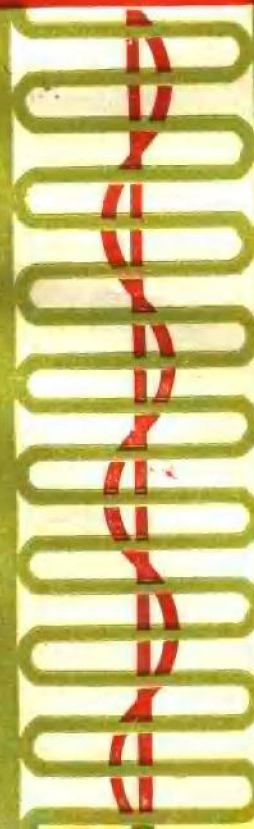


李祥林 薛万夫 张日昇 编著

振动切削 及其在机械加工中的应用



北京科学技术出版社

内 容 提 要

振动切削是在切削过程中给工具或工件加上某种可控的振动而形成的一种新的切削方法。它可以减小切削过程中的切削力和切削热，从而大大提高加工精度和光洁度、延长工具寿命。受振动切削的启发，人们把它的原理应用到金属塑性加工（拉丝、拔管、冲压）等机械加工的各个领域，有效地延长了工具寿命，提高了加工质量，令人信服地解决了难加工材料和普通材料的难加工工序中的加工问题，被认为是机械加工中的一个重要发展方向。振动切削方法可以节省能源，所需的设备简单，投资少，可作为机床附件在普通机床上使用。

本书介绍了振动切削的原理、它和普通切削的区别、各种振动切削装置及其安装调试方法，并通过试验证明振动加工的良好工艺效果，适于机械行业的中级技术人员和有一定经验的工人同志阅读，也可作为工科院校的辅助教材。

北京科学技术出版社出版

北京西外南路19号

北京市大郊亭印刷厂印刷

北京市新华书店发行

各地新华书店经售

开本：1/32 787×1092毫米

印张：11 字数：233 千字

1985 年 5 月第一版

1985 年 5 月第一次印刷

印数：1—5,500 定价：1.85 元

统一书号：15274.018

本社书号：049

前 言

切削加工在机器制造中占有极其重要的地位，研究和
发展切削加工的新方法，始终是机械行业的重要课题。

在切削加工领域内，提高技术水平和经济效益的方法虽
然很多，但一个非常重要的着眼点在于减小切削过程中的切
削力、降低切削热。振动切削是近十几年才逐步发展起来的
一种新的切削方法，它和普通切削相比，在降低切削力和切
削热方面起到了积极的作用，令人信服地解决了普通切削中
难以解决的一些工艺问题。在难加工材料的加工和精密加工
中，振动切削具有普通切削无法比拟的工艺效果。它的理论
和实践从另一个侧面打开了认识切削本质的大门，是对普通
切削方法的丰富、完善和发展。受振动切削的启发，切削工
作者把它的原理扩大到冲压、拉丝、拔管、抛光、研磨
等机械加工的各个领域，有效地提高了加工质量，延长了
刀具（工具、砂轮等）的寿命。

本书阐述了振动切削的基本原理，工艺效果，振动系统
的结构、设计和制造，以及在切削（包括磨削、金属塑性加
工等）中的应用，可供从事机械制造的工程技术人员和有经
验的工人同志阅读，也可作为工科院校机械制造专业的参考
教材。

本书共分六章，其中 1 ~ 2 章阐述了振动切削与普通切
削的区别，振动切削的工艺效果及关于振动切削机理的各种

观点；第3章介绍了各种振动切削装置；第4章介绍了振动系统的设计、安装和调整；5~6章介绍了振动切削的应用。

本书由甘肃光学仪器总厂张日昇、陕西机械学院薛万夫、北京机械局技术开发所李祥林共同编写，由李祥林统编定稿。

由于编写时间仓促，加之水平所限，错误之处在所难免，恳请同志们批评指教。

作 者

1984年4月

目 录

第一章 振动切削概述	(1)
第一节 普通切削与振动切削	(1)
第二节 振动切削的工艺效果	(5)
第三节 关于振动切削机理的主要观点	(16)
第四节 振动切削的国内外发展简况	(22)
第二章 振动切削的运动学特点	(25)
第一节 振动切削过程的特点	(25)
第二节 超声振动切削的运动学分析	(48)
第三节 振动切削时工件的动态变化	(58)
第三章 振动切削装置	(71)
第一节 振动切削装置及其分类	(71)
第二节 机械振动切削装置	(78)
第三节 液压振动装置	(94)
第四节 电磁电动振动装置	(103)
第五节 超声波振动装置	(107)
第四章 工具振动系统的设计与安装调整	(117)
第一节 利用步进电机的低频扭转振动	(117)
第二节 超声振动系统的设计制造	(134)
第三节 低频振动系统的安装与调整	(174)

第四节	超声振动系统的安装与调整·····	(183)
第五章	振动切削的应用·····	(206)
第一节	振动钻深孔·····	(206)
第二节	振动钻小孔·····	(247)
第三节	振动攻丝·····	(260)
第四节	振动铰孔·····	(269)
第五节	超声振动车削·····	(276)
第六节	超声振动研磨·····	(288)
第六章	振动切削在机械加工中的其他应用·····	(298)
第一节	用自激振动的方法加工柴油机缸套波 纹形孔面·····	(298)
第二节	超声振动在磨削中的应用·····	(305)
第三节	振动塑性加工·····	(319)
第四节	振动切削的其他应用·····	(342)

参考文献

第一章 振动切削概述

第一节 普通切削与振动切削

在机械制造中，金属由原材料到符合要求的零件，必须经过一系列的加工，包括铸、锻、轧制、冲压及切削加工等。在现代金属加工方法中，作为毛坯的制造如铸、锻等只能得到形状和尺寸比较粗糙、精度较低的零件，要进一步提高零件的质量，使其满足使用的要求，则必须对毛坯进行切削加工。切削加工是制造机器零件的基本方法和主要的生产环节。它被广泛地应用在机械零件的制造中。

一、普通切削

我们把目前广泛采用的切削方法称之为普通切削。在普通切削中，切削是靠刀具与工件的相对运动来完成的。切屑和已加工表面的形成过程，本质上是工件材料受到刀具的挤压，产生弹性变形和塑性变形，使切屑与母体分离的过程。在这种刀具始终不离开切屑的普通切屑中，刀具的作用包括两个方面：一个是刀刃的作用；一个是形成刀刃的刀面的作用。由于刀刃与被切物接触处局部压力很大，从而使被切物分离。刀面则在切削的同时撑挤被切物，促进这种分离。普通切削中，伴随着切屑的形成，由于切屑与刀具之间的挤压和

摩擦作用，将不可避免地产生较大的切削力、较高的切削温度，使刀具磨损和产生切削振动等有害现象。为了改善切削状况、提高切削水平，近百年来，切削工作者采用了各种方法与切削力和切削热作斗争。例如发展新型刀具材料，提高刀具的热硬性、韧性和硬度；改善刀具角度，减小切削力和切削热；发展新型冷却液，减小切削热的影响；选择合理的切削参数，延长刀具的寿命；设计新型机床，减小切削振动，保证加工精度等等，其目的都是为了适应切削力大和切削温度高这个特点。这些方法在切削加工中都起到了一定作用，不同程度地改善了切削状态，完善了切削工艺，解决了部分切削加工中的问题，使切削水平不断提高。但是，这些方法仅仅着眼于被动的适应，并没有从本质上减小切削力和切削热。

随着科学技术的发展，在机械制造和国防工业中，大量使用不锈钢、耐热钢、钛合金、高温合金、冷硬铸铁等材料。这些材料具有良好的耐热性、耐蚀性、高的比强，优异的常温和高温机械性能。由于它们的强度高、导热性差、加工硬化倾向严重，其可加工性仅为普通材料的30~40%，用传统的切削方法加工时，切削用量低，刀具磨损十分严重，甚至无法进行切削，给切削加工带来很大困难。因此，在切削技术的发展中，应当探求一种本质上新颖的切削方法，以适应材料参数和产品质量不断提高的要求，改善材料的可加工性，从而提高加工质量和效率。

近年来，人们把现代技术与传统切削工艺结合起来，研究出了一些新的切削方法，例如振动切削、低温切削、激光切削、水力切削等等。这些方法都是在普通切削加工的基础

上，加上某些物理或化学作用，从而改变切削过程，达到提高加工质量和效率的目的。

二、振动切削及其分类

1. 振动切削

普通切削中，自激振动对工艺系统的正常工作有很大影响，然而在不利的影晌中却包含了若干有利的因素。例如：在一定条件下切削功率可以降低15~30%，切屑收缩显著减小，改善了切屑的形成条件，得到碎断切屑等。是否可以这样设想：从进一步改善材料的可加工性出发，在传统的切削过程中人为地给工艺系统造成某种有规律的振动，以发挥其有利的方面而消除其不利的影响呢？

基于这种思想，在和有害的自激振动现象作斗争中产生了一种新的切削方法——振动切削。它的实质是在传统的切削过程中给刀具（或工件）加上某种有规律的、可控的振动，使切削用量中的 v （切削速度）或 S^* （走刀量）、 t （吃刀深度）按某种规律变化，从而形成一种本质上新颖的切削方法。振动切削改变了工具与被加工材料之间的空间一时间存在条件，从而改变了加工（切削）机理，达到减小切削力、切削热，提高加工质量和效率的目的。

振动切削是一种脉冲切削。在切削过程中，刀具周期性地离开和接触工件，其运动速度的大小和方向在不断地变化。刀具速度的变化和加速度的出现，使振动切削具有许多优点，特别是在难加工材料和普通材料的一些难加工工序（例如小直径精密深孔，小直径精密攻丝）的加工中，都收到了异乎寻常的效果。迄今为止，世界各国虽然在振动切削

某些现象的解释上、某些参数的选择上还有相当差别，但对它的工艺效果却是一致公认的。因此，它已经作为精密机械加工和难加工材料加工中的一种新技术渗透到各个加工领域中，形成了各种复合加工方法，使传统的切削技术有了一个飞跃。

2. 振动切削的分类

(1) 按振动性质分，可分为自激振动切削和强迫振动切削两种。自激振动切削是利用切削过程中产生的振动进行切削的。例如火车和船舶所用柴油机缸套内孔的波纹形孔面的加工。这种加工方法变有害的振动为有利，近几年来有逐渐扩大使用的趋势。强迫振动切削是利用专门设置的振动装置，使刀具（或工件）产生有某种规律的可控振动进行切削的方法。本书将侧重介绍强迫振动切削的原理、切削特点、工艺效果及其应用。

(2) 按振动频率分，可分为高频振动切削和低频振动切削两种。

刀具（或工件）振动频率在16000Hz以上的振动切削称为高频振动切削，而刀具（或工件）振动频率在200Hz以下的振动切削称为低频振动切削。低频振动切削的振动主要靠机械装置来实现，而高频振动则是利用超声波发生器、换能器、变幅杆来实现。由于振动频率在10000Hz左右的振动会产生令人讨厌的噪声，所以一般不被采用。通常，把高频振动切削叫作超声振动切削。

(3) 按刀具振动方向分，可分为吃刀抗力方向、进给抗力方向和主切削力方向的振动切削三种，如图1-1所示。

在实际应用中，可根据加工要求选择振动频率和振动方

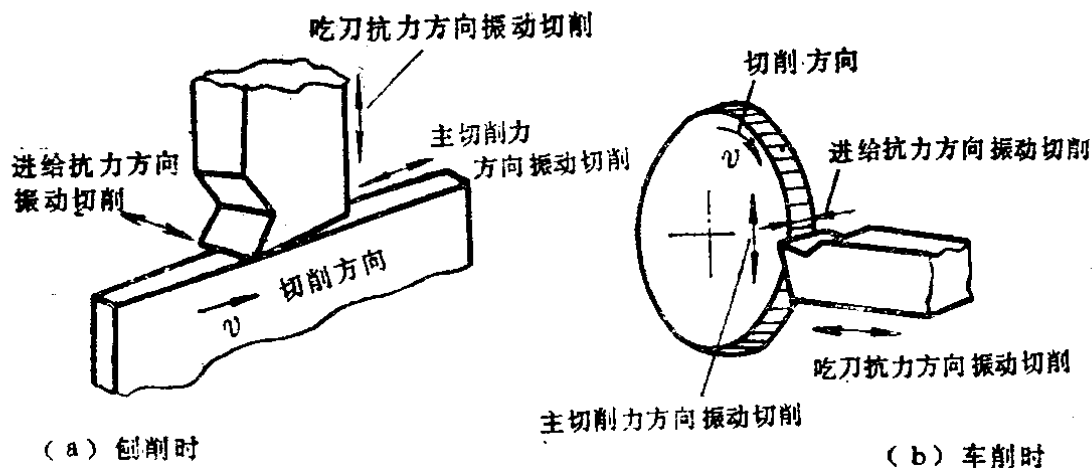


图 1—1

向。例如在振动攻丝时，把圆周方向和轴向振动组合起来，形成所需要的扭转振动。一般应用时，主切削力方向的振动切削效果最好。

第二节 振动切削的工艺效果

振动切削是在切削过程中加上某些物理作用而形成的一种新的切削方法。这种切削方法可得到普通切削不能得到的一些良好的切削效果。它的出现为精密切削和超精切削开辟了一条理想的道路。现在，我们从几个方面介绍振动切削的工艺效果。

一、切削力小

振动切削时，切削速度的大小和方向产生周期性的变化，这种变化改变了整个工艺系统的受力情况。用切削速度 $v = 0.1\text{m/min}$ （米/分）、振动频率 $f = 20\text{KHz}$ （千赫芝）、振

幅 $a = 15\mu$ (微米) 进行振动切削时, 刀具在每一个振动周期内纯切削时间 t_c 是非常短的, 只有 10^{-6} 秒。在纯切削时间 t_c 之内, 刀具沿切削方向的切削长度 $l_T = v/f = 8 \times 10^{-6} \text{ mm}$ (毫米)。可见超声振动切削是一个在极短时间内完成的微量切削过程。在一个切削循环过程中, 刀具在很小位移上得到很大的瞬时速度和加速度, 在局部产生很高的能量。例如, 以振动频率 $f = 20 \text{ KHz}$ 、振幅 $a = 20\mu$ 进行振动切削时, 刀具振动的最大速度和加速度分别可达到 2.5 m/s (米/秒) 和 $3.2 \times 10^7 \text{ cm/s}^2$ (厘米/秒²) $= 3.2 \times 10^4 g$ (g 为重力加速度), 即刀具运动的加速度为重力加速度的 8 万多倍。可以想象, 这时被加工材料在局部微小体积内的物理、机械性能必将发生重大变化。在振动的影响下, 摩擦系数大大降低, 只有普通切削的 $1/10$ 左右 (见表 1-1), 使超声振动切削的切削力下降到普通切削的 $1/2 \sim 1/10$ 。对一些塑性较大的材料, 下降的程度更大。例如, 振动车削紫铜 ($f = 20 \text{ KHz}$ 、 $a = 15 \sim 20\mu$) 时, 主切削力 P_t 下降到普通切削的 $1/8 \sim 1/10$, 而径向切削力 P_r 下降到普通切削的 $1/50$ 。用 $f = 20 \text{ KHz}$ 、 $a = 10\mu$ 振动车削铝棒时, 主切削力还不到普通切削的 $1/10$ 。这样的切削效果对精密加工或对刚度低、功率小的仪表机床将有重要的价值。当用 $f = 100 \text{ Hz}$ 、 $a = 0.35 \text{ mm}$ 的低频振动拉削时, 即使把齿升量加大到普通拉削的 6 倍 (0.3 mm), 拉削仍能顺利工作。用振动拉削加工一个宽 24 mm , 长 60 mm 的键槽时, 拉削力从普通拉削的 6 吨降低到 1.5 吨, 即降低

• 本书仍用公制单位, 与 SI 单位的换算可参见有关规定。如

$1\mu = 1\mu\text{m}$; $1\text{kgf} = 9.806 \text{ N}$; $1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.806 \times 10^6 \text{ Pa}$ 等。

表 1—1

材 料	摩 擦 系 数	
	超 声 振 动	无 振 动
铝	0.02	0.18
黄 铜	0.03	0.25
碳 素 钢	0.02	0.22

了70%。用 $f = 100\text{Hz}$ 的低频振动攻丝时,其扭矩降低到普通攻丝时的 $1/3 \sim 1/10$ 。在4Cr13、1Cr18Ni9Ti上低频振动钻孔时,切削力可降低20~30%,这为在更小的加工直径上推广应用内排屑深孔钻创造了条件。近年来,国外把超声振动应用在磨床上,收到了很好的效果。例如,用金刚石砂轮径向超声振动磨削时,其水平分力可降低30~40% (磨石英玻璃) 或60~70% (磨1Cr18Ni9Ti)。振动切削用于其他的机械加工中,例如拔丝、锯料、剪切等等时,都可以大幅度降低切削力。这种工艺效果为降低切削热、延长刀具寿命和保证加工质量创造了条件。

大幅度降低切削力是切削工作者多年追求的目标,振动切削为实现这一目标提供了有效的手段。

二、切削温度低

振动切削时,被加工材料的弹塑性变形和刀具各接触表面的摩擦系数大幅度下降,且切削力与切削热都以脉冲形式出现,使切削热的平均值大幅度下降。切屑的平均温度仅 40°C 左右,切屑完全没有氧化变色,用手去摸也不会烫伤,

这是普通切削不可想象的。普通切削时，相当于加热了的烙铁一动不动地压紧工件进行焊接。而振动切削时，相当于上下急促摆动的断续加热，刀具和工件不可能实现焊接。由于振动切削的过程是一种分离型的断续过程，切削热是以脉冲形式变化的，在极短的切屑形成过程中，热量来不及传到更深的金属内部，所以切削温度的绝对值是比较低的。早期的振动磨削发现，当给 $22 \times 22 \times 3\text{mm}$ 的试件(淬火硬度HRC55)加上 $f = 18\text{KHz}$ 、 $a = 25\mu$ 的径向超声振动时，尽管磨削深度由普通磨削的 0.05mm 提高到 0.09mm ，但工件的磨削温度却降低了50%。超声振动切削不锈钢时(切削深度 0.5mm ，走刀量 0.22mm/rev 、切削速度 20m/min ，刀具振动频率 $f = 20\text{KHz}$ 、振幅 $a = 15\mu$)，其切屑温度只有 40°C ，切屑完全不变色。切削过程的这种变化无论在理论上和实际应用中都有很大价值。它改善了切削条件，提高了加工质量和刀具的耐用度，消除了由于切削温度高引起的一系列问题，例如热致损伤，由于切削热引起的工件表面残余应力和工件的热变形等等。尤其对需要热处理的零件，为减少热处理的变形与裂纹创造了十分有利的条件。

切削热以脉冲的形式出现，象电火花加工、激光加工、电子束加工中一样，就可能实现高精密加工，这是这种新方法的特点之一。

三、表面光洁度和加工精度高

振动切削破坏了产生切削瘤的条件，又由于切削力小、切削温度低，使加工表面光洁度和几何精度都有大幅度提高。振动切削中，刀刃虽在振动，但在刀刃与工件接触并产

生切屑的各个瞬时，刀刃所处的位置在切削过程中总是保持不变。由于工件也不随时间发生变动，从而为提高加工精度创造了条件。

超声振动切削45号钢时，光洁度从普通切削的 $\nabla 4$ 提高到 $\nabla 9$ 。用宽刃刨刀超声振动刨削铝、碳素钢、黄铜等材料，均得到 $\nabla 11$ 的光洁度。用金刚石刀具对淬硬钢进行端面切削时，其光洁度可达 $\nabla 12$ 。超声振动切削钛合金可得到 $\nabla 10$ 的光洁度。用各种几何形状的刀具以不同的切削规范对各种材料进行超声振动切削，所得表面光洁度与理论计算值相当一致。这一结果意味着根据刀具形状和切削参数可以预测表面光洁度，为准确地控制表面光洁度提供了可能。普通切削中，即使用现代数理统计理论，也很难使计算结果与实际加工的结果相一致。用刀尖圆角 $R = 1.5\text{mm}$ 的硬质合金刀具，以走刀量 S 分别为 0.06 、 0.1 、 0.15 、 0.2mm/rev （毫米/转）超声振动车削铸铁棒，分别得到 0.5μ （ $\nabla 10$ ）、 0.8μ （ $\nabla 9$ ）、 1.8μ （ $\nabla 8$ ）、 2.9μ （ $\nabla 8$ ）的表面粗糙度，与理论计算值相当一致。以 $R = 0.85$ 的刀具、 $S = 0.1\text{mm/rev}$ 车削25件铸铁工件，所得的平均粗糙度为 1.6μ （ $\nabla 8$ ），与理论计算值 1.5μ 相当接近。振动钻孔时，光洁度从普通钻削弹簧钢的 $\nabla 3$ 提高到 $\nabla 8$ ，最高达 $\nabla 10$ 。振动切削的光洁度不但可以达到甚至超过各种切削加工的最好光洁度，而且可以用刀具切削达到磨削甚至研磨的光洁度。

还应当指出，振动切削（尤其是超声振动切削）提高了工艺系统的工艺刚度，明显地提高了切削过程中的动态稳定性，减轻或消除了普通切削时经常发生的振动现象，从而大大提高了加工精度与表面光洁度。

振动磨削时，在一个振动周期内，磨粒随时改变着切削方向并多方向地参与切削，形成一种“多刃切削”过程，而且磨粒更容易破碎，不断形成新的磨刃。振动磨削时，砂轮工作面上的有效磨粒数和磨粒的有效磨刃数都显著增加，提高了磨具的切削能力，也提高了磨削质量和效率。一般情况下，在其他加工条件都不变时，超声振动磨削可使加工表面的光洁度提高2级左右。

大量的振动切削试验表明，振动切削可以明显地提高工件的尺寸精度和几何精度。

1. 尺寸精度 在转速为200r/min(转/分)的精密瑞士机床上，一刀把 $\phi 1\text{ mm}$ 的不锈钢棒车成 $\phi 0.5\text{ mm}$ ，超声振动车削和普通车削各180分钟，超声振动车削得到的工件平均偏差范围是 $\phi 0.5 \pm \begin{smallmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{smallmatrix} \text{ mm}$ ，而普通切削是 $\phi 0.5 \pm \begin{smallmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{smallmatrix} \text{ mm}$ 。以 $f = 100\text{ Hz}$ 的频率振动攻M6×1螺纹时，有效孔径扩大为 $25 \sim 35\mu$ ，而普通攻丝孔径扩大为 $25 \sim 90\mu$ 。以超声振动攻M1~M5的小螺纹时，工件螺距与丝锥螺距的误差由普通攻丝的 $-8 \sim +10\mu$ 提高到 $-2 \sim +5\mu$ 。普通攻丝时，随加工材料不同，其间隙在 $40 \sim 130\mu$ 之间变动；而振动攻丝时，间隙不受加工材料的影响，始终保持在 50μ 左右。用硬质合金刀具对淬硬至HRC64~65的高速钢进行六次振动端面切削精度试验，误差均在 $0 \sim 5\mu$ 范围内，平均误差 3μ 。

2. 形状精度和位置精度 在龙门刨床上用超声振动的方法对硬铝、黄铜、铸铁、石板等进行刨削，与材料无关地得到 $2\mu/450\text{ mm}$ 的不直度，振动刨削与普通刨削平行度误差比较见表1-2。用普通车床振动车削铝、黄铜、不锈钢工件的圆度误

表 1—2

工 件 材 料	平行度误差 ($\mu/450\text{mm}$)	
	振 动 刨 削	普 通 刨 削
硬 铝	2	65
黄 铜	2	22
碳 素 钢	3	28
镍 铬 钢	3	63

差均在 1.5μ 以内；车削淬硬钢在 2μ 以内。对内径 $\phi 110\text{mm}$ 、壁厚 10mm 、长 30mm 的铜、铜合金、硬铝和碳素工具钢工件进行振动镗削，与材料无关地得到 2μ 的圆度误差， $1.5\mu/180\text{mm}$ 的圆柱度误差。把工件架在经过精密加工的顶尖上，用皮带带动，以 $v = 15.5\text{m/min}$ 、 $S = 0.03\text{mm/rev}$ 进行超声振动切削，得到的圆度误差分别为：碳素钢 0.1μ ；黄铜 0.3μ ；不锈钢 0.3μ 。进一步试验表明，超声振动切削中测出的圆度误差，实际是机床主轴的回转精度误差引起。因此，振动切削被认为是进行圆度误差、圆柱度误差、平度差、平行度误差等近似为零的精密切削的好方法。

四、刀具耐用度大大提高

振动切削时，由于切削力小、切削温度低、冷却充分，使刀具的耐用度明显提高。当振动参数选择合适时，一般可使刀具寿命提高几倍至几十倍，对难加工材料和难加工工序，其效果更好。用超声振动在不锈钢材料上振动车削细牙