

微晶刚玉在磨料磨具领域的应用：磨损机理与表面加工性能

杨文君 赵柏喻 国姗姗

山东磐石刚玉有限公司，山东省淄博市，255300；

摘要：本文聚焦于微晶刚玉在磨料磨具领域的应用，深入探讨了其磨损机理以及表面加工性能。首先介绍了微晶刚玉的基本特性，包括其晶体结构、物理化学性质等。通过实验研究和理论分析，详细阐述了微晶刚玉在磨削过程中的磨损机理，涉及机械磨损、化学磨损以及热磨损等方面，同时对微晶刚玉磨具在不同加工条件下的表面加工性能进行了系统研究，以期为微晶刚玉磨具的优化设计和应用提供了理论依据和实践指导。

关键词：微晶刚玉；磨料磨具；磨损机理；表面加工性能

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.029

前言

磨料磨具作为现代制造业中不可或缺的工具，在机械加工、电子制造、航空航天等众多领域发挥着关键作用。随着科技的不断进步和工业的快速发展，对磨料磨具的性能要求也日益提高。磨料作为磨具的核心组成部分，其性能直接影响着磨具的加工效率、加工质量和使用寿命。微晶刚玉作为一种新型的磨料材料，近年来受到了广泛关注。它具有独特的晶体结构和优异的物理化学性能，如高硬度、高韧性、良好的自锐性等，这些特性使其在磨料磨具领域展现出巨大的应用潜力。然而目前对于微晶刚玉在磨料磨具领域的应用研究还不够深入，尤其是在其磨损机理和表面加工性能方面，尚缺乏系统的理论和实践支持。磨损机理是理解磨料磨具在加工过程中性能变化的关键。磨料在磨削过程中会受到各种力的作用，同时还会与被加工材料发生化学反应，这些因素共同导致磨料的磨损。深入研究微晶刚玉的磨损机理，有助于揭示其磨损规律，为提高磨具的使用寿命和加工性能提供理论依据。表面加工性能是衡量磨料磨具加工效果的重要指标。不同的加工条件和磨料性能会对被加工表面的粗糙度、加工精度和材料去除率等产生影响。了解微晶刚玉磨具的表面加工性能，有助于优化加工工艺参数，提高加工质量和效率。因此，本文旨在通过对微晶刚玉在磨料磨具领域的应用进行深入研究，探讨其磨损机理和表面加工性能，为微晶刚玉磨具的进一步发展和应用提供科学依据。

1 微晶刚玉的基本特性

1.1 晶体结构

微晶刚玉是一种由众多细小刚玉晶体聚集而成的多晶体材料。从晶体学角度来看，其晶体结构与普通刚

玉具有高度的相似性，均归属于六方晶系，具备刚玉所特有的晶体结构特征。在刚玉的晶体结构中，氧离子以六方最密堆积的方式排列，铝离子则填充于八面体间隙之中，形成稳定的化学键合结构，这种结构赋予了刚玉材料一系列优异的性能。然而微晶刚玉的显著特点在于其晶体尺寸极为细小，通常处于微米级别。这种微小的晶体结构使得微晶刚玉展现出独特的性能。在微观尺度上，微晶刚玉的晶体之间存在着大量的晶界。晶界是晶体结构中不同取向晶体之间的过渡区域，其原子排列相对无序，存在着较高的能量。晶界的存在对微晶刚玉的材料性能产生了多方面的重要影响。从力学性能方面来看，晶界可以作为位错运动的障碍。位错是晶体中的一种线缺陷，其运动会导致材料的塑性变形。当位错运动到晶界处时，由于晶界处原子排列的不规则性，位错难以继续向前运动，从而被阻碍在晶界附近。这种对位错运动的阻碍作用使得微晶刚玉在受到外力作用时，需要更大的应力才能使位错越过晶界继续运动，进而提高了材料的硬度和强度。例如，在磨削过程中，微晶刚玉磨具需要承受较大的磨削力，其高硬度和高强度特性能够保证磨具在磨削过程中不易发生变形和破碎，从而有效地完成磨削任务^[1]。另一方面，晶界也为材料的变形和断裂提供了通道。在材料受到外力作用时，晶界处的原子结合相对较弱，容易发生相对滑动和分离。当应力达到一定程度时，晶界处可能会首先产生微裂纹，随着应力的继续增加，微裂纹会沿着晶界扩展，最终导致材料的断裂。这种特性使得微晶刚玉在具有高硬度的同时，还具有一定的韧性。与单晶体材料相比，多晶体材料中的晶界能够分散应力，避免应力集中在一个点上，从而提高了材料的抗断裂能力。在磨削过程中，磨具会受到周期性的冲击和摩擦力，微晶刚玉的韧性能使其在磨

削过程中不易发生脆性断裂，延长了磨具的使用寿命。

1.2 物理化学性质

1.2.1 高硬度与高耐磨性

微晶刚玉的硬度通常在莫氏硬度9级以上，接近于天然刚玉。硬度是衡量材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力的重要指标。高硬度使得微晶刚玉能够有效地磨削各种硬质材料，如淬火钢、硬质合金等。在磨削过程中，磨料颗粒需要切入被加工材料表面，高硬度的微晶刚玉能够提供足够的切削力，将材料从工件表面去除，从而实现高效的磨削加工。

1.2.2 良好的化学稳定性

在化学稳定性方面，微晶刚玉对大多数酸、碱和有机溶剂具有良好的耐腐蚀性。这是由于其晶体结构中铝离子和氧离子之间形成了稳定的离子键和共价键，使得微晶刚玉的化学性质相对稳定。在恶劣的化学环境下，如酸洗、碱洗等加工过程中，微晶刚玉能够保持其晶体结构和性能不变，不会与化学物质发生剧烈的化学反应。

1.2.3 较高的热稳定性

微晶刚玉还具有较高的热稳定性。在高温下，许多材料的晶体结构和性能会发生显著变化，如软化、分解等，从而影响其使用性能。然而，微晶刚玉能够在高温下保持其晶体结构和性能不变。这是由于其晶体结构中原子之间的键合强度较高，需要较高的能量才能破坏其晶体结构。在高速磨削等高温加工条件下，磨削区会产生大量的热量，导致磨具和被加工材料的温度升高。微晶刚玉的高热稳定性能够使其在高温下仍然保持良好的硬度和强度，不会发生软化或变形，从而保证了磨削加工的质量和效率。例如，在高速磨削硬质合金时，磨削区的温度可能会高达几百甚至上千摄氏度，微晶刚玉磨具能够在这种高温环境下稳定工作，有效地完成磨削任务。

2 微晶刚玉的磨损机理

2.1 机械磨损

机械磨损是微晶刚玉在磨削过程中最主要的磨损形式之一。在磨削过程中，磨料颗粒与被加工材料之间会发生强烈的摩擦和碰撞，导致磨料颗粒的破碎和磨损。微晶刚玉的机械磨损主要包括磨粒磨损和疲劳磨损。磨粒磨损是指磨料颗粒在磨削力的作用下，像刀具一样切入被加工材料，同时自身也会受到被加工材料的反作用力而发生磨损。由于微晶刚玉具有高硬度和脆性，在磨粒磨损过程中，磨料颗粒容易出现破碎和剥落现象^[2]。

疲劳磨损是指磨料颗粒在反复的磨削力作用下，其内部会产生应力集中，当应力超过材料的疲劳极限时，就会在磨料颗粒表面或内部产生裂纹，随着裂纹的扩展，最终导致磨料颗粒的破碎和脱落。微晶刚玉的微小晶体结构和大量的晶界使得其内部的应力分布更加复杂，容易产生应力集中，从而加剧了疲劳磨损。

2.2 化学磨损

化学磨损是指磨料颗粒与被加工材料或磨削液中的化学物质发生化学反应，导致磨料颗粒的化学成分和结构发生变化，从而引起磨损。在磨削过程中，微晶刚玉可能会与被加工材料中的某些元素发生化学反应，生成新的化合物。例如，当磨削钢铁材料时，微晶刚玉中的氧化铝可能会与铁发生反应，生成铁铝尖晶石等化合物。这些新生成的化合物可能会降低磨料颗粒的硬度和耐磨性，加速磨料的磨损。除此以外，磨削液中的化学物质也可能会对微晶刚玉产生腐蚀作用，导致磨料颗粒的表面发生化学变化，从而影响其磨削性能。例如，一些酸性的磨削液可能会与微晶刚玉发生化学反应，溶解其表面的氧化铝，导致磨料颗粒的磨损。

2.3 热磨损

热磨损是指在磨削过程中，由于磨削区产生大量的热量，导致磨料颗粒和被加工材料的温度升高，从而引起磨料颗粒的磨损。在高速磨削过程中，磨削区的温度可能会高达几百甚至上千摄氏度。高温会使微晶刚玉的晶体结构发生变化，导致其硬度和强度降低，从而加速磨料的磨损^[3]。此外，高温还可能会使磨料颗粒与被加工材料之间发生扩散现象，形成新的化合物，进一步影响磨料的磨削性能。与此同时，热应力也是导致热磨损的重要因素之一。由于磨料颗粒和被加工材料的热膨胀系数不同，在温度变化时会产生热应力。当热应力超过材料的强度极限时，就会导致磨料颗粒的破裂和脱落。

3 微晶刚玉磨具的表面加工性能

3.1 表面粗糙度

表面粗糙度作为衡量被加工表面质量的关键指标之一，深刻影响着零件的配合性质、耐磨性、疲劳强度以及耐腐蚀性等诸多性能。微晶刚玉磨具凭借其独特的物理化学特性，对被加工表面的粗糙度产生着显著且复杂的影响。众多实验研究结果表明，微晶刚玉磨具的粒度、硬度、结合剂类型以及磨削工艺参数等多方面因素，均会对被加工表面的粗糙度产生不同程度的作用。从磨

具粒度的角度来看，一般来说，磨具粒度越细，被加工表面的粗糙度越小。这是因为细粒度的磨具中，磨料颗粒的尺寸更小，在磨削过程中能够提供数量更多的磨削刃。这些密集分布的磨削刃在切入被加工材料时，每个磨削刃所承担的切削负荷相对较小，从而使得磨削痕迹的深度和宽度都得到有效减小^[4]。例如，在精密磨削光学玻璃等对表面质量要求极高的工件时，采用细粒度的微晶刚玉磨具，能够获得表面粗糙度极低的加工表面，满足光学元件对表面光洁度的严格要求。磨削工艺参数如磨削速度、进给速度和磨削深度等，也会对表面粗糙度产生重要影响。适当提高磨削速度可以减小磨削痕迹的宽度。这是因为提高磨削速度使得磨料颗粒在单位时间内通过被加工表面的次数增加，每个磨料颗粒对表面的切削作用时间缩短，从而使得磨削痕迹的宽度减小，降低了表面粗糙度。但过高的磨削速度可能会导致磨具磨损加剧，磨削过程中产生的热量增加，引起被加工材料的热变形和磨具的热损伤，反而影响表面质量。进给速度和磨削深度过大会增加磨削力，磨削力的增大使得磨削过程中的振动加剧，磨削痕迹的不均匀性增加，从而导致表面粗糙度增大。

3.2 加工精度

加工精度是指被加工零件的实际尺寸、形状和位置与理想尺寸、形状和位置的符合程度，它是衡量零件加工质量的重要指标。微晶刚玉磨具在保证加工精度方面具有一定的优势。由于微晶刚玉具有高硬度和良好的自锐性，在磨削过程中能够保持稳定的磨削性能。高硬度使得微晶刚玉磨具在磨削过程中不易发生变形，能够准确地按照预定的轨迹对被加工材料进行切削，从而减小了加工误差。良好的自锐性则保证了磨具在磨削过程中始终保持锋利的磨削刃，使得磨削力相对稳定，进一步减小了因磨削力变化而引起的加工误差。同时，微晶刚玉磨具的微小晶体结构使得其磨削刃更加锋利，能够更精确地去除材料。微小的晶体结构使得磨料颗粒的边缘更加尖锐，在磨削过程中能够更细腻地切削被加工材料，去除多余的材料量更加精确，从而提高了加工精度。

3.3 材料去除率

材料去除率是指在单位时间内从被加工材料上去除的体积或质量，它是衡量磨削加工效率的重要指标。微晶刚玉磨具的材料去除率受到多种因素的影响。磨具

的粒度和硬度是影响材料去除率的重要因素。一般来说，粒度较粗的磨具具有较大的磨削刃，在磨削过程中能够与被加工材料有更大的接触面积，从而能够更快地去除材料，材料去除率较高。但过粗的粒度可能会导致表面粗糙度增大，因为粗粒度的磨料颗粒在磨削过程中留下的磨削痕迹较深较宽。硬度较高的磨具能够承受较大的磨削力，在磨削过程中不易发生变形和磨损，从而能够保持稳定的磨削性能，提高材料去除率。但过高的硬度可能会使磨具磨损加剧，磨具表面的磨料颗粒容易过早脱落，导致材料去除率的稳定性降低^[5]。除此以外，提高磨削速度和进给速度可以增加单位时间内的磨削量。提高磨削速度使得磨料颗粒在单位时间内通过被加工表面的距离增加，单位时间内去除的材料量增多；提高进给速度则使得被加工零件在单位时间内相对于磨具的移动距离增加，同样增加了单位时间内的磨削量，从而提高材料去除率。但过高的速度可能会导致磨具磨损加剧和磨削温度升高。磨具磨损加剧会使得磨削刃变钝，磨削力增大，影响材料去除率的稳定性；磨削温度升高可能会引起被加工材料的热变形和磨具的热损伤，进一步影响材料去除率和加工质量。磨削深度过大会增加磨削力，可能导致磨具损坏和加工质量下降。

参考文献

- [1] 高云琴, 郭凯歌, 马爱琼, 等. 莫来石-刚玉-镁铝尖晶石复相材料的抗碱侵蚀性能研究[J]. 耐火材料, 2024, 58(4): 334-340.
- [2] 李海涛, 樊利存, 程浩艳, 等. 助烧剂对微晶 Al₂O₃-刚玉磨料结构与性能的影响[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2023, 44(3): 1-6.
- [3] 徐三魁, 赵建昌, 邹文俊. 超微晶刚玉磨料的生产技术及应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(2): 4.
- [4] 郝丙君. 微晶刚玉砂轮磨削 TC17 钛合金试验研究[D]. 大连理工大学, 2015.
- [5] 刘谦, 杨理钧, 田欣利, et al. 基于微晶刚玉砂轮的 20 CrMnTi 齿轮成型磨削表面完整性[J]. 北京科技大学学报, 2018, 040(003): 357-365.

作者简介：杨文君，1987.02.19，女，山东淄博，学历：大专；研究方向：新材料，单位：山东磐石刚玉有限公司。