332	0.7	—	25 千赫	
	2-334	0.1	0.5-25	25 千赫	
捷克 Институт Механизации и автоматизаций	VU-3	—	—	—	
	VU-15	—	—	—	
	U ₂ VI-20	2	—	—	

表 3 苏联制造的超声钻床特性

机 床	制 造 者	功率千瓦	频率千赫	加工孔径毫米	附 注
4770 工业通用机床	ОКБМосгорлов-нархоза	0.25	18~19	0.5~10	具有自动进刀调节器
4772 工业通用机床	ЭНИМС Москва	1.5	20~22	80 以下	具有螺旋形进刀头
УЭС-4 通用机床	НИТИ	2~3	18~22	—	一定周期退刀
УЭС-3м 专用机床	НИТИ	1	18~22	—	工作台移动进刀
1-УПС 实验通用机床	—	1~3 (更换头子)	—	—	一定周期退刀

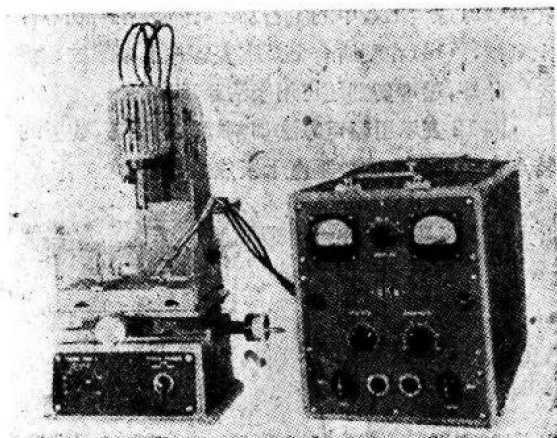


图1 超声钻床

表4列出了一些材料加工的数据[5],加工所采用的钻床具有下列特性功率700瓦、振动频率25千赫。振幅0.076毫米,工具头的材料为冷轧钢,工具直径为12.7毫米,使用深度12.7毫米,磨料为320#的碳化硼。

表5 硬质合金加工精度与光洁度和磨粒大小的关系

粒 度	加工精度(微米)	不平整高度的均方根值(微米)	加工后的光洁度(级)
120~180	±76	—	▽▽6~▽▽7
240~280~320~420	±50	0.456~0.635	▽▽▽8~▽▽▽9
600~800~1000	±13	0.25~0.38	▽▽▽9
1000	±5~7.5	0.2	▽▽▽▽10

在不厚的零件上穿孔时,采用双直线型的工具头:

当加工陶瓷时,最大的加工精度可达0.05毫米,加工硬质合金时可达0.01~0.007毫米。

最大加工孔径由钻床的功率来决定(表6),而最小加工孔径则决定于工具的硬度和进刀装置的灵敏度。目前已制造出来的钻床的加工孔径范围为0.15毫米至90毫米。

表6 钻床功率和最大加工孔径的关系

功率(千瓦)	加工孔径(毫米)	最大加工深度(毫米)
0.05	9 以下	9~12
0.25	25 以下	25
0.5~0.7	50 以下	40~50
1~1.5	75 以下	50~70
2~2.4	90 以下	70~90

为了增大加工孔径,必需增加换能器发射面积,因而带来了许多技术上的困难。

表4 材料加工特性

材 料	生产率(毫米 ³ /分)	工具磨损(%)	最大加工面积(厘米 ²)
玻 璃	320	0.5	20
锗 和 硅	240	0.5	20
铁 氧 体	240	0.5	20
云 母 玻 璃	240	0.5	20
珍 珠 母	240	0.5	20
陶 瓷	190	0.7	14
石 英	140	2	9
人 造 红 宝 石	65	50	7.7
烧 结 碳 化 硼	48	33	7.1
碳化钨硬质合金	29	100	7.7
淬火工具钢	22	100	7.7

加工精度与光洁度首先决定于磨粒的大小(表5),加工精度还与钻床本身的精度和硬度有关。工具头的磨损损害了工具头原来形状的精度,因而加工出来的孔具有锥度。为了得到高的精度,必须更换工具头,在粗加工后应进行精加工。

最大加工深度视切削区域中磨料的供给情况而定,大约等于加工直径的2~5倍。改善磨粒供给条件可以采用周期性撤回工具头或采用任何其它供给磨料到切削区域的方法,这样就会增加切削深度和切削速度。

工具头一般由具有韧性及延展性的材料制成(表7);较常采用的是普通的40#或50#钢材,而在特别需要降低工具头磨损的情况下,才用韧性较好的钢材制成(例如不锈钢)。

表7 各种材料制成的工具头的磨损
(磨料—100# 碳化硼;工具头振幅—0.05毫米)

工具头的材料	工具头相对磨损(%)	
	加工玻璃	加工硬质合金
钢	1.0	88
银 光 钢	0.46	26
不 锈 钢	0.7	35
铜	1.68	140
硬质合金(碳化钨)	0.1	110

为了避免出现有害的横向振动,在制造复杂形状的工具头时,应使它的重心位于主軸上。如果工具头的端部具有壁状及凸出部分,则工具头应尽可能地短和硬,工具头的壁以及凸出部分的厚度至少要大于磨粒直径的四倍,否则工具头的壁会很快地被磨尖而损坏。

工具头的结构应该保证磨料悬浮液进入切削区域中,为此,工具头应刻成空腔和槽状。采用的磨料有碳化硼、碳化硅及金刚砂,最常用和最有前途的是碳化硼,因为它有优良的切削性能、很好的吸水性而且比重不大(2.5克/厘米³),能很好的存在于悬浮液中。碳化硅及金刚砂可用来加工玻璃、锗、某些形状的陶瓷等等。

液体既可用来冲走加工下来的微粒,把磨粒带入切削区域中,又能冷却切削区域。通常采用水作为液体,因为水的粘滞性小、密度大,有良好的湿润性和冷却性。最重要的是液体的粘滞性,粘滞性降低时加工速度就会增加。

磨料在溶液中最合适的浓度为50%(按重量计算),磨料由磨料泵供应(见图4)。

应用范围

超声方法可用来实现以下工序:(1)在硬质合金上制阴模,(2)在硬质合金上制拉丝模,(3)制压模,(4)修理和改正阴模,(5)磨锐工具和切削碎屑器的碎屑槽,(6)制造光学仪器的玻璃零件,(7)制造无线装置和电器装置的陶瓷零件,(8)切割石英,(9)切割半导体材料(锗和硅)和加工半导体零件,(10)加工铁氧体零件,(11)精密工业用宝石的制

孔,(12)珠宝工业中的宝石加工,(13)在钢制零件上刻槽,(14)在硬质合金及陶瓷零件上刻螺纹。

此外,超声切割还可用来治牙疾。

图12表示用超声方法切割螺纹的原理,装置的特点在于工具头的轴垂直于聚焦器的轴。

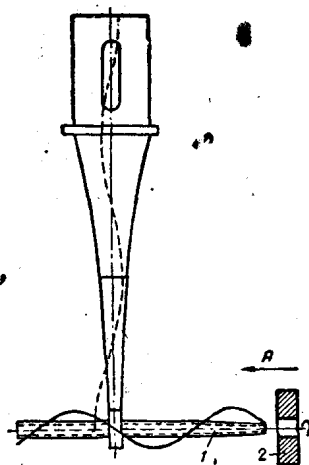


图12 利用超声方法切割螺纹简图

1—工具头; 2—零件; A—进刀方向

在铁氧体上切割深度为12.7毫米, $\frac{1}{4}$ 的螺纹费时16秒;玻璃为75秒,硬质合金为15分[4]。

超声切割方法的今后发展任务

摆在苏联工业部门面前的重要任务是组织生产大批的通用超声钻床。

分析各种资料后,可以拟定苏联工业所需的、各种标准通用超声钻床的工艺性能(表8)。

表 8

类型用途	最大孔径 (毫米)	发生器功率 (千瓦)	工作台尺寸 (毫米)	工具头的长度 (毫米)	进给压力 (千克)	进给机械灵敏度 (克)
在玻璃铁氧体陶瓷及宝石零件上加工小孔及刻槽	5~7	0.05~0.1	100×125	15	0.2	10~20 (更小一些)
1. 加上各种零件切割半导体材料	10~12	0.25~0.3	125×160	25	0.8~1.0	50~70
2. 在陶瓷零件上钻孔及制造较小的拉模	20~22	0.5~0.7	160×220	35	2.0~2.5	100~120
3. 切割石英制模及刻槽(较小的)	40~45	1.0~1.4	200×250	50	3.0~3.5	150~180
4. 在硬合金上制模及刻槽	80~85	2.0~2.5	250×315	70	4.0~5	180~250

在成批生产通用钻床和它的配件的基础上容易确立一些专用的钻床,从而解决一系列重要的工艺问题。

首要的任务是:(1)减少工具头的磨损,(2)提高加工生产率,(3)改进加工方法,使孔钻通时出口端不会产生缺口,(4)研究增加加工深度的方法。

在改进设备方面,应该解决下面的基本问题:

(1) 研究超声头子的结构及制造工艺,要求达到很高的精度和硬度。

(2) 在既定的不大压力下,制造牢固地夹紧工具头用的装置(这种压力不影响进刀机构)。

(3) 改进进刀机构以提高灵敏度,便于控制,实行周期性退刀与及采用计划控制。

(4) 研究在切削区域中磨粒悬浮液的供给方法

(周期性退刀,在工具头内刻槽或制成空腔)。

(5) 提高钻床流动坐标的准确度。

(6) 掌握加工孔径小于0.15毫米及大于90毫米的设备。

各种型号的超声钻床的成批生产不但可以在短时间内提高超声工艺,积累必要的工艺经验,而且还会发现超声加工应用的新领域。

(戚碧云译 郭春樞审校)

参 考 文 献

- [1] M. C. Shaw, Das Schleifen mit Ultraschall Microtechnie, 10, 6, 265, 1956
- [2] E. A. Neppiras, Report on ultrasonic machining, Met. Work. Prod, 100, 27~31, 33, 34, 1956.
- [3] И. Г. Лозинский, Л. Д. Розенберг, Авт. свид № 85193, 1950.
- [4] Developments in ultrasonic machining, Mach. Shop Mag. 18, 12, 746, 1957
- [5] M. S. Hartley, Ultrasonic machining of brittle materials, Electronics, 29, 1, 132, 1956.
- [6] И. В. Метелкин, В. Е. Попов, В. И. Никольский, В. В. Метелкин, А. А. Мукасева, Механическая обработка различных материалов при помощи ультразвука, «Станки и инструменты» № 2, 156, 1956.
- [7] В. Н. Шепетов, Ультразвуковая установка для резания керамических материалов, изд. фил. в. н. и. т. н., 1957. тема 9. № М-57-126/1

2. 应用超声法加工耐熔金属陶瓷材料的某些问题

А. А. Мукасева, В. С. Рановский, Б. Н. Бабин, Ю. В. Левинский

Вестник Машиностроения, № 3, (1961) [俄文]

现代技术的发展,要求制造出具有高度耐热性、高度热稳定性、和高度的抗热冲击及抗腐蚀性的材料。

铸造的耐热合金以及含镍或含铬的碳基合金,其工作温度仅能达1,000°左右^[1]。但是目前这样的数值往往不能满足设计者的要求,需要的是具有更高质量的材料。

在这方面,最有前途的材料是各种以金属的碳化物、氮化物、硼化物和硅化物为基础的合金^{[2], [3]}。

由于这些化合物具有高晶格能量,因而它们有较大的抗蠕变性、高硬度和热稳定性。因此已愈来愈广泛地采用碳化物、氮化物、硼化物和硅化物作为耐热材料。但是这些材料所具有的高硬度和脆度,使普通的切削方法难以加工,甚至无法加工。这阻碍了它们在实际设计上的应用。

将这些材料制成的另件加工时,可用磨料来研磨或切削,或用阳极机械加工及超声加工等。磨削

加工的生产率低;而阳极机械加工会使被加工另件的表面产生微小的裂纹。对于各种以金属的碳化物、氮化物、硼化物和硅化物为基础的合金,超声加工是最有前途的。

对应用超声法加工进行评价时,工具和被加工材料的磨损是基本参数之一^[4]。当工具的磨损较大时,工件表面上被加工形状的正确性就降低了,因而必需增加补充的精磨工序。

工具磨损(u_n)和材料磨损(u_m)之比,称为相对磨损。而相对磨损的例数 $K = \frac{u_m}{u_n}$,即材料的磨损与工具的磨损之比,可以在一定的程度上用比较单位来表示当超声加工时材料的可加工性。

为了确定因数 K ,我们曾采用了用金属的碳化物、氮化物、硼化物和硅化物等制成的样件,同时,为了进行比较,也采用了其它各种材料,如玻璃、石英、工具钢、工业用硬质合金等。

制造样件所用的原材料是各种耐熔化合物的粉末、

这些粉末系由元素合成,或从氧化物还原而得^[3]。

应用化学分析和 X 光分析,可表明所用的粉末具有适当的純度和足够的均匀度。各种化合物粉末的顆粒,其平均尺寸在 1~10 微米之間。

为了进行超声波的可加工性試驗,制造了圆柱形的样件,其直径为 14 毫米,高 10 毫米。这种样件是在实验室用的手板压机上以热压方法制成的。

具有最高密度的样件,其最佳热压规范如表 1。

表 1

热 压 規 范	耐 熔 化 合 物															
	TiC	ZrC	MoC	NbC	B ₄ C	ZrN	MoSi ₂	NbB ₂	ZrB ₂	TiB ₂	CrB ₂	W ₂ B ₅	Mo ₂ B ₅	WB	MoB	W ₂ B
温 度 (°C)	2500	2050	2400	2550	2100	1900	1750	2400	2100	2200	1900	1900	1850	1900	1800	1800
时 間 (分)	3~5	3~5	2~3	2~3	1~2	1~2	2~3	3~5	2~3	3~5	2~3	1~2	1~2	1~2	1~2	3~5
压强(千克/厘米 ²)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

具有孔隙度为 0~25% 的样件,曾被用来研究孔隙度对于超声加工的影响。此类样件系通过縮短其在最高温度中的持續時間,或降低压机的压强而制成的。

在噴砂处理以后,利用流体靜力学的測重方法来确定样件的密度。在超声加工以前,样件的表面被放在碳化硼和煤油的悬浊液中,并用鑄鉄的圆盘来磨光。在进行研究时,采用了 Y3Y-600 型超声設備。

在确定相对磨損和因数 K 时,采用了聚能系数为 1:5 的指数型聚能器。用直径为 5 毫米的軸承滾珠作为加工工具,因它具有較小的磨損因数,滾珠是用 ИОС-40 焊料焊接在聚能器上。所以选用低磨損的軸承鋼作为工具是由于軸承滾珠能在較重的工作条件下工作,如当材料具有相当大的韌性时,即要求工具具有較高的抗磨損和冷作性。和其它材料相比較,軸承滾珠的相对磨損是最小的(表 2)。利用滾珠的球形还可获得最正确的数据,因为被加工表面的不平行性不影响磨損的数值。此外,还可能对凸形和凹形的表面进行加工。

在样件上被加工成深度为 2.5 毫米的小孔(圓穴)。滾珠嵌入材料的深度可用精确度为 0.01 毫米的千分表来測量。加工的小孔数量根据材料的可加工性而定。各孔穴深度之和即加工的总深度。每加工一个新的样件即使用一个新的滾珠。对于滾珠磨損的測量則使用精确度为 0.01 毫米的分厘卡。

样件系經常在最理想的条件下进行加工,即当加工所有的样件时,工具振动的双振幅均为 0.10~0.11 毫米,頻率为 18~20 千赫。在这些条件下,可保証在生产率上获得滿意的效果,同时,在聚能器的

表 2

材 料	相对 密度 (%)	加 工 規 范		磨 損(毫米)		系数 K
		振 动 頻 率 (千赫)	切 入 深 度 (毫米)	工 具	材 料	
石 英	—	20.4	85.0	0.14	84.86	600
普 通 玻 璃	—	20.4	97.5	0.4	97.1	240
Y8 鋼	—	20.2	2.5	1.08	1.42	1.3
XBT 鋼	—	20.2	2.5	1.2	1.30	1.1
BK6 合金	—	20.4	2.5	0.89	1.61	1.8
BK8 合金	—	20.4	2.5	0.93	1.57	1.7
BK15 合金	—	20.4	2.5	0.83	1.67	2.0
T5K10 合金	—	19.5	2.5	0.75	1.75	2.3
T30K4 合金	—	19.5	2.5	0.45	2.05	4.5
NbC	81	18.0	12.5	0.14	12.36	90
ZrC	92	18.0	7.5	0.24	7.26	30
ZrC	72	18.0	7.5	0.11	7.39	67
MoC	89	18.0	2.1	0.06	2.04	34
TiC	87	18.0	2.5	0.21	2.29	11
TiC	96	18.0	5.0	0.4	4.6	11
B ₄ C	98	18.0	1.0	0.20	0.8	4
ZrN	97	18.0	8.0	0.3	7.7	26
ZrN	81	18.0	6.0	0.06	5.94	100
Si ₃ N ₄	70	18.0	12.5	0.11	12.39	110
NbB ₂	96	18.0	10.0	0.32	9.68	30
ZrB ₂	85	18.0	12.3	0.32	11.98	37
ZrB ₂	92	18.0	5.0	0.21	4.79	23
TiB ₂	91	18.0	12.5	0.52	11.98	23
CrB ₂	98	18.0	10.0	0.22	9.78	45
W ₂ B ₅	91	18.0	5.0	0.13	4.87	38
Mo ₂ B ₅	92	18.0	5.0	0.32	4.68	15
MoB	75	18.0	5.0	0.04	4.96	124
WB	93	18.5	5.0	0.52	4.48	8.6
W ₂ B	74	18.0	12.5	0.41	12.09	31
BC-1 合金	88	18.0	12.5	0.44	12.06	28
BC-1 合金	82	18.0	12.5	0.36	12.44	34

頸部不致产生疲劳断裂。

磨料在液体中的体积浓度采用 40~60%；这样的浓度是最佳的。

磨料采用颗粒度为 №150 的碳化硼。工具上的静荷载为 400 克，在滚珠切入最大深度时，相当于 2×10^{-2} 千克/毫米² 的最佳压强。这样的压强保证了工具和被加工样件间的良好耦合，但不致使振幅减小，也不致使样件有破裂和损坏的危险。

对样件加工的结果列于表 2。表中也列出对某些脆性材料、钢和硬质合金加工的结果作为对比。

根据所得到的数据，曾企图把材料的可加工性与它的硬度、脆性、强度和孔隙度等联系起来。硬度和脆性与材料的塑性变形能力有关。可以设想，在超声加工时，随着材料硬度的增加，超声振动的较少一部分能量将被消耗在塑性变形上，而大部分能量则用于材料的剥离上。

强度也与材料微粒的剥离过程有关。随着金属陶瓷体内的孔隙度的增加，微粒之间的接触面积减小了，因而必然会影响到其可加工性。

在表 3 中列出了一些具有不同硬度和脆性的材料的可加工性，在试验时采用了密度最大的样件，其孔隙度不超过 5~10%。有关这些化合物的硬度和脆性的数据是取自文献^[5]。

将此表中的数据进行对比以后，可以确定因数 K 和材料的显微硬度之间是毫无关系的。

表 3

材 料	系数 K	显微硬度 (千克/毫米 ²)	脆 度 指 数	
			α_{90}	$\gamma \cdot 10$
TiC	11	2600	20.0	35.0
ZrC	30	2400	32.5	32.5
ZrN	26	1930	—	—
W ₂ B ₅	38	2500	21.0	26.2
Mo ₂ B ₅	15	2950	13.0	9.7
NbB ₂	30	2900	8.0	5.2
CrB ₂	45	2150	2.0	1.0
ZrB ₂	23	1500	3.0	0.75
TiF ₂	23	3400	13.5	13.5
MoSi ₂	40	950	8.0	4.0

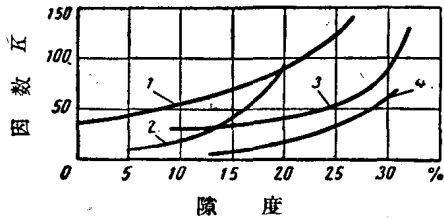
在这些材料的加工过程中，曾发现同样材料但具有不同密度的样件，其 K 值各不相同。为了确定因数 K 和密度之间的关系，我们曾对下列几种化合物的样件作过研究：W₂B；MoSi₂；ZrC 和众所周知的耐热合金 BC-1，它们的相对密度为 70~100%。所得的数据如表 4。

表 4.

相对密度 (%)	切入深度 (毫米)	磨 损 (毫米)		系数 K
		工 具	材 料	
硼 化 钨 (W_2B)				
70	12.5	0.22	12.28	56
74	12.5	0.41	12.09	31
75	12.5	0.46	12.04	27
75	12.5	0.37	12.13	33
78	12.5	0.56	11.94	21
78.5	12.5	0.6	11.9	20
83	12.5	0.83	11.67	14
83	12.5	0.81	11.69	14.5
84	12.5	0.94	11.56	12
86	12.5	0.86	11.64	13.5
硅 化 钼 ($MoSi_2$)				
74.5	12.5	0.10	12.4	124
77	12.5	0.11	12.39	112
82	12.5	0.17	12.33	72
90	15.0	0.22	14.78	67
90.5	10.0	0.20	9.8	49
95	12.5	0.25	12.25	49
98.5	12.5	0.28	12.22	43
99	12.5	0.30	12.2	40
100	12.5	0.34	12.16	36
碳 化 锆 (ZrC)				
69	7.5	0.07	7.48	105
72	7.5	0.11	7.39	67
72	7.5	0.12	7.38	61
75	7.5	0.15	7.35	50
79	7.5	0.16	7.34	46
79	7.5	0.15	7.3	49
85	7.5	0.19	7.31	39
86	7.5	0.21	7.29	35
86	7.5	0.22	7.28	33
88	7.5	0.22	7.28	33
88	7.5	0.24	7.26	30
88	7.5	0.24	7.26	30
90	7.5	0.26	7.24	28
BC-1 合金				
81.5	8.0	0.11	7.89	72
82	8.0	0.23	7.77	34
82.5	8.0	0.12	7.88	65
83	8.0	0.13	7.87	60
85	10.0	0.21	9.79	46
87	8.0	0.25	7.75	31
89.5	10.0	0.42	9.53	23
92	10.0	0.70	9.30	13
94	12.5	1.27	11.23	9

根据表 4 所列数据，可绘出因数 K 与材料孔隙

度的关系曲线(見附图)。



超声波加工时因数 K 与材料孔隙度的关系:

1— McSi_2 ; 2—BC-1 合金; 3— ZrC ; 4— W_2B

这些曲线可以表明: 随着材料孔隙度的增加, 显著地改善了用超声波加工法时这些材料的可加工性。

当用超声加工时, 材料的断裂可假设有两种情况: 其一——颗粒本身的断裂, 其二——沿颗粒的边缘断裂。

假如第一种假设是正确的, 则随着孔隙度的增

加, 可加工性应作线性的变化。在这种情况下, 可加工性决定于颗粒本身的物理性能, 如它的显微硬度、显微脆性等等。

假如采取第二种假设——即物体是沿颗粒的边缘而断裂的, 则应用超声时, 其可加工性和孔隙度之间将存在着幂次的关系。上述假设同样可以说明材料强度随其孔隙度而变化的类似特性^[6]。

根据得到的数据可作出结论: 沿颗粒边缘的断裂对于材料的破坏起着主要的作用。

根据研究结果必需指出: 当应用超声方法时, 金属陶瓷耐熔材料的可加工性比工业上广泛应用的硬质合金的可加工性要大 5~10 倍; 当材料的孔隙度增加时, 应用超声的可加工性有显著的改善; 当用超声加工时, 金属陶瓷耐熔材料的破坏主要是沿着颗粒的边缘而发生的。

(陈兆治译 曾克京审校)

参 考 文 献

- [1] Киффер Р., Шварцкопф П., твердые сплавы, Металлургиздат, 1957.
- [2] Портной К. И., Самсонов Г. В., Боридные сплавы, ВИНТИ, 1960.
- [3] Самсонов Г. В., Уманский Я. С., Твердые соединения тугоплавких металлов, Металлургиздат, 1957.
- [4] Метелкин И. В., Попов В. Е., Никольский В. И., Метелкин В. В., Мукасеєв А. А., Механическая обработка различных материалов с помощью ультразвуковых колебаний, "Станки и инструмент" № 2, 1956.
- [5] Самсонов Г. В., Нешпор В. С., Хренова Л. М., Твердость и хрупкость металлоподобных соединений, "Физика металлов и металловедение" № 4, 1959.
- [6] Glaser F. W., Iwanick W., Sintered Titanium Carbide, "Journal of Metals", T. 4, №4, 1952.

3. 振动切削的效果

隈部淳一郎

机械技术, 1月号: 12~18 页(1961)[日文]

图1所示, 是使旋转切削速度为 V 的工作物, 在与切削方向相同的方向上, 作振动数为 f 、振幅为 a 的强迫振动, 进行切削。今试说明这种振动切削的效果如下。

使刀具或工作物振动而进行切削的振动切削, 其切削方法和切削机构与一般仅以刀具压在平动或转动的工作物上而进行的切削完全不同。兹列举其理想的切削效果如下。

1) 作用于工作物或工作机械上的切削阻力

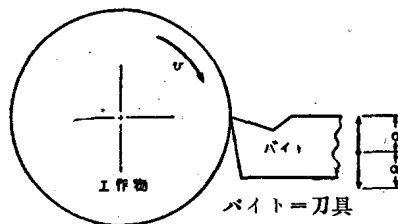


图1 工具的振动频率 f , 振幅 a 的强迫振动在切削方向相同的方向中进行振动切削

激減。

- 2) 刀具上完全不粘有切屑瘤。
- 3) 具有理想的表面光潔度。
- 4) 切削後端面无毛刺。
- 5) 切削表面具有与研磨表面同样的耐 磨 性 和耐蝕性。

这种切削法对任何刀具都能适用，因此将在結構上带来革命的变化。无疑，今后将陸續出現嶄新的工作机械，显示出前所未見的理想的切削性，并进一步提高生产力。

茲就适用于車床的振动切削的效果，用实例具体說明如下。

振动切削条件

为了提高振动切削的效果，振动頻率、振幅及切削速度之間必須具有这样的关系，就是說，設

V : 切削速度

f : 振动頻率

a : 振幅

則

$$V < 2\pi af \quad (1)$$

因此，相等于 $2\pi af$ 的切削速度名为临界速度 V_c 。

沒有式(1)所示的切削条件，就沒有振动切削的效果。切削速度 V 越接近于 V_c ，即越类似一般切削，在 $V > V_c$ 时，即和一般切削完全相同。

茲以表面光潔度与其切削条件之間的关系来说明这种现象。

关于理論的表面光潔度 H_{th} ，可根据切削条件并用几何学方法来求得下列关系。設切削刀具有圓鋒刀具；刀鋒半徑为 $t < r$ ，則

$$H_{th} = \frac{S^2}{8f} \quad (2)$$

t : 切削深度, s : 进給量

在 $t > r$ ，如第2图所示的情况下，

$$S_1 = \frac{a + H_{th}}{\tan k_2}, \quad S_2 = \frac{b + H_{th}}{\tan k_1}$$

但

$$S_1 + S_2 = S$$

所以理論的表面光潔度 H_{th} 如下

$$H_{th} = \frac{S}{\cot k_1 + \cot k_2} \left(\frac{a \tan k_1 + b \tan k_2}{\tan k_1 + \tan k_2} \right)$$

但

$$b = \frac{r(1 - \cos k_1)}{\cos k_2}$$

$$a = \frac{r(1 - \cos k_2)}{\cos k_1}$$

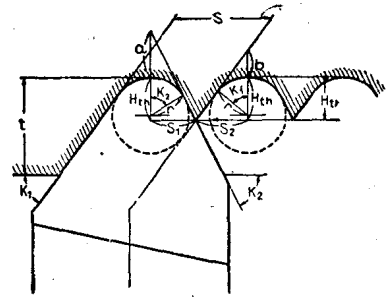


图2 理論的表面光潔度

因而

$$H_{th} = \frac{S}{\cot k_1 + \cot k_2}$$

$$- \left\{ \frac{r(1 - \cos k_2)}{\cos k_1} \cdot \frac{\sin k_1}{\cos k_1} + \frac{r(1 - \cos k_1)}{\cos k_2} \cdot \frac{\sin k_2}{\cos k_2} \right\} \frac{1}{\tan k_1 + \tan k_2}$$

$$= \frac{S}{\cot k_1 + \cot k_2} - r \left\{ \frac{\sin k_1 - \sin k_2}{\sin(k_1 + k_2)} - 1 \right\} \quad (3)$$

在直鋒刀具的情况下，可使式(3)中 $r=0$ 以求得 H_{th} 的数值，这样就得到大家所知道的式(4)。

$$H_{th} = \frac{S}{\cot k_1 + \cot k_2} \quad (4)$$

振动切削的装置已于不久前发表过了，茲再簡單說明如下。

只須滿足上述式(1)的条件，則刀具的振动頻率 f (例如用电磁振动器等来发生的) 为 50 周/秒、60 周/秒、100 周/秒或 120 周/秒的低頻率就行了。但使用这种电磁振动器的装置，由于其有效的切削速度极低；并不适于旋削。

刀具振动頻率到了百周以上，比較簡單的装置，也有用几百周波的电动-发电机作为超声波振动的。有的却用振动頻率在 10,000 周波以上的所謂磁致伸縮的振动。

但是这种装置是在作为振动源的振动子上直接安装切削工具的，所以振幅不够大，非設法扩大振幅不可。所幸根据振动基础式从事設計、研究的結果，已經发现了一种直線形的所謂指数函数型的喇叭，形的适当形状的振幅扩大器。

称此为适当的振幅扩大器，是因把它装在車床拖板上后，不但外形相称，而且与刀具的超声波振动不发生关系，用任何形状的夹紧装置来加以固定，也能使振动节存在于适当的間隙中。

振动切削的振动频率，如果是超声波领域内的极高的频率，则在切削条件上，或在车床构造上，都是比较合理的。

图3所示是最基本的超声波振动切削用的刀架。水箱(2)中有镍制纵振动的磁致伸缩振动子，其一端与喇叭形振幅扩大器连接。刀具则装在喇叭形振幅扩大器上。又依靠磁致伸缩振动子和喇叭形振幅扩大器的振动节固定在兼作磁致伸缩振动子的冷却水箱的夹具上。这一夹具，再以加强系固用的夹具把它安装在设于拖板上的支柱上，并且安装得使刀具的振动方向与切削方向相同。

这是最基本的切削装置。此外还有其他各种刀架，容后有机会时再作介绍。

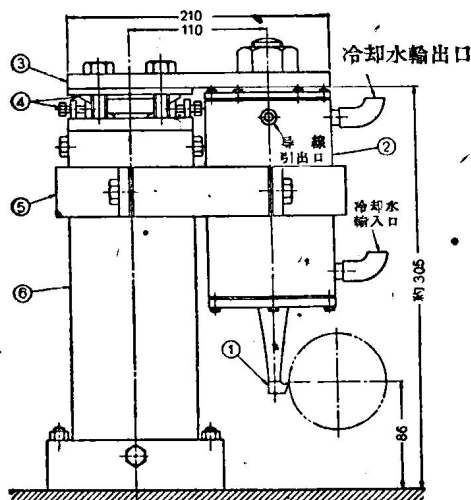


图3 基本的超声波振动切削装置

1) 刀具 2) 水箱 3) 4) 调心装置

5) 加强的夹紧装置 6) 支柱

以这种装置来使用图4所示的刀具，在下列切削条件下进行工作，则所获得的表面光洁度与切削速度之间的关系当如下述。

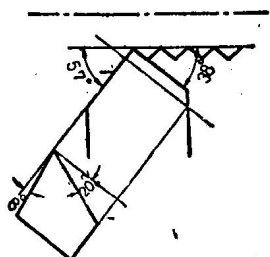


图4 使用工具的形状

切削条件：

振动频率 f 20,000 周/秒

振幅 a 12 微米
进给量 s 0.063 毫米/转
切削深度 t 1 毫米
工作物 铝

此外，设式(1)中 f 的单位为千周/秒， a 的单位为微米，则

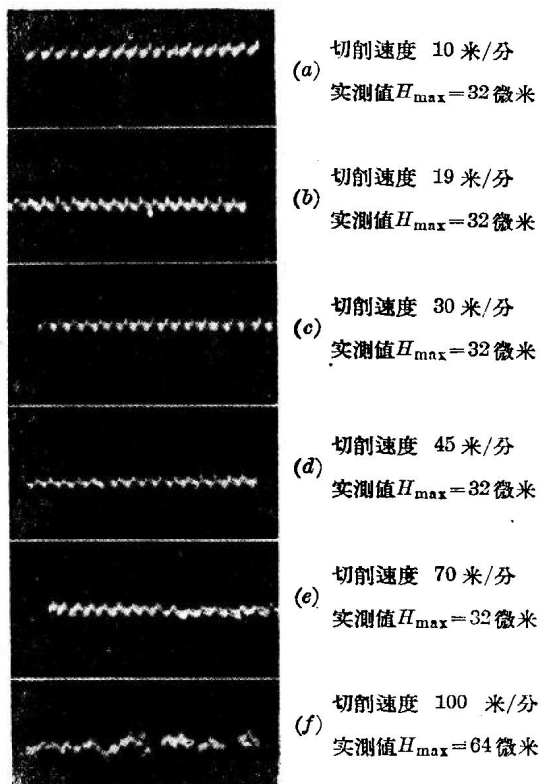
$$V_c = 0.376af \text{ 米/毫米}$$

因此，与一般切削现象相同的临界切削速度 V_c 。在上述切削条件下，应为 90 米/分钟。这样，用式(4)所计算的理论的表面光洁度 H_{th} ，因为 $k_1 = 57^\circ$ ， $k_2 = 38^\circ$ ，所以它是 38.8 微米。

照相1(a)，(b)，(c)，(d)，(e)，(f)所示为各种切削速度下的表面光洁度，都是用休麦尔氏表面检查仪所实测的。其所以用这种检查仪，是因为，正如大家所知，“日本光学”公司所制以及小坂式的触针方式的检查仪等会因触针尖端形状的影响，不能正确测出直锋刀具所产生的锯齿状波形的表面光洁度之故。

兹说明照相1如下。

照相(a)，(b)，(c)表示，在 $V = 10$ 米/分钟，10 米/分钟，30 米/分钟的条件， $H_{max} = 32$ 微米，并能清楚地显示出锯齿状理论的加工面。



照相1 切削速度与表面精度的关系

照相(d)表示, $V=45$ 米/分钟时, 就逐渐显出圆周方向的加工面, 但其 $H_{\max}$ 依然接近理论值 32 微米。

但在 $v=70$ 米/分钟时, 则表面带圆形, 也就是说, 刀锋逐渐附着切屑瘤, 则表面变粗, 如照相(e)所示。这样, 当从临界切削速度 V_c 增加到 $V=100$ 米/分钟的高速时, 就会 $H_{\max}=64$ 微米, 出现与一般切削大致类似的表面光洁度。从这个例可以看出, 振动切削的速度如不在刀具的振动频率和振幅所决定的限度以内, 则不可能获得应有的效果。也就是说, 在盲目随便的切削条件下, 刀具每振动一周所切削下的切屑不能与刀具的前面相离, 这样就失去了游离切削所特有的切削机构*而与仅将刀具压在工作物上的一般切削方法相同, 使得切屑与刀具前切削面经常互相接触, 这一点是必须注意的。

形成理论的表面光洁度

关于 $V < V_c$ 时表面光洁度如何形成理论的光洁度, 兹列举下述切削条件下的实验结果, 以资说明。

切削条件:

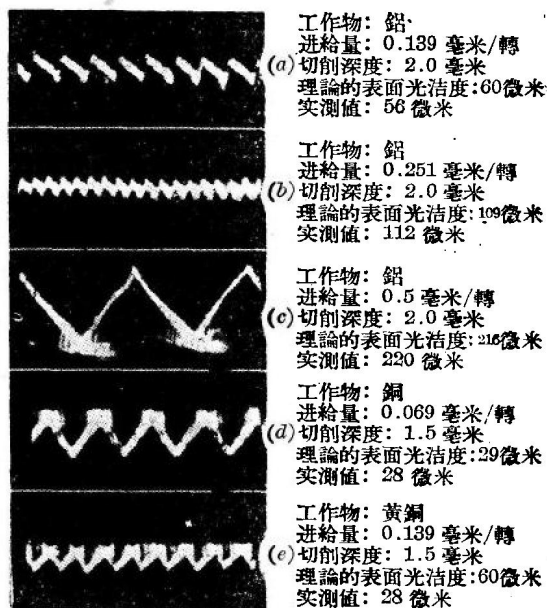
振动频率	$f=20$ 千周/秒
振幅	$a=12$ 微米
切削速度	$V=20$ 米/分钟
刀具形状	前角 $\alpha=20^\circ$, $k_1=60^\circ$, $k_2=30^\circ$
切削深度	$t=1.5$ 及 2.0 毫米
进给量	$s=0.069, 0.139, 0.251$, 0.5 毫米/转
工作物	铝 抗拉强度 8.3 公斤/毫米 ² 铜 抗拉强度 2.6 公斤/毫米 ² 黄铜抗拉强度 36 公斤/毫米 ²

照相 2 (a), (b), (c), (d), (e) 所示为在各种条件下的表面光洁度用同样的休麦尔氏表面检查仪测定的结果。

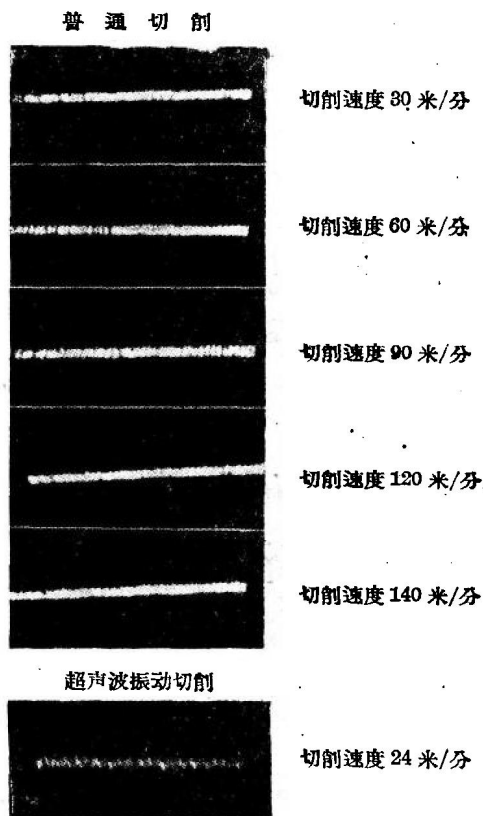
照相 2 所示为在这些切削条件下的理论的表面光洁度 H_{th} 及实测值, 实测值大体上与 H_{th} 一致。它并表示在比较上重切削的切削条件下, 工作物材料性质即使不同, 也同样得到理论表面光洁度。

如照相 2 (c) 所示, 对于铝料, 在进给量 $s=0.5$ 毫米/转, 切削深度 $t=2$ 毫米的切削条件下, 也会获得理论表面光洁度, 这样的效果是足以惊人

* 切削机构是指(1)切屑的生成机构, (2)被切削材料的变形, (3)被切削材料内的应力分布状态, (4)剪角, (5)切屑瘤, (6)切削刃的变形, (7)表面光洁度等——译者注。



照相 2 在各种切削条件下的超声波振动切削面



照相 3 碳素钢的普通切剖面与超声波振动切剖面的比较

的。

这种超声波振动切削面在有光线直线时,呈鲜明的虹面,在暗处则无光泽。用一般切削法则很容易获得有光泽的表面,甚至光滑得连颜面也照得出。但是这种光泽是切削时的切屑瘤等的摩擦所造成的。所以越是光泽,越与当时的切削条件下的理论表面光洁度相差得远。并且它会大大地产生以下文所要谈及的毛刺。

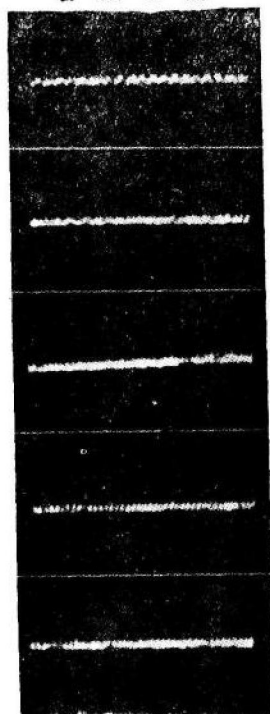
兹将高速切削面与超声波振动切削面加以比较。所谓高速切削,它在一般的切削法之中,不同于将工作物加热或冷却、巧妙地利用温度对工作物机械特性的影响的那些切削法,而是在常温下将工作物安在主轴上,以提高其切削性为目的的一种切削法。

切削条件:

切削速度 一般切削为 30~140 米/分

超声波振动切削为 24 米/分

普通切削



切削速度 80 米/分

切削速度 60 米/分

切削速度 90 米/分

切削速度 120 米/分

切削速度 140 米/分

超声波振动切削



切削速度 24 米/分

照相4 铜材的普通切削面与
超声波振动切削面的比较

进给量 $s=0.063$ 毫米/转

切削深度 $t=0.5$ 毫米

刀具形状 刀面角 $\alpha=20^\circ$, $k_1=60^\circ$,
 $k_2=30^\circ$

振动频率 $f=20,000$ 周/秒

振幅 $a=12$ 微米

工作物 碳素钢 抗拉强度 38 公斤/毫米²

铜 抗拉强度 26 公斤/毫米²

此时理论的表面光洁度 H_{th} 为 27.2 微米。工作物直径约为 29 毫米;为了获得 140 米/分钟的切削速度,必须使主轴旋转次数为约 1,900 次/分钟。

照相3和照相4表示两种切削面的比较。一般切削面即使是切削速度为 140 米/分钟的高速切削时,尽管能够辨认出进给量 $s=0.063$ 毫米/转的进给痕迹,但加工表面的形状则如照相所示,没有获得理论的表面光洁度 H_{th} 。

另一方面,超声波振动切削面则显示出 $H_{max}=26.2$ 微米,与理论的表面光洁度 $H_{th}=27.2$ 微米几乎一致,而其形状则如照相所示,呈鲜明的锯齿状。至于它的切削速度却是 24 米/分钟的低速回转所赋与的。因此,在设计超声波切削车床时,在使主轴轴承高速化的这种麻烦的工作方面,无须费什么心思,以现有的低速车床就足够应付的了,这一点实应大书特书。

无毛刺的加工成为可能

使用一般的切削法,很难获得十分理想的表面光洁度。毛刺之必定发生,成为提高质量上的一大问题。

进行一般切削法的工作机械,其构造上及使用上都合理,能力亦显著有所提高了。但工作物在用这种工作机械加工之后,还必须经过很多的手工作业,其中大部分就是去除毛刺的作业。无论工作机械的切削速度提高了多少,但如在以后的工序中还须进行手工作业,这从合理化而言,就没有什么大价值。因此,如何建立不发生毛刺的加工法实在是一项重大的关键。

超声波振动切削完全解决了毛刺的问题。照相5所示即其实例,其切削条件如下: