

# 关于平面磨削中顺逆磨特性的研究

龙慧玲

桂林创源金刚石有限公司

**摘要:** 机械加工粗糙表面的微观形貌模拟一直是磨削学的基本课题之一。微观表面形貌的模拟研究对于机械加工表面的质量控制和粗糙表面接触的模拟研究具有重要意义。目前光学玻璃被广泛应用到各个领域,其主要包括空间技术、航空航天、光电与精密工程等领域,其表面质量的加工要求越来越高。实现平面磨削粗糙表面的模拟方法。

**关键词:** 金刚石砂轮; 平面磨削; 顺逆磨; 特性

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.031

**前言:** 目前,平面磨削仍是加工机械零件平面最常用的方法,因此其加工精度和表面质量是人们特别关注的技术指标。在平面磨削过程中,经常同时使用正向磨削和反向磨削,因此,研究这两种磨削工艺的特性对提升精度水平的精度和表面质量有积极重要意义。过去人们在研究磨削过程时,一般不考虑正磨和反磨的区别。其实正磨和反磨的区别是显而易见的,有切身体会。在做单向进给时,总觉得一个方向磨比较容易,另一个方向磨比较难,需要对这个问题做更深入的研究。

## 一、研究金刚石砂轮高速磨削的磨削力

金刚石砂轮被在非金属材料的精密加工中被广泛的应用,其具有高硬度系数、高导热性、高耐磨性和低摩擦等优点。采用细磨粒和粗磨粒金刚石砂轮磨削光学玻璃,利用ABAQUS软件对不同参数和不同砂轮磨削的光学玻璃残余应力进行仿真。仿真结果表明,粗晶铸铁结合剂金刚石砂轮的残余应力应该比粗晶电镀金刚石砂轮的大,这样才更适合于磨削光学玻璃。只有及时有效地进行砂轮修整工作,保持磨具表面的容屑空间、磨粒锐度、和加工能力,磨削才能顺利进行。不一样材料的砂轮采用其相对应的修整技术。用Cr12钢对电镀金刚石砂轮进行粗修整,再用杯形金刚石滚轮对砂轮进行精修整。光学元件的磨削过程会涉及大量的材料去除,造成砂轮堵塞、砂轮磨损、不平衡跳动等问题。之后,对200mm粗粒电镀金刚石砂轮和200mm粗粒金属基金刚石砂轮在不同工艺参数下的法向磨削力进行建模,利用镀铜金刚石修整砂轮结合ELID技术对单层镀镍金刚石砂轮进行精密修整。在研磨开始时,切削深度为2微米,进给速度为2毫米/分钟。当磨削区从工件中心到距中心9mm时,法向切向力 $f_t$ 从1.8n增加到4.5n,磨削力 $f_n$ 从25n增加到55n,当磨削区移向外圆时,切向力 $f_t$ 下降,法

向力 $f_n$ 下降到40n。修整后,用它研磨BK7玻璃。但当整体的切削深度增加时,磨削力变化不大,这与粗粒砂轮的特点不同。由此可见,维护良好的粗砂轮符合BK7玻璃加工的机械性能。

## 二、金刚石砂轮高速磨削的表面质量的研究

研究了用ELID方法进行的金刚石磨盘的表面损伤,以研磨BK7玻璃。两个样品都进行了彻底和锐化,再用原子力显微镜检查样品表面。发现精磨表面的粗糙度为40~47nm,粗磨表面的粗糙度为37~48nm,工件的边缘比中心表面光滑,这是由于磨削片的接触刚性和工件的中心、工件边缘的实际切削深度小于工件的中心,致使边缘的材料去除率更低。磨料的最大表面损伤为3423  $\mu\text{m}$ ,磨料的最大表面损伤为2914  $\mu\text{m}$ 。结果表明: BK7玻璃表面损伤深度小于3.5微米,表面粗糙度由1.5微米降低到0.5微米; 砂轮1的径向磨损率维持在 $1.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}^2$ , 砂轮4的径向磨损率为 $3.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}^2$ ,说明磨削速度越低磨损越小。研究了磨削参数对微晶玻璃磨削过程中表面粗糙度和亚表面损伤的影响。建议采用角度抛光法和截面抛光法研究亚表面损伤,采用截面抛光法研究材料去除机理,采用角度抛光法测量亚表面损伤深度和磨削表面微裂纹分布。扫描电镜结果表明,进给速度对表面粗糙度和表面光洁度的影响最大,其次是切削深度和切削速度。增加切削深度和进给速度会增加SSD值和SR,而增加切削速度则会降低SSD值和SR值。切削深度和切削速度对SSD和SR的影响是线性的,而进给速度对SSD和SR的影响是非线性的。根据不同的SR值,将SSD和SR模型与磨削参数进行比较。结果表明, Li模型与实验结果吻合,证明Li模型在测量和预测SSD和sr方面是可靠的。传统磨削伴随着较大的磨削力和热,表现为工件表面下的表面裂纹和表面损伤,在一定程度上缩短了圆盘的使用寿命,进而影响光学元件的加工精度和效率。为了改进传统磨削的缺点,将超声波引入磨削。国内外许多研究证实,超声波磨削可以提高材料的距离、加工精度和表面质量,减少工件表面损伤,延长砂轮的使用寿命。外圆和端面用具有不同磨体的金刚石砂轮研磨,并与超声波研磨进行比较。实验表明,超声波磨削显著提高了表面质量( $R_a \approx 20\text{nm}$ ),因为轴向圆盘中磨削体的不均匀分布在工件的磨削中起着重复的作用,从而实现了高质量的加工表面。使用DEFORM-3D软件,研究了轴向超声波磨削过程中各个磨

削速度对磨削力和磨削温度的影响。根据模拟试验，我们可以看到，在轴向超声波循环过程中，各个磨粒的磨削力和磨削温度降低，可以提高工件的表面的质量。

### 三、磨削加工的技术

磨削是利用高速旋转的砂轮，通过无数细小磨粒的切削刃在砂轮作用表面的切削、刮削、磨削等综合作用，从工件表面去除进一步的材料，以获得所需的形状精度、尺寸精度和表面质量。磨削时，磨盘高速旋转，可以以一定的进给速度和磨削深度去除工件表面的材料。在各种磨削参数（包括磨削深度、磨削速度、工作片进给速度）下，砂轮（砂轮类型、粘合剂类型、颗粒尺寸、密度、砂轮硬度或孔隙、砂轮拆卸和磨损等）和冷却液供给（喷嘴的设计、供给压力、磨削面积、传热条件都非常复杂）等因素，因此磨削件的表面质量取决于此。根据加工对象的用途和要求，研磨已发展成为各种形式的加工技术。根据刀具类型可分为固体磨削和自由磨削，根据表面生成方法和加工对象可分为内圆磨削、外圆磨削、平面磨削和模具磨削方法。

### 四、顺逆磨研究的现状分析

#### （一）磨削力

磨盘在磨削过程中所承受的力，或它所承受的反作用力，称为磨削力。为了研究磨削加工过程中磨削区域内磨削轮与工件的相互作用，磨削质量和工件表面/表面损伤以及材料去除机理，磨削力的变化是分析上述问题最基本的指标之一。磨削力是评价材料磨削性能的重要指标。它与机床的机械性能、微结构、磨削量、磨削盘性能、材料去除机理甚至机床的设计密切相关。它是磨削过程中产生磨削热和振动的主要原因。在平面循环中，根据磨盘与工件接触点的线速度方向之间的关系，可将磨削分为磨削方向和反磨削方向。由于前磨砂轮与工件的相互作用不同，工件与磨砂轮之间的力自然不同，但实际力沿磨弧分布，其大小和方向随磨削过程而变化。在科学研究中，正常磨削力 $F_n$ 和切向磨削力 $F_\tau$ 受到极大的关注。但在实际测量中，由于技术的限制只能测量水平磨削力 $F_h$ 和垂直磨削力 $F_v$ 。为了便于研究，分析了磨削过程，将磨削力分为 $F_n$ 和 $F_\tau$ 、 $F_h$ 和 $F_v$ 两组。其中法线磨削力是 $F_n$ ；切线磨削力是 $F_\tau$ ，水平磨削力是 $F_h$ ；垂直磨削力则用 $F_v$ 表示；位置角 $\phi$ 是工作台垂直方向与法线磨削力方向所成的角； $A_p$ 为磨削深度；砂轮与工件之间的应力分布表明，位置角与法向磨削力的位置、磨削深度和砂轮等效直径有关，同时也影响法向磨削力 $F_n$ 和切向磨削力 $F_\tau$ 。磨削是精密加工的范畴，由于磨削深度 $a_p$ 通常较小，因此 $\phi$ 角也较小。在实际研究中，认为 $F_\tau$ 和 $F_h$ 、 $F_n$ 和 $F_v$ 的值相等，用测力传感器测量的水平磨削力 $F_h$ 和垂直磨削力 $F_v$ 代替切线

磨削力 $F_\tau$ 和法线磨削力 $F_n$ 。基于正向磨削和逆向磨削的不同特点，国内外许多专家学者对磨削力进行了大量的研究。结果表明，在相同磨削条件下，无论磨削参数如何变化，正向磨削的磨削力总是大于反向磨削的磨削力。另外，正磨和反磨产生的屑的形状也不同。正向磨削的磨削屑粗而短，反向磨削的磨削屑细而长。研究表明，磨削过程中单个磨粒的平均未变形切屑厚度与磨粒和工件的相对运动方向密切相关， $h_{zm}$ 为单个磨粒的未变形切屑厚度； $V_s$ 是砂轮线速度； $V_w$ 是工件进给速度； $b$ 是砂轮的有效磨削宽度， $b$ 是砂轮的宽度。解释单个磨粒扁平的未变形切屑在正反磨削中不相等，导致正反磨削切屑形状不同的现象。由于正磨粒的单个运动轨迹比逆磨粒短，正磨粒的运动轨迹曲率大于逆磨粒，正磨粒的磨损粉变形程度大于逆磨粒，最终正磨粒的磨削力大于逆磨粒。结果表明，反磨粒的切削厚度从零增加到最大值，然后迅速减少到零。滑、耕、切三个阶段是整个打磨过程的构成。磨粒通过弯折阶段时，由于产生的热量，磨削电弧区的材料的机械强度会有一定程度的下降，因此进入切削阶段所需的摩擦力较小。在正向磨削过程中，磨粒进入磨削区会遇到较大的切削厚度。磨削过程中，磨粒不打滑进入刮削和切削阶段，磨削弧中材料温度更低，机械强度更高，磨削力更大。比较了铁基粘结剂金刚石刀头在氧化铝砂轮正磨和反磨条件下的磨削特性。结果表明，在相同磨削条件下，正向磨削的法向力和切向力高于反向磨削。研究结果与这个结论一致。在静态磨削阶段，正、负磨削法向力差随物料体积的增大而增大，即正、负磨削法向力差随砂轮磨损量的增大而增大。但有研究表明，在相同磨削条件下，反向磨削的磨削力大于正向磨削。结果表明，磨削方式对磨削力有明显影响，正向磨削的法线磨削力和切线磨削力小于反向磨削。这一现象可以用正反磨削中各个磨粒的切削厚度的不同来说明，表明正反磨削中各个磨粒的切削厚度会发生变化。在正反磨削中，磨粒正好进入磨削区破碎材料，然后磨粒去除表面的破碎材料，单个磨粒的切削厚度由大变小。反向磨削时，磨粒正好进入磨削区，与工件表面的材料摩擦。当磨粒对材料的渗透深度达到临界深度时，材料被磨粒切割成碎片，单个磨粒的切割厚度从小到大递增。由上述分析可知，由于材料的弹塑性变形抗力小于反向磨削，反向磨削的磨削力要高于顺式磨削。在相同磨削条件下，反向磨削的磨削力比正向磨削的磨削力大13.87%。磨削方式的改变对磨削力没有明显的影响。在相同磨削条件下，法向磨削力和切向磨削力在大小和宽度上基本相等，测力传感器测量的正向磨削和反向磨削的力学信号曲线基本一致。与砂轮的圆周速度相比，工件的进给速度较小，正反砂轮与工

件的相对速度差对磨削过程的影响有限,因此磨削方式对磨削力的变化没有明显的影响。深入研究了正负磨削力的差异。研究表明,在相同磨削工艺条件下,正向磨削的磨削力小于反向磨削的磨削力。但在实际加工中,是顺向磨削还是逆向磨削有利于磨削过程,要看实际情况。在磨削工件形状精度的过程中,磨削主要以大量去除为主,磨削效率在一定范围内随磨削力的增大而增大,故采用反向磨削。在追求工件尺寸精度的过程中,磨削主要集中在小的去除上。磨削力越小,各个磨粒陷入工件表面的深度越小,磨粒在工件表面留下的伤痕的深度和宽度也越小。这个时候用正磨比较合适。

## (二) 磨削温度

磨削温度是磨削过程中磨盘与工件之间的表面温度,也称为试样表面在弧区内的平均温度。在成型过程中,当成型范围内的温度过高时,零件表面会出现烧伤和热裂纹等缺陷。严重影响成型曲面的质量。在实际加工过程中,通常通过选择适当的加工技术来限制加工区域的温度,从而可以合理地控制加工曲面的质量。大多数研究表明,磨削温度的趋势与磨削力的趋势一致,在相同条件下,正磨削温度高于反向磨削温度。这一结果不难理解,如果磨削力大于反向磨削力,则正向磨削力大于反向磨削力,一定会产生更多热量,最终导致正向磨削温度高于反向磨削温度。一般来说,磨削温度比反向磨削高出13%,最大温差为30%,结果表明,在平面加工期间,砂轮与工件之间的接触弧长度比反向加工期间短。在相同的研磨条件下,正研磨和负研磨的材料去除率相同。接触弧长度越短,温度越差,温度越高,这也解释了正磨和负磨之间的温差。除了比反向磨削温度高的磨削温度之外,在磨削过程中的不同时间还会出现最高的正磨削温度。反向磨削的最大温度比正向磨削的温度早。在反向磨削中,零件的磨削区域温度比正向磨削更快地升高和降低,而磨削区域温度的升高速度比正向磨削更快,也就是说,在反向磨削开始时,磨削区域温度高于正向磨削。最大磨削区域温度更接近磨削区域的入口,且最大正向磨削区域温度相对较远。由于正向磨削和逆向磨削中工件表面对流冷却条件不同,有限元边界条件和有限元模拟结果表明,正向磨削中磨削温度为56℃,逆向磨削中为65℃,正向磨削中磨削温度低于逆向磨削,有限元模拟得到的磨削温度通过实验测量正、逆磨削温差的研究表明,磨削烧伤、热裂纹等表面缺陷材料时,应选择逆磨削方式。正磨削的磨削温度比逆磨削高,高温对磨削表面不利。在陶瓷和其他耐热材料的研磨技术中,在一定范围内的高温不仅对工件表面没有影响,而且对表面材料的软化,增加表面材料的塑料间隙,形成良好的研磨表面。

## (三) 磨削表面特性

由于正反砂轮与工件接触、应力、热对流和散热的复杂性,磨削表面粗糙度、烧伤、裂纹、崩刃、硬化层、残余应力、硬度和表面结构等表面特征极其复杂。根据顺向磨削和逆向磨削各自的特点,在实际加工中认为,逆向磨削可以保证良好的刚度和较少的损伤和崩刃,顺向磨削可以保证良好的精磨工件表面质量。正磨和反磨硬化层显微硬度变化趋势相似。正向磨削的硬化层深度明显大于反向磨削。这是因为正向研磨和反向研磨之间的研磨机制存在显著差异。由于工件与砂轮的接触弧长小于逆磨削,且正磨削中磨粒的曲率和未变形切削厚度大于逆磨削,所以在去除表面材料时,正磨削的磨削力也大于逆磨削。另外,与逆磨削相比,顺磨削的散热条件比逆磨削差,磨削温度的上升大于逆磨削。通过对磨削实验的研究发现,当磨削力和磨削温升共同作用时,正向磨削比反向磨削更具有淬硬层深度。为了更深入地了解正反磨削时磨削表面特性的差异,我们进行了一系列磨削实验。根据磨削表面粗糙度随磨削深度、砂轮线速度和工件进给速度变化的趋势图表所示,在相同的磨削条件下,正向磨削对应的表面粗糙度要明显小于反向磨削的表面粗糙度。随机选取两个磨削参数相同的正向磨削和反向磨削得到的磨削表面,观察磨削后的工件表面。发现正向磨削工件表面的伤痕比反向磨削的伤痕更均匀、连续。此外,工件表面材料去除主要是塑性流动造成的,划痕表面有塑性凸起,长而完整,高度和宽度小。正向磨削的表面质量优于反向磨削。因此,为了提高加工效率,以深切削为主去除材料时,应采用反向磨削。为了提高磨削面的质量,小深度精加工采用平行磨削方法。

## 结束语

总的来说,在制造高精度零件的时候,最常见的表面成形方法是磨削技术。国内外对粉磨方面的技术都进行了大量的研究,亦获得了较多成果。但不同的磨削方式会对产品的表面性能产生直接影响,如何在磨削过程中选择较为适合的方式就尤为重要。由于现有的磨削工具和理论系统难以快速改变,因此研究正向磨削和反向磨削在磨削强度、磨削温度和磨削表面特性方面的区别具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 刘小超. 平面磨削中顺逆磨特性的研究. 2020.
- [2] 李颂雪. 浅谈平面磨削中顺逆磨特性的研究. 2021.
- [3] 李宛山. 超高速磨削工件表面温度场分析. 2020.
- [4] 刘海英. 平面磨削温度场及热损伤的研究. 2021.