

引文格式: 尤芳怡, 钟明杰, 刘建春, 等. 铝合金磨削加工的研究综述[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 133-141.

YOU Fangyi, ZHONG Mingjie, LIU Jianchun, et al. Review of research on grinding of aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 133-141.

## 铝合金磨削加工的研究综述\*

尤芳怡<sup>1</sup>, 钟明杰<sup>1</sup>, 刘建春<sup>2</sup>, 吴 贤<sup>1</sup>, 戴秋莲<sup>1</sup>

(1. 华侨大学, 厦门 361021;

2. 厦门理工学院, 厦门 361024)

[摘要] 铝合金因为质轻被广泛应用在需要全面减轻自重的场合, 特别是航空航天领域。越来越多的零件选择磨削作为最终加工手段, 其高效磨削加工需求在不断增大。铝合金因具有较好的塑性, 使得其磨削性能较差。不同种类铝合金的磨削性能相差较大, 但存在一些共同的问题, 如较大的磨削力作用使工件发生变形, 磨削过程的塑性变形及磨屑堵塞砂轮造成工件表面质量差。特别是曲面磨抛加工, 既要控制面形精度又要控制表面粗糙度, 对加工技术提出了新的挑战。学者们通过选择合理的磨削工具、优化磨削参数或者使用磨削液等方法改善工件表面质量; 利用超声振动辅助磨削等各种方法来提高铝合金的表面磨削质量。但是如何控制铝合金磨削加工中的塑性变形、解决磨具堵塞以及实现自由曲面的高效精密磨削等问题仍然有待进一步研究。

关键词: 铝合金; 磨削; 精密加工; 表面质量; 塑性变形

### Review of Research on Grinding of Aluminum Alloy

YOU Fangyi<sup>1</sup>, ZHONG Mingjie<sup>1</sup>, LIU Jianchun<sup>2</sup>, WU Xian<sup>1</sup>, DAI Qiulian<sup>1</sup>

(1. Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

[ABSTRACT] Aluminum alloy material is light and widely used to reduce the weight of the construction element, especially in fields such as aerospace. More and more parts choose grinding as the final processing method, and the demand for efficient grinding is increasing. However, due to the good plasticity of aluminum alloy, its grinding performance is poor. The grindability of different kinds of aluminum alloys is quite different, but there are some common problems, such as the deformation of workpiece caused by the grinding force, the plastic deformation in the grinding process and the poor surface quality of the workpiece caused by the blockage of the grinding wheel by the debris. Especially for surface grinding and polishing, both of surface shape accuracy and surface roughness are necessary to control, which bring new challenges to processing technology. Scholars improve the surface quality of workpiece by selecting reasonable grinding tools, optimizing grinding parameters or using grinding fluid. Ultrasonic vibration assisted grinding and other methods are also used to improve the surface grinding quality of aluminum alloy. However, how to control the plastic deformation in aluminum alloy grinding, solve the problem of tool blockage, and achieve efficient and precise grinding of free surface remains to be further studied.

Keywords: Aluminum alloy; Grinding; Precision machining; Surface quality; Plastic deformation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.23/24.133

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51375180); 华侨大学 2020 教育教学改革项目(教务[2020]54 号, 教务[2020]105 号)。

铝合金因为质轻被广泛使用在要求减轻自重的航空航天领域,其加工质量要求也越来越高。磨削加工是一种高效的精密加工方法,越来越多的零件选择磨削作为最终加工手段,但铝合金因具有较好的塑性,使得其磨削性能较差。近年来随着航空技术的快速发展,铝合金零件的磨削加工应用也逐渐扩大,并得到了广大学者关注。本文就铝合金磨削加工的技术难点和表面质量控制等关键技术做了综述。

## 1 铝合金的优良特性及用途

铝的密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , 约为钢材料的  $1/3$ 。加入合金元素构成的铝合金,可以提高其机械性能。由于密度较低,因此其比强度很高,能够实现重要结构件的减重并达到轻量化的目的。在某些飞机上的使用量达到了  $70\%$ , 在某些大型轮船上的使用甚至达到了几千  $\text{t}^{[1]}$ 。添加一定量碳化硅形成的铝基碳化硅材料具有较高的比强度,为一般结构钢比强度的两倍;具有较高的弹性模量,为一般铝合金的  $1.6$  倍;较高的耐磨性,尤其在湿摩擦的条件下,其耐磨性远高于一般铝合金,可作为多个领域应用材料的替代材料。由于铝元素在大气环境下与氧作用,在表面形成一层氧化膜,起到阻止氧化作用进一步往内部扩展,因此具有较好的抗氧化性。加入稀土元素可通过变质、净化和合金化 3 种作用对传统铝合金进行强化<sup>[2]</sup>。强化元素不仅能提高强度,还能够加强其耐腐蚀性能,因此相比其他金属材料,具有突出的耐腐蚀性能。

铝合金具有以上优良特性,使其应用渗透到了生活生产的各个方面,如电子器件、汽车制造、轨道交通、机械装备制造、家电、建筑等,并且从传统的建筑领域行业逐步扩大到航空航天等国民生产重要部门。特别是高强度铝合金材料,兼具优良的导电性、导热性、抗蚀性和较好的疲劳裂纹扩展抗力,逐步应用到航空及军工设备上,是目前为数不多具有整体制造能力的材料,可以满足现代飞机要求的轻量化、舒适化、长寿命、高可靠性和低成本<sup>[3]</sup>。

铝合金可以进行成形加工<sup>[4]</sup>,再经精加工和表面处理来获得零件。如被用于制造高强度高温铝镁合金的叶片、铝合金轮毂、整体铝合金飞机机身、铝合金光学镜片、天文望远镜的金属反射镜、大功率 LED 散热器基片、磁盘基板<sup>[5]</sup>等。这些零件对其制造加工质量,特别是表面形貌质量提出了较高要求。表面粗糙度不但对零件的耐磨性、疲劳强度、配合性质和传动精度影响很大,而且直接影响机械的使用性能和寿命。光学镜片、轮毂、铝合金背盖等零件甚至需要加工至镜面级别。磨削加工作为常见的高效精密加工手段,能够实现一般工序中的最后一步精加工,在光学器材应用领域能够实

现镜面加工。如铝合金叶片通过磨抛消除其表面由于铣削加工而出现的刀纹,提高其流体动力学性能。因此铝合金的精密磨削加工具有实际应用背景和重大意义。探究表面质量与磨削加工工艺参数之间关系以及表面形貌在加工过程中的变化趋势和对磨削缺陷的认识是目前铝合金磨削加工的研究热点。

## 2 铝合金磨削加工的应用

大多数铝合金的硬度较低,塑性较强,强度比钢材低,通常采用车削和铣削技术<sup>[6]</sup>进行加工能获得较高的表面质量。但在某些领域的铝合金零件需要被高效磨削加工至镜面。如铝合金门窗、汽车轮毂、手机铝合金后盖等均需加工至镜面,才能满足通过阳极氧化等方法进行表面装饰的要求。

袁伟杰等<sup>[7-8]</sup>通过使用弹性砂轮成功实现对铝合金手机后盖的镜面加工,并且使用聚氨酯弹性砂轮对 6061 铝合金进行磨削抛光试验,成功加工出了表面粗糙度为  $48.93 \text{ nm}$  的铝合金表面。关佳亮等<sup>[9]</sup>在抛光压力为  $2\sim 6 \text{ kPa}$ , 转盘转速为  $60\sim 150 \text{ r/min}$ , 抛光偏心距为  $30\sim 40 \text{ mm}$  以及不同的研磨抛光垫和研磨液的条件,对铝合金手机后盖进行抛光加工,获得表面粗糙度为  $0.026 \mu\text{m}$  的镜面表面。

强化成分的添加会提高铝合金的机械性能和表面硬度,但也会对铝合金的切削加工性能产生较大影响<sup>[10]</sup>,如一种电子封装领域较为常见的硅铝合金,由于高硬度硅颗粒的存在,在切削加工时容易出现裂纹、崩边、凹坑等缺陷,并且对刀具的磨损也增大<sup>[11]</sup>,使得硅铝合金的可切削加工性能急剧下降。因此,对于具有硬质颗粒的材料,更适合采用磨削加工作为最终的加工工艺。Atzeni 等<sup>[12]</sup>使用普通金刚石砂轮开展了  $\text{AlSi}_3\text{Cu}_3(\text{Fe})$  的外圆磨削试验研究,探究铝合金磨削的机理及表面质量的影响因素,并成功加工出了表面粗糙度为  $0.28 \mu\text{m}$  的工件。张利军等<sup>[13]</sup>用大粒度 40# 和 60# 的陶瓷结合剂黑碳化硅砂轮对 2A12-T4 的陀螺框架零件进行分布磨削加工,在粗磨时砂轮转速为  $1200 \text{ r/min}$ , 进给速度为  $17 \text{ m/min}$ , 磨削深度为  $8 \mu\text{m}$ ; 精磨时砂轮转速为  $900 \text{ r/min}$ , 进给速度为  $8 \text{ m/min}$ , 磨削深度为  $1 \mu\text{m}$ , 成功将产品合格率从  $80\%$  提高到了  $98\%$ 。

## 3 铝合金磨削的加工难点

### 3.1 不同种类的铝合金材料可加工性能差异大

铝合金的种类众多,据不完全统计,目前注册的铝合金有 706 种,牌号 1~8 系列表示不同种类的铝合金材料<sup>[14]</sup>,每种材料因为基体性元素的不同,也会产生不同的加工难点,如 4 系列的 Al-Si 合金与 7 系列的高强度

铝合金的加工难点相差较大。

4系列的铝合金组织内部具有某些颗粒性硅元素单质,硅单质的硬度比铝高出太多,可能对磨具或砂轮产生较大的磨损甚至破坏。7系列的铝合金是航空航天的重要结构件,属于超硬合金,具有良好的耐磨性,因此磨削加工对磨削参数的选择需要一定的经验积累。为了使其耐磨性能得到提升,对表面粗糙度的要求也相应地提高。并且航空结构件对耐蚀性和表面性能要求较高,对加工的环境条件和加工控制提出了非常严格的要求。不同种类铝合金材料的磨削加工性能差距较大,因此对其进行磨削性能研究仍然是一项值得开展的工作。

### 3.2 磨削加工中的工件变形

铝合金材料属于偏“软”的有色金属,切削加工过程中产生的热-力耦合作用、初始残余应力、切削力和振动等都会使工件在加工之后产生一定量的变形<sup>[15]</sup>。安装夹紧产生过大的夹紧力还可能导致铝合金零件产生弹性变形,导致表面完整性受损伤。磨削加工中,砂轮与工件表面的接触力,特别是法向磨削力比切削力更大,因此力变形现象将更严重。铝合金具有较好的导热性,磨削产生的热量更大比例地传给了铝合金工件,将造成工件的热变形程度严重。对于叶片、飞机蒙皮这一类薄壁重要零件,根据使用工况的要求,其变形量应该得到严格控制。因此薄壁铝合金零件的磨削加工,其热-力耦合造成的变形控制是一个难点。

为了加工过程维持恒压力磨削,从而保证磨削表面质量,重庆大学刘瑞杰等<sup>[16]</sup>采用自适应模糊-PID复合控制有效地解决了钛合金复合板材砂带磨削加工过程中存在的磨削不均匀问题。Michael等<sup>[17]</sup>设计了闭环控制器控制工件的振动,改善砂轮和工件之间的振动(颤振),提高工件质量。Ahrens等<sup>[18]</sup>提出了一种基于小波变换的在线颤振鲁棒检测方法,在磨床配备了涡流、力、声发射、加速度传感器和触觉探头等传感器,自动检测颤振,为进一步的颤振抑制工作提供了理论依据。

### 3.3 磨屑塑性变形对磨削质量的影响

磨削是砂轮表面的磨粒对工件进行耕犁、滑擦、切削3种作用的综合,是一个比较复杂且多种作用耦合的加工过程。对铝合金平面磨削工件表面质量影响较大的是耕犁和滑擦两种作用。铝的塑性好、黏性大、具有较强的化学亲和力,切屑和刀具表面摩擦力大,容易产生更大的切削热,并造成磨屑包粘在磨粒上,使加工后的表面粗糙度较大。在磨削过程中采用较小的进给量,仍然有较多的铝合金磨屑与砂轮结合导致堵塞<sup>[19]</sup>。在连续的磨削中,砂轮磨粒和铝合金磨屑共同作用,对工件表面进行加工,一方面增加了对工件表面的耕犁作用;另一方面磨屑又被再次加热并且挤压,在工件的表

面形成塑性变形沟槽,导致工件表面质量变差<sup>[20]</sup>。

铝合金表面被砂轮磨削后,在磨削热作用下,出现磨屑粘刀或者砂轮堵塞现象,在后续的加工中,耕犁和滑擦的作用增强,使最终的加工质量进一步降低。因此在铝合金的磨削中,较易出现多条等距刀痕,使铝合金工件的表面质量变差,需要后续进行研磨抛光加工去除这些刀痕<sup>[21]</sup>,增加了工艺流程,不利于实际生产的应用。在铝合金的磨削加工中,为了保持其表面质量和精度,单次磨削量为1~3 μm,但一般的加工余量都远远超过上述数值,因此在整个平面的磨削加工中,需耗费较长时间,对材料的去除率也比较低。当生产中对加工效率要求比较高时,材料的去除率和加工精度之间的平衡成为一个难点<sup>[22]</sup>。

由于铝合金磨削的过程中容易出现粘刀现象,直接影响工件的磨削加工性能和最终零件的尺寸、形状精度和表面质量。氧化铝砂轮在砂轮线速度1600 m/min、工件进给速度6000 mm/min、磨削深度10 μm条件下,磨削5A06铝合金后砂轮表面形貌图如图1所示。可以看到,铝合金磨屑包裹在磨粒上,使磨粒失效;堵塞进砂轮的孔隙之中,削弱了磨粒的作用。因此粘刀、砂轮堵塞是迫切需要解决的问题。

磨削加工之前需要对磨削砂轮进行整形和修锐。随着持续磨削的进行,砂轮磨粒逐渐磨钝,磨削能力下降以及磨屑堵塞砂轮气孔,都将导致后续磨削中磨削力和磨削热的增加,对工件表面造成损伤和加工不良<sup>[23]</sup>,因此在整个磨削过程中,必须定期修整和修锐砂轮。在磨削领域,修整是磨削的关键已经成为共识<sup>[24]</sup>。砂轮修整往往是一个耗时的过程,且过于频繁的修整砂轮,不仅影响加工效率,而且缩短砂轮寿命。因此,铝合金磨削过程如何减少砂轮堵塞并及时修锐被堵塞的砂轮是一个值得研究问题。

当前,不少的学者和研究人员对砂轮堵塞和磨损的

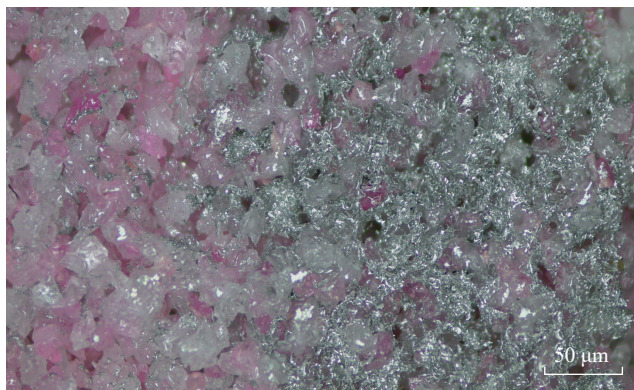


图1 铝合金磨屑堵塞砂轮表面形貌

Fig.1 Surface morphology of grinding wheel blocked by aluminum alloy debris

情况进行了追踪,通过智能信号监测和图像识别等手段判断砂轮的表面状态,以确定是否对砂轮进行修整,减少不必要的修整次数,提高加工的效率。You 等<sup>[25]</sup>通过对不同磨损程度的砂轮表面进行图像识别,利用灰度值差异得出砂轮表面磨损占比,从而实现砂轮磨损程度的在位监测。汪旋<sup>[26]</sup>通过在砂轮表面镶嵌识别记号,如图2所示,用于跟踪观察磨削过程中磨粒的磨损状态;通过磨削温度信号间接反映砂轮磨损状态,结合砂轮表面单颗粒磨粒磨损状态,基于图像识别的方法,实现了对砂轮磨损状态进行在线跟踪。段景淞<sup>[27]</sup>利用磨削力信号、声发射信号和振动信号对砂轮实现状态进行在线跟踪,并且成功建立一套可行的智能监测系统。

### 3.4 曲面磨削加工的关键问题

大型铝合金整体铸件及叶片类零件均具有自由曲面,如果采用磨削或者磨抛加工方法作为零件加工的最后一个步骤,其加工余量和加工精度均需要得到保证。目前铝合金的磨削研究大多集中在平面磨削方面,曲面磨削较少,但也有学者在这个方向上进行了突破。徐慧等<sup>[28]</sup>利用磨削液射流磨抛抛光装置对异型自由曲面进行磨削抛光,并通过正交试验找到了优化工艺参数组合,实现了对自由曲面的精密加工。

在以航空发动机叶片为代表的一类多异形曲面及复杂薄壁结构件,通常采用精密铸造或精密锻造的方法进行成形,然后再采用磨削的方法进行最终几何精度定形的精加工。其曲面异形且复杂,叶片薄且扭转程度大,并且具有很高的几何精度,一直以来是工业制造的难点。对于这类加工易变形,形状复杂,难以拟合磨削加工面的零件,传统砂轮磨削比较困难。任旭<sup>[29]</sup>在机器人平台上使用浮动带补偿结构磨头对机器人砂带磨削的关键技术进行了研究,通过对以航空发动机叶片为代表的一类多异形曲面及薄壁复杂结构件进行砂带磨削加工,实现了自由曲面的精密加工。

在光学器材制造领域,随着近年来加工技术的进一步发展,对铝合金复杂曲面的镜加工已经成为可能。

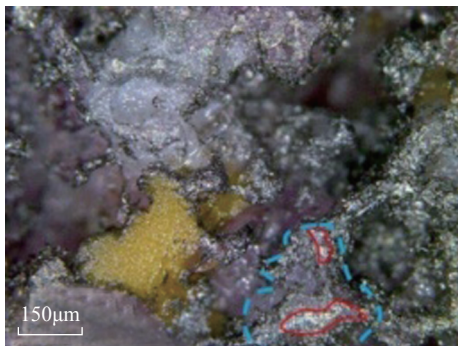


图2 跟踪观察砂轮表面磨粒<sup>[26]</sup>  
Fig.2 Tracking abrasive grains on wheel<sup>[26]</sup>

在曲面加工的难点中,最主要的问题是拟合自由曲面的形状以保证其形状精度,实现对其曲面加工的恒去除量<sup>[30]</sup>。徐超等<sup>[31]</sup>从自由曲面的曲率入手,对其恒去除函数进行建模,通过模型得出最小驻留时间的算法,优化工艺参数的组合,并在后续加工中通过使用单点金刚石车削和磁流变抛光的组合工艺进行试验验证,证明出其算法的可行性。此外保证其精密加工的参数控制,以达到表面质量优异的要求,对机床的联动进给技术、精密的工具控制技术有关加工工艺参数的优化提出了不小的要求,是在后续研究中需要进行突破和开拓的领域。

## 4 提高铝合金磨削质量的途径

评定金属零件磨削加工表面质量的主要参数是表面粗糙度,表面残余应力状态则决定了零件的疲劳性能<sup>[22]</sup>。虽然表面粗糙度通常作为评定铝合金磨削质量的主要指标,但是其影响因素很多。比如加工硬化能够使工件表面性能得到一定的提升<sup>[6]</sup>,铝合金具有较大的塑性,在磨削加工中必然产生较严重的加工硬化,理论上会在一定程度上对其表面粗糙度的获得产生有利影响。在加工环节的每一个因素都可能对加工结果产生较大的影响<sup>[32]</sup>,且影响机制复杂。众多学者对如何提高铝合金工件表面磨削质量开展了大量的研究,也获得了一定的成果。

### 4.1 合理选择磨削工具改善磨削质量

影响磨削质量的主要因素包括磨削工具和磨削参数及磨削条件。如砂轮、砂带和磨抛轮等工具的各项基本参数对加工结果有较大的影响,特别是工具表面的磨粒种类、磨粒直径、磨粒的分布情况以及磨粒的磨损和堵塞程度。Sun 等<sup>[33]</sup>通过对磨削表面划痕的试验研究,得到了磨料的粗细对材料去除率和加工表面粗糙度的影响规律,即磨料颗粒越大,磨削加工表面越粗糙;反之磨料颗粒越小,加工表面质量越好;磨料的颗粒越大,在参与磨削时的有效磨削深度越大,材料的去除率也越大。磨削工具的导热性对磨削质量也有一定的影响。赵智航<sup>[20]</sup>在MGK7120×6精密磨床上进行6061铝合金的正交试验,研究了金刚石砂轮和传统CBN砂轮对6061铝合金磨削质量的影响,工件表面质量如图3和4所示。可以看出,金刚石砂轮磨削后的工件表面质量更好,分析其原因是金刚石砂轮的硬度较高,导热性较好,出现铝合金粘刀的现象更少,并且磨削力更小,能够提升表面加工的质量。

近年来随着材料制备技术的发展,以及对加工要求的不断提高,也出现了较多的新型磨削工具。袁伟杰等<sup>[8]</sup>通过使用聚氨酯微孔弹性砂轮对6061铝合金手机背盖在砂轮转速500 r/min、折线往复走刀、磨削深度

0.01 mm 的条件下进行磨削抛光,获得了表面粗糙度为  $R_a 48.93$  nm 的加工表面,在其加工过程中,聚氨酯微孔砂轮的磨粒数与工件及容屑槽接触更多,加工效率更高,对表面的损伤更小,是一种良好的精密加工手段,其磨削原理如图 5 所示<sup>[7]</sup>(其中,  $V_s$  表示磨粒线速度),通过弹簧和弹性磨粒的双重作用,使研磨的刚性减小,增大了接触的面积,加工质量更好。

砂带磨削是一种近年来兴起的磨削加工工具,其原理与传统的砂轮加工原理类似,同样是经过耕犁、滑擦以及切削 3 个阶段对工件进行磨削,但砂带除对工件表

面产生耕犁滑擦切削外,额外对工件表面有挤压,对工件表层产生一定量的塑性变形和流动,类似于在加工过程中,同时完成了磨削、研磨、抛光 3 个阶段,因此表面质量更好<sup>[34]</sup>。砂带切削热较小,相比于传统的磨削砂轮,砂纸只是薄薄一层,产生热量可以很快散失在空气中,对于加工工件的表面保护很强,不容易造成烧伤;砂带是一种柔性材料,可实现弹性磨削,与工件之间是柔性接触,其磨合性和抛光能力较好;精度更高,属于精密加工的一种类型,具有很好的抛光作用,能够实现  $0.01 \mu\text{m}$  的粗糙度加工;生产成本更低,经济效益更好,砂纸相比于砂轮的价格更便宜,并且对很多大型异形曲面表面磨削抛光有较好的效果,如异形水槽、船用螺旋桨、航空发动机的精密加工<sup>[35]</sup>。

张迪<sup>[36]</sup>通过使用 1500# 的碳化硅固结磨料的磨具,在研磨压力 178 N、研磨半径 80 mm、主轴转速 25 r/min 的条件下,对 6061 铝合金进行了精密研磨抛光,得到表面粗糙度为 214.88 nm 的铝合金镜面,实现了铝合金的精密加工。廖燕玲等<sup>[37]</sup>制备钎焊金刚石微刃砂轮并对 AlSiC 进行磨削加工,研究了普通钎焊金刚石砂轮和 AlSiC 钎焊砂轮在不同的砂轮转速、进给速度、磨削深度以及磨削方式下对磨削力和表面粗糙度的影响,发现钎焊金刚石砂轮相对于传统的金刚石砂轮,能够降低加工的表面粗糙度,并且其微刃结构能够使工件表面得到更好的冷却和排屑,对铝合金加工的粘刀现象具有较大的改善,进一步提升加工质量。张晓芳<sup>[38]</sup>则从辅助加工工具的角度对砂带磨削过程进行了改进,利用超声振动原理,对砂带磨削过程进行超声振动辅助,从原理上加快了磨屑与砂带工具的脱离,能够防止磨削工具的堵塞,并且通过对 6063 铝合金的砂带磨削加工,通过单因素试验研究了有无超声振动存在的条件下,砂带速度、进给深度和超声振动幅度对工件表面

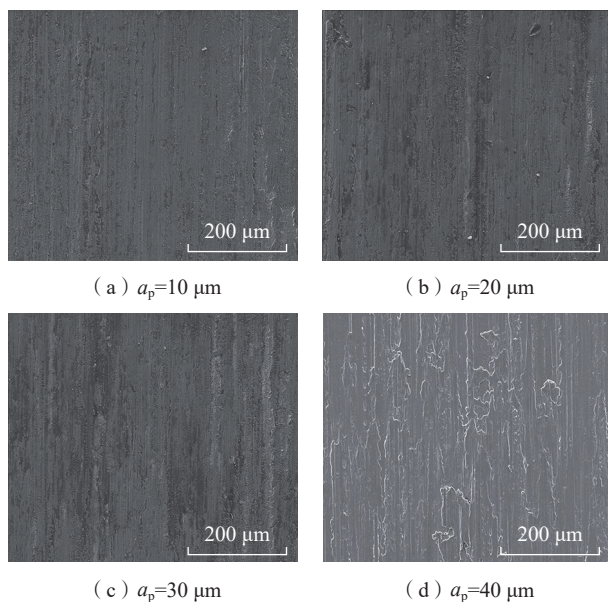


图 3 CBN 砂轮磨削 6061 铝合金的表面形貌<sup>[20]</sup>

Fig.3 Surface of 6061 aluminum alloy ground by CBN wheel<sup>[20]</sup>

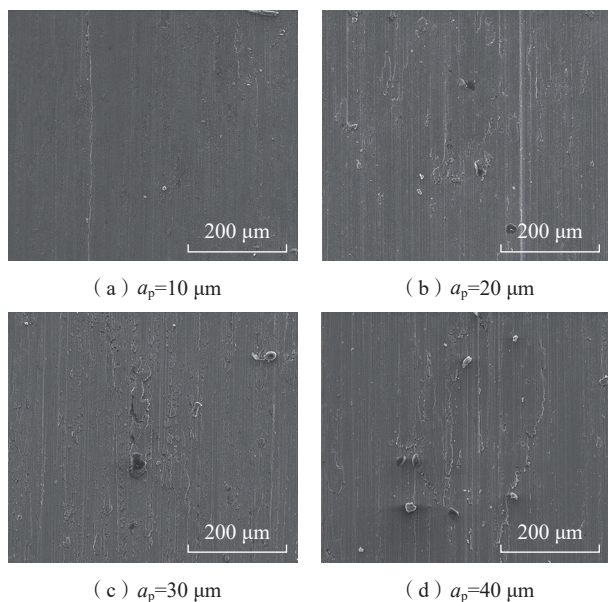


图 4 金刚石砂轮磨削 6061 铝合金的表面形貌图<sup>[20]</sup>

Fig.4 Surface of 6061 aluminum alloy ground by diamond wheel<sup>[20]</sup>

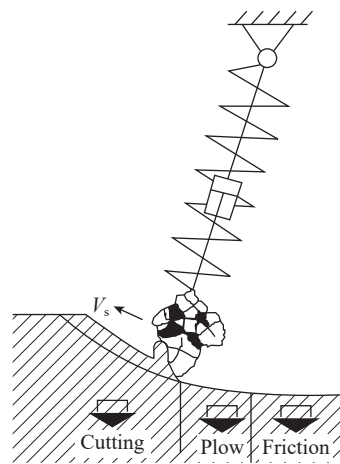


图 5 弹性砂轮磨削示意图<sup>[7]</sup>

Fig.5 Grinding schematic with an elastic grinding wheel<sup>[7]</sup>

粗糙度的影响,结果表明超声振动能够使表面粗糙度降低 15%~20%。

在抛光领域还有一些比较特殊的工具,如气囊抛光工具、弹性砂带抛光、磁性流体抛光、磨料射流抛光<sup>[39]</sup>,但是其基本原理类似,都是通过柔性抛光工具与工件曲面在完全接触的情况下,驱动抛光工具对接触表面进行充分打磨,重点在于对接触效果和接触压力的研究与控制,从而达到精密加工。

从上述来看,在磨削加工领域,工具多种多样,关键是根据加工要求选择合适的磨具来加工铝合金零件。

## 4.2 优化加工参数提高加工精度

除了磨削工具外,对于磨削加工表面质量具有重大影响的还有磨削三要素,即砂轮转速、进给速度以及磨削深度。磨削工艺的优化一般集中于优化这 3 个工艺参数,在保证工件质量的前提下,提高效率并降低成本。通常采用测定磨削热、磨削力和表面粗糙度等来评定磨削工艺参数的合理性。通过优化磨削三要素来降低磨削力,减小磨削变形;通过控制磨削温度来防止磨削烧伤和热变形,通过降低表面粗糙度来获得产品合格的表面质量。

提高砂轮转速可以使单颗磨粒受到的磨削力作用减小<sup>[40]</sup>,也可以使整个砂轮的磨削力变得更小,并且使铝合金磨屑融附在砂轮上的比例减小,使砂轮堵塞现象得到改善<sup>[41]</sup>。观察铝合金磨削后的微观表面可以发现,其主要由磨屑黏附、白色析出颗粒、孔、划痕和光滑区 5 部分组成。其中光滑区和磨屑黏附的比例是决定表面粗糙度的主要因素。提高砂轮转速有利于减少磨屑黏附和增大光滑区的面积,从而降低表面粗糙度,提高表面加工质量<sup>[42]</sup>。随着砂轮线速度的不断提高,当砂轮转速达到超高速加工区域,单位时间内参与磨削的磨粒数大幅度增加,使磨屑在极短的时间内发生高应变率。此时磨屑的形成过程与普通磨削具有较大的差别,主要表现为工件的弹性变形减小,在砂轮两侧因磨屑产生塑性流动形成的隆起高度减小,磨屑形成过程中的耕犁和滑擦距离变小,单个磨粒磨削产生的磨屑变得很薄,可以归结为超高速磨削下,单颗磨粒的最大未变形切屑厚度变小,有利于减少工件表层加工硬化和残余应力区域面积,还有利于减小工件表面粗糙度。此时,单个颗粒的切削力减小,总的切削力也可能减小,可以进一步改善磨屑对磨粒的包粘和砂轮堵塞的现象。在超高速磨削时,温度的响应滞后于应变率的变化,在磨屑高应变率的情况下,温度来不及响应变化,因此能够直接越过磨削烧伤区域<sup>[43]</sup>,避免磨削烧伤。

工件进给速度在磨削加工中的影响也是显著的。随着工件进给速度增大,金属材料的剪切应变效应增

大,材料塑性变形程度加大,此时消耗的磨削能量增大,磨削比能降低。同时由于来不及排屑,发生粘刀的磨屑随着砂轮在后续的加工中,增大了滑擦和耕犁作用的比例,使加工质量进一步变差。在实际加工中,往往通过降低进给速度的方式来提高表面质量,降低表面粗糙度。

磨削深度对加工结果也有很大的影响。随着磨削深度的增加,未变形切屑的厚度增加,铝合金热融时产生大量热能使切屑热融附于砂轮表面,增大了滑擦和耕犁效应,并且对切削产生阻碍,因此磨削比能降低,磨削质量变差。但是磨削深度与工件进给速度之间的关联较强,近年来发展起来的缓进给大深度磨削工艺,是一种为航空航天器材零件应运而生的工艺手段<sup>[44]</sup>,其满足了加工效率和较大的加工余量之间的平衡关系,选择使用慢进给大切深的方式进行加工,是一种新的精密磨削方式。

上述的 3 个磨削要素对磨削质量的影响并不是孤立的,其相关规律和组合方式将会造成不同的加工结果,因此有大量的学者从其组合方式上着手,进行最佳工艺组合的研究。较为常见的优化方法有正交试验法、响应曲面法<sup>[45]</sup>等,近年来兴起的人工智能算法,如多粒子目标群体算法<sup>[46]</sup>、BP 神经网络算法<sup>[47]</sup>,对其参数的组合研究也取得了不错的成果。

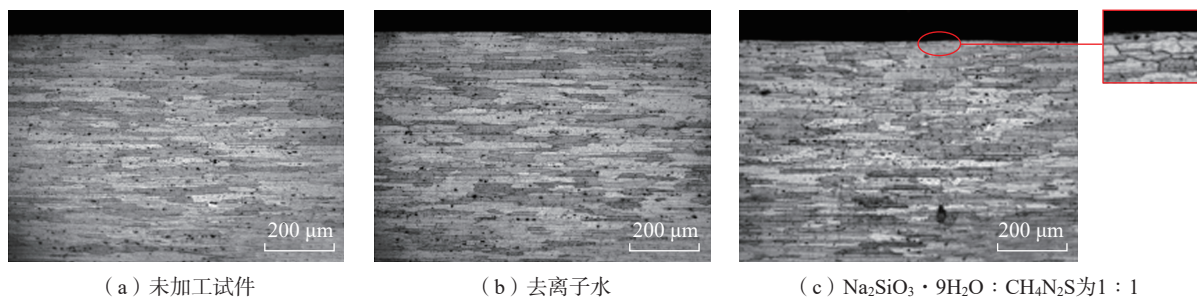
## 4.3 使用磨削液提高表面质量

还有一些其他因素如研磨液等对磨削质量的影响不可忽视。高志森等<sup>[48]</sup>配制了一种 1:1 的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$  新型磨液,在主轴转速 300 r/min、磨液体积 400 mL、磨块体积 700 mL 的条件下,对 7075 高强度铝合金进行滚磨光整加工,研究不同比例的磨液对工件表面粗糙度的影响,结果表明工件表面粗糙度从  $1.260 \mu\text{m}$  减小到了  $0.167 \mu\text{m}$ ,并且实现了在加工 20 min 时的去除率最大,为  $0.089 \text{ mm}^3/\text{min}$ ,工件表面质量如图 6 所示<sup>[48]</sup>,在磨削加工前后,工件的表面出现了较为明显的晶粒细化,说明新型磨液的使用增强了细化的作用,能够对工件表面产生较好的强化作用。Li 等<sup>[49]</sup>研究了氧化石墨烯冷却液对  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  激光晶体的超精密研磨加工过程的作用机理和对加工质量的影响,结果发现氧化石墨烯的加入增强了材料表层的剪切和充填作用,达到了纳米尺度的材料去除,实现了材料的高效精密加工。

温度对加工质量也有一定的影响,商执亿等<sup>[50]</sup>在高速钢干式磨削的过程中通过低温冷风降低工件表面的热塑性变形程度,并且对磨削区域形成了冲击效应,获得比传统干式磨削更小的表面粗糙度值。

## 4.4 超声振动辅助磨削减少堵塞提高表面质量

为解决砂轮磨削铝合金容易出现黏附、堵塞及磨

图6 不同冷却条件下工件表面形貌<sup>[48]</sup>Fig.6 Surface morphology of workpieces under different cooling conditions<sup>[48]</sup>

损等问题,不少学者引入超声振动辅助的方法。根据理论分析,将超声振动叠加到磨削作用中,可以加快磨粒与切屑的脱离,降低黏附程度,减少堵塞<sup>[51]</sup>。近年来,随着对超声振动辅助加工的深入研究,其加工机理也得到了揭示。肖敏<sup>[52]</sup>对轴向超声振动辅助磨削的机理进行了研究,指出超声振动具有超声软化作用和超声排屑作用,大幅度减轻磨削过程的砂轮堵塞,较大提升材料的表面质量。张晓芳<sup>[38]</sup>研究了超声振动辅助磨削过程中的工艺参数对表面粗糙度的影响,发现在一定范围内,振动幅度和振动频率的提高都有助于降低表面粗糙度,并且超声振动的加入使表面粗糙度平均降低 10%~15%。与传统磨削相对比,超声波振动中磨削轨迹的轮廓为正弦路径,超声波在垂直于工件的方向上振动,在连续或不连续模式下磨削材料,超声波振动方向平行于工件时切割面积扩大,超声波会导致磨粒对工件的冲击,使变形场从冲击部位扩散,产生更深的磨削深度和更大的径向和横向裂纹,提高磨削效率<sup>[53]</sup>。

## 5 结论

铝合金因独特的应用场合和庞大的使用量,其精密加工的要求也正逐步提高,人们期待一种能超越车削或铣削加工效率的精密加工手段,磨削加工通常会成为首选,这促使了铝合金磨削技术向着高精、高效、高速的方向蓬勃发展。但仍存在一些有待解决的问题。

(1) 对于大型自由曲面的磨削加工,传统的砂轮结构很难满足于曲面的拟合性,近年来随着机器人技术的兴起,使用机器人作为控制源进行自由曲面的砂带磨削成为一个热点方向,铝合金零件自由曲面磨削研究仍需要开展探索。

(2) 铝合金磨削加工机理研究仍处于探究参数组合对加工质量影响的阶段,随着智能制造技术的发展,通过在磨削过程监控砂轮磨损、堵塞,及时修锐或者更换砂轮,是保证加工质量的有效途径。铝合金零件的智能磨削与控制也将是今后的重要研究方向。

## 参考文献

- [1] 章锤. 铝合金在船舶和海洋工程中的应用 [J]. 船舶物资与市场, 2021(1): 49-50.  
ZHANG Chui. Application of aluminum alloy in ship and ocean engineering[J]. Ship Materials and Market, 2021(1): 49-50.
- [2] 余聪, 陈乐平, 周全. 稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 241-246.  
YU Cong, CHEN Leping, ZHOU Quan. Research progress in effects of rare earth elements on microstructure and properties of aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 241-246.
- [3] 张新明, 邓运来, 张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术 [J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.  
ZHANG Xinming, DENG Yunlai, ZHANG Yong. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(3): 257-271.
- [4] 冉文君. 铝合金材料的应用及其加工成形技术 [J]. 产业创新研究, 2020(10): 151, 153.  
RAN Wenjun. Application and forming technology of aluminum alloy materials[J]. Industrial Innovation, 2020(10): 151, 153.
- [5] 范树信. 有色金属合金超精密研磨加工技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.  
FAN Shuxin. Research on ultra-precision grinding of nonferrous metal alloys[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [6] 熊瑞亮, 刘旭波, 熊智文, 等. 2024 铝合金超精密车削表面形貌的实验研究 [J]. 制造技术与机床, 2020(7): 72-75.  
XIONG Ruiliang, LIU Xubo, XIONG Zhiwen, et al. Experimental study on surface morphology of ultra-precision turning[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(7): 72-75.
- [7] 袁伟杰, 邓日涛, 杨振涛, 等. 应用弹性砂轮对铝合金镜面磨削工艺研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(7): 21-27.  
YUAN Weijie, DENG Ritao, YANG Zhentao, et al. Mirror grinding process for aluminum alloy using elastic grinding wheel[J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 21-27.
- [8] 袁伟杰. 聚氨酯弹性砂轮制备及其磨削性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
YUAN Weijie. Study on preparation and grinding performance of polyurethane elastic grinding wheel[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [9] 关佳亮, 张孝辉, 马新强, 等. 铝合金手机外壳超精密镜面加工工艺的实验研究 [J]. 制造技术与机床, 2014(2): 21-23.

GUAN Jialiang, ZHANG Xiaohui, MA Xinqiang, et al. Research on ultra precision mirror machining technology for aluminum alloy mobile phone shell[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2014(2): 21–23.

[10] 罗佳, 孙亮. 合金元素影响铸造铝合金切削加工性能研究[J]. *南方农机*, 2017, 48(4): 21–22.

LUO Jia, SUN Liang. Effect of alloying elements on Machinability of cast aluminum alloy[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 21–22.

[11] 张深圳, 牛秋林, 李爽, 等. 硅铝合金表面缺陷形成机理及其加工工艺优化研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2021, 51(1): 10–16.

ZHANG Shenzhen, NIU Qiulin, LI Shuang, et al. Research progress on the formation mechanism of silicon-aluminum alloy surface defects and optimization of processing technology[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2021, 51(1): 10–16.

[12] ATZENI E, CALIGNANO F, SALMI A, et al. Experimental study on forces and surface roughness in peripheral grinding of an aluminum alloy[J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2019, 12(3): 229–242.

[13] 张利军, 申伟. 铝合金陀螺框架磨削技术研究[J]. *金属加工(冷加工)*, 2016(11): 40–41.

ZHANG Lijun, SHEN Wei. Study on grinding technology of aluminum alloy gyro frame[J]. *Metal Working (Metal Cutting)*, 2016(11): 40–41.

[14] 王祝堂, 余东梅. 全球注册变形铝合金状况简介[J]. *轻合金加工技术*, 2020, 48(9): 1–5.

WANG Zhutang, YU Dongmei. Analysis of globally registered wrought aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2020, 48(9): 1–5.

[15] 刘畅. 铝合金结构件铣削加工性研究现状[J]. *科技视界*, 2016(6): 182–184.

LIU Chang. Research status of milling machinability of aluminum alloy structural parts[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(6): 182–184.

[16] 刘瑞杰, 黄云, 靳星星, 等. 基于砂带磨削的钛合金复合板材恒压自适应控制研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(8): 1258–1261.

LIU Ruijie, HUANG Yun, JIN Xingxing, et al. Adaptive control with constant pressure on titanium alloy composite plates based on abrasive belt grinding[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(8): 1258–1261.

[17] MICHAEL E H C, ANDRE B D. Development of control system for vibratory grinding process[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 1093–1099.

[18] AHRENS M, FISCHER R, DAGEN M, et al. Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 374–378.

[19] 高显胜, 周扬, 李泽宇, 等. 大型非封闭圆薄壁铸铝合金零件车削加工[J]. *金属加工(冷加工)*, 2020(11): 61–64.

GAO Xiansheng, ZHOU Yang, LI Zeyu, et al. Turning of large non closed thin wall cast aluminum alloy parts[J]. *Metal Working (Metal Cutting)*, 2020(11): 61–64.

[20] 赵智航. 金刚石砂轮与CBN砂轮加工铝合金Al6061的对比试验研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2020, 56(8): 38–39, 46.

ZHAO Zhihang. A comparative experimental study between the diamond grinding wheel and the CBN grinding wheel for processing

aluminum alloy Al6061[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2020, 56(8): 38–39, 46.

[21] 张涵源, 程仁寨. 硬铝合金精密磨削材料去除率的研究[J]. *铝加工*, 2019(1): 49–52.

ZHANG Hanyuan, CHENG Renzhai. Study on material removal rate during precision grinding for hard aluminum alloy[J]. *Aluminium Fabrication*, 2019(1): 49–52.

[22] 张程焱, 王立新, 俎晓莉, 等. 高强铝合金干式切削加工参数多目标优化[J]. *机床与液压*, 2020, 48(19): 74–78.

ZHANG Chengyan, WANG Lixin, ZU Xiaoli, et al. Multi-objective optimization of dry cutting parameters of high strength aluminum alloy[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(19): 74–78.

[23] 焦锋, 李成龙, 牛赢, 等. 砂轮修整技术研究现状与展望[J/OL]. *中国机械工程*, [2021–03–30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20210329.1728.012.html>.

JIAO Feng, LI Chenglong, NIU Ying, et al. Research status and Prospect of grinding wheel dressing technology[J/OL]. *China Mechanical Engineering*, [2021–03–30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20210329.1728.012.html>.

[24] WEGENER K, HOFFMEISTER H W, KARPUSCHEWSKI B, et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(2): 757–777.

[25] YOU F Y, ZHOU W, WANG X, et al. Systematic monitoring and evaluating the wear of alumina wheel when grinding the workpiece of Cr12[J]. *Complexity*, 2021, 2021: 1–11.

[26] 汪旋. 基于磨削温度的砂轮磨损状态在线监测技术研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.

WANG Xuan. Monitoring the wear of grinding wheel on-line base on grinding temperature[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020.

[27] 段景淞. 精密磨削砂轮磨损状态智能监测系统的研究[D]. 长春: 长春大学, 2020.

DUAN Jingsong. Research on intelligent monitoring system for wheel wear status in precision grinding[D]. Changchun: Changchun University, 2020.

[28] 徐慧, 李天生. 磨削抛光铝合金的工艺参数研究[J]. *机械设计与制造*, 2010(9): 134–135.

XU Hui, LI Tiansheng. Research on process parameters of Al-alloy grinded and polished[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010(9): 134–135.

[29] 任旭. 机器人砂带磨削航发叶片关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.

REN Xu. Research on the key technology in robot belt grinding of aero-engine blade[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

[30] 孔令叶, 阎秋生. 曲面恒去除量磨削技术研究[J]. *机电工程技术*, 2017, 46(5): 33–35, 90.

KONG Lingye, YAN Qiusheng. Research on constant removal grinding of curved surface[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2017, 46(5): 33–35, 90.

[31] 徐超, 胡皓, 彭小强, 等. 复杂曲面铝反射镜磁流变抛光工艺优化[J/OL]. *航空学报*, [2021–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20201229.1412.015.html>.

XU Chao, HU Hao, PENG Xiaoqiang, et al. Optimization of magnetorheological polishing process for complex curved aluminum mirrors[J/OL]. *Acta Aeronautica Sinica*, [2021–04–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20201229.1412.015.html>.

net/kcms/detail/11.1929.V.20201229.1412.015.html.

[32] 张涵源,程仁寨.磨削加工对ZL102铝合金组织和性能的影响[J].铝加工,2018(6):57-60.

ZHANG Hanyuan, CHENG Renzhai. Influence of grinding process on microstructure and properties of ZL102 aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2018(6): 57-60.

[33] SUN H Q, IRWAN R, HUANG H, et al. Surface characteristics and removal mechanism of cemented tungsten carbides in nanoscratching[J]. Wear, 2010, 268(11-12): 1400-1408.

[34] 毕波. 铝合金材料砂带磨削机理的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

BI Bo. Experimental study on the belt grinding mechanism for aluminum alloys[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.

[35] 黄云. 砂带磨削技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 1-4.

HUANG Yun. Brief introduction of research status and development direction of belt grinding technology[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(3): 1-4.

[36] 张迪. 基于固结磨料磨具的金属镜研磨加工技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.

ZHANG Di. Research on the lapping technology of metal mirror based on consolidated abrasives[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.

[37] 廖燕玲, 刘文广, 李明聪, 等. 钎焊金刚石微刃砂轮的制备及其磨削 AISiC 的性能研究[J]. 超硬材料工程, 2019, 31(4): 1-6.

LIAO Yanling, LIU Wenguang, LI Mingcong, et al. Preparation of brazed diamond grinding wheel with micro-edges and its grinding performance on AISiC composite[J]. Superhard Material Engineering, 2019, 31(4): 1-6.

[38] 张晓芳. 超声辅助砂带磨削铝合金仿真与实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.

ZHANG Xiaofang. Simulation and experimental study on ultrasonic-assisted belt grinding of aluminum alloy[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.

[39] LUO Q F, LU J, LI Z, et al. Fabrication of a sol-gel polishing tool for green manufacturing of the seal stone[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2020, 96(3): 576-588.

[40] 曹颜楠, 苗艺男, 关玉明. 6061-T651 铝合金单颗磨粒磨削仿真[J]. 工具技术, 2020, 54(4): 32-35.

CAO Yannan, MIAO Yinan, GUAN Yuming. Grinding simulation of 6061-T651 aluminum alloy single grinding grain[J]. Tool Engineering, 2020, 54(4): 32-35.

[41] 陈世隐. 大直径细粒度钎焊金刚石砂轮的制备及其磨削性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.

CHEN Shiyin. Research on the preparation and grinding performance of large diameter fine-grained brazed diamond wheel[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.

[42] 余凯峰, 陈世隐, 黄国钦. 钎焊金刚石砂轮磨削 AA4032 铝合金试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-6.

YU Kaifeng, CHEN Shiyin, HUANG Guoqin. Grinding experiment of AA4032 aluminum alloy with brazed diamond wheel[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(1): 1-6.

[43] 赵恒华, 宋涛, 蔡光起. 磨削加工技术的发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2012(1): 55-58.

ZHAO Henghua, SONG Tao, CAI Guangqi. The development trends of grinding process technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(1): 55-58.

[44] 宋铁军. 整体式硬质合金刀具缓进给磨削机理及其表面质量研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

SONG Tiejun. Study on creep feed grinding mechanism and surface quality of cemented carbide shank-type tool[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[45] 王福明, 黄云. 基于砂带磨削的铝合金磨削力和表面粗糙度的研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(1): 43-45.

WANG Fuming, HUANG Yun. Research of grinding force and surface roughness of aluminum alloy based on the abrasive belt grinding[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(1): 43-45.

[46] LIU Y, DONG H R, WANG H T, et al. Multi-objective titanium alloy belt grinding parameters optimization oriented to resources allocation and environment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1-2): 449-463.

[47] 田凤杰, 吕冲. 基于 BP 神经网络的机器人砂带磨削表面粗糙度研究[J]. 工具技术, 2018, 52(9): 100-103.

TIAN Fengjie, LÜ Chong. Research on surface roughness of robotic abrasive belt grinding based on BP neural network[J]. Tool Engineering, 2018, 52(9): 100-103.

[48] 高志森, 石慧婷, 王嘉明, 等. 滚磨光整加工中新型磨液对 7075 铝合金加工效果的影响分析[J/OL]. 机械科学与技术. [2021-03-15]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200060>.

GAO Zhisen, SHI Huiting, WANG Jiaming, et al. Analysis of the influence of new grinding fluid on the machining effect of 7075 aluminum alloy in roll polishing[J/OL]. Mechanical Science and Technology. [2021-03-15]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200060>.

[49] LI C, LI X L, HUANG S Q, et al. Ultra-precision grinding of Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystals with graphene oxide coolant: Material deformation mechanism and performance evaluation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 417-427.

[50] 商执亿, 劳奇成. 低温冷风磨削加工高速钢试验研究[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(2): 130-134.

SHANG Zhiyi, LAO Qicheng. Experimental study on cooling-air grinding of high speed steel[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2015, 35(2): 130-134.

[51] MALKIN S, GUO C. Thermal analysis of grinding[J]. CIRP Annals, 2007, 56(2): 760-782.

[52] 肖敏. 轴向超声振动辅助磨削机理的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

XIAO Min. Study on mechanism of axial ultrasonic-assisted grinding[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.

[53] CAO J G, WU Y B, LI J Y, et al. Study on the material removal process in ultrasonic-assisted grinding of SiC ceramics using smooth particle hydrodynamic (SPH) method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5-8): 985-994.

通讯作者: 尤芳怡, 教授, 博士, 研究方向为高效精密加工、高效智能制造及工艺。

(责编 阳光)