

高速超声加工工具的研究与应用

杨周铜

(电子工业部第十研究所 成都 610036)

1996年3月18日收到

摘要 本文将提供一种设计高速超声加工工具的新方法,并给出了高速超声加工工具的试验结果.

关键词 超声加工, 高速工具, 变幅杆

High speed tool for ultrasonic machining

Yang Zhoutong

(The Tenth Institute of Ministry of Electronics Industry, Chengdu 610036)

Abstract This paper will discuss a new design for high speed tool in Ultrasonic machining. Some testing results are presented.

Key words Ultrasonic machining, High speed tool, Amplitude transformer

1 引言

随着科学技术的发展,对超声加工小孔的质量提出了越来越高的要求,特别是在电子工业中,为了使硬脆材料上用超声加工的小孔,在孔金属化后具有良好的电磁性能,所以对孔的加工精度、锥度、粗糙度和圆柱度都提出了很高的要求.要用超声加工这种高质量的优质小孔,除设备应具有必要的基本条件外,加工速度也是至关重要的,因为加工速度的快慢会直接影响到孔的锥度和圆柱度,而孔的锥度和圆柱度又会影响微波器件电磁性能的提高.在现有超声加工设备的情况下,要想提高超声加工速度,除选择最佳的加工工艺参数外,其余就是选择理想的工具和与工具相连的末级变幅杆.所以在此情况下,最好的办法就是改变工具和末级变幅杆的设计,来提高整个声学系统的电声转换效率,从而提高超声加工速度.

长期以来,人们对超声加工设备的声学振动系统进行过广泛地研究,但迄今为止所考虑的主要是按“半波长”或“半波长”的级联来设计声学系统.按这种设计方法,整个声学振动系统处于谐振时,工具加工端面振幅最大,加工速度也会最快.但在实际工作中,按上述方法设计的声学振动系统的现有设备,其加工速度也往往达不到优质小孔的加工要求.所以我们在换能器和变幅杆仍处在“半波长”级联的经典条件下,研究了工具的其他工作方式.我们发现,当工具的长度等于 $1/4$ 波长或接近 $1/4$ 波长时,附加有这种工具的变幅杆,勿须改变原来的半波长度,仍能工作在最佳状态,虽然此时系统的谐振频率微有下降(由工具的附加质量引起),但工具输出端的振幅不但没有减小,反而迅速增加,因而使超声加工速度获得成倍的提高.

本文将着重详细介绍这种超声加工工具的

2 高速超声加工工具的设计基础

按现有理论, 变幅杆附加工具后, 谐振频率会下降, 振幅会减小。为了减小工具对变幅杆的影响, 设计者就采用质量互易法对变幅杆进行修正, 具体方法如图 1 所示。图中 λ 为波长, l_0 为等效长度, l_1 为设计物理长度, l_2 为工具长度。 l_0 、 l_1 和 l_2 的关系如下

$$l_0 = l_1 + l_2 \frac{S_2}{S_1} \quad (1)$$

式中 S_1 和 S_2 分别为变幅杆细端和工具的截面积。

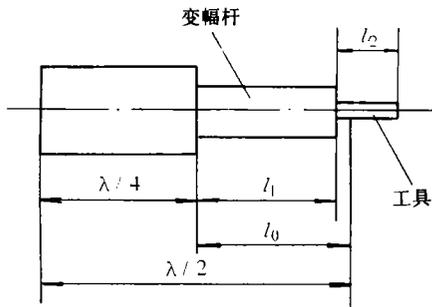


图 1 末级变幅杆的等效长度与物理长度

采用上述方法设计的工具变幅杆系统, 安装在现有的 250W 超声加工设备, 用 240 号碳化硼为磨料, 在高铝陶瓷、稀土铁氧体和玻璃上进行通孔加工实验。加工过程中选择的工艺参数均认为是最佳状态, 加工结果列于表 1。按质量互易法设计的工具变幅杆系统称为现有方法的加工系统, 其加工实验过程称为现有方

法。在现有工具变幅杆系统的设计工作中, 我们进行了广泛的研究和实验, 均未找到一种能达到高速加工要求的方案, 说明在现有方法中, 已很难找到提高普通超声加工设备加工速度的方法。要想进一步提高加工速度, 就必须研究工具变幅杆系统新的设计方法。为此, 我们对作为工具常用形式的等截面工具进行了系统地研究。

设有一如图 1 所示的等截面工具, 长度 l , 截面积 s , 密度 ρ , 声速 c , 负载 Z_R , 两端受力分别为 F_1 和 F_2 时产生的位移(速度)为 U_1 和 U_2 。图 2 所示工具可以用图 3 所示等效电路来分析。图中 $Z_a = \rho c S l$, $\alpha = kl$, $k = \omega/c$, ω 为角频率。

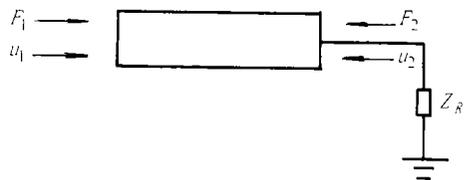


图 2 在有负载时作纵振动的等截面工具

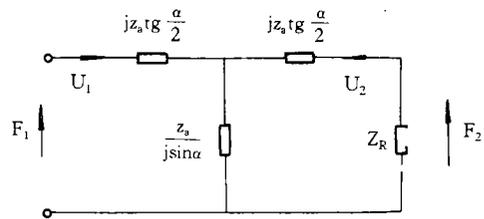


图 3 有负载时作纵振动的等截面工具的等效电路

表 1 现有方法和高速工具在相同条件下加工通孔的时间

工具类型	现有方法						高速工具					
	高铝陶瓷		稀土铁氧体		玻璃		高铝陶瓷		稀土铁氧体		玻璃	
工件材料	高铝陶瓷		稀土铁氧体		玻璃		高铝陶瓷		稀土铁氧体		玻璃	
工件厚度 (mm)	1		1.5		3		1		1.5		3	
加工孔径 (mm)	0.8	1 2	0.8	1 2	0.8	1 2	0.8	1 2	0.8	1 2	0.8	1 2
加工时间 (S)	14	18 24	12	18 20	6.4	7.3 8.4	4.3	5.7 7.9	3.5	5.6 6.8	2.1	2.4 2.7

从图 3 中显然可以得到

$$F_1 = \frac{Z_a}{j \operatorname{tg} \alpha} U_1 + \frac{Z_a}{j \sin \alpha} U_2 \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{Z_a}{j \sin \alpha} U_1 + \frac{Z_a}{j \operatorname{tg} \alpha} U_2 \quad (3)$$

注意到 F_2 和 U_2 的方向, 设工具自身有振幅

变换作用, 且变幅比为 $A = |U_2/U_1|$, 令 $x = Z_a/Z_R$, 通过适当的数学运算就可得

$$A = 1/[1 + (\frac{1}{x^2} - 1)\sin^2\alpha]^{1/2} \quad (4)$$

在无负载时 $Z_R \rightarrow 0, x \rightarrow \infty$

$$A = 1/|\cos\alpha| \quad (5)$$

我们现在来讨论 (4) 和 (5) 式的特殊情况:

(1) 当 $\alpha = \pi$ 时, 根据 $\alpha = kl$ 可以得出 l 为半波长, $U_1/U_2 = -1$ 或 $A = 1$, 说明不管工具有无负载, 工具的变幅比均为 1, 即振幅不放大也不减小.

(2) 当 $\alpha = \pi/2$ 时, 同样可得出 l 为 $1/4$ 波长, $U_1/U_2 = -j/x$, 即 $A = x = Z_a/Z_R$, 说明工具的变幅比等于工具材料的力阻与负载之比. 因此可看出, 除非 $x = 1$, 否则等截面工具仍可以变幅.

在 $x > 1$, 即 $Z_a > Z_R$, 这在通常的超声加工过程中都能成立, 所以当工具的长度等于 $1/4$ 波长时, 等截面工具的变幅比都会大于 1. 事实上, 通过计算发现, $1/4$ 波长的等截面工具, 理论变幅比可以达到 28 左右 (工具材料为 45 号钢, 水和磨料混合体为直接负载, 这是超声加工的通常情况), 已优于一般变幅杆的变幅比.

在 $Z_R \rightarrow 0, x \rightarrow \infty$ 时, $A \rightarrow \infty$, 就是说空载时工具有无穷大的振幅, 事实上这是不可能的, 因为此时工具的输入阻抗也会变为无穷大. 而 $x < 1$ 时, $A < 1$, 即振幅减小. 当 $Z_R \rightarrow \infty, x \rightarrow 0$ 时, $A \rightarrow 0$, 即工具无输出.

我们从 $\alpha = 0$ 到 $\alpha = \pi$ 的一般情况可以看出, 等截面工具不能变幅只是在其长度等于半波长或半波长的整数倍, 或在 $x = Z_a/Z_R = 1$ 的两种情况, 其余情况下是可以变换振幅的. 而用现有方法设计的工具变幅杆系统, 设计过程中是把工具作为变幅杆的附加部分来考虑.

当 $x > 1$ 时, 即是通常超声加工遇到的情况, $1/4$ 波长工具本身此时可以获得最大的振幅放大, 而且是随 x 的增加, A 亦增加, 在轻

负载的情况下, A 可以很大. 当然随着 x 的增加, 当工具的长度偏离 $1/4$ 波长时, A 相对而言也减小得很快. 当 $x < 1$ 时, 振幅会减小, 但在超声加工过程中不会遇到这种情况.

根据上述分析, 我们对 $1/4$ 波长工具进行了实用性设计和研究, 并解决了加工优质小孔过程中工具的刚性和制造问题, 使其达到实用化要求, 这种工具就称高速超声加工工具, 简称高速工具, 用这种工具的末级变幅杆仍为半波长.

3 高速超声加工工具的实际应用

根据上述理论分析, 可以很方便地设计出如图 4 所示的高速工具与末级变幅杆的组合体, 图中 λ 为波长. 为了尽量减小工具质量对声学系统谐振频率的影响, 所以工具的质量不宜过大, 如果加工孔的直径较大, 应采用空心的薄壁工具来加工.

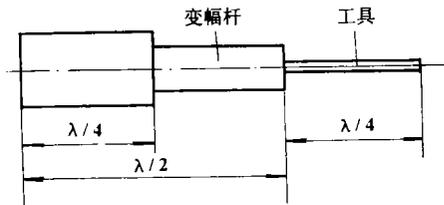


图 4 理想化的高速工具与变幅杆的组合图

为了比较两种工具的加工速度, 我们仍然采用除末级变幅杆和工具外, 与现有方法设计的工具变幅杆系统进行加工实验时相同的条件, 用高速工具进行加工实验, 并把实验结果也同样列入表 1. 比较表 1 中现有方法和高速工具加工通孔的时间, 可以明显看出, 在相同条件下高速工具的加工速度比现有方法快 2 倍左右.

表 1 中所用工具是等截面的, 这种工具加工速度虽然很快, 但刚性差, 很难保证必要的加工精度. 为此, 我们在设计过程中采用牺牲部分速度, 适当增加刚性 (质量) 的方法, 并把工具的非加工部分设计成微微的变截面, 其结构如图 5 所示. 改进设计后的高速工具虽然加

工速度略有下降,但刚性和加工精度均达到实用化要求。

在图5中,工具的等截面部分是直接用于加工,其余变截面部分是为了使工具接近1/4波长而增加的附加长度。附加部分虽有微小的变幅作用,但因附加质量造成的振幅下降已超过变幅带来的增量,所以加工速度会小于等截面的高速工具。

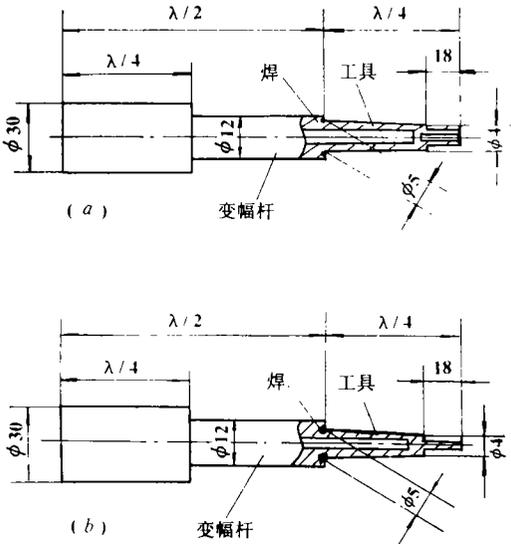


图5 (a) 直径1 mm的高速工具与变幅杆的组合图
(b) 直径2 mm的高速工具与变幅杆的组合图
(图中单位mm)

4 讨论

如果“半波长”谐振变幅杆附加工具后,仍

能保持原来的谐振频率,考虑到工具是带有负载的这种具有最实用意义的情况,用本文提出的设计方法就可以得到具有变幅作用的工具。而且当工具的长度等于1/4波长时,具有最大的振幅放大效果。这就是用1/4波长工具能实现高速加工的关键。

工具的质量对声学系统的影响是不言而喻的,所以设计高速工具时,严格控制工具的质量是必要的,否则因工具质量的增加造成的振幅下降会超过工具自身的放大作用,使加工速度反而下降,所以高速工具的质量不宜过大。换句话说,这种高速工具不宜用来加工较大直径的孔和面,在小孔加工时也应尽量减小工具的质量,否则工具质量的增加引起的频率变化,会使声学系统的工作频率远远偏离了原设计频率,重新工作在由工具和原系统所组成的新系统的谐振频率上,此时的工具已不是本文所讨论的高速工具了。

在使用高速工具的系统中,由于换能器和变幅杆均工作在较佳的谐振状态,工具又连接在变幅杆的应力节点处,所以换能器和变幅杆振动良好,工具加工端面振幅大,也不易在连接处断裂。

最后必须说明,本文的分析和讨论还是初步的,不少问题尚未涉及,如高速工具的内位移(速度)和应力分布随负载的变化规律,工具和变幅杆相连后对变幅杆的影响,以及实际应用中如何根据工具材料的不同和加工的要求来设计高速工具等等。这些问题都有待进一步的研究。

欢迎订阅 《应用声学》

《应用声学》(双月刊)是中国自然科学核心期刊、中国科技论文统计用刊。国内邮发代号: 2-561; 国外刊号: Q607。

定价: 5元/期, 30元/年。全国各地邮局均可订阅。