

文章编号:1000-2278(2001)01-0048-05

两类陶瓷刀具的现状、性能与应用

王宝友 崔丽华 黄传真 艾 兴
(潍坊学院) (山东大学)

摘 要

综述了氧化铝系和氮化硅系两类陶瓷刀具的发展现状,阐述了两类陶瓷刀具的力学性能与切削性能,论述了两类陶瓷刀具的特点、加工范围以及合适的切削加工用量,提出了刀具使用过程中的一些注意问题。

关键词 氧化铝,氮化硅,陶瓷,刀具

中图分类号:TQ174.5 文献标识码:A

THE CURRENT SITUATION, PERFORMANCE AND APPLICATION
OF TWO KINDS OF CERAMIC CUTTING TOOLSWang Baoyou Cui Lihua
(Weifang College)Huang Chuanzhen Ai Xing
(Shandong University)

ABSTRACT

The currently development situation of Al_2O_3 matrix ceramic and Si_3N_4 matrix ceramic cutting tools is elaborated in this paper. The physical performance and cutting performance of which are discussed. The characteristics of Al_2O_3 matrix ceramic and Si_3N_4 matrix ceramic cutting tools are described. The cutting fields of which and the suitable machining values are discussed emphatically. Some questions in using ceramic cutting tools are also probed. Which has practical meaning for propagating the using of ceramic cutting tools.

Keywords Al_2O_3 , Si_3N_4 , ceramics, cutting tools

1 前 言

在机械加工中,切削加工是最基本而又可靠的精密加工手段^[1],而刀具的性能对切削加工的效率、精度、表面质量有着决定性的影响。刀具的发展大体经历了碳素工具钢、高速钢、硬质合金、陶瓷及超硬材料等几个阶段。根据 CIRP 的资料,由于刀具材料的改进,允许的切削速度几乎每隔 10 年即提高 1 倍。在现

代化的加工过程中,提高加工效率的最有效方法仍然是采用高速切削加工技术^[2]。传统刀具已无法胜任由于现代科学技术的发展而需要的各种高强、高硬及高速的工程材料的切削加工。陶瓷刀具则以其优异的耐热性、耐磨性和化学稳定性,在高速切削领域和切削难加工材料方面,有着其它刀具无法比拟的优点。目前,新型陶瓷刀具不断出现^[3],预计 20 年后世界范围内陶瓷刀具的比重将达 15~20%^[4]。陶瓷刀具材料是 21 世纪最有希望、最有竞争力的刀具材料,它的研究与发

收稿日期:2000-04-15

作者简介:王宝友,潍坊学院机械工程系,261041

展,有可能引起切削加工技术的第三次革命^[5]。

2 两类陶瓷刀具的发展现状

陶瓷刀具的品种、牌号很多,按其主要成分大致可分为氧化铝(Al_2O_3)系和氮化硅(Si_3N_4)系^[6]。目前世界上生产的陶瓷刀具 95% 属于 Al_2O_3 系,其它多为 Si_3N_4 系。

2.1 氧化铝系陶瓷刀具

Al_2O_3 系陶瓷刀具是以氧化铝(Al_2O_3)为主体的陶瓷材料,包括纯 Al_2O_3 陶瓷刀具, Al_2O_3 中添加碳化物、氧化物、氮化物或硼化物的组合陶瓷刀具,以及在 Al_2O_3 中同时添加化合物与粘结金属的组合陶瓷刀具等。

(1) 纯 Al_2O_3 陶瓷刀具

纯 Al_2O_3 陶瓷刀具的 Al_2O_3 含量占 99% 以上,添加微量助烧剂如 MgO 、 NiO 、 TiO_2 等烧结而成,抗弯强度为 400 ~ 700 MPa,断裂韧性 K_{IC} 为 2.2 ~ 3.2 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,弹性模量 E 为 400 GPa,热膨胀系数 α 为 $8.2 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$,脆性大,易崩刃,未能广泛使用^[1,6]。

(2) Al_2O_3 —碳化物系陶瓷

Al_2O_3 中添加百分之几到几十的碳化物可以提高 Al_2O_3 陶瓷的韧性。其中以添加 TiC 的 Al_2O_3 — TiC 陶瓷应用最多。添加的 TiC 多在 30% ~ 60% 之间,也有添加 5% ~ 10% 的^[6]。这类组合陶瓷有两种:一种是在 Al_2O_3 中除添加碳化物外,还有少量粘结金属,亦称金属陶瓷。另一种是在 Al_2O_3 中只添加碳化物或碳化物的饱和固溶体制成的组合陶瓷。加入金属粘结剂的 Al_2O_3 —碳化物陶瓷比没有加入金属的强度要高,但硬度低^[6]。

(3) Al_2O_3 中添加氮化物、硼化物的刀具

Al_2O_3 中添加氮化物的 Al_2O_3 —氮化物组合陶瓷具有较好的抗热震性能,其基本性能和加工范围与 Al_2O_3 —碳化物金属陶瓷相当。氮化物组合陶瓷更适于进行间断切削^[6],而其抗弯强度和硬度比 Al_2O_3 — TiC 金属陶瓷低,有待进一步发展。在 Al_2O_3 中添加 TiB_2 作为粘结剂制成的陶瓷刀具,其组织中具有细晶粒的 Al_2O_3 以及连续的 TiB_2 粘结相,保持了硼化物“三维连续性”,具有极好的耐冲击性和耐磨性^[6]。

(4) 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具

陶瓷刀具的强度和韧性低,易发生破损特别是早

期破损^[7],限制了陶瓷刀具的应用。由于 Si_3N_4 陶瓷的韧性和强度较 Al_2O_3 陶瓷高的多,对陶瓷的增韧、增强主要集中在以 Al_2O_3 为基体的刀具上。增韧 Al_2O_3 陶瓷是指在 Al_2O_3 基体中添加增韧或增强材料烧成^[6]。目前常用的增韧方法主要有 ZrO_2 相变增韧、晶须增韧以及第二相颗粒弥散增韧等。 ZrO_2 相变增韧利用 ZrO_2 在 1150℃ 左右发生单斜晶(m - ZrO_2)系到四方晶(t - ZrO_2)系的可逆相变^[8]时伴有 3% ~ 5% 的体积变化及 8% 的切应变效应,在基体中诱导出许多裂纹,从而可以吸收主裂纹尖端的大部分能量,达到增韧目的。晶须增韧利用晶须的加强棒作用,常用晶须有 SiC 晶须和 Si_3N_4 晶须。 SiC 晶须是一种单晶,具有一定的纤维结构,具有高强度、高硬度、导热性好及抗热震性能好等许多优良的性能,平均直径 0.6 μm ,平均长度 10 ~ 80 μm ,抗拉强度达 7 GPa, SiC 晶须在加强 Al_2O_3 基体的同时,还可以使应力在基体内分散^[4]。这种陶瓷刀具的断裂韧性可达 9 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,具有高的强度和硬度,非常适用于加工镍基耐热合金,以及较低的切削速度加工各种铸铁及非金属脆性材料。 Si_3N_4 晶须加入到 Al_2O_3 基体中可以提高陶瓷的抗热冲击性,适合切削 45 HRC 的镍铬铁耐热合金材料^[8]。第二相颗粒弥散增韧是通过利用弥散第二相颗粒来阻碍位错的滑移和攀移,阻止裂纹扩展,达到增韧目的。第二相颗粒周围会产生残余应力,引起裂纹偏转或裂纹被钉扎,提高材料断裂功,从而使 Al_2O_3 陶瓷的韧性有了明显的提高。

2.2 氮化硅系陶瓷刀具

氮化硅系陶瓷刀具包括以 Si_3N_4 为主体的刀具和 β' - $\text{Sialon}(\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 刀具^[6,8]。

(1) 单一 Si_3N_4 陶瓷

单一 Si_3N_4 陶瓷的热胀系数为 $3.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,断裂韧性 4.2 ~ 5.2 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,抗弯强度 700 ~ 900 MPa,硬度 HRA91 ~ 92,耐热性可达 1300 ~ 1400℃,有良好的抗氧化性能^[6]。

(2) Si_3N_4 复合陶瓷

在 Si_3N_4 基体中添加适量金属碳化物及金属等复合强化剂,利用复合强化效应(又称弥散强化效应)制成的 Si_3N_4 组合陶瓷,其性能比热压 Si_3N_4 陶瓷优越的多。在 Si_3N_4 基体中添加 Al_2O_3 、 Y_2O_3 、 TiC 、 TiN 和 MgO 等成分,可以采用冷压烧结而降低其成本^[6,8]。 β' - Sialon 就是在 Si_3N_4 中添加 Al_2O_3 烧结而成,兼有 Al_2O_3 和 Si_3N_4 的特性,其热硬性比硬质合金和 Al_2O_3 都高,

刀尖温度高于 1000℃ 时仍可高速切削。其最大的特点是可提高切削速度,加大进给量,提高金属切除率,延长刀具寿命。

Si_3N_4 陶瓷刀具具有低密、高强、高硬的物理性能。目前, Si_3N_4 陶瓷刀具的室温硬度值已超过了最好的硬质合金刀具的硬度而达到 HRA92.5 ~ 94,这就大大提高了它的切削能力和耐磨性,可以加工硬度高达 HRC65 的各类淬硬钢和硬化铸铁;其抗弯强度,目前已达 750 ~ 1200MPa,超过了高速钢而与普通硬质合金相当; Si_3N_4 系列陶瓷刀具的断裂韧性值,优于其他系列陶瓷刀具达 6 ~ 7MPa $\text{m}^{1/2}$,接近某些牌号的硬质合金刀具; Si_3N_4 系列陶瓷刀具的抗热震性能指标 ΔT ,由于其强度高、较低热膨胀系数而高达 600 ~ 800℃,明显优于其它系列陶瓷刀具(300 ~ 400℃),因而在高强度断续零件的毛坯加工方面,显示出独特的优越性能。

虽然目前 Si_3N_4 陶瓷的发展非常迅速,但陶瓷刀具中, Al_2O_3 陶瓷仍占绝大部分。

3 两类陶瓷刀具的性能

陶瓷刀具多为高硬度的细微晶粒经高温烧结而成,具有高的硬度和耐磨性,其高温性能和化学稳定性大大高于其它刀具,总体说来具有良好的切削性能。

3.1 陶瓷刀具的力学性能

陶瓷刀具材料的力学特性是其优良的切削性能的根本所在。几种典型的陶瓷刀具的力学性能如表 1 所示^[1,3,9~12]。

3.2 两类陶瓷刀具的切削性能

(1) Al_2O_3 陶瓷刀具的切削性能及应用范围

Al_2O_3 系陶瓷刀具的硬度达 HRA91 ~ 95,在高温下有较好的化学稳定性、耐磨性和耐热性,高温硬度高,在 1200℃ 仍能进行切削(此时硬度为 HRA80),如果加入一定的稳定剂及采用热压技术,可使刀具在高达 1800℃ 高温下仍能保持硬度和耐磨性。月牙洼磨损率较低,且高温时刀具与工件间不产生化学反应,表面加工粗糙度小。

Al_2O_3 陶瓷刀具最初主要用于车削和精铣铸铁,目前 Al_2O_3 系的陶瓷刀具主要用来加工各种铸铁(灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、冷硬铸铁、高合金耐磨铸铁等)和各种钢料(碳系结构钢、合金结构钢、高强度钢、高锰钢、淬硬钢等);也可以加工铜合金、石墨、工程塑料和复合材料。但由于铝元素会和一些其它元素发生

化学亲合作用, Al_2O_3 陶瓷刀具不适宜于加工铝合金和钛合金。

Al_2O_3 陶瓷刀具可以用于制造包括滚刀、铰刀、成形车刀在内的各种刀具,不仅用于普通车床,而且作为稳定可靠的刀具应用于数控机床和自动生产线中。对于高精度、高硬度、大件切削有良好的效果。

(2) Si_3N_4 系陶瓷刀具切削性能及应用范围

在众多的陶瓷材料中, Si_3N_4 陶瓷具有最佳的耐热性,这使得它即使在 1200 ~ 1450℃ 切削高温时,仍能保持一定的硬度、强度进行长时间切削,因此允许采用远远高于硬质合金刀具的切削速度,实现高速切削,其切削速度可比硬质合金刀具提高 3 ~ 10 倍。

Si_3N_4 系陶瓷刀具的加工范围与 Al_2O_3 系陶瓷刀具近似,但是 Si_3N_4 系陶瓷刀具不能加工产生长屑的钢料。 Si_3N_4 系陶瓷刀具特别适合于加工灰铸铁,铸铁加工用的刀具有有一半可以被 Si_3N_4 系陶瓷刀具替代。其中 Sialon 陶瓷主要加工铸铁(含冷硬铸铁)与高温合金。

4 两类陶瓷刀具的应用

目前我国陶瓷刀具的应用还处于起步阶段,而且主要用于硬质合金刀具难以切削的工件的粗加工,在精密加工中应用比较少,这与国外大量应用于数控机床的情况相反。使用陶瓷刀具,可以解决各行业难加工材料的切削加工问题,改变了传统的机械加工工艺,提高了加工效率,同时可节约大量的生产硬质合金刀具所需要的贵量金属 W、Co 及 Ti 等。在美国,陶瓷刀具占全部刀具市场份额的 3% ~ 4%,在日本该份额为 8% ~ 10%,在德国约为 12%。在一些特殊的加工过程中,陶瓷刀具所占的比例更大。据估计^[13,14],今后陶瓷刀具占整个刀具市场的份额可能增加到 15% ~ 20%。我国虽然在陶瓷刀具的研究水平上不比国外差,但实际应用发展较慢,这与人们普遍存在的一种错误观点——陶瓷刀具性能不稳定有着极大关系。资料报导目前国内陶瓷刀具占总刀具使用量的比例不超过 1%。陶瓷刀具推广使用的时间不长,在刀具的几何参数、切削用量以及使用技术方面,均缺乏成熟的理论与经验,使得陶瓷刀具的性能远远没有发挥出来。应用陶瓷刀具是一项需要综合多方面技术的系统工程,必须考虑陶瓷刀具本身所具有的物化特性、切削性能以及与普通刀具的差别。陶瓷刀具不是万能刀具,只有

表 1 几种典型陶瓷刀具的力学性能

Table 1 Dynamic performance of some typical ceramic cutting tools

	牌 号	成 分	硬度(HRA)	抗弯强度(GPa)	生产单位
Al ₂ O ₃ 系	SG5	Al ₂ O ₃ - SiC	94	0.70	山东工业大学
	SG4	Al ₂ O ₃ - (W, Ti)C	94.7 ~ 95.3	0.79	
	LT35	Al ₂ O ₃ - TiC - Mo - Ni	93.5 ~ 94.5	0.9 ~ 1.1	
	LT55	Al ₂ O ₃ - TiC - Mo - Ni	93.7 ~ 94.8	1.0 ~ 1.2	
	JX - 1	Al ₂ O ₃ , SiC 晶须	94.0 ~ 95.0	0.70	
	AT6	Al ₂ O ₃ - TiC 加金属	93.5 ~ 94.5	0.88 ~ 0.93	冷水江陶瓷工具厂
	HDM4	Al ₂ O ₃ 基	93	0.80	北京海得曼无机非金属材料公司
	FD - 11, 12	Al ₂ O ₃ 基			北京方大高技术陶瓷公司
	P1(AM)	Al ₂ O ₃	HR15N ≥ 96.5	0.40 ~ 0.50	成都工具研究所
	P2	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	HR15N ≥ 96.5	0.70 ~ 0.80	
	T2	Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	HR15N ≥ 96.5	0.90 ~ 1.00	
	CC - 650	Al ₂ O ₃ - Ti(C, N)	93.5 ~ 94.5		瑞典 Sandvik 公司
	CC - 670	Al ₂ O ₃ , SiC 晶须	94.0 ~ 94.5		瑞典 Sandvik 公司
	KY2500	Al ₂ O ₃ , SiC 晶须	93.5 ~ 94.0		瑞典 Sandvik 公司
Si ₃ N ₄ 系	HDM1	Si ₃ N ₄ 基	92.5	0.93	北京海得曼无机非金属材料公司
	HDM2	Si ₃ N ₄ 基, SiC 晶须	93	0.98	
	HDM3	Si ₃ N ₄ 基	92.5	0.83	
	N5	Si ₃ N ₄ 基	HR15N ≥ 96.5		
	CC - 680	Si ₃ N ₄ - Al ₂ O ₃ - Y ₂ O ₃	93.5 ~ 94.5	1.0 ~ 1.3	瑞典 Sandvik 公司
	KY3000	Si ₃ N ₄ - Al ₂ O ₃ - Y ₂ O ₃		1.0 ~ 1.3	美国 Kennametal 公司

正确使用才能发挥其优越性。在使用陶瓷刀具时,必须考虑以下几个方面的问题:

(1) 系统刚性

陶瓷刀具对冲击和振动载荷比较敏感,系统刚性弱是促使陶瓷刀具耐用度降低或引起崩刀的主要原因。系统刚性愈小,则振动愈大,而刀具耐用度也就愈低。系统刚性是指机床—工件—刀具工艺系统的刚性,而不是孤立的一台机床的刚性,必须考虑工件、夹具、顶尖及刀具等。任何环节的刚性不足都将大幅度地降低陶瓷刀具的切削性能和效率。实践证明,适于陶瓷刀具加工的机床必须具有良好的刚性、足够的功率和高的转数。

重型机床的刚性好,有足够的转速及功率,采用陶瓷刀具的成功率往往比较高,中型机床在精、半精加工时因振动较小,使用陶瓷刀具也能较好地发挥效果,而粗加工时往往很难发挥陶瓷刀具的优越性。

(2) 防止零件对刀具造成大的冲击

虽然陶瓷刀具可以对大多数铸、锻件不退火就进行粗加工,但硬铸件毛胚上的夹砂和砂眼常常会引起冲击,造成许多不必要的崩刀。因此在切削加工前对毛胚缺陷进行适当的清理、修正处理,可大大减少陶瓷

刀具的破损。此外也要防止高速转动的高硬毛胚毛边对刀具的冲击,对那些硬度高而形状不规则的毛胚,应注意在切入和切出处先倒角再切削。切入处的倒角,可避免刀具接触工件时承受过大的冲击载荷;切出处的倒角,主要是为防止刀具切离零件时被留下的一圈料边打坏。还要注意机床与被加工零件的情况要匹配,避免使用小功率机床加工大零件。

(3) 合理的刀具几何参数

刀具的合理几何参数,是指粗加工或半精加工时能保证刀具具有较高的生产率和刀具耐用度,精加工时在具备较高的刀具耐用度的基础上保证加工出符合预定尺寸精度和表面质量的工件的刀具几何参数。虽然陶瓷刀具切削性能优良,但是如果不能在使用中合理地选择其几何参数,仍不能很好地发挥其作用。在选择陶瓷刀具的几何参数时,除要考虑刀具的一般规律外,也必须考虑陶瓷刀具所特有的规律。相对而言,陶瓷刀具硬而脆,如何保证其使用稳定可靠、不发生崩刀是选择陶瓷刀具合理几何参数的主要依据;此外,陶瓷刀具的结构常常是机夹可转位刀具,必须结合其结构特点来选择其几何参数。一般说来,陶瓷刀具常采用零角或负前角切削。

(4)合理的切削用量

合理选择切削用量,是充分发挥陶瓷刀具切削性能的最基本问题之一,它直接影响加工生产率、加工成本、加工质量和刀具耐用度。必须充分考虑陶瓷刀具的硬度高、耐磨性好、耐热性高等优点以及脆性较大、强度较低等缺点来选择合适的切削用量。进给量对刀具破损的影响很大,选取较小的进给量,有利于防止或减少刀具的破损;陶瓷刀具适于高速切削,切削速度过低,不仅不利于发挥陶瓷刀具的优越性,而且容易发生崩刃;较大的切削深度则可以缩短加工时间。总体说来,对于陶瓷刀具应选用较小的进给量和尽可能高的切削速度,切削深度在系统刚性和加工工艺允许前提下应尽可能选择较大值。

进给量大小的正确选择是成功应用陶瓷刀具的关键。进给量大小主要受刀具强度、工艺系统刚性及被加工表面粗糙度的影响,因为陶瓷刀具的强度比硬质合金刀具低,所以进给量也应低些。一般可预选得小一些,通过实践逐步增加。精车普通钢和铸铁,进给量 f 取为 $0.10 \sim 0.75 \text{ mm/r}$;精加工取 $f = 0.05 \sim 0.25 \text{ mm/r}$ 。端铣时可取每齿进给量 $a_f = 0.1 \sim 0.3 \text{ mm/z}$ 。加工淬硬钢,随硬度不同而选取进给量。一般取车削 $f = 0.1 \sim 0.3 \text{ mm/r}$;端铣取每齿进给量 $a_f = 0.05 \sim 0.15 \text{ mm/z}$ 。

目前陶瓷刀具的切削速度已高达数千 m/min ,较高的切削速度特别是在 $v = 350 \sim 1500 \text{ m/min}$ 范围内,往往可以获得良好的切屑形状。如在高速车削淬硬钢时,可能形成酥化的易于碎断的假带状切屑而使切屑易于清理。陶瓷刀具作低速切削时,不但与硬质合金刀具的切削性能相近,而且容易引起工艺系统的振动,使刀具崩刃,甚至无法切削。一定范围内高速切削时,切削温度的升高能改变工件材料的性能,提高陶瓷刀具的韧性而减少其破损,所以一般陶瓷刀具均采用干切削。而陶瓷刀具断续切削时,如果切削速度提高太多,温差很大,产生的热应力会导致刀具破损。

切削深度受机床功率和工艺系统刚性的限制,尽量一次走刀后切去大部分余量。一般粗加工钢和铸铁时,允许的最大切削深度为 $2 \sim 6 \text{ mm}$,通常取 $a_p > 1.5 \text{ mm}$;精加工取 $a_p < 0.5 \text{ mm}$ 。加工淬硬钢一般都是半精加工或精加工,切削深度应较小,当工艺系统刚性较差时,取较小的切削深度,以免引起振动使刀具破损。

5 结 论

陶瓷刀具大致可分为氧化铝系和氮化硅系,其中绝大多数属于 Al_2O_3 系,部分为 Si_3N_4 系。

陶瓷刀具具有良好的切削性能,但只有正确使用才能发挥出来。

使用陶瓷刀具时要注意其应用范围,防止对刀具造成大的冲击以及选择合理的刀具几何参数和切削用量。

陶瓷刀具的强度低,韧性差,限制了它在实际中的应用。但随着陶瓷技术的发展及数控机床和加工中心应用的扩大,陶瓷刀具的应用范围必将越来越大。

参 考 文 献

- 1 肖诗纲.刀具材料及其合理选择(第二版).北京:机械工业出版社,1990.4
- 2 初犁编译.高速切削加工现状.工具技术,1994.28(12):21-22
- 3 段继光等.陶瓷刀具的生产与应用概况.工具技术,1993.27:1
- 4 肖诗纲.刀具材料的新发展(上).机械工艺师,1994.3
- 5 于涛.先进陶瓷刀具材料及质量的研究现状与发展趋势.中国机械工程,1998.8
- 6 艾兴,萧虹.陶瓷刀具切削加工.北京:机械工业出版社,1988.7
- 7 艾兴,萧虹.陶瓷刀具端铣淬硬钢时刀具破损原因的探讨.山东工业大学学报,1984.2
- 8 黄传真.新型复相陶瓷刀具材料的研制及切削可靠性研究.博士论文.山东工业大学,1994.5
- 9 张清纯.陶瓷材料的力学性能.北京:科学出版社,1987.8
- 10 方文琳等. Al_2O_3 陶瓷刀具材料的研究和发展.机械工程材料,1995.19(2):1
- 11 丁培道等.工具材料的研究现状.材料导报,1993.(1):4
- 12 Thusly. High - Seed Maching. Annals of the CIRP, 1993. 42: 733 - 738
- 13 Li L S, Low L M. Advanced Ceramic Tools for Machining Applications Switzerland. Trans, Tech. Publications, 1994
- 14 肖诗纲.现代刀具材料.重庆:重庆大学出版社,1992