

陶瓷刀具 切削加工

艾 兴 萧 虹 编著



机械工业出版社



本书详细介绍了国内外陶瓷刀具的发展与应用情况，并对陶瓷刀具材料的制造方法、物理机械性能以及陶瓷刀具的切削特征、几何参数、切削用量、磨损与破损、加工的表面质量、合理使用等问题进行了系统地论述与分析。

本书适于从事机械加工、刀具制造与使用等方面工作的工程技术人员以及大专院校有关专业师生参考。

陶瓷刀具切削加工

姜 兴 翁 虹 编著

责任编辑：冯永亨 温莉芳 责任校对：黄 薇
封面设计：王 伦 版式设计：张伟行

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 8⁵/₈ · 字数 183 千字

1988年7月北京第一版·1988年7月北京第一次印刷

印数 0.001—2.550 · 定价：2.90元

ISBN 7-111-00055-2/TH·11

前 言

陶瓷刀具是一类新型刀具，近年来发展很快。山东工业大学最近几年研制成功的几种新型陶瓷刀具材料，已在生产中推广应用。由于国内外有关陶瓷刀具切削加工的书籍很少，为了大力推广这种有前途的新型刀具，使金属切削加工领域的广大工程技术人员、大专院校师生和工人同志更好地了解并掌握它的切削过程特点和合理使用知识，促进机械加工生产的发展，我们在总结这几年系统的试验研究、推广使用陶瓷刀具的经验基础上，收集了大量的有关资料，写成这本书。它包括国内外陶瓷刀具的发展与应用情况，陶瓷刀具的制造方法，陶瓷刀具的物理机械性能，切削过程中的切削力、切削温度，刀具磨损与破损，刀具几何形状，切削用量，加工表面质量以及刃磨与合理使用等，内容比较丰富。

本书的主要特点是有一定的理论知识，但更着重于实际应用。书中有许多具体应用陶瓷刀具的实例以及切削用量等数据，可供生产实际中参考。

本书初稿于1983年写成后；根据不断的研究成果和使用经验，几经修改补充，曾多次作为山东工业大学举办的全国性“陶瓷刀具切削加工”学习班的讲义，得到大家许多帮助与热情鼓励。

重庆大学萧诗纲教授对本书初稿曾作仔细审阅并提出许多宝贵意见，在此致以深切的谢意。

限于作者水平，书中的缺点、错误在所难免，诚恳希望读者批评指正。

作者 于济南

目 录

概论.....	1
一、刀具材料的发展,促进切削加工技术的进步	1
二、现代陶瓷刀具材料的发展,必将成为切削加工技术进 步中一支重要的生力军	9
三、陶瓷刀具材料成功应用的关键在于合理使用	10
第一章 陶瓷刀具材料的发展和动向	12
第一节 国外陶瓷刀具材料的发展	12
第二节 国内陶瓷刀具材料的发展	22
第三节 展望	29
第二章 陶瓷刀具材料的类型、制造方法及性能	31
第一节 陶瓷刀具材料的类型	31
一、氧化铝系陶瓷	31
二、氮化硅系陶瓷	41
三、复合氮化硅-氧化铝 ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) 系陶瓷	43
第二节 陶瓷刀具材料的制造方法	45
一、冷压法	45
二、热压法	46
三、热等静压法	52
第三节 陶瓷刀具材料的特性	60
一、硬度	60
二、强度	61
三、抗氧化性能	64
四、弹性模量和泊松比	65
五、断裂韧性	66
六、抗磨损性	67

七、抗热震性	68
第四节 陶瓷刀具材料的应用	71
第五节 小结	75
第三章 陶瓷刀具切削过程的特征	76
第一节 切屑形成的特点	76
一、切削变形	76
二、积屑瘤	80
第二节 陶瓷刀具的切削力	83
一、切削合力与分力	83
二、切削功率	86
三、车削力的实验公式	87
四、端铣时的切削力	91
第三节 陶瓷刀具的切削温度	101
一、切削热的产生和分布	101
二、陶瓷刀具切削温度的实验公式	103
第四节 小结	110
第四章 陶瓷刀具的磨损和破损	112
第一节 陶瓷刀具的切削性能	112
一、切削时的耐磨损性能	112
二、切削时的抗破损性能	122
第二节 陶瓷刀具的磨损特征与磨损机理	128
一、陶瓷刀具的磨损形态	129
二、陶瓷刀具的磨损机理	135
第三节 陶瓷刀具的磨钝标准和磨损耐用度	141
第四节 陶瓷刀具的破损	141
一、陶瓷刀具脆性破损的形态	142
二、陶瓷刀具脆性破损的原因	145
三、陶瓷刀具的破损规律和破损耐用度	150
第五节 小结	152

第五章 陶瓷刀具的几何参数	154
第一节 前角 γ_o 的选择	154
第二节 切削刃的倒棱	160
第三节 后角 α_o 的选择	164
第四节 主偏角 κ_r 的选择	168
第五节 刃倾角 λ_s 的选择	169
第六节 刀尖的形状及其尺寸	170
第七节 小结	172
第六章 陶瓷刀具的切削用量	174
第一节 切削用量与刀具耐用度的关系	174
一、连续切削	174
二、断续切削	179
第二节 陶瓷刀具切削用量的选择	183
一、陶瓷刀具耐用度的选择	184
二、陶瓷刀具切削用量合理选择的步骤	185
三、陶瓷刀具切削用量的推荐值	188
第三节 陶瓷刀具加工的经济分析	188
第四节 小结	191
第七章 陶瓷刀具加工的表面质量	193
第一节 已加工表面的形成	193
第二节 已加工表面的粗糙度	195
一、影响已加工表面粗糙度的因素	195
二、陶瓷刀具加工淬硬钢时形成表面粗糙度的特点	197
三、陶瓷刀具加工时切削条件对已加工表面粗糙度的影响	197
第三节 已加工表面硬化	201
一、加工硬化的产生原因和表示方法	201
二、陶瓷刀具加工淬硬钢时切削条件对加工硬化的影响	202
三、陶瓷刀具加工未淬硬钢时切削条件对加工硬化的影响	206

第四节 已加工表面的残余应力	208
一、残余应力产生的原因	208
二、残余应力对零件使用性能的影响	209
三、陶瓷刀具加工淬硬钢时切削条件对残余应力的 影响	211
四、陶瓷刀具加工淬硬钢时切削条件对残余应力的 影响	214
第五节 小结	220
第八章 陶瓷刀具的使用	222
第一节 陶瓷刀具的结构	222
一、对陶瓷刀片机械夹固的要求	222
二、刀具的结构形式	223
第二节 使用陶瓷刀具时机床的选择	226
第三节 陶瓷刀具切削时的卷屑和断屑	228
第四节 陶瓷刀具的刃磨和研磨	232
一、砂轮的选择	232
二、刃磨用量的选择	234
三、陶瓷刀具刃磨时的冷却	235
第五节 合理使用陶瓷刀具	235
第六节 小结	236
附表1 陶瓷刀具试验和应用实例	238
附表2 陶瓷刀具加工钢和铸铁时推荐的切削用量	244
附表3 陶瓷刀具端铣的切削用量实例	246
附表4 陶瓷刀具粗车和半精车铸铁的切削用量	247
主要参考文献	253

概 论

金属切削加工目前仍然是机械工业应用最广泛的加工方法。各国从事金属切削加工的人数众多，耗资十分惊人。据统计，我国近300万台机床，每年所耗切削加工费用近100亿元。因此，不断提高金属切削加工的劳动生产率，降低生产成本，是提高机械工业生产率的极其重要的途径。这对发展国民经济和提高人民生活水平有着非常重要的意义。

一、刀具材料的发展，促进切削加工技术的进步

在传统的切削加工方法的发展中，刀具起决定性的作用。国际生产工程研究会（CIRP）的一项研究报告指出“由于刀具材料的改进，允许的切削速度每隔十年几乎提高一倍。”实践证明，每一种新刀具材料的出现，都使机械加工的能力和水平向前迈进一大步。

一百三十多年来，刀具材料从碳素工具钢到今天的超硬刀具材料有了很大的发展。18世纪首先出现了碳素工具钢，能维持切削性能的最高温度仅为 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，切削速度只有 $4\sim 10\text{m/min}$ 。1900年出现了高速钢刀具，红硬性有所提高，可在 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下进行切削。因此切削速度可提高 $3\sim 4$ 倍，达到 $30\sim 40\text{m/min}$ 的水平（以切削普通碳素钢为基准，下同）。到1923~1932年间，出现了碳化钨钴（WC-Co）并添加碳化钛（TiC）的硬质合金，在 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的切削温度下切削性能也不发生变化。随后又在这类硬质合金中，加入碳化铌（NbC）和碳化钽（TaC）。由于钽和铌能改善高温

性能，细化晶粒，可提高硬质合金的冲击韧性和红硬性，能在 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的高温下进行切削。50年代末又出现了碳化钛基（TiC）硬质合金。它的基本成分为碳化钛，并以镍、钼作为粘结剂，可在 1100°C 以上进行工作。硬质合金刀具的切削速度比普通高速钢高 $4\sim 10$ 倍，达到 $200\sim 400\text{m/min}$ 的水平，而且可以加工多种难加工材料，大大提高了金属切削加工的劳动生产率，促进了机械工业的发展。

最近若干年来，新刀具材料发展很快，有力地促进了机械加工技术的不断进步。在高速钢方面，发展了许多高性能高速钢，如超硬型高速钢。它的含碳量接近平衡碳，在热处理后可达很高的硬度（HRC67~70），而且在 600°C 时，还能保持HRC54~55的硬度。其切削速度可达到 100m/min 以上，适合加工多种难加工材料。如美国的M42，瑞典的HSP-15与HSP-17和我国独创的铝高速钢（W6Mo5Cr4V2Al）等。

在高速钢领域中，还发展了粉末冶金高速钢，其物理机械性能如抗弯强度和冲击韧性高于熔炼高速钢，进给量一般可提高30%左右，适于大截面和断续切削。

1968年前后出现的涂层硬质合金刀具及其迅速发展是硬质合金最重要的发展，这对推广使用可转位刀片有特别重要的意义。有人称涂层硬质合金为刀具材料领域里的一次革命，它促使切削加工水平和能力向前迈进了一大步。硬质合金的涂层是通过气相沉积方法，在硬质合金表面上涂覆一层或几层耐磨性高的难熔金属化合物，既提高了耐磨性和耐热性（可达 $1000\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ），又不降低其韧性。涂层硬质合金抗粘结性强，化学稳定性好，较好地平衡了刀具强度与硬度的矛盾。涂层材料有碳化钛（TiC）、氮化钛（TiN）、碳

氮化钛 (TiCN)、氮化铝钛 (Ti-AlN)、硼化钛 (TiB_2) 和氧化铝 (Al_2O_3) 等。涂层硬质合金刀片可加工各种金属和非金属材料, 与非涂层刀片相比, 可提高切削速度 30~40%, 甚至可达 1~2 倍, 刀具耐用度提高两倍, 使切削效率提高 80% 以上。

应特别指出的是, 近年来, 涂层技术已进入超硬型材料领域, 如立方氮化硼 (CBN) 和金刚石涂层技术已于 1972 年获得成功。金刚石涂层刀具主要用于切削有色金属、纤维玻璃、石墨或其它耐磨性的材料; 涂层立方氮化硼刀具主要用于切削淬硬钢、高速钢、不锈钢和高温合金。

涂层刀具的另一引人入胜的发展是物理气相沉积工艺成功地用于高速钢刀具, 已广泛应用于高速钢钻头、铰刀、丝锥、铣刀、滚刀、插齿刀、拉刀、成形刀具等。切削效率提高了 1.5~2 倍, 刀具耐用度可提高 3~6 倍。

60 年代末, 出现了超细晶粒硬质合金, 它的硬度和强度高, 切削性能好, 可加工多种难加工材料, 并有较高的刀具耐用度。我国最近几年生产的超细晶粒 YH 新牌号硬质合金, 其硬度为 $\text{HRA} \geq 93$, 抗弯强度达 $1700 \sim 2200 \text{ N/mm}^2$, 可加工铁基、镍基和铁镍基耐热合金, 以及不锈钢、高强度钢、耐热钢及冷硬铸铁等。

陶瓷刀具材料的出现和发展, 把切削加工的能力和水平提高到一个新的高度。虽然早在 1931 年陶瓷材料就试作切削刀具使用, 但因脆性较大, 当时并未得到推广。1938 年前后, 有些国家相继研究, 直到 50 年代中期, 才逐渐发展起来。特别是最近十几年来, 无论在刀具性能、产品种类和使用领域的开拓方面都有相当的进展。现代陶瓷刀具材料远非 25 年前的陶瓷刀具材料可比。它的主要成分是氧化铝

(Al_2O_3)、氮化硅(Si_3N_4)等,经冷压或热压烧结而成。它的高温硬度高,耐磨性、耐热性和化学惰性好。除纯氧化铝、氮化硅等陶瓷刀具外,已发展出加入多种碳化物、氮化物、硼化物(如 TiC , WC , ZrO_2 , TiB_2 等等)和金属 Ni 、 Mo 等的组合陶瓷刀具。工艺上已从冷压发展成为热压、热等静压烧结等。材料的颗粒已细化到 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 以下。因而硬度比碳化钛基硬质合金还高,达 $\text{HRA}94\sim 96$,抗弯强度 $800\sim 1000\text{N/mm}^2$,而抗热冲击性能大幅度提高。在 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 的高温下,切削性能仍不改变,可以 $250\sim 400\text{m/min}$ 的速度切削钢, $800\sim 1000\text{m/min}$ 的速度切削铸铁。切削速度比硬质合金还高 $1\sim 2$ 倍,刀具耐用度高 $4\sim 9$ 倍,工序劳动量减少 40% 左右,并可用于连续车削和铣削,有很高的生产率。例如,用 $v=390\text{m/min}$ 加工铸铁时,陶瓷刀具的耐用度为碳化钨基硬质合金的 5 倍;为碳化钛基硬质合金的 3 倍。加工 40Cr 钢时,陶瓷刀具的耐用度为硬质合金的 $5\sim 6$ 倍。在美国通用汽车公司的别克(Buick)分部,陶瓷刀片已取代了硬质合金涂层刀片加工铸铁飞轮。配合一台机器人,两台车床的净生产率已从每小时 15 件提高到 50 件。

1957年美国GE公司首次合成立方氮化硼(CBN)。它是一种超硬刀具材料,有很多独特的优点。硬度达 $\text{HV}8000\sim 9000$,接近金刚石;可在高达 $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ 的温度下进行切削,允许使用更高的切削速度,对进一步提高生产率有很大的潜力。1972年聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼广泛用于工业,使金属切削加工业与当代材料工业发展的适应性增强了。聚晶金刚石可加工铜、铝等有色金属以及耐磨塑料、硬橡胶等非金属材料直至硬质合金、陶瓷、纤维玻璃等硬脆材料,其耐用度比硬质合金刀具高 $20\sim 200$ 倍;加工效率和精

度远非硬质合金刀具所能比美,切削性能甚至比天然金刚石还好。聚晶立方氮化硼可加工淬硬钢,冷硬铸铁和镍基、钴基合金;还可加工喷焊、喷涂表面。例如车削硬度为HRC55的喷有铬化硼的表面,用硬质合金只能加工3件,用立方氮化硼可加工1000件,表面粗糙度为 $R_a0.63\sim1.25\mu\text{m}$ 。

这两种超硬刀具材料已做成可转位刀片,并已用于车、钻和铣削。苏联用以精铣和半精铣HRC40~70淬火钢时,切削用量为切削速度 $80\sim300\text{m/min}$,每齿进给量 $0.005\sim0.15\text{mm}$,切削深度 $0.05\sim1.5\text{mm}$,表面粗糙度 $R_a0.2\mu\text{m}$ 。精铣铸铁还可采用更高的切削用量,切削效率比硬质合金高1.5~3倍。用于铣削过共晶硅铝合金时,切削深度可达 9mm ,表面粗糙度 $R_a0.42\sim1.0\mu\text{m}$ 。超硬刀具材料的发展,又把切削加工水平提高到一个崭新的水平,可在 1000m/min 以上的高速进行切削加工,并且加工硬度达HRC70的工件也是完全可能的了。

刀具材料的发展是人们力图发展生产,提高加工效率的结果。刀具材料的发展历史,就是金属切削加工发展、革新的历史。图0-1表示一百多年来由于刀具材料的进步,促进切削速度提高的情况。由图可知,最近几十年,刀具材料的发展日新月异,把切削加工不断提高到新的水平。今天的陶瓷刀具和超硬刀具材料比当年的碳素工具钢,切削速度已提高了100多倍。图0-2为新刀具材料与碳化钨基硬质合金刀具对比,切削速度相对提高的情况。由图可看出,超硬刀具材料的切削速度比碳化钨基硬质合金刀具还高4~5倍。因此刀具材料技术的巨大进步,大幅度提高了劳动生产率。图0-3表示用不同刀具材料粗车一根普通碳钢棒($\phi100\times500\text{mm}$)所需要的时间的比较。在1900年用碳素钢刀具车削时,需要

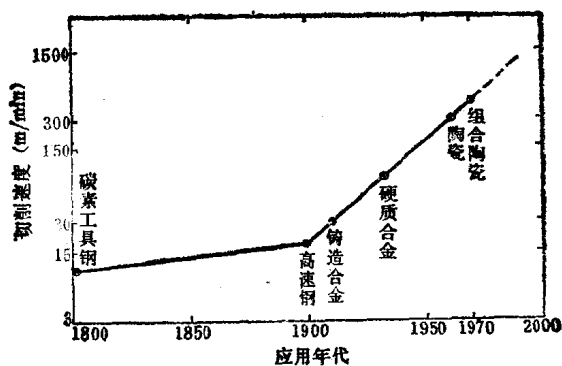


图0-1 刀具材料的进步^[3]

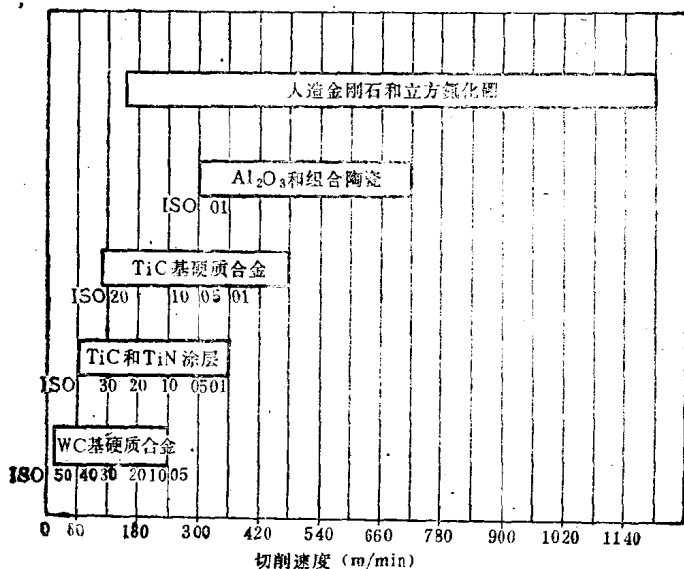


图0-2 不同刀具材料的最佳切削速度范围^[4]

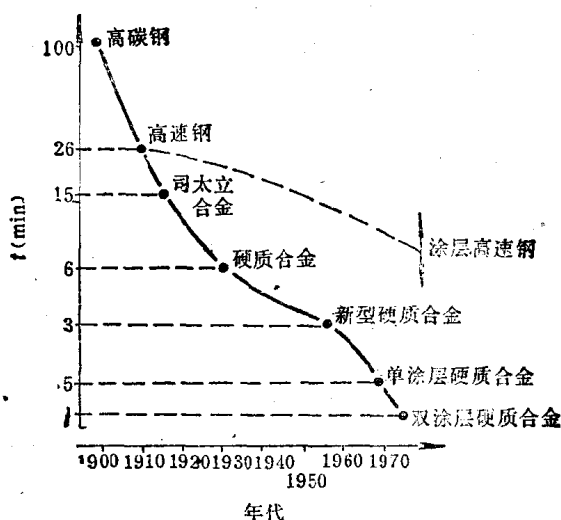


图0-3 不同刀具材料车削钢棒时所需切削时间的比较³

100min。1910年用高速钢刀具加工需要26min。现在用单涂层（TiC涂层）硬质合金刀具加工需1.5min，而用双涂层（底层为TiC，上层为 Al_2O_3 ）硬质合金刀具只要1min就够了。如果用陶瓷刀具和超硬刀具材料加工，所需时间均少于1min。

表0-1为1977年美国所耗刀具费用及其金属切除量情况。由表可知，高速钢刀具所耗费用占刀具总费用的65%，而金属切除量只占28%；但硬质合金刀具金属切除量所占比例最大，而费用并不高。陶瓷刀具也有类似情况，所以有显著的经济效果。金刚石等超硬刀具材料价格虽然较贵，但由于其切削效率高，比高速钢刀具更有其独特的优越性。

从第二次世界大战以来，由于许多新兴工业技术如航

表0-1 刀具费用与金属切除量情况(1977年)^[8]

刀 具 材 料	占刀具总费用(%)	占金属切除量(体积)(%)
高 速 钢	85	28
硬质合金	33	68
陶瓷刀具	2	4
金 刚 石	<1	<1
其它刀具	≪1	≪1

空、航天、导弹、微电子、液压设备、喷气发动机和化工设备等迅速发展,使用和发展了很多新的工程材料,在制造技术上需要解决一系列新的难题。一方面,应用新的物理和化学原理,开发了许多新的高效加工方法,如激光加工、电火花加工、电化学加工、电子束加工、等离子束加工、高压水柱喷射加工等;另一方面,由于刀具材料的进步和高动态性能的现代机床的出现,促使许多新的工程材料,能够用传统的切削加工方法进行加工。当前,在整个金属切削领域里,除手用工具和极少数低速刀具还部分使用碳素工具钢外,应用较多的刀具材料主要是高速钢、硬质合金、陶瓷刀具材料和超硬刀具材料四类。它们各有其特点和适用范围,相互补充,并且不断发展。

由图 0-2 可以看出各种刀具材料加工普通碳钢与低碳合金钢的切削速度范围及其相互重叠和竞争的区域。加工其它材料,如高合金钢需要采用较低的速度;但加工铝或低碳钢,速度可以大幅度提高。

然而,为了适应新兴工业发展的需要,工程材料的发展趋势是强度愈来愈高,种类愈来愈多。而传统的切削加工方法加工成形所需能量的利用率很低,现有刀具材料又不能适应许多新材料如超级耐热合金、非结晶金属、复合材料与涂层

材料、陶瓷材料及其它无机材料的加工。因此，既要开发新的高效加工方法，同时还要继续研制高性能的刀具材料。图0-4为现有各种刀具材料的性能变化特性。由图可知，强度

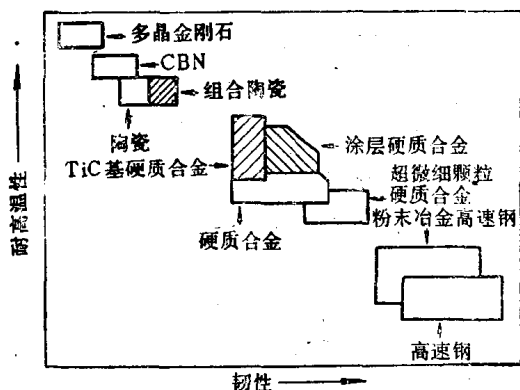


图0-4 各种刀具材料的特性^[6]

或韧性较高的刀具材料（如高速钢），其耐磨性或高温硬度（常温硬度）就较低；而耐磨性或高温硬度较高的材料（如陶瓷），其强度或韧性又较低。所以，现有刀具材料各有其局限性，不可能存在“万能”刀具材料。

切削加工方法发展的历史说明，切削加工既不可能完全被代替，但目前它对许多工程材料又无能为力。面对日益发展和应用新工程材料的挑战，应该是：一方面努力应用新的物理和化学原理开发新的加工方法；另一方面积极发展和革新刀具材料，促进传统的切削加工技术更快发展，进一步提高加工能力和水平。

二、现代陶瓷刀具材料的发展，必将成为切削加工技术进步中一支重要的生力军

在切削加工技术的进步中，无疑是高速钢和硬质合金

(包括涂层刀具)仍然起着重要作用。然而,由于添加各种碳化物、氮化物、硼化物和氧、氮化合物等并改进生产工艺制成的各种现代陶瓷刀具材料,具有耐热性、耐磨性和化学稳定性等独特的优越性,在高速切削范围以及加工某些难加工材料,特别是加热切削法方面,包括涂层刀具在内的任何高速钢和硬质合金刀具都无法与之相比。何况在世界范围内,钨、钴、钼等价格昂贵,又特别稀缺,而陶瓷材料和碳化钛等多种碳化物,资源比较丰富,价格也便宜,对发展现代陶瓷刀具有十分有利的条件。

数控机床在切削加工技术进步中应用日益广泛。正是这种数控机床的性能更能发挥陶瓷刀具的潜力。因此,陶瓷刀具尽管目前使用量还比较少,还没有达到预期的效果。但是,它有巨大的潜力和广阔的发展前景,可以指望更多的人,将会改变他们原先认为陶瓷刀具易碎和性能不可靠的印象。认识到由于现代陶瓷刀具的发展,以 $200\sim 1200\text{m/min}$ 的高速进行切削已经成为现实,并且对多种高硬度、高强度以及耐磨、耐腐蚀的新工程材料的切削加工也已经是可行的了。可以有把握地说,随着切削速度的继续提高,现代陶瓷刀具的使用量将有较大的增长而成为切削加工技术进步中一支重要的生力军。

三、陶瓷刀具材料成功应用的关键在于合理使用

任何刀具材料如不能正确地合理使用,则很难发挥其巨大潜力。特别是陶瓷刀具,有不同于硬质合金的物理机械性能,成败的关键更取决于是否合理使用。长期以来,由于陶瓷刀具较脆,以及错误使用而失败的教训,使人们造成的误解和不信任,限制了陶瓷刀具的推广使用。

陶瓷刀具在切削过程中有着不同的特点,因其摩擦系数