

高效加工技术及其应用研究

艾 兴

(山东工业大学机械系, 济南 250061)

[摘要] 在机械加工领域, 切削加工是应用最广泛的一种加工方法, 其发展方向主要是研究高速切削, 对超硬材料加工, 主要是发展磨削、超声和放电等高效复合加工技术。文章介绍对高效切削加工和高效复合加工技术的理论研究和技术开发与应用及所取得的重要成果, 主要包括高速切削基础理论、陶瓷刀具材料研究新体系和超硬材料断续磨、超声和电火花的复合加工理论与技术的研究开发。生产实际应用结果表明, 高效加工技术可以大幅度提高加工效率, 改善加工表面质量, 降低加工成本。

[关键词] 高效加工技术; 高速切削; 陶瓷刀具材料; 断续磨-间隙脉冲放电复合加工; 超声-间隙脉冲放电复合加工

1 概述

机械加工发展的总趋势是高效、高精度、高柔性和强化环保意识。在机械加工领域, 切、磨削加工是应用最广泛的加工方法。目前, 零件的最终形成仍然是以切(磨)削为主。对超硬材料和某些难加工材料, 多数采用特种加工技术。在高效切削加工方面主要是高速切削, 这是切削加工的发展方向。在国外, 在刀具材料许可条件下, 加工钢、铁及其合金的切削速度一般为 150~1 200 m/min, 加工镍基合金为 15~600 m/min, 加工钛合金为 30~200 m/min, 加工铝合金可达 3 500~4 000 m/min, 但高硅铝合金(硅含量在 12% 以上)视硅含量不同, 一般为 200~500 m/min。当然, 在生产实际中, 被加工材料和刀具与加工要求不同, 常常以材料切除率(即切削深度 a_p , 进给量 f 和切削速度 v 的乘积)作为高效切削目标, 而不是单纯追求高切削速度。在我国制造业中, 由于广泛使用普通高速钢与硬质合金和通用机床, 切削速度和切削效率普遍较低, 一般加工钢、铁及其合金的切削

速度在 200 m/min 以内, 采用新型刀具材料和数控机床, 可达 500 m/min 以上; 加工铝合金的效率也普遍较低; 在加工超硬材料方面, 除磨削外, 主要是电火花、超声、激光和电化学等特种加工方法, 但这些方法, 有的效率低, 有的加工表面质量较差, 影响使用性能, 发展方向主要是高效复合加工技术。

2 高速切削技术和刀具材料

2.1 高速切削技术理论基础研究

高速切削是一项先进制造技术, 它包括高速硬切削、高速干切削、高进给速度切削和高切除率切削。高速切削技术的推广应用将大幅度提高生产效率和加工质量, 并降低成本。高速切削是一个相对概念, 如何定义, 目前还没有共识。20 多年来, 由于刀具材料和机床技术的进步, 高速切削的速度超过普通切削的 5~10 倍。对于 HRC35~65 的材料, 过去没有刀具可以切削, 如今也可在 100~400 m/min 的速度下进行高速切削。

1931 年德国 Carl Salomon 发表著名高速切削

[收稿日期] 2000-06-09; 修回日期: 2000-07-10

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59875091)

[作者简介] 艾 兴(1924-), 男, 江西东乡县人, 中国工程院院士, 山东工业大学教授, 博士生导师

专利以来，引起广泛重视。他指出，随切削速度提高，切削力减少，切削温度上升至最大值（临界值）；切削速度继续提高，切削温度随之降低，如图 1。这一变化规律一直有争议。1959 年美国 Kronenberg 和 1960 年前苏联 Кузнецов 分别用超高速切削试验证实了 Salomon 的预言^[1]，但更多的研究者没有证实这一规律。例如，J. F. McGee 的研究认为^[2]，切削时切削温度随切削速度提高而升高，不会像 Salomon 预言的那样，他指出，切削铝时，切削温度随切削速度提高而单调地升高直至铝材熔点。

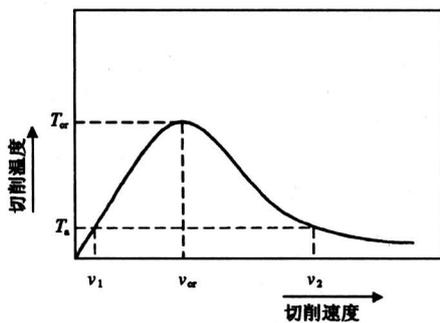


图 1 切削速度对切削温度的影响

Fig.1 Effect of cutting speed on cutting temperature

2.1.1 切削热和切削温度 由切削理论可知^[3]，切削时的热量主要来自剪切变形功和前、后刀面的刀-屑与刀-工的摩擦功，大体上剪切面生热占 75%，刀-屑接触区占 20%，刀-工接触区占 5%。干切削时，切削热主要由切屑、工件和刀具传出，周围介质传出的极少，小于 1%，可略去。

设剪切面和前刀面产生的热量流入切屑的比例分别为 R₁ 和 R₂，而后刀面产生的热量流入工件的比例为 R₃，则^[4,5]：

$$R_1 = \frac{1}{1 + 1.33 \sqrt{\frac{\alpha_1 \epsilon}{v a_c}}} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{\frac{F_f v_c \bar{A}}{a_w \lambda_1} - \bar{\theta}_s + \theta'_0}{\frac{F_f v_c \bar{A}}{a_w \lambda_1} + \frac{0.752 F_f}{a_w c_2 \rho_2} \sqrt{\frac{v}{\alpha_2 l_f \xi}}} \quad (2)$$

式中，a_c 为切削厚度；a_w 为切削宽度；l_f 为刀-屑接触长度；ε 为剪切变形；ξ 为切屑变形系数；F_f 为前刀面摩擦力；v_c 为切屑流动速度； \bar{A} 为面积系数，它与热源面积长与宽之比有关；α₁，α₂

为不同温度时工件材料的导热系数；λ₁ 为在某一温度时工件材料的导热系数；c₂ 为某一温度时切屑的比热容； $\bar{\theta}_s$ 为剪切面的平均温度，θ'₀ 为刀具的原始温度；ρ₂ 为在某一温度时切屑的密度。

由式 (1) 可看出，随 v 与 a_c 增大，R₁ 增加，但 v 的变化范围比 a_c 大，所以 v 对 R₁ 的影响比 a_c 大。也就是说，随 v 提高，剪切面上产生的热量流入切屑的比例 R₁ 增大，即切削速度越高，被切屑带走的热量越多，切屑温度升高，而切削（刀具）温度相应升高少。图 2 为硬质合金 P20 (YT15) 立铣刀铣削 S45C 钢件的实验结果，并与理论计算比较^[6]。结果表明，切屑带走的热量增加多倍，而刀具传出的热量几乎没有增加。图 3 为陶瓷刀具高速车削 (a_p = 1.5 mm, f = 0.315 mm/r) CK45 和 42CrMoS4 (HB275) 等几种钢件时，切屑温度（测切屑表面）随切削速度提高呈线性上升^[7]，即切削速度提高，切屑带走的热量增加，切屑温度升高很快；材料硬度越高，随切削速度提高，切屑带走的热量越多，切屑温度升高越快。

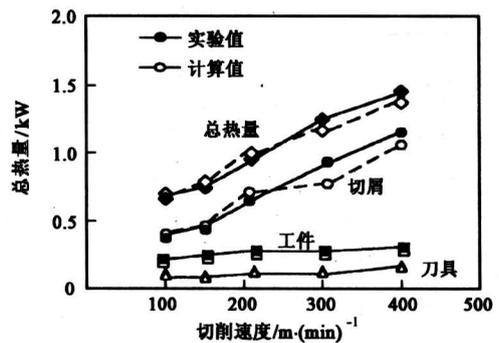


图 2 切削时流入各部分的热量^[6]

Fig.2 Distribution of heat in machining^[6]

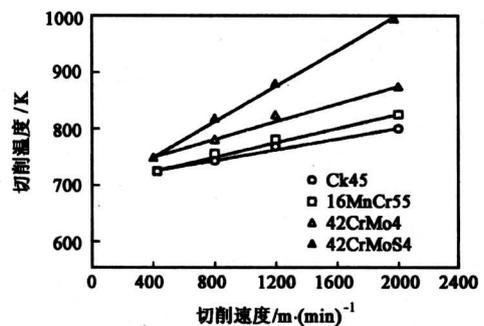


图 3 车削不同钢件时切削速度对切屑温度的影响^[7]

Fig.3 Effect of cutting speed on chip temperature in turning steels^[7]

图 4、图 5 分别为用 LT55 陶瓷刀具高速车削 35CrMnSiA (HRC45~48) 超高强度调质钢和用 SG-4 陶瓷刀具高速端铣 T10A (HRC58~64) 淬硬钢时, 切削速度与切削温度的关系曲线。该二图表明, 随切削速度提高, 切削温度呈指数曲线至一定温度后, 缓慢增加, 因为切削速度愈高, 切屑带走的热量愈大, 而刀具的切削温度升高很慢。陶瓷刀具 SG-4 在生产中高速硬切削 20CrMnTi (HRC60~62) 渗碳淬硬直齿锥齿轮端面也证明了这一点。在 $v = 100 \sim 150 \text{ m/min}$ ($a_p = 0.20 \sim 0.30 \text{ mm}$, $f = 0.15 \sim 0.19 \text{ mm/r}$) 时, 计算表明 90% 以上的热量被切屑带走, 切屑如火龙喷射, 完全被高温烧酥。可见速度越高, 或工件材料硬度越高, 随切削速度提高, 切屑带走的热量越多, 而切削(刀具)温度相应增加就少得多, 但逐步缓慢地升高到材料允许的温度极限。只要工件材料与刀具材料合理匹配, 在高至刀具材料允许的极限切削温度内进行高速切削(机床条件应许可)是完全可行的, 也是有利的。例如陶瓷刀具可允许 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$, 立方氮化硼刀具(CBN)近 $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ 。它们是目前用于高速切削黑色金属最常用的两类刀具材料。

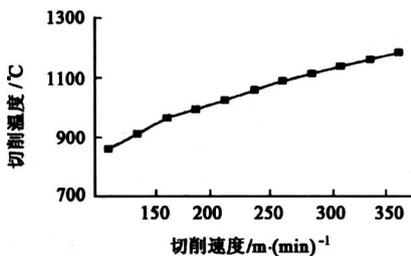


图 4 陶瓷刀具车削 35CrMnSiA (HRC45~48) 时切削速度对切削温度的影响

Fig.4 Effect of cutting speed on cutting temperature in turning

35CrMnSiA (HRC45~48) with ceramic tool

2.1.2 切削力 长期以来, 对切削力的理论分析研究做了大量工作, 取得了卓有成效的成果。但由于切削过程的复杂性, 影响因素很多, 和切削温度一样, 要精确计算切削力比较困难, 但理论公式可以比较充分地反映切削力与各影响因素之间的变化规律。切削时的主切削力 F_z 为^[5]:

$$F_z = \tau_s A_c [\cot \phi + \tan(\phi + \beta - \gamma_0)], \quad (3)$$

式中, τ_s 为工件材料的屈服剪应力; A_c 为切削层

截面积, $A_c = a_c a_w$; ϕ 为剪切角; β 为前刀面摩擦角; γ_0 为刀具前角。

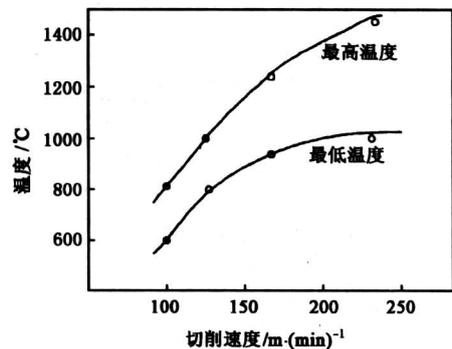


图 5 陶瓷刀具高速端铣 T10A (HRC58~64) 时切削速度对切削温度的影响

Fig.5 Effect of cutting speed on cutting temperature in facing milling T10A (HRC58~64) with ceramic tool

(3) 式中的剪切角 ϕ 直接反映切削变形的程度, 很多研究者致力于研究求 ϕ 角的公式, 其中最著名的有麦钱特 (Merchant)、李-谢弗 (Lee and Shaffer)、肖 (M.C.Shaw) 和奥克斯利 (Oxley) 等剪切角公式, 这些公式都表明, ϕ 主要取决于刀具前角 γ_0 和摩擦角 β 。

如果工件材料、切削面积 A_c 和刀具前角 γ_0 一定, 切削力则由 ϕ 、 β 而定, 但它们又直接受切削温度, 即切削速度的影响。当然, 对一定工件材料, τ_s 随切削温度变化也有改变。因此, 切削速度直接影响切削力的大小。随切削速度提高, 摩擦系数减少, 剪切角 ϕ 增大, 因此, 由 (3) 式可知, 随速度增加, 切削力降低。图 6 为切削力实验结果^[4]。实验用立方氮化硼 (CBN) 刀具, 工件材料为铸铁 (经 15 日自然时效处理), 切削深度 $a_p = 0.5 \text{ mm}$, 工件直径 $D = 300 \text{ mm}$, 实验时, 取切削速度乘进给量为定值 (在 v , a_p , f 三者中, f 对切削力影响最小)。随切削速度减少 (进给量增加), 主切削力 F_z 增加, 在 1600×0.22 点之前, 进给力 F_x 和推力 F_y 无甚变化, 但在此点之后, F_z 增加很快, 而 F_x 与 F_y 增加不明显。图 7 为 LT55 陶瓷刀具加工 35CrMnSiA 超高强度调质钢 (HRC45~48) 时的切削力随切削速度的变化情况 ($a_p = 0.20 \text{ mm}$, $f = 0.15 \text{ mm/r}$, 后刀面磨损量 $VB \leq 0.1 \text{ mm}$), 实验结果表明, 随切削速度提高, 切削力降低。可见, 在刀具材料和机床许可情况下,

尽可能提高切削速度是有利的。

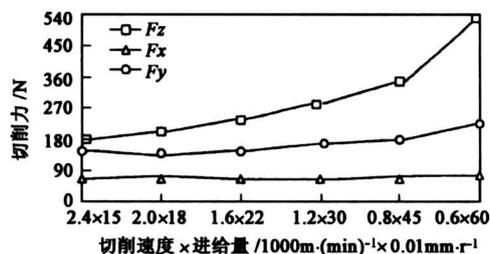


图 6 切削力实验结果

Fig. 6 Experimental results of cutting forces

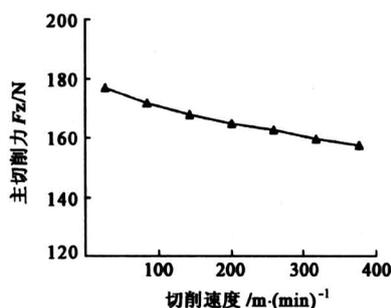


图 7 陶瓷刀具车削时切削速度对主切削力 F_z 的影响

Fig. 7 Effect of cutting speed on cutting force F_z in turning with ceramic tool

2.1.3 刀具磨损特征和磨损机理 高速切削时, 刀具承受很高的温度和压力, 加工钢件时, 视切削用量不同, 前刀面上的正应力可达数百乃至数千 MPa, 切削温度可达 1 000℃ 以上, 因而造成刀具的磨损与破损。高速切削常用的陶瓷刀具和 CBN 刀具的磨损规律与硬质合金刀具基本相同, 切削速度对磨损影响最大。在前一节实验研究用 CBN 刀具加工铸铁的切削力时, 同时也研究了刀具的磨损, 实验结果表明^[4]: 切削速度愈高, 刀具磨损愈严重。在 $v \times f$ 从 2 400 m/min × 0.15 mm/r 到 2 000 m/min × 0.18 mm/r 和从 1 600 m/min × 0.22 mm/r 到 1 200 m/min × 0.30 mm/r 时刀具磨损变化梯度特别快, 其磨损形态也是前刀面形成月牙洼 (台阶), 后刀面形成小棱面, 磨损棱面上有明显的机械摩擦犁沟 (磨料磨损) 痕迹。

用陶瓷刀具高速切削钢、铁及其合金时, 磨损形态与 CBN 刀具大致相同, 但有很微小崩刃。用晶须增韧氧化铝陶瓷刀具 JX-1 加工高温镍基合

金时, 边界磨损较严重。详细研究陶瓷刀具高速切削不同材料时的磨损机理结果表明^[8], 氧化铝基陶瓷刀具的磨损原因主要是磨料磨损与粘结磨损。用 LT55 和 SG-4 与 45# 钢和 35CrMnSiA 钢在真空炉中加热到 1 000~1 200℃, 保温 30~75 min 后, 经电子探针表明: 刀片中没有发现工件材料的成分, 而工件中也没有见到陶瓷刀片材料的成分扩散进去。但 SiC_w 晶须增韧的氧化铝刀具 JX-1 与钢结合进行扩散试验, 就发现 Fe、Si 相互扩散的现象。因此含 SiC_w 较多的陶瓷刀具不宜于加工铁基金属。

研究表明^[9], SiC_w 平行于热压轴方向的平面耐磨性能优于垂直于热压轴方向的。磨损过程中 SiC_w 有氧化现象, 加速了刀具的磨损, 摩擦表面主要是晶粒的塑性变形, 磨料摩擦犁沟以及 SiC_w 的氧化脱落造成的表面缺陷引起的基体晶粒的断裂破损造成磨损, 因此使用 SiC_w 增韧陶瓷刀具时, 应选择 SiC_w 平行热压轴方向的平面作为主要的耐磨刀面。

研究表明^[10], 陶瓷刀具材料的成分及其配比、晶粒直径、晶粒分布均匀性、微观结构参数和显微组织对切削性能有重要的影响。在一定范围内, 金属含量较多、耐磨相比较少的陶瓷刀具, 强度和断裂韧性虽然较高, 但耐磨性较差, 特别是在高温下。在陶瓷刀具材料中, 碳化物均匀而呈网状分布时, 有利于提高其性能。陶瓷刀具材料的晶粒细化 ($\leq 1 \mu\text{m}$), 可减少平均自由程和裂纹数, 缩短原始裂纹长度, 增加晶界, 加强裂纹扩展障碍, 降低残余应力, 缩小形成裂纹的滋生地, 最有利于减少陶瓷刀具破损, 改善切削性能。

应当指出, 传统的刀具磨损寿命与切削用量之间的关系 (即 Taylor 公式) 是以刀具的平均寿命为依据建立的^[11]。实际上, 切削时, 由于刀具和工件材料性能的分散性, 所用机床及工艺系统动、静态性能的差别, 以及工件毛坯加工余量不均匀或材质不均匀等条件的变化, 刀具磨损寿命是随机变量。实验结果表明, 刀具磨损寿命变化规律服从正态分布或对数正态分布。在用陶瓷刀具、CBN 刀具高速切削时要特别注意这一点。

2.1.4 陶瓷刀具破损理论的建立 高速切削用的硬质合金刀具、陶瓷刀具、CBN 刀具等硬度高, 耐磨性好, 耐热性高, 但比高速钢脆性大, 强度低, 因此, 高速断续切削时常发生破损, 特别是

陶瓷刀具。刀具破损有早期和后期两种。早期破损是切削刚开始或短时间切削后一般冲击次数为 10^3 次左右即发生的破损。这时前、后刀面尚未产生明显的磨损，一般 $VB \leq 0.1$ mm。陶瓷刀具高速硬切削和断续切削时最常出现这种破损，其主要原因是机械冲击造成应力超过刀具材料许可强度导致脆性断裂。后期破损是在加工一定时间之后，刀具材料因冲击、机械疲劳和热疲劳而引起的破损。早期和后期两种破损形态均属脆性断裂。陶瓷刀具脆性破损的形态主要有崩刃、剥落、碎断和裂纹。在切削温度超出刀具材料允许的温度范围，陶瓷刀具也发生塑性破损。

陶瓷刀具破损是一种典型的随机现象。必须用概率论和数理统计方法研究这种规律。大样本试验表明^[12]，陶瓷刀具断续车削时其破损规律服从威布尔分布，而端铣时则服从对数正态分布（或近似为威布尔分布）。因为陶瓷刀具脆性较大，很容易发生早期破损，因此，不可能按传统的 Taylor 公式决定陶瓷刀具断续切削时的破损寿命与切削条件之间的函数关系，而应按刀具破损寿命分布规律决定破损寿命与切削条件的关系。图 8（横坐标为冲击次数 N 的对数 $\ln N$ ，纵坐标为正常冲击次数累积频率百分比 $F(N)\%$ ）为 SG-4 陶瓷刀具端铣淬硬 T10A（HRC58~65）时切削速度对刀具破损寿命影响的实验结果（铣刀直径 160 mm， $\gamma_f = \gamma_p = -5^\circ$ ， $a_p = 0.30$ mm， $a_f = 0.063$ mm/z），呈对数正态分布：

$$F(N) = \int_0^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma N} \exp\left[-\frac{(\ln N - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dN, \quad (4)$$

式中， μ 为冲击次数 N 的对数均值； σ 为冲击次数的对数标准差， μ 和 σ 根据实验数据由数理统计法估计。

由图 8 可知，随 v 提高，刀具破损概率大大增加。实验结果表明，切削速度为 110 m/min 时，SG-4 陶瓷刀具可以成功地端铣高硬钢。同理，可以求得进给量、切削深度、刀具几何参数等合理切削条件。在生产实践中，应用这种破损理论，保证了陶瓷刀具对淬硬材料成功地进行高速断续切削。

详细研究了高速断续切削时的刀具破损原因^[13~16]。刀具破损主要原因是循环冲击载荷（机械和热冲击）作用，或机械冲击造成的应力超过刀具材料许可的强度，或机械疲劳和热疲劳作用在刀

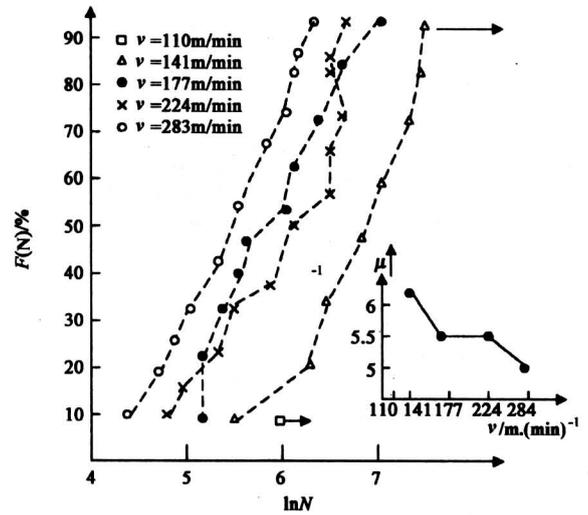


图 8 切削速度对刀具破损寿命的影响

Fig. 8 Effect of cutting speed on tool life by fracture

头内形成裂纹及存在的裂纹或类裂纹失稳扩展。用激光散斑法实验分析了在不同切削条件下切削时刀头内的机械应力分布，并用高功率脉冲激光器（YAG-580）模拟刀具在端铣加工中的冷（空切）和热（切削）状态下对刀具的热震破坏，同时进行实际端铣实验，测定不同条件下切削力与切削温度，再用有限元法具体分析刀头内机械与热应力的分布规律。用 SEM 对不同情况的刀具破损面进行微观分析。实验结果表明，用陶瓷刀具端铣调质 45# 钢时，低速 30 m/min 下，刀具主要承受机械冲击作用，中速 185 m/min 时主要承受机械和热冲击综合作用，高速 380 m/min 时，热冲击对刀具破损起主导作用。

2.1.5 陶瓷刀具可靠性评价新方法 陶瓷刀具的可靠性是实际应用中的一个关键问题。大量试验结果表明^[17]，对于一定的刀具材料，其磨损寿命变异系数 C_s （样本刀具磨损寿命的方差与其均值之比）几乎为一定值。因此，可以用 C_s 来评价其磨损可靠性。陶瓷刀具材料可靠性直接与抗弯强度 σ_b 、硬度 H 与断裂韧性 K_{IC} 有关。研究表明^[18]，可以用 $K_{IC}^{3/4} \cdot H^{1/2}$ 和切削温度来评价陶瓷刀具前、后刀面的耐磨性能，即在相同的切削温度下，此值越大，耐磨性能越高。

研究表明^[14]，在相同裂纹扩展速率和相同工作条件下，不同组份陶瓷刀具材料的破损寿命主要

取决于其力学性能，因此，可以用已建立的陶瓷刀具断裂力学—随机特性破损判据来评价陶瓷刀具的破损可靠性。

对于晶须增韧陶瓷刀具可以用 K_{IC} 、 σ_b 和 H 评价其破损可靠度。但是由于 SiC_w 与 SiC_p 协同增韧的复相陶瓷刀具的界面结合强度和材料的微观结构组织具有紧密的直接关系，所以用界面结合强度作为评价陶瓷刀具破损可靠度指标，可以达到刀具破损寿命可靠度和刀具材料质量控制的目的。根据晶须与颗粒协同增韧机理，已建立了界面结合强度公式^[19]。

2.1.6 高速切削的表面质量 切削速度 v 对加工表面粗糙度、加工硬化和残余应力均有影响。图 9 为高速铣削铝合金时切削速度对加工表面粗糙度的影响（机床为 ACE-V500 型立式加工中心，工件材料为 Si 含量 $\leq 12\%$ 的铝合金）。随切削速度增加，表面粗糙度显著降低。研究表明^[3]：陶瓷刀具 SG-4 端铣淬硬钢（工件材料为 T10A, HRC58~65）时，随速度增加，加工硬化程度加大。陶瓷刀具 SG-4 端铣 45# 钢时，随速度增加，工件表面的压应力略有减少，因速度大，切削力降低，工件表面所受挤压减轻。

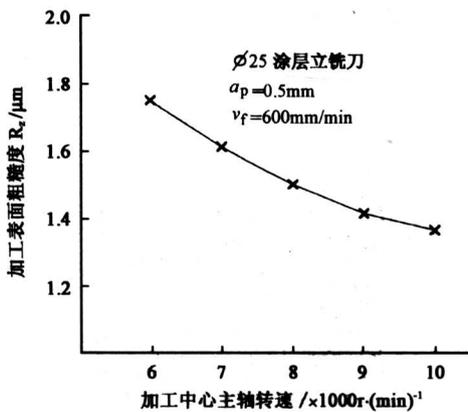


图 9 切削速度对加工表面粗糙度的影响

Fig.9 Effect of cutting speed on machined surface roughness

2.2 高速切削用刀具材料^[20~29]

对高速切削用的刀具材料，最突出的要求就是耐高温和高温下的硬度、韧性及其可靠性。目前国内可用于高速切削的主要刀具材料有：TiC 基硬质合金（金属陶瓷）、硬质合金涂层刀具、陶瓷刀具、聚晶金刚石（PCD）和立方氮化硼（CBN）等^[4]。

它们各有特点，适应的工件材料和切削速度范围不同。陶瓷刀具和 CBN 刀具在高速切削领域有其突出优点，可广泛应用，但 CBN 刀具对以铁素体为主的工件不宜使用且价格昂贵。

2.2.1 建立陶瓷刀具研究新体系 对陶瓷刀具最突出的要求是高可靠性。它与材料成分、制造工艺、微观结构及物理机械性能密切相关，多年来的研究证实了这一点。因此可以建立以高可靠性为目标的、融合陶瓷刀具切削加工与刀具材料开发于一体的陶瓷刀具研究新体系（见图 10），根据切削可靠性优化设计陶瓷刀具材料。

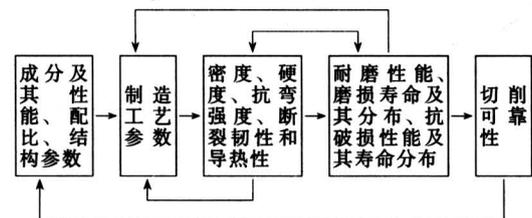


图 10 陶瓷刀具研究新体系

Fig.10 New system for development of ceramic cutting tools

2.2.2 加速先进陶瓷刀具的开发 根据上述思路，10 多年来，基于切削可靠性，深入研究开发了 6 个品种系列、12 个牌号的新型陶瓷刀具材料。在 80 年代初研制成功 LT 系列陶瓷刀具材料基础上，80 年代末研究成功 SiC 晶须（ SiC_w ）增韧氧化铝基陶瓷刀具材料（JX 系列），首先优化了 SiC_w 含量，根据热胀失配原理分析了其中的 SiC_w 最佳匹配，应以保证载荷通过界面有效地传给晶须，并使界面先于基体脆性断裂为原则。

90 年代中研究成功添加硼化钛 TiB_2 增强氧化铝基陶瓷刀具材料（LP 系列）。以径向残余应力产生不贯穿的裂纹为条件，得出在 Al_2O_3/TiB_2 材料中， TiB_2 的体积分数为 44.5%（极限量）。在此基础上，深入研究了晶须增韧和颗粒补强机理的协同作用。根据能量耗散理论，建立了晶须桥接、拔出与裂纹偏转增韧理论模型和颗粒裂纹偏转以及微裂纹区增韧的理论模型。以此为基础，分别研究了在 Al_2O_3/TiB_2 中加入 SiC_w 和在 Al_2O_3/SiC_w 中加入 SiC_p 颗粒各自构成新的三相陶瓷刀具材料。随着增韧补强机理研究的深入，又研究了添加特殊粉末以形成极微细裂纹达到增韧陶瓷刀具材料的目的，以及某些稀土元素在复相陶瓷中可以清洁表面、提高界面结合强度、活化烧结与质点强化等作用机制

而改善复相陶瓷刀具材料的力学性能的机理, 研制成功了添加某些特殊粉末和稀土的 LD 系列陶瓷刀具材料。

陶瓷刀具材料的热导率和抗拉强度较低, 如果按导热性能和应力分布设计陶瓷刀具材料的组分分布, 使其表层具有最大导热系数, 则有利于切削热的迅速传出, 同时表层具有最小的热膨胀系数, 使材料热压过程中形成压应力以抵消切削过程的拉应力, 也就是设计材料的组分形成梯度分布。根据这种构思, 最近开发出一种全新的梯度功能陶瓷刀具材料 (FG 系列), 生产应用表明, 其切削性能比非梯度分布的陶瓷刀具优越得多。陶瓷刀具的最大弱点是抗弯强度仍然较低。如果采用复合刀片形式, 选用高硬度的 Al_2O_3 基的复相陶瓷材料为耐磨相, 配合应用高强度、高弹性模量的硬质合金作为基体材料, 通过热压制成陶瓷/硬质合金复合刀片, 则可显著提高抗弯强度。经过几年的研究, 研制成两种陶瓷/硬质合金复合刀片 (FH-1 和 FH-2), 有单面陶瓷和双面陶瓷, 中间为硬质合金, 两者的等效抗弯强度比同类陶瓷刀片平均提高 20%, 断裂韧性平均提高 8.5%。生产验证结果表明, 刀具寿命提高 20%~30%, 而抗破损能力提高更大。这些刀具材料不仅填补了国内空白, 其中 JX-2、LP-2、LD-1 和 FG、FH 等国外也未见报道。JX 系列的 JX-2 加工某火箭的电铸纯镍, 刀具寿命很长。LT 系列的 SG-4 和 FG 系列的 FG-2 与 FH 系列的 FH-2 陶瓷刀具为国内目前加工淬硬钢 (HRC55~65) 最好的陶瓷刀具, 已被广泛应用, 取得重大经济与社会效益。

3 超硬材料高效加工新技术^[25~31]

超硬材料的出现和发展为现代工业的技术进步开拓了广阔的前景。它的应用给各工业部门带来重大的经济效益和社会效益, 现在最常用的这类材料主要有聚晶金刚石 (PCD)、聚晶立方氮化硼 (PCBN)、陶瓷和各种复合材料 (如 TC 轴承套为金刚石、Si、Ti、Mo、Ni 与硬质合金粉末等的烧结体), 其最大特点是硬度高、耐磨损, 但性脆、强度较低, 影响其大力推广应用的主要障碍之一是加工困难, 加工效率低。如何有效地解决超硬材料加工问题, 若干年来世界各国极为重视。这里介绍近十年来研究开发成功的超硬材料高效复合加工新技术。

3.1 断续磨-间隙脉冲放电复合加工技术

如图 11 所示, 电源为直流电源, 其正负极分别与工件和特制工具相联接, 特制工具圆周 (或端面) 上均匀相间分布着不导电的金刚石磨块和导电的工具电极。加工时, 砂轮工具旋转, 当非导电的金刚石磨块接触工件时, 产生磨削作用, 继之而来的工具电极对工件进行放电加工 (调整电压、间隙和齿宽等可改变放电脉冲参数以适应不同加工要求), 实现断续磨-间隙脉冲放电复合加工 (EDGM)。

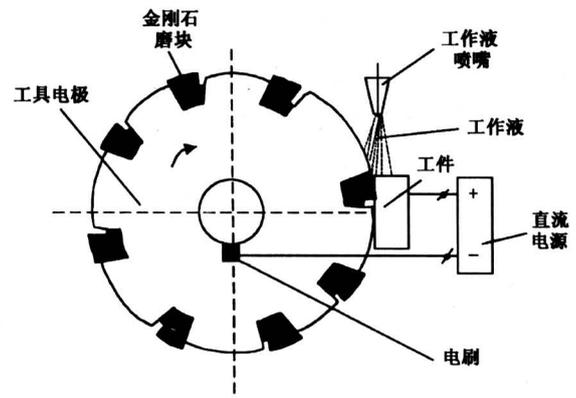


图 11 断续磨-间隙脉冲放电复合加工原理图

Fig.11 Principle of electrical-discharge grinding machining (EDGM)

磨削过程中, 磨粒切入工件表面, 局部产生一个非弹性变形区, 当作用压力达到某临界值后, 变形流动突然发展成为一个小的中央裂纹, 随着砂轮的切入, 该裂纹随之变大, 磨粒切出工件表面时, 中央裂纹开始闭合, 侧向裂纹形成并向表面扩展, 最后形成切屑脱离工件。一般电阻率小于 $100 \Omega \cdot \text{cm}$ 的超硬材料, 可以放电加工。复合加工时, 放电作用使超硬工件表面局部材料熔化、汽化并抛离到工作液介质中, 或使工件材料通过热应力作用蚀除。放电作用后, 工件表层具有一定的残余应力和显微裂纹, 为继之而来的磨削创造了有利条件。磨块把放电作用产生的影响磨除, 磨块的断续磨削, 提高了磨块自砺性和磨削能力, 改善了散热条件。因此, 复合加工中, 磨削和放电加工互为有利条件, 从而可提高效率和质量。图 12 和 13 分别为复合加工聚晶金刚石与陶瓷材料时, 不同加工方法的加工效率及表面粗糙度的实验结果。从图可知, 复合加工效率高, 加工表面质量较好。表 1 为不同方

法加工陶瓷材料时表面显微硬度 HV 的测量值。结果表明，复合加工后的表面硬度与磨削基本相同。

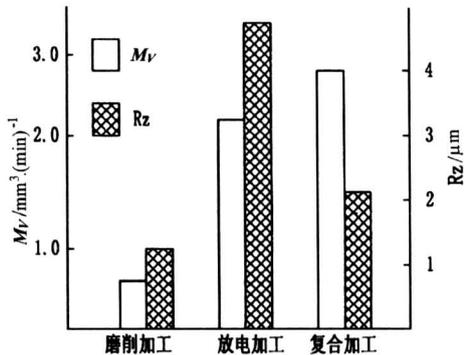


图 12 不同方法加工 PCD 时的加工效率及表面粗糙度

Fig.12 Machining efficiency and surface roughness in different machining methods for PCD

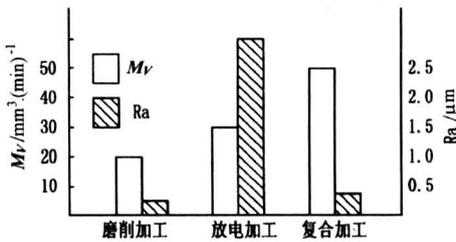


图 13 不同方法加工陶瓷 SG-4 时的加工效率及表面粗糙度

Fig.13 Machining efficiency and surface roughness in different machining methods for SG-4 ceramic

表 1 不同方法加工表面显微硬度 HV 测量值
Table 1 Measuring HV values of machined surface hardness in different machining methods

试验号	磨削加工	放电加工	复合加工
1	2 289	1 682	2 191
2	2 239	1 533	2 055
3	1 971	1 661	1 971
平均	2 166	1 625	2 072

放电参数对加工表面质量有一定影响。电压高时，以放电加工为主，加工表面残留有部分放电加工影响区，该影响区的硬度略有降低，而成分并无明显变化。在电压一定的条件下，随着进给速度增

加，加工效率提高，加工表面粗糙度亦略有增大，但不明显。放电频率对复合加工效率有显著影响，频率很高时，脉冲放电持续时间短，热量来不及扩散，放电蚀除材料中汽化比例大，能量利用率低，放电蚀痕小，加工效率低；放电脉冲频率很低时，放电持续时间长，由于传热而损失的热量较多，放电热量影响层大，能量利用率低，加工效率低，如图 14。因此，在其它条件一定时，放电脉冲频率有一个最佳值。随着放电脉冲电流的增加，脉冲能量增大，并且能量密度加大，汽化爆炸以及熔融、材料的抛出作用增强，放电蚀痕增大，因此，加工效率提高，但加工表面粗糙度增大。复合加工中，特种工具上磨块和工具电极所占比例不同影响加工的效果。在磨块和电极数量一定的条件下，电极所占比例小，放电脉冲能量小，放电蚀除作用微弱。这时是以磨块的断续磨削作用为主，加工质量较好，但不能充分发挥放电加工的高效特点，因而加工效率较低，并且特制工具的制造成本和损耗费用均较高。反之，电极所占比例太大，放电时间太长，部分转换的热能将通过热传导损失，放电能量利用率降低，热影响层加大，而且由于磨块所占比例小，磨削作用很弱，不能及时把放电热影响层磨除，加工表面质量较差。所以要选一个合理的磨块与电极数量比例，以充分利用它们互为有利条件的特点。特制工具是专门设计制造的。

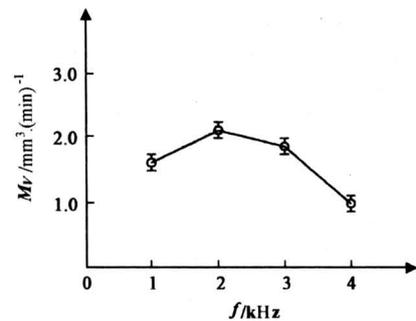


图 14 不同放电脉冲频率条件下复合加工 PCD 效率 (实际条件与图 12 相同)

Fig.14 Machining efficiency of EDM for PCD in different impulse frequency

断续磨-间隙脉冲放电复合加工是粗、半精和精加工复合加工超硬材料的有效方法，为充分发挥其作用，一般在加工初期，采用较高的放电参数(如提高脉冲电压、脉冲电流)，突出其放电加工的高效率特点；加工临近结束时，可减小放电参数，

或干脆切断放电作用，充分发挥断续磨削高质量的特点，把放电作用影响层完全磨除，得到高质量加工表面。在生产中采用该项技术磨削 TC 轴承套（直径 200 mm，长 350 mm，壁厚 10 mm，原用金刚石砂轮磨削内孔需要 24~25 h，磨削外圆需要 10~12 h），加工外圆只需 1 h，加工内孔只需 4.5 h，大大提高了效率，保证了质量。

对于电阻率大于 100 Ω·cm 的非导电超硬材料，可采用断续磨削加工技术，断续磨削 PCD 时，效率比连续磨削提高 3 倍，加工表面粗糙度基本相当^[28]。

3.2 超声与放电复合加工新技术

根据成型孔加工运动学分析建立的运动学图谱，为高效加工超硬材料的成型孔，研究开发了超声频间隙脉冲放电加工、超声-间隙脉冲放电复合加工、回转式超声频间隙脉冲放电加工和回转式超声-间隙脉冲放电复合加工等新方法。

3.2.1 超声频间隙脉冲放电加工法 该方法基本原理如图 15 所示。但喷嘴只喷工作液而不是添加磨料的磨料悬浮液。工具电极以超声（16kHz 以上）周期性上下振动，使极间距离随工具电极高频伸缩而改变，直流电源的两输出端分别与工件和工具相接，在极间形成一个周期性变化的电场，借助极间距离的改变，极间电压击穿极间的工作液介质，产生放电和停歇的交替，实现极间的脉冲放电，使放电点的工件材料熔化、汽化并抛离工件表面。

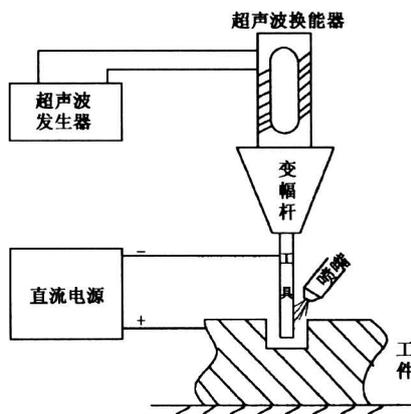


图 15 超声频间隙脉冲放电加工原理

Fig.15 Principle of electrical-discharge machining (EDM) by ultrasonic frequency

设直流电源输出电压（即开路电压）为 U ，在工具和工件之间接通直流电源时，在两个电极之间形成一个电场，其强度大小为：

$$E = \frac{U}{\delta}, \tag{5}$$

式中， δ 为电极间距离。

当 U 不变时， E 随 δ 的减小而增大。当 E 增加到极间工作液介质的抗电强度 E_{kp} 时，工作液介质被击穿，产生放电。对于已选定的工作液介质，它的 E_{kp} 一般是固定不变的。工具端面超声波振动方程为：

$$y = A \sin 2\pi ft, \tag{6}$$

式中 A 为振幅， f 为频率。

t 时刻，工件与工具之间的间隙为：

$$\delta = \delta_0 + A \sin 2\pi ft, \tag{7}$$

式中， δ_0 为工具静止时工具端面与工件表面之间的平均距离。

设与 E_{kp} 对应的间隙距离为 δ_{kp} ，实现间隙脉冲放电的间隙条件式为：

$\delta_{max} > \delta_{kp} > \delta_{min}$ (δ_{max} 为工具一个振动周期中最大间隙值， δ_{min} 为其最小间隙值)。

为了便于分析计算，假设间隙击穿以后，放电通道能够继续放电的最大间隙等于间隙击穿时的距离。因此，在间隙合适的前提下，图 16 可以作为直流电源在工具超声波振动调制下产生间隙脉冲放电的过程示意图。

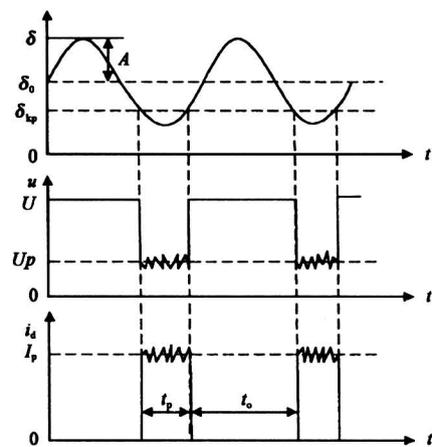


图 16 超声频间隙脉冲放电过程示意图

Fig.16 Electrical-discharge Process of EDM by ultrasonic frequency

根据超声频间隙脉冲放电加工原理，可导出一

个间隙放电脉冲的放电时间 t_p :

$$t_p = \frac{1}{2\pi f} \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\delta_0 - \delta_{kp}}{A} \right) \right], \quad (8)$$

而对应的放电停歇时间 t_0 为:

$$t_0 = T - t_p, \quad (9)$$

式中 T 为超声波振动周期, $T = 1/f$, f 一般为 16 ~ 25kHz。

间隙脉冲放电的电流峰值为:

$$I_p = (U - U_p)/R, \quad (10)$$

式中 U_p 为火花放电间隙维持电压, R 为放电回路电阻。

单次间隙脉冲放电的能量大小 W_p 为:

$$W_p = U_p \cdot I_p \cdot t_p = \frac{U_p(U - U_p)}{2\pi f R} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\delta_0 - \delta_{kp}}{A} \right) \right]. \quad (11)$$

至此得到了直流电源在工具端面超声波振动调制作用下产生间隙脉冲放电的三个重要参数 t_p 、 I_p 和 W_p 。它们对间隙脉冲放电加工的材料去除率和质量起决定性作用。由上面计算公式可知, 当工具振动频率一定时, 改变间隙 δ_0 和/或工具振动的振幅就可以改变放电时间 t_p 、停歇时间 t_0 、有效脉宽系数 (t_p/t_0) 以及脉冲能量等。但为了精确地控制放电参数, 研制了放电脉冲能量可控的直流电源。

对这种方法的加工过程特性进行了详细的理论与实验研究, 建立了材料去除率模型、加工表面粗糙度模型和加工间隙模型。研究结果表明: 工具电极的超声振动可产生空化作用、泵吸作用与涡流运动, 极大地改善工作液循环条件, 提高脉冲利用率 80% 以上, 有效地提高电能利用率, 降低能耗。同时由于空化作用, 能使每次放电后有更多的已熔化材料抛出加工区, 因而提高了加工效率。这种放电加工方法与一般的电火花加工不同, 它的放电参数取决于直流电源输出电压、工具振动频率、振幅、最小极间间隙等因素。加工陶瓷材料实验结果与超声波加工和电火花加工分别相比, 具有较高的加工材料去除率, 而尺寸精度与超声波加工时几乎一样。加工表面粗糙度稍高于超声波加工, 但低于电火花加工。

3.2.2 超声-间隙脉冲放电复合加工法 该方法的基本原理与图 15 相同, 只是工作液中添加了磨料而成磨料悬浮液。在这里, 利用工具的超声振动对工作液中的磨料颗粒进行高频撞击, 冲击工件表

面, 去除材料。通过调整工具电极的振动频率、振幅与极间直流电压等可实现对放电参数的控制。在超声-间隙脉冲放电复合加工过程中, 由于使用了磨料, 大大地减小了短路现象的发生。加工时工具电极靠其自重以恒定的静压力作用在工件表面上, 因此极间最小距离取决于工作液中磨料粒径的大小。为了使加工表面放电均匀, 改善工作液的流动性, 便于电蚀产物从放电间隙中排出, 增加放电加工的稳定性, 加工过程中作用在工件表面的静压力比普通的超声加工中选用的静压力小得多, 因而复合加工过程是以电火花脉冲放电加工起主要作用的过程。但由于磨料的存在, 工具超声波振动改变了工作液介质的击穿过程, 改善脉冲放电状态。在没有磨料情况下, 可认为工具与工件极间电场是均匀电场, 由于工作液中含有大量的磨料颗粒, 其介电系数与工作液的介电系数不同, 因而会使电场发生畸变, 工作液介质也变得容易被击穿放电。设磨料颗粒为介质球, 对引起的电场畸变进行理论分析可知, 介质球之所以会使极间均匀电场发生畸变是由于介质球体被极化, 使球面上出现了束缚电荷造成的结果。工作液中含有大量磨料颗粒, 其浓度在整个加工过程中变化很小, 工作液性能变化程度小, 从而提高了加工过程稳定性, 有利于加工效率和加工精度的提高。对超声-间隙脉冲放电复合加工的材料去除率、加工精度、加工表面粗糙度进行了理论分析并对陶瓷材料进行了加工实验研究, 建立了复合加工材料去除率理论模型和加工精度模型。实验结果表明, 超声-间隙脉冲放电复合加工陶瓷材料, 与单独电火花加工相比, 材料去除率提高 1 倍, 而与超声频间隙脉冲放电加工相比, 材料去除率高出 10% ~ 20%, 加工表面粗糙度与加工精度基本一致, 因而更具有实际价值。

3.2.3 回转式超声-间隙脉冲放电复合加工法

该方法和回转式超声频间隙脉冲放电加工法原理分别与超声-间隙脉冲放电加工和超声频间隙脉冲放电加工原理相同, 但工件或工具 (或者工件、刀具同时) 旋转, 它适于超硬材料圆孔加工, 其加工孔形状精度主要决定于工具或工件的回转精度, 有利于消除工具本身的几何误差。这种方法最适合于非导电超硬材料的孔加工, 加工时切断直流电源, 工具电极换成磨具 (如指状金刚石砂轮), 工作液不加磨料。配合工作台的移动, 可加工沟槽。这就形成超声磨削复合加工技术, 在生产中加工非导电陶

瓷取得相当满意的结果。

以上研究开发的多种超硬材料加工新技术应用于石油钻探的钻头 PCD 刀片、TC 轴承套和陶瓷材料等的加工, 已获得重大经济效益与社会效益。

4 结论

1) 高效加工技术是先进的制造技术。它可以大幅度地提高生产效率和加工质量, 并降低成本。在我国现有条件下, 大力加强高效加工技术的研究和推广应用, 对提高加工水平, 加快新产品开发具有十分重要的意义。

2) 在高速切削领域, 切削速度越高, 切屑带走的热量越多, 切削温度升高愈缓慢; 工件硬度越大, 切屑带走的热量也越多。切削力随切削速度的提高而减小。这表明在切削加工中, 只要刀具材料和机床条件许可, 提高切削速度是有利的。

3) 在高速切削范围内, 刀具的磨损随切削速度提高而增加, 其磨损寿命是随机分布的, 但可按 Taylor 公式决定。氧化铝基陶瓷刀具高速切削时主要是磨料磨损和粘接磨损, 未发现扩散磨损。断续切削时, 主要损坏形式是破损, 其破损寿命应按所建立的破损理论来确定。

4) 生产实践表明, 所开发的陶瓷刀具适用于高速切削, 已取得良好的效果。但和其它刀具材料一样; 应该针对不同工件材料性能和加工方式与机床条件, 合理匹配和选择, 以保证高速切削顺利进行。

5) 超硬材料的应用日益广泛, 但高效加工存在很大困难。所建立的多种复合加工新技术是高效加工超硬材料的先进技术, 设备比较简单, 成本低, 推广应用可获得重大经济效益。

参考文献

- [1] 狩野勝吉, データでみる切削加工の最先端技術 [M]. 东京: 工业調査会, 1992
- [2] Schule H, et al. High-speed machining [J]. Annals of CIRP, 1992, 41 (2): 637~643
- [3] 艾兴, 萧虹. 陶瓷刀具切削加工 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [4] 艾兴, 刘镇昌, 赵军, 等. 高速切削技术研究和应用 [A]. 全国生产工程第8届学术大会暨第3届青年学术会议论文集 [C]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 146~149
- [5] 周泽华. 金属切削理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [6] 平尾政利. 高速切削时における切削熱の舉動に關する研究 [J]. 精密工学会誌, 1998, 64(7):1 067~1 071
- [7] Toenshaff H K, et al. Chip formation at high-cutting speed [A]. High Speed Machining [C]. ASME, U. S. A, 1984. 95~100
- [8] Ai Xing, Xiao Hong. Study on the wear mechanism of composite ceramic tool in turning steel [A]. 4th Int. Symposium on Production Control Proceedings [C]. Beograd, 1986. 65~69
- [9] 萧虹, 艾兴. 晶须增韧陶瓷刀具的磨损机理 [J]. 机械工程学报, 1992, 28 (3): 1~5
- [10] 孙永青, 艾兴. 陶瓷刀具材料微观结构及其对切削性能的影响 [A]. 信息技术与先进制造系统学术会议论文集 [C]. 南京: 华东工学院, 1990. 294~297
- [11] 艾兴, 李兆前. 金属切削刀具可靠性的研究 [A]. 中国高校金属切削研究会第四届学术年会科研论文选 [C]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 12~17
- [12] 萧虹, 艾兴. 陶瓷刀具端铣淬硬钢时的破损规律研究 [J]. 山东工业大学学报, 1984, (1): 9~17
- [13] Ai Xing, Li Zhaoqian. Characteristics of ceramic tool fracture [A]. In: Xing S L, Low I M. Ceramics for Application-I [C]. Switzerland: Trans. Tech. Publishing, 1994. 165~220
- [14] 艾兴, 夏传波. 陶瓷刀具断续车削钢时破损判据的研究 [J]. 机械工程学报, 1989, (3): 1~7
- [15] Huang Chuanzhen, Ai Xing. Study on the technique to measure tip stress with laser in cutting process [A]. Proc. of 6th Int. Manufacturing Conference with China [C]. Hong Kong: Int. Academic Publisher, 1993. 363~366
- [16] 黄传真. 许崇海, 艾兴. 端铣淬硬钢时新型陶瓷刀具热破损的强激光模拟 [J]. 机械强度, 1996, (4): 21~25
- [17] 许崇海, 艾兴, 黄传真. 氧化铝基陶瓷刀具切削可靠性研究——基于磨损的刀具可靠性 [J]. 工具技术, 1998, (1): 4~7
- [18] 邓建新, 艾兴. $Al_2O_3 - TiB_2$ 陶瓷刀具材料的研制及耐磨性能研究 [J]. 现代技术陶瓷, 1994, 15 (2): 8~13
- [19] 黄传真, 李兆前, 艾兴. 评价新型陶瓷刀具破损可靠性的新指标 [J]. 机械强度, 1996, 18(1): 69~72
- [20] 艾兴, 赵军, 刘战强, 等. 推动陶瓷刀具研究走上国际先进行列 [J]. 中国机械工程, 1999, 10(9): 1 033~1 035

- [21] Ai Xing, Zhao Jun, et al. Development of an advanced ceramic tool materials - Functionally gradient cutting ceramics [J]. *Materials Science and Engineering, A*, 1998, 248 (1-2): 125~131
- [22] 许崇海, 艾兴, 等. 特殊添加剂陶瓷刀具材料的研制及其应用——稀土硬质合金刀具材料研究进展 [J]. *机械工程材料*, 1997, 21(3): 1~3
- [23] 李兆前, 艾兴, 等. 新型陶瓷复合片的成型机制研究 [J]. *中国机械工程*, 1996, (7): 71~73 (增刊)
- [24] 邓建新, 艾兴, 等. 陶瓷-硬质合金复合片的界面结合机制 [J]. *科学通报*, 1997, 42 (12): 1 338~1 346
- [25] Ai Xing, Zhang Jianhua. Development of advanced technology for superhard materials [A]. *Proc. of 2nd ICMT [C]. Hong Kong, 1993. 100~103*
- [26] Zhang Jianhua, Ai Xing. Study on the combined technology for the precision machining of conductive superhard materials [A]. *Proc. of CIRP Conference on Precision Engineering and Manufacturing System [C]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991. 385~393*
- [27] 霍孟友, 艾兴, 等. 超声电火花同步复合加工用脉冲电源设计 [J]. *电加工*, 1997, (4): 27~29
- [28] Ai Xing, Zhang Jianhua. Study on the grinding of polycrystalline diamond with slotted diamond wheel [A]. *Proceedings of NAMRC XXIII of SME [C]. Honghton, Michigan, U. S. A, 1995. 55~59*
- [29] 张建华, 艾兴. 陶瓷材料的机械磨-放电复合加工技术研究 [J]. *山东工业大学学报*, 1981, 21 (4): 19~25
- [30] Jia Zhixin, Zhang Jianhua, Ai Xing. Ultrasonic vibration pulse EDM of holes in engineering ceramics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, (53): 811~816
- [31] Zhang Jianhua, Ai Xing. Study on the marching of ceramics [A]. In: *Transformation of Science and Technology into Productive Power [C]. Proc. of 11th ICPR, Hefei, Anhui, China, 1991. 1 935~1 938*

Study on High Efficiency Machining Technology and Its Applications

Ai Xing

(Dept. of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Jinan 250061, China)

[Abstract] The cutting technique is the most widely used technology in machining field and the focus of the majority of cutting technology research has been directed toward high-speed machining. For superhard materials machining, the main trend is the development of new combined technology of grinding, ultrasonic machining (USM), electrical-discharge machining (EDM) and others. The theoretical and technical research work and results on high efficiency machining and high efficiency combined technology are presented in the paper. They include mainly the fundamental theory of high-speed machining, new system for development of ceramic cutting tool materials as well as the theories and techniques of electrical-discharge grinding machining (EDGM), combined technology of ultrasonic machining (USM) and electrical-discharge machining (EDM) for superhard materials. The results used in practice show that the developed high efficiency machining technologies may greatly promote the machining efficiency, improve the surface quality and reduce the machining cost.

[Key words] high efficiency machining; high-speed machining; ceramic cutting tool material; electrical-discharge grinding machining (EDGM); combined technology of USM and EDM

* * * * *

《中国工程科学》(月刊) 是中国工程院院刊
欢迎读者直接向本刊编辑部订阅