

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0237-06

新型陶瓷刀具的发展与应用^①

苗赫濯

(清华大学 材料系, 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 回顾了陶瓷刀具的发展简况及其意义, 重点介绍了 Si_3N_4 基和 TiCN 基复合陶瓷刀具的研制、性能和应用。复合 Si_3N_4 陶瓷刀具具有较高的耐磨性和抗冲击性, 特别适合于各类铸铁件的粗精加工, 也能进行铣削、刨削等冲击力很大的加工, 其切削效率可提高 3~10 倍; 复合 TiCN 金属陶瓷刀具具有很高的硬度和耐磨性, 特别适合于各类高硬高强钢(如淬硬钢等)的加工, 可对高硬材料实现“以车代磨”干切削, 免除退火工艺和冷却液, 大幅度提高生产效率。新型复合陶瓷刀具已经在我国冶金、水泵、矿山机械、轴承、滚珠丝杠、汽车、军工等十几个行业得到应用。

关键词: 陶瓷刀具; 氮化硅; 碳氮化钛; 金属陶瓷

Development and applications of new types of ceramic cutting tools

MIAO He-zhuo

(State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing,

Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The advance and meanings of ceramic cutting tools were reviewed. The emphasis was paid on the development, performances and applications of Si_3N_4 -based and TiCN -based composite ceramic cutting tools. The composite Si_3N_4 -based ceramic cutting tools possess rather high wear-resistance and excellent impact-resistance properties, being fit for rough and finish machining of various cast iron workpieces, including milling and planing of large impact force. The cutting efficiency could be enhanced by 3~10 times, compared with the cemented carbide tools. The composite TiCN -based cermet cutting tools possess high hardness and wear-resistance, having an excellent performance on machining of diversified steels, for instance hardened steels, of high hardness and strength. When these tools are used in dried machining of high hardness workpieces, a machining process without annealing and coolants can be used rather than a grinding one, so the efficiency is dramatically improved. Up to now, the new types of composite ceramic cutting tools have been applied in China on a variety of industries, including metallurgy, pump, mining-machinery plant, mechanical bearing, ball screw, motor vehicle, etc.

Key words: ceramic cutting tool; Si_3N_4 ; TiCN ; cermet

切削加工是工业生产中最基本、最普通和最重要的方法之一, 它直接影响工业生产的效率、成本和能源消耗。提高加工效率, 将会带来巨大的社会、经济效益。前北美机械工程师协会主席 Hom 曾说:“每节省加工工时一分钟, 美国就可节省一亿美元”, 可见提高加工效率对国民经济具有十分重要的意义。陶瓷刀具由于高温性能好, 其切削速度可比传统刀具提高 3~10 倍, 因而可以在现有的厂

房、设备、动力条件下, 使产品产量成倍增长, 大幅度提高社会生产力。

其次, 由于现代科学技术和生产的发展, 越来越多地采用超硬难加工工件, 以提高机器设备的使用寿命和工作性能。有资料介绍, 难加工材料已超过 43%。这些难加工材料的采用, 给制造技术带来很大的困难, 传统刀具是难以对付的, 往往要采用费时费电的退火加工和磨加工等方法。新型陶瓷刀

① 作者简介: 苗赫濯(1936-), 男, 教授, 博士生导师。
通讯作者: 苗赫濯, 教授, 电话: 010-62773395

具由于有很高的硬度(HRA93~95),因而可以加工硬度高达HRC65的各类难加工材料,免除退火加工所消耗的电力和时间;可以提高工件的硬度,延长机器设备的使用寿命。

第三,硬质合金刀具大量消耗着W、Co等战略性贵金属,节约这些资源是各国的基本政策,而广泛采用陶瓷刀具则是有效措施。因为陶瓷刀具的主要原料 Al_2O_3 和 SiO_2 ,是地壳中最丰富的成分,是取之不尽,用之不竭的。

1 陶瓷刀具的发展简况

刀(工)具材料的进步对人类发展的文明史有重要的影响。在公元前2万年,人类开始采用打磨的石料(也可称为“天然陶瓷”)作刀具,历史学家就以刀(工)具材料的进步作为划分远古人类历史发展时期的标志,称这以后的人类历史为“新石器时代”,以后又以青铜、铁刀工具的出现来划分古代人类历史发展阶段。从1850年至今150余年来,刀具材料获得了很大发展。

1898年高速钢工具问世,1926年硬质合金又研制成功,使切削加工技术的历史发生了两次革命性的进步。由于硬质合金刀具强度和韧性高,易于烧结,生产效率高,应用面广,至今仍然是独占鳌头的主要刀具材料。

陶瓷作为金属切削刀具,也有很长的历史。早在1905年德国人就开始了 Al_2O_3 陶瓷作为切削刀具的研究,1912年英国首获 Al_2O_3 陶瓷刀具专利。但是由于 Al_2O_3 陶瓷脆性大,且当时的陶瓷工艺技术还比较落后,所以它的应用受到限制。1968~1970年间人们研制成功了 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 复合陶瓷刀具以后,使 Al_2O_3 基陶瓷刀具走出了缓慢发展的“低谷”,成为解决超硬材料加工的一种新型刀具^[1~3]。这种复合 Al_2O_3 陶瓷刀具由于在基体中弥散了15%~40%的硬质颗粒TiC,不仅提高了热传导率,抗冲击性,而且由于弥散相TiC颗粒阻碍了 Al_2O_3 晶粒长大,使材料强度也得到很大提高。其抗弯强度 σ 可达到700~900 MPa,断裂韧性 K_{IC} 可达3.5~4.5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,硬度可达HRA94~95。 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 复合陶瓷刀具主要用来对淬硬钢、硬化铸铁等进行精加工。

自澳大利亚的Garvie于20世纪70年代初首次利用 ZrO_2 的相变来增韧陶瓷以后,德国的Claussen发展了用 ZrO_2 相变增韧 Al_2O_3 陶瓷(简称ZTA)^[4]。20世纪80年代初,德、美等国将这种刀具投放市

场。其抗弯强度可达650~800 MPa,断裂韧性 K_{IC} 可达6~7 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,但硬度略低于 Al_2O_3 刀具。 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 刀具可用于粗精加工中硬钢(HRC35~55)、铸铁和超合金。20世纪80年代初,日本日立金属株式会社研制成功 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiB}_2$ 复合陶瓷刀具。据称这主要是利用 TiB_2 室温硬度和高温硬度都比TiC高,而且热膨胀系数又比TiC小的特点,这样制成的复合陶瓷刀具的耐磨性和耐热冲击性更好。

20世纪80年代初,美国、瑞典还研制成功SiC晶须增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$)。晶须的加入使 Al_2O_3 基陶瓷的断裂韧性提高两倍多,同时保留了很高的硬度。这种刀具1986年投放市场,其抗弯强度可达 $\sigma = 750$ MPa,断裂韧性 $K_{\text{IC}} = 8.7$ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,硬度HRA94~95,使 Al_2O_3 基陶瓷刀具能够进军对高硬材料有冲击力的加工。目前, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ 刀具主要用于淬硬钢、工具钢、冷硬铸铁和镍基超合金的加工^[5,6]。

20世纪70年代中期美国用Sialon陶瓷刀具($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 的固熔体)加工灰铸铁,取得良好效果^[7]。同期,中国用热压 Si_3N_4 陶瓷刀具实现了对多种难加工材料(冷硬铸铁、淬硬钢、粉末冶金烧结材料、热解石墨和玻璃钢等)进行多种工序(车、铣、螺纹、丝杠挑扣等)的加工和生产应用^[7~11]。20世纪70年代中期出现的新一代陶瓷刀具—— Si_3N_4 陶瓷刀具,以另一支新军的姿态受到人们的重视。由于它有较高的强度($\sigma = 900 \sim 1\,000$ MPa)、硬度(HRA92.5)和断裂韧性($K_{\text{IC}} = 6 \sim 7$ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),又有较低的热膨胀系数($\alpha = 3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$),因而表现出优异的切削性能,特别适合于铸铁件和高温合金的加工。后来为了提高 Si_3N_4 陶瓷刀具的耐磨性,又发展出 $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}(\text{TiCN})$ 复合陶瓷刀具^[12,13],使其应用范围越来越广。

20世纪80年代后期,Sr-Al-O-N系相图的研究导致了 α - β -Sialon陶瓷刀具的开发。研究表明, α -Sialon晶粒是等轴状的,硬度较高; β -Sialon具有长柱状的晶粒,韧性较好。根据不同的工件材料和切削状态要求,可以通过调整 α 、 β 相的含量,开发出一系列性能优良的 Si_3N_4 基陶瓷刀具材料^[15~17]。

下面着重介绍本文作者在 Si_3N_4 基和TiCN基陶瓷刀具方面的研制和推广应用情况。

2 氮化硅与复合氮化硅陶瓷刀具

由于 β - Si_3N_4 陶瓷以共价键结合,晶粒是长柱

状的,因而有较高的硬度、强度和断裂韧性,同时它又有较小的热膨胀系数($\alpha = 3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$),所以有较好的抗机械冲击性和抗热冲击性。 Si_3N_4 刀具特别适合于铸铁、高温合金的粗精加工、高速切削和重切削,其切削耐用度比硬质合金刀具高几倍至十几倍^[10]。在汽车发动机铸铁缸体等加工中应用越来越普遍。但是 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷的硬度并不是特别高(HRA92.5),所以对于硬度较高的工件,如冷硬铸铁(HS65~80)、高铬铸铁(HS80~90)等,纯 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷刀具的耐用度是较低的。为了改善它的耐磨性,加入 TiC、TiCN、TiC+TiN 作为硬质弥散相,以提高刀具材料的硬度,同时保留着较高的强度和断裂韧性,称之为复合氮化硅陶瓷刀具^[12,13](见图 1 和 2)。

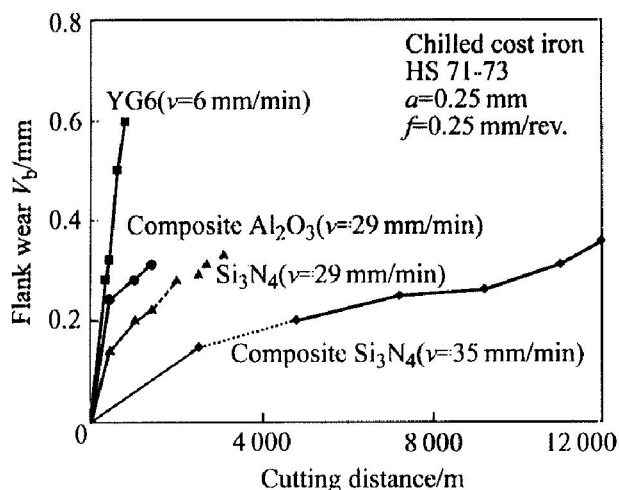


图 1 几种刀具材料切削冷硬铸铁时耐用度比较^[13]

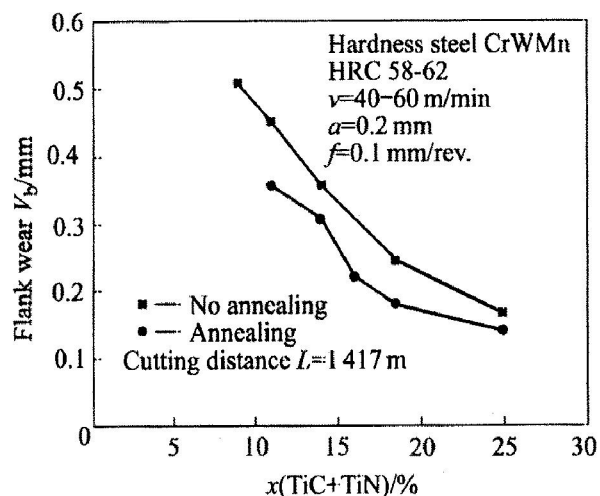


图 2 在加工 CrWMn 淬硬钢时,复合 Si_3N_4 刀具的后刀面磨损值与弥散相含量的关系^[13]

20 世纪 80 年代初复合 Si_3N_4 陶瓷刀具首先应用于我国冶金工业,主要用来切削冷硬铸铁轧辊和超硬铸铁渣浆泵等。首钢、武钢、鞍钢、攀钢、邢台轧辊厂、第一重型机器厂和无锡粮食机械厂等都先

后采用这种新型刀具对各类高硬铸铁轧辊进行加工,获得平均提高生产效率 3~10 倍,节约加工工时、电力 50%~80% 的显著经济效益。过去我国每年生产几十万吨冷硬铸铁轧辊,由于硬质合金刀具耐磨性、红硬性差,切削速度只有 7~8 m/min,生产效率很低,加工成本很高。复合 Al_2O_3 陶瓷刀具又承受不了毛坯拨荒粗车的冲击力。20 世纪 80 年代初首钢机运公司采用复合 Si_3N_4 陶瓷刀具对硬度高达 HRC60 的球墨冷硬铸铁轧辊进行粗精车(见图 3),切削速度从以往采用硬质合金刀具的 7 m/min 提高到 36~51 m/min,车一根轧辊硬层部分的时间从 20 h 减少到 3 h 以内。邢台轧辊厂加工冷硬铸铁轧辊(HS65~80),毛坯拨荒切削深度达到 10 mm,切除率从 20~37 cm^3/min 提高到 270 cm^3/min ,一次走刀可以切完整个辊身。武钢用复合 Si_3N_4 陶瓷刀具加工硬度为 HS60~80 的冷硬铸铁轧辊,切削速度提高 3 倍,每车 1 根 1 t 重的轧辊消耗 1 片陶瓷刀片,节约刀具费 88 元,节约工时费 459 元,产品质量也得到大幅度提高。



图 3 首钢用复合 Si_3N_4 刀具加工冷硬铸铁轧辊

高耐磨的渣浆泵广泛用于我国冶金、电力、矿山、水利等领域,消耗量很大,其泵体、护板是硬度高达 HRC63~65 的 Cr15Mo3 或 Cr27 等超硬铸铁件,过去由于各种刀具都加工不动,所以只得采取退火加工的方法。其工艺过程是铸造→退火软化→粗加工→淬火硬化→精加工。退火一个泵体,要耗电一万多度,约需 6 天时间,机加工工时还需 48 h。20 世纪 80 年代初石家庄水泵厂开始采用复合 Si_3N_4 陶瓷刀具(见图 4),顺利地解决了一次硬化加工问题,免除了退火工艺,新的工艺过程变为铸造→淬火硬化→用陶瓷刀具粗精加工。不仅节省了 6 天的退火时间,而且机加工工时也从过去的 48 h 减少到 8 h。该厂还用复合 Si_3N_4 刀具解决了高铬铸铁渣浆泵护板,以及水泵叶轮(HRC55)的断续粗

切削, 均表明复合 Si_3N_4 陶瓷刀具不仅有很高的耐磨性, 还有很好的抗冲击能力。



图4 石家庄水泵厂用复合 Si_3N_4 刀具对 HRC60 的 Cr27 高硬铸铁护板的加劲肋进行断续粗加工

某耐磨材料厂生产高铬钼铸铁的渣浆泵和高锰钢的矿山设备零件, 该厂从车、镗到铣、刨所有工艺上, 从粗加工到精加工, 全部采用复合 Si_3N_4 陶瓷刀具, 切削效率提高 3~10 倍, 在不增加厂房、设备、电力的情况下, 年生产量和销售额得到大幅度提高。

现在我国铸铁轧辊和渣浆泵两个行业大都采用了复合 Si_3N_4 陶瓷刀具直接加工的新工艺, 获得了提高生产力、节约能源、工时和设备的显著效益。

复合 Si_3N_4 陶瓷刀具在冶金工业中的应用, 还有一个典型的例子, 就是加工无缝钢管生产工艺上用的高硬合金铸铁顶头 (Cr17Ni2Mo , 硬度 HRC55)。过去只能采用在工件被烧红的状态下用硬质合金刀具加工的办法, 现场工作状况十分恶劣, 工人很不安全, 而且往往冷却时收缩不均匀导致工件出现裂纹, 合格率很低。后来采用复合 Si_3N_4 陶瓷刀具解决了冷态加工的难题, 不仅切削效率提高了 3 倍, 产品质量与合格率也得到很大提高。

3 复合 TiCN 金属陶瓷刀具

近年来发展起来的 TiCN 金属陶瓷刀具是以碳化钛(TiCN)作为耐磨相, 金属 Mo、Ni 作为粘结相, 经过高温烧结而成的金属陶瓷刀具材料。它有很高的抗弯强度 ($\geq 1000 \text{ MPa}$), 和断裂韧性 ($K_{\text{IC}} \geq 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 有较宽的适用范围, 适合于普通钢铁材料加工, 在精加工和高速铣削钢件时尤为有效。但是由于晶界上有相当数量的 Mo、Ni 等金属相, 硬度较低 (HRA91~92), 高温性能也受到影

响, 难于胜任高硬难加工材料的加工。为了提高 TiCN 基金属陶瓷刀具的硬度和切削能力, 加入 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为弥散相, 经过烧结时的反应, 大大减少了晶界金属相, 使其硬度从 HRA91~92 提高到 HRA94~95。称之为复合 TiCN 金属陶瓷刀具^[18]。图 5 表示虽然随 Si_3N_4 体积含量的增加, 热压 TiCN 基金属陶瓷材料的抗弯强度、断裂韧性 K_{IC} 下降, 但即使 Si_3N_4 体积含量为 40% 时, σ_{RT} 仍大于 900 MPa, K_{IC} 大于 $6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 对于大多数切削加工来说, 还是足够的。由于硬度大幅度提高, 刀具的切削能力和耐磨性显著增加。图 6 表示了这种复合 TiCN 金属陶瓷刀具系列可根据不同的应用来进行材料组成和性能设计的思想。

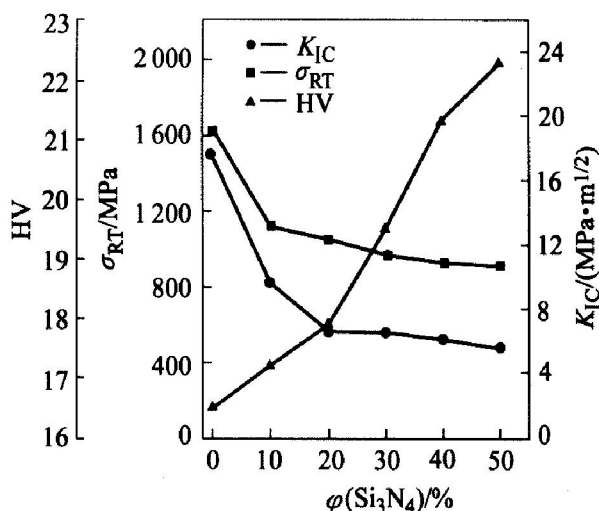


图5 Si_3N_4 加入量对 TiCN 金属陶瓷材料的力学性能的影响

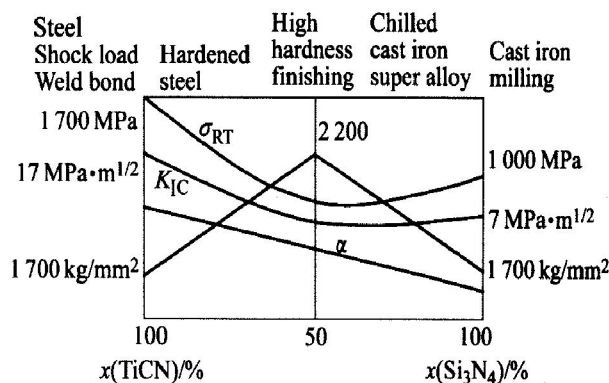


图6 TiCN- Si_3N_4 体系刀具材料组成、性能设计与应用示意图^[18]

复合 TiCN 金属陶瓷刀具比复合 Si_3N_4 陶瓷刀具具有更高的硬度和耐磨性, 更适合于淬硬钢、高强度钢的加工; 它比复合 Al_2O_3 陶瓷刀具具有更高的断裂韧性和抗冲击性, 可承受更大的切削深度和进给

量。

目前工业中采用的淬硬钢工件越来越多, 通常采用磨削工艺加工, 不仅效率低, 成本高, 还要消耗大量的冷却液, 造成环境污染。复合 TiCN 金属陶瓷刀具在许多大型骨干企业解决了淬硬钢加工“以车代磨”的难题。例如宝钢过去采用进口精密磨床加工 86CrMoV7 淬硬钢轧辊(HRC63, $d0.8\text{ m} \times 3\text{ m}$), 成本高, 效率低, 虽试用过国内外六七种陶瓷刀具, 均未能实现“以车代磨”, 后来采用复合金属陶瓷刀具才顺利地解决了这个难题。所采用的切削用量为: 切削速度为 60~ 80 m/min, 切削深度为 0.8~ 1.5 mm, 进给量为 0.3~ 0.5 mm/r, 连续切削了 6 个辊子, 切削路程长达 15 420 m, 切削时间高达 260~ 280 min, 表面粗糙度和辊子锥度均达到了要求。单根轧辊的加工时间由 7 h 减少为 2.5 h, 综合加工成本减少了 75%, 相应单班产量提高了 3 倍。

轴承行业也大量应用淬硬钢 (GCr15, HRC62), 过去采用退火粗车、精车, 然后淬火再粗磨、精磨工艺, 考虑到淬火的变形, 必须留有足够的余量, 给粗磨工艺带来困难, 成为生产工艺中的“瓶颈”。瓦轴等轴承企业采用复合金属陶瓷刀具对轴承内外圈淬火后精车, 取代原工艺淬火前精车和淬火后粗磨, 取得十分显著的效果。在加工提速客机、货车轴承内外圈时, 比磨削效率提高 4 倍以上。复合金属陶瓷刀具还实现了轴承圈淬火后车退刀槽、黑皮和圆角(“光亮工程”)等工艺改革, 简化了工艺, 提高了轴承的质量。

随着我国汽车工业的发展, 汽车零部件的加工在生产中占有越来越重要的地位, 其中有一些零部件是非常难加工的。如某厂生产载重车汽门(材料 4Cr9Si2, HRC45), 用硬质合金刀具加工不仅效率低, 而且加工弧形面的表面光洁度达不到要求, 采用磨削工艺, 不仅难磨圆弧、表面还常出现微观裂纹, 也达不到验收标准, 后来采用复合金属陶瓷刀具不仅表面光洁度达到了要求, 而且加工效率提高了 3~ 4 倍。

某厂生产的 C100 发动机初级主齿轮是淬硬至 HRC58~ 62 的 20CrMnTi 钢, 其端部 $d42\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ 内孔要求表面粗糙度 $< 1.6\text{ }\mu$, 硬质合金刀具加工不动, 又无法磨加工, 后来采用此新刀具解决了此加工难题。

复合 TiCN 金属陶瓷刀具由于晶界金属相少, 硬度高, 耐磨性、红硬性好, 特别适合于淬硬钢、高强度钢的加工, 可以实现“以车代磨”, 大幅度提

高加工效率, 解决传统刀具难以解决的工艺难题, 推动机械加工技术的进步。

4 结语

1) 切削加工, 量大面广, 各行各业都需要, 在工业生产中如何采用新的刀具材料来提高加工效率和加工质量, 对工业生产的成本、效率和能源消耗具有十分重要的意义。

2) 氧化铝基陶瓷刀具已有近百年的历史。近几十年来, 其工艺技术、材料组成、性能和品种得到很大发展, 有非常高的硬度和耐磨性, 在高硬工件的精加工和半精加工中应用比较广泛。

3) 氮化硅基陶瓷刀具是新一代的陶瓷刀具, 我国是最早开发氮化硅陶瓷刀具的国家之一。复合 Si_3N_4 陶瓷刀具有较高的耐磨性和抗冲击性, 特别适合于各类铸铁件的粗精加工, 也能进行毛坯拨荒粗车、铣削、刨削等冲击力很大的加工, 复合 Si_3N_4 陶瓷刀具在我国冶金、水泵、矿山机械、汽车等行业已得到广泛应用。

4) 复合 TiCN 金属陶瓷刀具是一种高硬度、高耐磨性的新型金属陶瓷刀具, 它特别适合于各类高硬高强度钢(如淬硬钢等)的加工, 可对高硬材料实现“以车铣代磨”干切削, 免除退火工艺和冷却液, 减少环境污染, 实现绿色加工。复合 TiCN 金属陶瓷刀具已在冶金、轴承、齿轮、滚珠丝杠、汽车、军工等十几个行业得到应用。

5) 用新型陶瓷刀具实现的一系列难度很大的切削项目, 是我国材料研究工作者和相关行业科技人员在机械加工技术上的创新。

6) 和其他刀具一样, 陶瓷刀具也不是万能的, 各有一定的适用范围, 针对不同的工件材料和加工状况, 研制出系列化的刀具材料, 是材料工作者的责任。

参考文献

- [1] Li X S, Low I M. Ceramic cutting tools- An introduction [J]. Key Engineering Materials, 1994, 96: 1 - 18.
- [2] Dawihl W, Dorre E, Dworak U. Application of ceramic tools in machining steel and cast iron[J]. Powder Metallurgy International, 1971, 3(4): 189 - 192.
- [3] Whitney E D. Modern ceramic cutting tool Materials[J]. Powder Metallurgy International, 1983, 15(4): 201 - 205.

- [4] Claussen N. Fracture toughness of Al_2O_3 with an unstabilized ZrO_2 dispersed phase[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1976, 59(1-2): 49-51.
- [5] Wei G C, Becher P F. Development of SiC-whisker-reinforced ceramics[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1985, 64(2): 296-304.
- [6] Billman E R, Mehrotra P K, Shuster A F, et al. Machining with Al_2O_3 -SiC whisker cutting tools[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1988, 67(6): 1016-1019.
- [7] Katz R N. An assessment of the present status and future prospects of advanced ceramics in high temperature structural applications[A]. Proceedings of the World Congress on High Tech Ceramics, the 6th International Meeting on Modern Ceramics Technologies[C]. Milan, Italy, 1987. 145-161.
- [8] Katz R N. High-temperature structural ceramics[J]. Science, 1980, 208: 841-847.
- [9] 清华大学. 氮化硅陶瓷刀具切削性能的试验研究[R]. 清华大学, TH78002, 1978.
- [10] Miao H Z, Zhou C B, Liu Y H, et al. Studies on the application of hot-pressed Si_3N_4 ceramics as cutting tools[J]. Ceramurgia International, 1980(1): 36-39.
- [11] Wu T K, Miao H Z, Jiang Z Z, et al. Studies on silicon nitrides and silicon carbides[A]. Proceedings of International Symposium on Factors in Densification and Sintering of Oxide and Non-oxide Ceramics[C]. Tokyo, Japan, 1978. 443-457.
- [12] Miao H Z, Luo Z B, Jiang Z Z. A new type of ceramic cutting tool[A]. Proceeding of Second International Metal Cutting Conference[C]. Wuhan, China, 1985. 583-595.
- [13] Miao H Z, Qi L H, Ma D J, et al. Studies on Si_3N_4 ceramic cutting tool materials and their applications[J]. Silicon Nitride Ceramics, Scientific and Technological Advances, MRS. 1993, 287: 507-511.
- [14] Miao H Z, Qi L H, Zeng Z Q, et al. Si_3N_4 -based and TiC_xN_x -based ceramic cutting tools[A]. Ceramics: Getting into the 2000's, Part D[C]. 1999. 165-172.
- [15] Ekstrom T, Nygren M. Sialon ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1992, 75(2): 259-276.
- [16] Ekstrom T. Effect of composition, phase content and microstructure on the performance of yttrium SrAlO-N ceramics[J]. Materials Science and Engineering A, 1989, 109: 341-349.
- [17] 董良金, 黄振坤, 孙维莹, 等. β - Si_3N_4 : α' -Sialon 复相陶瓷的研制[A]. 第四届全国高技术陶瓷学术年会论文集(上)[C]. 1992. 21-23.
- [18] 苗赫濯, 齐龙浩, 曾照强, 等. 新型陶瓷刀具在机械工程中的应用[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 152-155.

(编辑 何学锋)