# 工程陶瓷的磨削机理和磨削模型

机械科学研究院（北京 100044） 孔伟时

TQ174.B

结构和功能特性均远优于普通陶瓷的工程陶瓷的出现最早也只是在20世纪初期，其发展和应用不过百年的历史。真正从理论上对工程陶瓷的加工原理和加工模型开展深入研究仅仅是最近二、三十年间由材料学和机加工工艺学领域的学者们共同组织发起的。在工程陶瓷的机械加工领域中，尽管长期以来采用了各种有效的磨削手段和工具对工程陶瓷进行精密或超精密加工，以获得各种特殊工况下使用的机械零部件，但是，由于陶瓷材料本身的定义广泛、材质特殊，使得在工程陶瓷的制备和加工过程中遇到了许多传统的金属切削、磨削加工过程中所不曾遇到过的难题。导致工程陶瓷的加工成本居高不下，成为阻碍其得到更广泛应用的主要原因之一。

针对上述问题，近年来有很多学者在工程陶瓷的机械加工领域就工程陶瓷的磨削机理研究和磨削模型建立开展了大量富有成效的工作，只有对各种材质的工程陶瓷磨削机理的深入认识及磨削模型的正确建立才能彻底揭示工程陶瓷材料磨削加工的全过程，扬长避短，才能寻找出在工程陶瓷加工过程中解决各种复杂问题的最优方法，并应用于指导生产实践以期获得精度、表面粗糙度以及材料性能均符合要求的工程陶瓷零部件。但是，由于种种客观条件的限制，迄今为止工程陶瓷磨削机理、磨削模型的研究还没有一个完全规范的标准。许多加工方法仍然缺乏理论的指导，而主要依靠生产实践中成功或失败的经验才确立起来的。

总之，工程陶瓷以其优异的性能在能源、汽车、航空航天等领域展示了广阔的应用前景。同时，随着生产发展和技术进步对加工后的工程陶瓷各方面性能要求也越来越高。从而需要对工程陶瓷材料磨削机理的认识和磨削模型的建立进行更广泛而深入的研究。

工程陶瓷材料磨削机理的研究工作是一门涉及众多基础学科和应用学科的交叉学科，所考虑的问题主要包括材料学、力学、摩擦学、传热学等等。目前关于工程陶瓷材料磨削机理和磨削模型的研究发展主要侧重于以下几个方向：

**1. 断裂力学磨削机理和磨削模型**

工程陶瓷材料是由金属或半金属原子与非金属原子以离子键或共价键形式相结合而成的化合物，具有很高的硬度和化学稳定性，但韧性较低，是一种特殊的硬脆材料。断裂去除的现象贯穿整个加工过程的始终，其中加工初期出现断裂尤为明显。在工程陶瓷磨削过程中主要存在两种断裂现象：第一种断裂现象发生在加工过程的初期，由于工件表面粗糙度值较大，同时砂轮的表面地貌凸凹较为明显且磨粒锋锐，将会以碰撞形式而发生的断裂。第二种断裂现象发生在磨削过程的中后期，此时砂轮磨粒和工件表面会出现一种近似平台状的接触（其模型变化如图1所示）。在磨削过程的中后期阶段的断裂去除要以压痕断裂力学的模型来考虑。压痕断裂力学的模型建立是基于将陶瓷磨削中磨粒与工件表面的作用近似看作小范围的压痕现象。通常包括定点压头模型和移动压头模型。如图2所示定点压头模型，压头正下方是一小的塑性变形区，从塑性区开始形成两个主要的裂纹系统，径向裂纹和横向裂纹。径向裂纹通常导致材料强度的降低，甚至是表面或亚表面的微观损伤，使材料的表面强度降低。而横向裂纹则主要引起材料的去除，对材料加工后的表面粗糙度有影响。工程陶瓷磨削表面的裂纹集度、长度及裂纹层的深度对零件的使用性能至关重要。

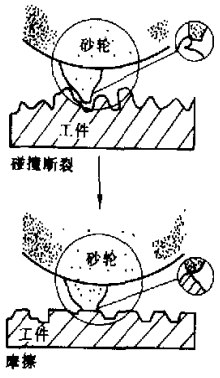

图 1

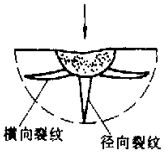

图 2

这一模型已从最初的普通静载荷发展为切向载荷（移动压头）的情况。同定点压头一样移动压头也会产生局部塑性变形。不同的是，法向接触压力与接触形式和压头形状有关。

有学者在20世纪80年代提出了陶瓷材料的磨损数学模型，公式如下：

$$V = \alpha \frac{W^{3/4}}{K_c^{1/2} \cdot H^{5/8}} (E/H)^{4/5} \cdot L$$

式中 $V$——磨损体积
$W$——载荷
$K_C$——断裂韧性
$H$——硬度
$\alpha$——与材料无关的常数
$E$——弹性模量
$L$——滑行距离

此公式是将陶瓷材料的硬度、断裂韧性以及弹性模量等力学性能与陶瓷的磨损特性联系起来建立模型，对于研究陶瓷材料磨削加工过程有一定的指导作用。此后，随着经典断裂力学理论的不断发展和完备，科学家们又推导出陶瓷材料的力学性能判据 $S_C$，公式如下：

$$S_C = P_o \sqrt{d_{max}} / K_{1C}$$

式中 $P_o$——最大赫兹接触应力
$d_{max}$——最大裂纹长度
$K_{1C}$——断裂韧性

研究表明，当 $S_C \geq 7/(1+10\mu)$（$\mu$ 为摩擦系数）时，陶瓷材料发生严重磨损，磨损发生的主要机制是表面断裂，产生大量片状磨屑，表现在加工过程中即为脆性去除；当 $S_C < 7/(1+10\mu)$ 时，陶瓷材料会发生轻微磨损，磨损的主要机制是产生微裂纹或犁沟，表现在加工过程中会出现陶瓷材料的延性域去除。

**2. 切削近似磨削机理和磨削模型**

切削近似磨削机理和模型的研究方法是基于金属磨削机理的研究方法，包括切削刃的近似和磨屑及工件被加工表面的显微观察等等。其切削模型如图 3，对于工程陶瓷磨削过程中所产生的磨屑而言，在大多数情况下主要是脆性断裂的结果，同时伴随着许多细小微粒。这一现象通常认为是由于陶瓷的硬脆特征导致横向断裂的磨屑又进一步破碎而成细小微粒。但在高速磨削或小进给量磨削的情况下，也可以发现连续的塑性磨屑，表明了塑性去除的存在。

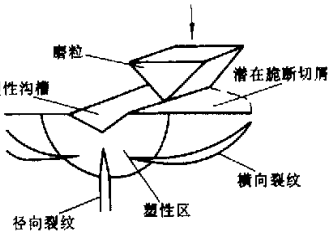

图 3

对被加工表面的显微表面观察而言，利用单颗粒金刚石在氮化硅和氧化铝表面的划痕实验也表明了沿沟痕的的塑性变形、横向断裂和破裂铲除现象，以及刀头下前方的破碎现象，基本上与磨屑的生成相吻合。

对于这一模型所给出的磨粒下方的塑性区，也存在着很多疑问。在陶瓷材料的磨削过程中，磨粒和工件之间的接触会产生局部应力和应变集中。这一应力场通常由静态压应力、剪应力以及磨粒和工件接触界面的摩擦力引起的拉应力组成。这样复杂的应力场导致了以位错和解理方式的材料变形。随着应力的不断变化，材料的变形也会经历不同的阶段。从微观角度来看，被加工陶瓷材料的晶格（点阵）结构会经历以下三个变形阶段：弹性变形、位错和原子间结合键断裂。位错的层积会导致晶面间的解理。应力集中引起的相邻晶核剥离导致了局部粉化。在晶界处由结合键断裂或解理导致的微裂纹会停止生长，在一定程度上对粉化起到抑制作用。由于陶瓷材料的这种粉化作用使得在磨粒与工件接触的部分形成粉化区域。简略的形成过程可描述如下：在磨削初期，材料会发生弹性变形。随着剪应力的增加，沿特定的滑移面会产生位错。此后，剪应力继续增加，发生原子间结合键断裂，最终导致工件材料出现粉化。通过原子间化学结合键的断裂，粉化过程降低了陶瓷材料磨屑的颗粒尺寸。

以上说明磨削过程是复杂的多因素交互作用的过程。仅使用单个金刚石磨粒的切削模型来近似工程陶瓷的磨削加工模型是不全面的。针对不同的材料使用不同性能的砂轮所用的切削近似标准应该是不同的。就利用单个磨粒来近似整个磨削过程的方法而言，这一模型还是不全面的，仍然需要进行深入的试验和理论分析工作。

**3. 半延性磨削机理和磨削模型**

工程陶瓷半延性磨削机理和模型是基于以下两种理论；首先，磨削过程中后期与磨粒切削刃相接触的脆性材料在高温条件下会发生软化，表现出一定的塑性性能，便于材料的去除。其次，在砂轮高速进给过程中，工件和砂轮表面相互接触所产生的压应力和变形导致磨粒的脱落以及工件表面和亚表面的微观裂纹，这些微观裂纹的逐渐增长最终导致材料的脆性去除。其磨削模型如图 4 所示。

科学家们试验表明：对于 $Al_2O_3$、$Si_3N_4$ 和 SiC 三种陶瓷材料利用金刚石砂轮进行磨削，发现随着

砂轮转速（$v_w$）和切深（$a_p$）的增加，磨削温度也逐渐升高．尤其是对于 $Si_3N_4$ 和 SiC 材料在 $v_w$ = 12m/min 时磨削温度能达到 1200℃左右。由于材料间离子键和共价键的结合比例不同，对于以离子键结合为主的 $Al_2O_3$ 和 $Si_3N_4$ 在高速磨削情况下表现得更容易被去除，试验证实了在陶瓷材料的高速磨削过程中磨削温度对材料的可磨削性存在着直接的影响；对于硅和锗这两种脆性材料而言，用树脂结合剂的杯形砂轮进行高速磨削，在磨削温度达到被加工材料熔点的 60% 时，也即在锗的加工温度达到 450℃，硅的加工温度达到 750℃时，两种材料会表现出很高的塑性，同时材料表面有明显的磨削划痕所形成的条纹，表明脆性材料磨削加工中延性磨削现象的存在。显然，这一理论更侧重于从热学、材料学角度分析脆性材料的磨削去除机理，需要研究的问题包括磨削温度场的变化、高温条件下被加工材料微观结构变化等等。

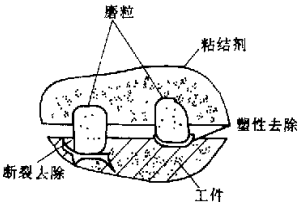

图 4

**4．摩擦学磨削机理和磨削模型**

利用摩擦学的系统研究方法分析陶瓷磨削加工过程并进行系统建模，目前还鲜有耳闻。笔者经过翻阅资料以及实际加工过程的观察，考虑到陶瓷磨削过程中各种可能的影响因素提出了基于系统理论的研究方法，来分析陶瓷磨削加工过程的加工机理并构建系统模型。人们通常将由两个或者两个以上的要素所组成的极其复杂的研究对象称为系统，系统的基本组成包括构成系统的各要素、各要素的功能以及各要素之间的关系。系统研究方法的基本特点，就是从联系和发展角度来看问题，将所研究的事物作为一个整体来分析，既注意到整体内部中各个要素之间的相互联系和相互制约，又特别注意从外部氛围既环境的角度，综合考虑整个系统的运动和变化，以达到最全面地处理问题和解决问题的目的。

工程陶瓷的磨削过程是需要考虑多方面影响因素的机械加工过程。它既不同于金属材料的宏观塑性剪切磨削过程，又不同于高脆性工程材料那样的裂纹扩展断裂过程。影响因素大体可以分为内部影响因素和外部影响因素两类。内部影响因素考虑的是加工工具（通常指各类型砂轮）和被加工工件各自的力学性能（如强度、硬度、脆性指数、断裂韧性等等）以及被加工工件自身的微观结构（如杂质、气孔、位错、晶粒尺寸等等）对加工过程的影响。外部影响因素则主要分为加工过程可控制因素（如砂轮转速、工件进给速率等等）以及加工过程伴生因素（如磨削热、摩擦磨损、化学反应等等）对加工过程的影响。在系统理论中上述的各种影响因素、在加工过程中体现出来的影响作用以及相互之间的联系可以分别看作是组成系统的要素、功能以及要素之间的关系。鉴于陶瓷磨削加工过程的复杂程度，只有利用系统研究方法才有可能综合地、全面地、正确地解释全部加工过程的加工机理。

基于系统研究方法所建立的陶瓷磨削加工过程系统模型是综合了弹性力学、断裂力学、摩擦磨损、传热学和材料学等学科的基本理论知识，并参考其他陶瓷磨削的建模方法，经过大量的实验现象观察和数据记录，针对不同的陶瓷材料从宏观和微观两种角度建立合理的磨削模型。需要指出的是，在这个系统模型中，同时考虑到某些工程陶瓷加工过程中出现的塑性变形、挤压和摩擦。因为在加工过程中当磨削温度达到一定程度时某些工程陶瓷工件会由常温下的脆性特征逐渐转变为半脆性甚至是塑性特征。当加工过程到中后期时，由于磨削比的变化导致切向磨削力和法向磨削力的比值变小，磨削作用主要表现为挤压和摩擦。对于这一阶段的加工过程，摩擦学与塑性力学的引入是绝对必要的。不难想象，利用系统方法最终得出的陶瓷磨削模型将是一种包括力学模型、传热学模型、摩擦磨损模型等的综合模型。

尽管目前我们对于系统研究方法分析工程陶瓷的磨削机理建立磨削模型的工作还处在探索阶段，但是随着试验手段提高和理论研究进展，相信在这一领域的研究将会逐步地得到完善。

随着试验手段和试验设备的不断改进以及计算机技术的迅猛发展，使得工程陶瓷的加工过程越来越有可能实现准确的计算机模拟并在微观领域予以研究。但是由于工程陶瓷材料的多样性和特殊性，仍然有很多问题值得深入研究。同时，不同角度研究方法的引入也将大大拓宽这一领域的研究范围。

（收稿日期：20020923）