

表面质量控制及检测

微细切削加工表面质量的研究综述

张浩, 刘玉德, 石文天, 韩冬

(北京工商大学, 北京 100048)

摘要: 随着微小型零件的广泛使用, 对精度和表面质量的要求越来越高, 必须进一步解决微细加工中表面粗糙度差、微细毛刺等加工缺陷, 提高表面的加工质量。因此, 微细切削加工的表面质量受到国内外越来越多学者的关注, 并成为研究的重点和热点。综述了微细切削加工中表面质量的研究成果以及研究现状, 并进行了分类和总结。首先介绍了微细切削加工的背景和意义, 综述了微细切削加工的特点, 对微细切削加工表面质量按照表面粗糙度、表面残余应力、表面加工硬化、微细毛刺进行了分类讨论。然后, 将微细切削加工工艺分为微细车削、微细铣削、微细车铣、微磨削工艺四个方面展开论述, 综述了微细切削加工工艺中对表面质量的试验方法和科研成果, 归纳了影响表面质量的相关因素, 包括切削要素、刀具要素以及其他的辅助因素等, 并总结出影响表面质量的加工规律。最后, 对微细切削加工表面质量进行总结, 提出一些改善加工表面质量的方式方法以及相关建议。

关键词: 微细切削; 表面质量; 加工工艺; 研究成果; 影响规律

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)07-0219-14

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.037

Quality of Micro Machined Surface

ZHANG Hao, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, HAN Dong

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: Extensive use of micro-parts requires higher precision and surface quality, and processing defects including poor surface roughness and micro burrs in micro-processing must be further removed to improve surface processing quality. Therefore, quality of micro-machined surface has aroused more attention of scholars both at home and abroad, and has become a focus and hotspot of domestic research. Research findings and research status concerning surface quality in micro-machining were reviewed, classified and summarized. Firstly, background and significance of micro-machining were introduced, characteristics of micro-cutting were reviewed and the surface quality was discussed in respect of surface roughness, surface residual stress, surface hardening and micro burrs. Then the processing technology was expounded in terms of fine turning, fine milling, fine milling and micro grinding. Test methods and scientific research results concerning surface quality in micro-cutting process were summarized. Relevant factors affecting surface quality, including cutting elements, tool elements and other cofactors, and law of processing affecting surface quality was concluded. Finally, quality of micro-machined surface was summed up, and some ways, methods and suggestions of improving quality of machined surface were proposed.

KEY WORDS: micro cutting; surface quality; processing technology; research findings; influence law

收稿日期: 2017-04-23; 修订日期: 2017-06-20

Received: 2017-04-23; Revised: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51505006)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51505006)

作者简介: 张浩 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微细切削技术。

Biography: ZHANG Hao(1990—), Male, Master, Research focus: micro-cutting technology.

通讯作者: 石文天 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微细切削技术。

Corresponding author: SHI Wen-tian(1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: micro-cutting technology.

近年来,随着微型器件的广泛应用,对于微小零件的需求越来越广,微小零件具有体积小、质量轻、精度高、性能可靠、灵敏度及效率高等优点^[1-3]。目前,我国对微小零件的生产尚处于发展阶段,起步较晚,加工微小零件的技术也不够成熟,还需要微细切削加工技术进一步的研究。由于微细切削技术主要用于表面粗糙度和几何精度在数十纳米至微米之间的微小零件,其尺寸微小,加工结构三维化,曲面复杂,微细切削加工过程中表面质量较难保证。微细切削加工过程中,主要的加工特点是尺寸效应,这与传统切削加工有着本质的区别。尺寸效应极大地影响着加工工件的表面质量,这是因为参与切削的刀具存在刃口半径,刀具前刀面的接触面积在逐渐减小,承担材料去除工作的主要是刀刃附近区域,后刀面的磨损量在不断增大,此时刀具刃口半径对切削变形和材料去除的影响不可忽视。

微小零件的表面质量主要包括表面粗糙度、表面残余应力、表面冷作硬化、表面微细毛刺,其中,表面粗糙度、表面残余应力、表面冷作硬化是影响表面质量最重要的因素^[4]。微细切削技术首先要解决的是如何保证微小零件的表面质量,因为它极大地影响着零件的装配精度、使用耐磨性、抗腐蚀性还有疲劳断裂强度等。图 1 是影响微细切削加工表面质量的相关因素,涵盖了与表面质量紧密联系的基本因素,包括刀具参数、试验方法、切削工艺、切削参数等。本文综述了各种微细切削加工工艺对表面质量的影响,总结了影响表面质量的规律,对提高微小零件产品的表面质量和性能具有重要的意义。

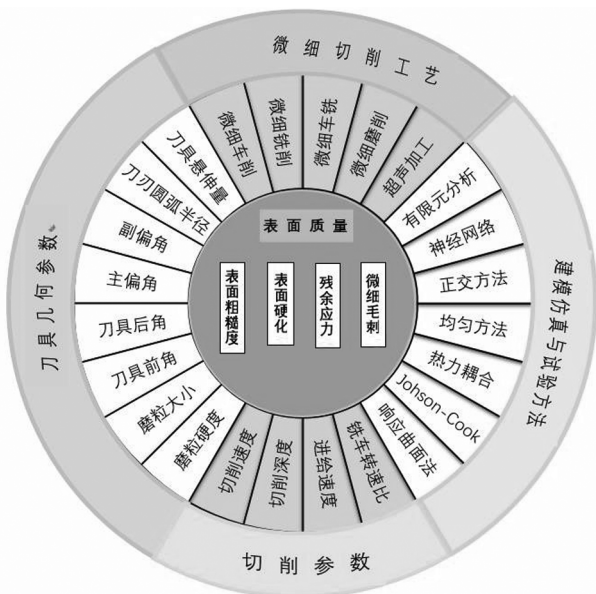


图 1 微细切削加工表面质量相关影响因素
Fig.1 Surface quality of micro-machined surfaces

1 微细切削加工表面粗糙度

表面粗糙度是评价微细精加工之后表面质量指标的最重要参数,它是指已加工工件表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度,其两波峰或两波谷之间的距离很小(在 1 mm 以下),属于微观几何形状误差。这主要因为微细切削加工中刀具和工件之间的相互作用造成的,它们之间的挤压、摩擦、表层金属产生变形等,均能造成工件表面的微观不平整。表面粗糙度越小,则表面越光滑,粗糙度值的大小直接影响工件的配合性质、耐磨性、疲劳强度、接触刚度、振动和噪声等,综合反映了微细切削加工中各种参数对表面质量的影响。表面粗糙度极大地影响着产品的使用寿命和可靠性,特别是在微小零件中,表面粗糙度值的大小直接决定着零件合格与否。

1.1 微细车削加工表面粗糙度的研究

微细切削加工时,由于刀具与工件之间的运动关系,在已加工表面上有很小部分的切屑没有被完全切削下来,而是残留在已加工零件表面,形成微观结构高低不平的残留面积,残留下来的不平整表面高度直接影响表面粗糙度。根据理论公式,残留面积高度可由刀具的主偏角 κ_r 、副偏角 κ_r' 、刀尖圆弧半径 r_ϵ 和进给量 f 等参数按照几何关系推算出来^[5]。

如图 2 所示,残留面积高度可由以下公式表示:

$$R_{\max} = O_1O = O_1C - OC = r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2} \quad (1)$$

变换得到:

$$(r_\epsilon - R_{\max})^2 = r_\epsilon^2 - \frac{f^2}{4} \quad (2)$$

由于式中 $R_{\max} \ll r_\epsilon$,故 R_{\max}^2 可以忽略,简化后可得:

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (3)$$

而当 $r_\epsilon = 0$ 时,如图 2 所示,由主切削刃及副切削刃的直线部分形成的残留面积直接用公式(4)表示:

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot \kappa_r + \cot \kappa_r'} \quad (4)$$

由公式(3)和(4)可知,理论残留面积高度随着进给量的减小、刀尖圆弧半径的增大或主偏角以及副偏角的减小而降低,而实际的表面粗糙度都是由其他影响因素在这个基础上叠加的结果,降低残留面积高度直接减少实际表面粗糙度。另外,微细车削表面粗糙度还受到切削速度、进给速度、背吃刀量等切削工艺的影响。

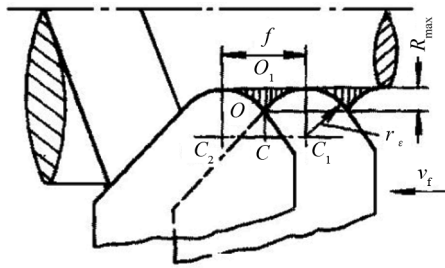


图 2 微细车削时残留面积高度
Fig.2 Residual area height for fine turning

国外学者 Vogle 进行了微细车削试验,发现切削厚度很小时,随着进给量的减小,粗糙度值会上升。这是因为在加工过程中存在最小切削厚度现象,当刀口半径与最小切削厚度处于同一量级时,会产生不稳定的切削和犁耕,从而增加表面粗糙度值^[6]。国内有人利用 PCD 刀具进行微细车削硬铝合金表面质量试验^[7],采用正交试验方法,发现对表面粗糙度影响最大的是进给量,其次是切削速度,影响最小的是切削深度。与之类似的试验,张慧萍通过单因素试验研究进给量、切削速度、切削深度及刀尖圆弧半径对表面粗糙度的影响,经过分析得到同样的试验结果,即影响表面粗糙度重要程度依次是进给量、刀尖圆弧半径、切削速度、切削深度^[8]。于是,可以得出降低进给速度是减小工件表面粗糙度最直接有效的方法^[9]。张涛在试验中得出已加工表面轮廓由工件材料沿刀具前、后刀面两次堆积而成,当工件材料在刀具前、后刀面的堆积高度与进给量达到平衡时,表面粗糙度的最大高度最小,表面粗糙度值达到最低^[10]。吕玉梅等人进行微细车削表面粗糙度实验,发现表面粗糙度主要受刀尖圆弧半径的影响,当刀尖圆弧半径处于较大范围时,表面粗糙度变化很小;当切深与材料微观结构尺寸相近时,对表面粗糙度产生较大影响^[11]。在微细干车削硬铝合金 LY12 的表面粗糙度试验中,也得到类似的结论^[12]。孔金星等人通过改变冷却润滑方式进行了纯铁微细车削表面完整性的影响试验,结果显示在 4 种冷却润滑(水冷、菜籽油润滑、干切和微量润滑)方式中,微量润滑对表面粗糙度的影响最好,可达到 $3.24 \mu\text{m}$ ^[13]。还有一些特殊的辅助微细车削的加工方法,如施加超声辅助、刀具添加涂层等方法配合微细车削,均可以降低表面粗糙度,提高表面质量。

国外学者 MULTHC^[14]、ZEMANNR^[15]、XUWX^[16]、CONGWL^[17]均用超声振动技术降低微细车削表面粗糙度。朱林等人进行了超声振动车削光整技术研究试验,利用田口实验方法得出在附加超声振动时,微细车削表面粗糙度能够达到足够小^[18]。张晓武等人进行超声加工对工件加工质量的影响试验,也得到了类似的结论,图 3 为超声波振动微细车削装置^[19]。Ucun 使用 5 种不同涂层(AlTiN、AlCrN、TiAlN+AlCrN、

TiAlN+WC/C、类金刚石)的刀具加工铬镍铁合金 718,得到的表面粗糙度各不相同,说明涂层材料对表面质量的影响较大^[20]。

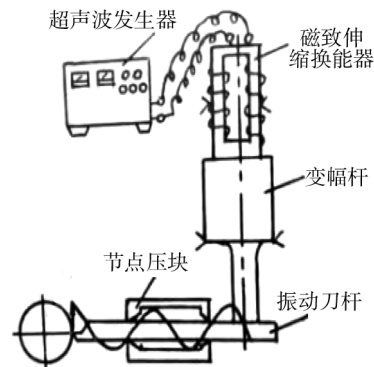


图 3 超声波振动微细车削装置^[19]
Fig.3 Micro-fine turning ultrasonic vibration device^[19]

根据国内外文献以及相应的理论公式、试验,经过分析得到微细车削加工表面粗糙度在切削要素方面主要受到进给量的影响,随着进给量的增大,表面粗糙度增大。其次是切削速度,较高的切削速度可获得较低的表面粗糙度值。最后是切削深度,增加切削深度会使切削力明显增加,但微细切削所选用的切削深度一般在几十微米左右,在切削力的波动较小、稳定加工工况下,对表面粗糙度的影响也较小。在刀具几何方面,表面粗糙度随着刀尖圆弧半径的增大或主偏角以及副偏角的减小而降低。通过微量润滑以及采用其他特殊辅助加工方法等,也可以达到降低表面粗糙度的目的。

1.2 微细铣削表面粗糙度的研究

微细铣削技术在微细切削加工中,实用性最强,应用性最广,特别是在加工三维立体表面技术方面越来越成熟,并且已经成为微细切削加工中研究的重点和热点^[21-22]。已加工表面粗糙度值对零件的各项性能等影响很大,尤其是微小型结构工件,由于自身结构微小,很难控制和预测零件加工后表面粗糙度。因此,研究微细铣削条件,并选择合理的切削参数,如切削速度、轴向切深、每齿进给量以及刀刃钝圆半径等,对表面粗糙度的控制和预测显得尤为重要。

文献[23]采用二因素析因设计进行微细铣削硬铝合金 LY12 槽铣试验,研究了刀具悬伸量、刀具直径、轴向切深、每齿进给量对工件表面粗糙度的影响,利用方差分析发现对表面粗糙度影响非常显著的是刀具悬伸量、刀具直径,其次是轴向切深,最后是每齿进给量。张欣欣等人通过研究微铣削 7075 航空铝合金表面,采用多因素正交试验与极差、方差分析法,得出铣削速度对表面粗糙度的影响最大,进给速度次之,最后是轴向切深。所以要想降低表面粗糙度,首

先要考虑铣削速度,选择合适的铣削速度对整个铣削加工起到至关重要的作用,其次考虑进给速度和铣削深度,最后考虑刀具悬伸量、刀具直径等^[24]。曹自洋在微细铣削表面粗糙度实验研究中,发现每齿进给量和刀具切削刃钝圆半径对表面粗糙度的影响显著。由此可知,为了减小表面粗糙度,应尽量选用切削刃钝圆半径较小的刀具^[25]。王建平对复杂曲面微细零件进行微铣削加工,得出通过减少进给量或者减少圆弧半径的办法,可得到较小的表面粗糙度^[26]。

Aramcharoen^[27]、Filiz^[28]、Mian^[29]、Liu^[30]等人在试验中均发现,表面粗糙度随着切削厚度或切削厚度和切削刃口圆弧半径比值的减少,在一段区间范围内反而增大。文献[31]中采用设计的二次响应曲面法建立了微细铣削表面粗糙度预测模型,分析得到在一定的切削参数范围内,提高铣削速度,减少每齿进给量和切削深度,可以有效降低微细铣削表面粗糙度值。李灵光等人经过试验得出在一定区域内,低进给量和高切削速度或低进给量和低切削深度可降低表面粗糙度,最低可达到 $1.26\text{ }\mu\text{m}$ ^[32]。季思慧在正交试验中也得到类似的结论,得出铣削深度、进给速度、铣削速度对表面粗糙度的影响规律^[33]。

综上所述,微细铣削表面粗糙度影响最大的因素是铣削速度,且提高铣削速度,能有效降低表面粗糙度值,分析原因主要是因为高主轴转速下,刀具前刀面变形和磨损较小,容易切削材料,且切屑被快速带走,没有留下,很少产生材料表面变形。另外,减少每齿进给量、切削深度或者采用微进给微切深,可明显降低表面粗糙度值,这是因为刀具与工件之间的摩擦力和挤压力小的原因。从试验中还可分析得出刀具悬伸量、刀刃圆弧半径对表面粗糙度的影响在不同的切削环境下均不相同,规律性不明显,不能一概而论,需在各自环境下进行讨论和进一步研究。

1.3 微细车铣表面粗糙度的研究

微细车铣加工工艺复合了铣削和车削两种工艺方法,相比车削具有切削效率高、切削速度大、径向切削力小、切削振动小、加工表面粗糙度和精度好等优点。它从根本上解决了微细轴类零件在车削加工时切削线速度低的问题,同时可以实现工件低速旋转状态下的高速切削加工,被证明是一种优于车削工艺的微细轴类加工方法。精加工后的表面粗糙度值对零件各项性能(如接触刚度、耐磨耐蚀性、装配精度等)的影响很大,尤其对自身几何尺寸微小的轴类零件,表面粗糙度更是不容忽视。

影响微细车铣表面粗糙度的主要因素是铣车转速比、主轴转速、轴向进给量、切削深度等。贾春德通过矢量分析的方法,建立了正交车铣运动的矢量模型,认为转速比、铣刀刃数、刀刃半径、顺逆铣、偏

心量等多个参数对正交车铣运动均会产生较大的影响^[34]。刘克非在研究表面粗糙度单因素试验中,得出铣削转速和工件转速对表面粗糙度的影响最大,轴向进给量的影响次之,而切削深度对表面粗糙度的影响最不明显^[35]。冯佳彬采用正交试验方案进行切向车铣工件表面粗糙度的试验,该试验分析了4个切削参数对表面粗糙度的影响程度,结果显示铣刀转速影响最大,其次是铣刀轴向进给量和工件转速,最后是切削深度,同时测得最小的表面粗糙度值为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ^[36]。从以上试验可以得出,影响微细车铣表面粗糙度程度从大到小依次为铣车转速、工件转速、轴向进给量、切削深度。

李江南等人在试验中得出表面粗糙度随着工件转速、轴向进给量和刀具悬伸量的增大而增大,随着铣刀转速的增大而减小,并得到最小的表面粗糙度值为 $0.793\text{ }\mu\text{m}$ ^[37]。金成哲提出一种基于人工神经网络的表面粗糙度预报方法,并且对神经网络算法加以改进,结果证明BP神经网络对于微细车铣表面粗糙度值具有很高的预测精度,这对今后微细车铣表面粗糙度的预报具有重要指导作用^[38]。

上述微细车铣加工表面粗糙度的试验结论得出,铣车转速比对表面粗糙度的影响最大,且表面粗糙度值随铣车转速比的增大而增大,这是由于在微细切削条件下,刀刃与加工材料接触区域较常规尺度切削更狭小,单位面积上的切削应力急剧增加,产生的热量集中、不易散发,会使局部温度过高,不利于切削加工,刀刃的挤压磨损也在急增,直接导致表面粗糙度值增加。其次,随主轴转速的增加,表面粗糙度也在增加,但是当轴向进给速度与适当的切削转速相配合时,可以降低表面粗糙度。最后,切削深度对表面粗糙度的影响不大,但较大的切削深度会得到较好的表面粗糙度值。在实际微细车铣加工中,加工材料的不同,对应的切削参数不尽相同,但是影响程度和规律大致如此。

1.4 微磨削表面粗糙度的研究

微磨削加工是指使用直径小于 1 mm 的微型磨棒对材料直接进行机械去除并形成所需形貌,其主要用于微型零件及微特征的加工^[39-42]。吴艾奎进行了微磨削钛合金表面粗糙度预测分析试验,运用二次回归正交旋转组合,设计方法安排了19组试验,结合响应曲面法,得出对微磨削表面粗糙度的影响最大是进给速度,然后是磨削速度,最后是磨削深度,并运用该模型经过预测获得 $Ra=0.393\text{ }\mu\text{m}$ 的磨削表面^[43]。类似结果,例如郑伟生在TC4钛合金微磨削表面粗糙度的试验中,得到随着进给速度的减小以及切削速度的提高,工件表面的质量越好的结论^[44]。

郑青竹等人在研究表面粗糙度的试验中,也得到

同样结论,认为进给速度对微磨削表面粗糙度的影响最大,其次是磨削深度,最后是磨削速度,还得到最小的表面粗糙度为 $0.11\ \mu\text{m}$ 。同时还研究了微径砂轮的磨损对表面粗糙度的影响,发现磨损初期,表面粗糙度是下降的,这是因为磨粒断裂使切削刃增加,随后微径砂轮的磨粒钝化,使表面粗糙度变大,表面质量降低,最终得到最低的粗糙度值为 $0.23\ \mu\text{m}$ ^[45]。明兴祖在微磨削表面粗糙度建模与实验分析中,发现随磨削转速的增加,工件的表面粗糙度呈减小趋势,最小表面粗糙度值可达到 $0.345\ \mu\text{m}$;随着摆动进给速度的增加,粗糙度值也相应增大;砂轮磨粒粒度越细,工件表面的粗糙度越低,可达到 $0.479\ \mu\text{m}$ ^[46]。另外,微量润滑对磨削加工表面粗糙度也有一定的影响。蒋为在干磨与微量润滑 MQL (Minimum Quantity Lubrication) 磨削条件下进行磨削表面粗糙度试验,磨削工件表面的粗糙度值 ($Ra=2.2\ \mu\text{m}$, $Rz=14.09\ \mu\text{m}$) 明显低于干磨加工的工件表面粗糙度值 ($Ra=3.11\ \mu\text{m}$, $Rz=23.81\ \mu\text{m}$),说明 MQL 技术能够有效降低工件表面的粗糙度值。这是由于在 MQL 条件下,磨削液可以增加磨粒切削刃边缘材料的弹塑性变形,从而使边缘的残留材料减少,降低表面粗糙度^[47]。

微磨削加工过程中的表面粗糙度主要受到磨削速度、进给速度、磨削深度的影响。其中影响最大的是进给速度,随着进给速度的减小,表面质量越好;影响较大的是磨削速度,随着磨削速度的提高,表面粗糙度越低,表面质量逐渐提高;影响较小的是磨削深度,随着磨削深度的增加,表面粗糙度先逐渐增大达到一定值,再逐渐下降。所以,在进行微磨削加工时,宜采用合适的较小进给速度、磨削深度以及较大磨削速度,有利于减少表面粗糙度值,提高微磨削表面质量。

2 微细切削加工表面残余应力

残余应力是指工件经过微细切削加工后,在已加工零件表面层存在的保持内部平衡的应力系统,同时也是表面质量的一种重要标志,极大地影响着工件几何尺寸的稳定性、抗腐蚀性、疲劳强度等,最终影响工件的使用寿命^[48]。在微细切削加工过程中,由于切削热和切削力与残余应力的相互作用,使得工件自身原有的表面残余应力重新分配,当切削加工完成后,没有了切削力及切削热减弱,工件表面局部会出现塑性变形,工件内部的残余应力再次发生形变和分布,整个切削加工结束后,工件表面和内部的残余应力形成新的残余应力分布规律,这种规律对工件的表面质量起到重要的预测和控制作用^[49-55]。

2.1 微细车削表面残余应力的研究

微细车削表面残余应力是指在微细车削加工工

艺中,车削工件后在工件表面产生的残余应力。由于微细切削加工存在切削力和切削热,所以会产生与热力学相关的问题,比如在较高的温度、压强以及高强度的应变情况下产生塑性大变形,直接导致残余应力发生改变^[56]。残余应力的形成过程极其复杂,有刀具因素、切削因素、材料本身因素,还有工件和刀具之间的相互摩擦挤压因素等。微米级的超精密车削在研究表面残余应力方面存在很多困难,主要是因为切削尺寸属于微米级,产生的残余应力不易测量或者测量不稳定导致研究报告较少^[57-61]。

吴宝森^[62]分析了微细切削加工残余应力的产生规律,采用 Johnson-Cook^[63]剪切失效法作为切屑分离准则,在热力耦合的作用下,建立了关于超精密车削加工铝合金的三维有限元仿真模型,得到残余应力的仿真结果。由于刀具刃口的尺寸效应,当切削深度较小时,残余应力没有明显变化,当切削深度逐渐增大时,残余应力会逐渐增大;当进给量、切削速度逐渐增大时,残余应力也逐渐增大。可知改变切削用量对超精密车削加工铝合金表面残余应力变化具有一定的规律:当背吃刀量、进给量和切削速度提高时,都会导致残余应力的提高。常艳艳等人采用有限元分析和试验相结合的方法,使用天然单晶金刚石刀具,对 LY12 硬铝合金做超精密车削仿真和试验,结果显示随着切削深度的增大,表面残余压应力增大,但是表面残余应力不再是压应力,而是转化为拉应力^[64],如图 4 所示。王明海也建立了热-力耦合有限元仿真模型,对钛合金正交切削过程中刃口半径及材料变形进行了仿真模拟,研究它们对已加工工件表面质量和表面残余应力分布的影响,得到刃口半径由 $0.01\sim 0.04\ \text{mm}$ 增大时,表层残余应力逐渐增大^[65]。

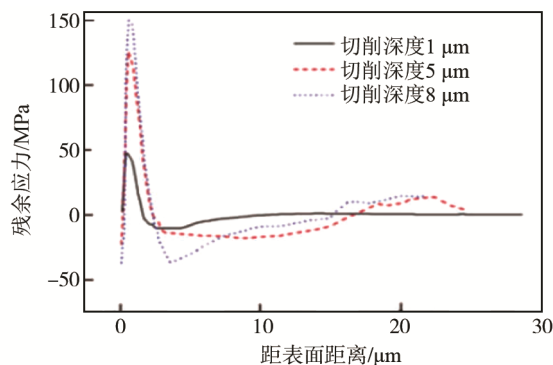


图 4 切削深度对表面残余应力的影响^[64]

Fig.4 Effect of cutting depth on surface residual stress^[64]

国外学者 SALONITIS^[66]、Mamedov^[67]通过有限元仿真均得出不同加工条件下残余应力分布情况。另外, Virginia^[68]研究了切削参数对加工表面残余应力的影响,同样发现随进给速度的增大,残余拉应力增大的规律。Tampu^[69]进一步得到小切深可以得到较小的残余应力值的结论。由此可知,在一定条件下,残

余应力随着切削深度、切削速度、进给量的增加而逐渐增大。

马艳等人在微细车削已加工表面残余应力建模试验中,发现切削热应力及材料受热相变是残余应力的来源,残余拉应力随后刀面磨损的增加而增加;当前刀面月牙洼磨损不断增大时,残余应力呈现先下降后上升的趋势^[70]。Henrikse^[71]也得到类似结论。刘文文进行钛合金 TC4 材料仿真试验,分析出已加工表层残余应力主要为拉应力,深向过渡到压应力,表面残余应力随着切削速度的增大而增大,一定前角范围内,随前角增大,表面残余拉应力先增后减,随着刀具后角的增大而减小^[72]。

试验研究表明:微细车削表面残余应力主要随着切削深度发生变化,大致是随着切削深度的增加,残余应力先急剧增加,后快速减少,再缓慢减少;进给量、切削速度也会影响残余应力的大小,当它们逐渐增大时,残余应力逐渐增大,同时刃口半径在一定范围内增大时,残余应力也相应增大;刀具角度对表面残余应力也有影响,即随着后刀面的磨损逐渐增加,后角变大,残余应力从压应力变为拉应力,压应力从大变小,拉应力从小增大,所以尽量减少刀具磨损,可以适当减少残余应力的产生。

2.2 微磨削表面残余应力的研究

微磨削表面残余应力研究的是在不同的磨粒大小、磨削深度、磨削温度等条件下,工件表面残余应力的变化规律。

原一高在研究超细晶粒硬质合金磨削实验时,对不同磨削条件下残余应力进行测定,得到:切削深度相同时,随着砂轮粒度的减小,残余应力逐渐降低;而在不同切削深度时,只要是同一粒度,砂轮的残余应力变化不大^[73]。由此说明,影响微磨削表面残余应力的主要因素是砂轮粒度,而切削深度对残余应力的影响不大。刘莉娟等人在实验中得出在不同磨削深度下,工件表层存在残余压应力和拉应力;当磨削深度从小变到大时,残余应力先增长缓慢到最后增长较快,如图 5 所示,这说明随着切削深度的增加,残余应力增长变化较大,这不利于微磨削加工,应该尽量在满足加工的条件下,减小磨削深度^[74]。朱跃伟采用 CBN(立方氮化硼)砂轮对 20CrMnTi 进行了高速外圆磨削试验的研究,在磨削深度为 9 μm 时,磨削机械作用(磨粒的切削能力和磨削力)越强,残余压应力越大;磨削温度越高,残余压应力减小^[75]。张雪萍等进行了轴承钢顺次磨削(粗磨-精磨-超精磨)表面残余应力的离散度试验,得出采用“粗磨-精磨-超精磨”的工艺路线,可使残余应力的离散度呈收敛趋势,磨粒偏小使其对工件的影响程度减小,从而对表面和次表面的残余应力影响相对较小^[76]。

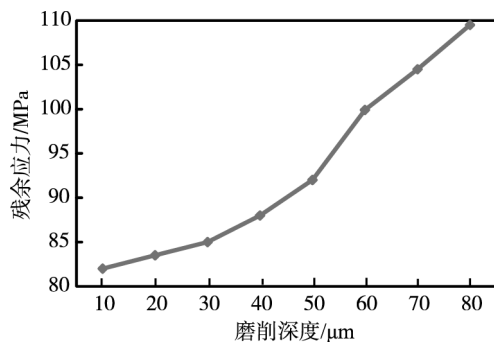


图 5 表面残余应力与磨削深度关系曲线^[74]
Fig.5 Surface residual stress and grinding depth of the curve^[74]

微磨削的表面残余应力主要受到砂轮磨粒大小的影响:粒度越大,残余应力越大;粒度越小,残余应力越小。其次,磨削深度对表面残余应力的影响不大,在一定条件下,磨削温度越高,残余应力越小。最后,不同的加工工序,也会影响表面残余应力的大小,按照粗磨、精磨、超精磨的加工工序,可以有效减少表面残余应力的产生。

2.3 微细铣削、车铣表面残余应力的研究

微细铣削和车铣表面残余应力的产生相对比较复杂,这是因为微细切削加工时,不仅有刀具的切削运动,还有加工材料的自身运动,在已加工表面所产生的残余应力是两种运动合成加工的结果。

郭培燕等人在加工表面残余应力的试验中,经过分析认为切削区不均匀的热力耦合强应力场作用加工表面,直接对工件表面产生影响,得到表面残余应力随着温度升高而增大。这是因为当热塑性变形效应大于弹性恢复作用时,表面残余应力表现为残余拉应力,当弹性恢复作用大于热塑性变形效应时,弹性变形处于拉伸状态,表面残余应力表现为压应力,这就是工件表面和内部的残余应力重新分布的规律^[77]。孙青在研究微铣削残余应力产生及影响的试验中发现,当刀具刃口半径为 3 μm ,主轴转速为 40 000 r/min 时,随着每齿进给量的减少,残余应力相应减少;当每齿进给量为 10 μm 且转速小于 40 000 r/min,其他切削条件不变时,随着转速的增加,残余应力逐渐减少^[78]。李江南等在进行微车铣表面残余应力试验时,得到随铣刀转速增大,残余应力下降;切削速度及轴向进给增大时,残余应力下降缓慢。说明增大切削速度和进给量对残余应力产生较大的作用力,刀具伸缩量对残余应力无明显影响^[79]。

除了采用控制切削要素达到控制残余应力的目的,还可以结合其他技术手段降低或者增大残余应力。焦锋指出采用传统铣削加工难以控制残余应力的范围,需采用超声辅助技术,将超声振动和高速加工技术有效复合,可以保证材料具有更加优良的抗疲劳

王素玉^[88]在实验中分析得出,表面加工硬化程度随铣削速度的提高略有下降,当深度越小时,距离表面越近,此时硬度减小较快;当深度越大时,距离表面越远,此时硬度减小缓慢;但深度达到 20~30 μm 时,硬化程度接近于基体的硬度值。辛民在试验中得出,在 0~10 μm 表面深度内,试件硬度随切削温度的不同具有显著变化;切削热对变质层金相组织结构的影响显著,当切削温度达到一定程度后,会在工件表面形成塑性变形与自激淬火特点相结合的加工硬化层,可明显提高工件表面硬度、塑性、韧性和抗腐蚀性^[89]。可知,表面加工硬化需在不同表面深度内进行研究,表面深度略有不同,材料自身的硬度也不尽相同。周子同等人进行铣削参数及刀具后刀面磨损量对加工硬化的影响试验,结果表明铣削速度增加时,加工硬化程度降低较明显,而进给量与切削深度对加工硬化的影响并不明显;后刀面磨损量低于 0.2 mm 时,硬化层深度随磨损增量从 30 μm 增加至 55 μm ,而后刀面磨损量为 0.35 mm 时,硬化层深度达到 130 μm ^[90]。可见刀具磨损对加工硬化的影响较显著。

由此可以分析得到,微细铣削表面加工硬化随着切削速度、切削深度的增大而减少,但是随着切削深度的减少,表面硬化减少得越快,主要是因为切削深度方向,加工时工件的组织结构发生变化最大,较大影响着表面硬化;当切削温度升高时,加工硬化随之变大,而不会发生软化现象,主要是因为塑性变形与自激淬火相结合形成加工硬化层,因此加工硬化将变大。此外,刀具磨损也会影响表面加工硬化,随着刀具磨损量的增加,加工硬化随之增大。

3.3 微磨削表面加工硬化的研究

研究微磨削表面硬化的规律,主要考虑磨粒大小、研磨速度以及研磨压力对表面硬化的规律。张修铭^[91]深入分析了小切深磨削力机械作用硬化机理和材料热相变硬化机理,以磨削和干磨为加工方式,进行磨削深度分别为 15、50、80、100 μm 的试验,试验得出在一定的磨削参数范围内,增大磨削深度和降低工件进给速度会增大工件表面显微残余应力,较大的残余应力可以间接反映磨削表面层硬度增加的趋势。田春林等人^[92]研究了固着磨料高速研磨工件时表面硬度的变化规律,随着磨料粒度的增加,工件表面硬化程度的变化不明显,主要因为工件与磨粒之间发生犁耕效应,导致塑性变形;随着研磨压力增加,塑性变形随之加大,位错密度增加,致使工件表面硬化程度变大。

从试验中可分析得到,影响微磨削加工表面硬化的因素主要是磨削深度、进给速度、研磨压力、磨料粒度。其中,表面硬化随着磨削深度的增加而增大,随着工件进给速度的减小而变小。另外,随着研磨压

力逐渐增加,表面硬化随之加大。但是,随着磨料粒度的增加,表面硬化变化不大。这是由于在较细磨料研磨时,每个磨粒对材料作用力较小,导致变形小,硬化程度轻,当磨粒尺寸较大时,虽然对工件材料的作用力较大,变形大,但是因为较大磨粒之间距离大,所以在每个微观区域上引起的硬化程度较轻。

4 微细切削加工表面微细毛刺

金属毛刺是指金属件经过切削加工后残留在表面未脱离的余屑,这种现象在微细切削中普遍存在。金属毛刺的存在严重影响工件的定位、夹紧、尺寸精度、形位精度以及表面质量。此外,由于微细切削中产生的微细毛刺特征尺寸很小,试验研究会更加复杂。本文主要介绍微毛刺在微细切削加工中的研究现状,以及微毛刺研究方向的发展状况,并总结抑制微毛刺产生的办法和去除毛刺的方法。

4.1 微细毛刺的生成机理

微细刀具在切削过程中,刃口半径和切削厚度在同一数量级(微米级),使刃口圆弧加工材料时产生挤压和剪切作用,导致加工材料形成 3 个变形区,即图 8a 中的第一变形区、塑性变形区、弹性变形区。刀具切削过程中,产生切屑,随之材料内部产生塑性变形区和弹性变形区,当持续切削到工件末端面时,即图 8b 中,材料弹性区域被挤压凹陷,在即将达到工件边界时,切屑和工件之间产生裂纹,如图 8c 所示。裂纹沿着切削的方向扩张,直到切屑与工件脱离,当刀具滑过工件边缘后,工件边界材料的一小部分被挤压到侧面,便形成毛刺^[93],如图 8d 所示。

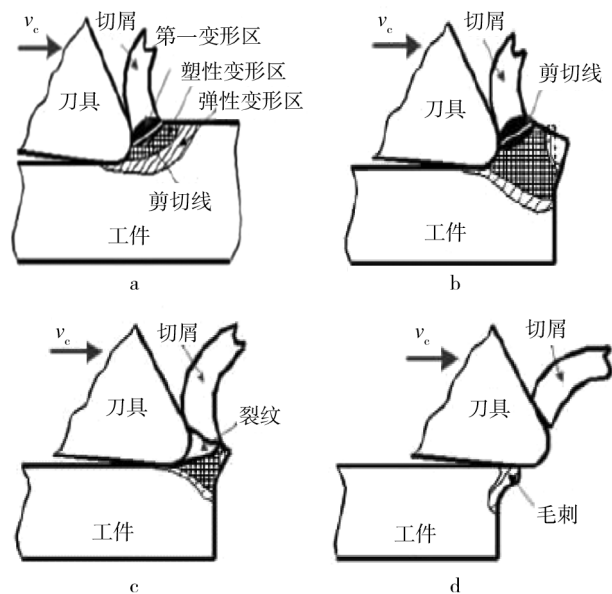


图 8 微细毛刺的形成过程^[93]

Fig.8 The formation of micro-burr process^[93]

4.2 微细切削加工微毛刺的研究

杨凯采用微铣刀对硬铝合金 AL2024-T6 进行微槽结构铣削, 得到切削刃钝圆半径与最大有效应力是影响微毛刺尺寸的主要因素, 随着每齿进给量、背吃刀量及切削刃钝圆半径的增加, 微毛刺的尺寸随之增大^[94]。白清顺在微小型三轴立式数控铣床上研究铅黄铜微细切削加工实验, 发现刀具的每齿进给量和背吃刀量对顶端毛刺的影响显著, 而铣削速度等参数对其影响变化不明显^[95]。陈玉龙在研究飞刀切削加工毛刺形成的影响因素试验中, 得出随着铣削速度、刀具前角、刀尖圆弧半径、刃倾角的增加, 毛刺的高度减少, 而随着每转进给量的增加, 毛刺高度逐渐增大; 随着切削深度的增加, 毛刺高度先减少, 当高度减少到 1/4 时, 再随着切削深度的增加, 毛刺高度随之增大^[96]。

另外还可以将微细毛刺进行分类, 张涛在微切削毛刺高度的尺寸效应研究实验中, 将毛刺按形成机理分为泊松毛刺和切出毛刺, 泊松毛刺是工件材料发生侧流形成的, 当切削厚度和刃口圆弧半径比值减小时, 毛刺高度逐渐增大。当切削厚度大于刃口圆弧半径时, 毛刺的高度不再变化。而切出毛刺是切削加工完成后, 在末端面边界处的卷曲切屑和工件挤压的多余材料形成的, 当切削厚度小于刃口圆弧半径时, 毛刺高度随着切削厚度与刃口圆弧半径比值的减少而逐渐增大^[10]。国外学者 Aramcharoen 在微切削试验中也认为, 毛刺高度和切削厚度与刃口圆弧半径比值有重要关系, 分析得到毛刺尺寸随着切削厚度和刃口圆弧半径比值的增大, 呈现先减少后增大的变化规律^[97]。Lee 等人研究了微铣削铝和铜时产生微细毛刺的试验, 试验得出切削厚度和刃口圆弧半径比值随着背吃刀量和进给量的增加而增大^[98]。

影响微细切削加工微毛刺的因素很多, 包括切削三要素和刀具因素。随着刀刃钝圆半径、每齿进给量、背吃刀量的增加, 微毛刺的高度随之增大; 但随着铣削速度、刀具前角、刀尖圆弧半径、刃倾角的增加, 毛刺的高度随之减少。此外, 切削厚度和刃口圆弧半径比值也影响微毛刺高度, 当切削厚度和刃口圆弧半径比值减小时, 毛刺高度逐渐增大, 随着切削厚度和刃口圆弧半径比值的增大, 呈现先减少后增大的变化规律。

4.3 控制毛刺产生的工艺方法

20 世纪 90 年代, 以王贵成^[93]为代表的国内学者提出了工件倾斜法、终端部倒角法、终端材料脆化法、叠加法^[96]、端部挡板法^[99]等来控制切削加工表面毛刺的形成。国外 Schafer 等人^[100]进行微细铣削黄铜的微小沟槽时发现, 在黄铜表面做青色涂层处理可以彻

底减少毛刺的形成。2005 年, Simon S. F. Chang^[101]在进行超声振动钻削试验时发现, 在一定的切削条件下, 当钻削的振动频率大于某个值时, 毛刺高度开始变小, 说明这种方法能有效抑制毛刺的产生。结合近几年关于控制微细毛刺产生的各种方法, 可以从切削条件、刀具条件两方面概括。

控制切削条件参数, 主要从切削深度、切削速度入手。切削深度越小, 毛刺高度越小; 当切削速度较低时, 切屑来不及离开工件, 容易残留在工件表面, 从而形成毛刺; 当速度较高时, 切屑被快速带走, 离开工件, 不易残留在工件表面, 因而不易产生毛刺。

控制刀具条件是指在微细切削加工过程中, 改变刀具角度、刀具刃口半径, 达到控制毛刺的目的。因为毛刺的产生和大小主要与刀具负偏角以及刃口半径有关, 当然还和刀具的前后角有关系, 当使用较小负偏角, 或者增大前角, 减少后角时, 都可以减少毛刺产生, 但是当增大刃口半径时, 刀具钝化, 不能很好地将切屑切削下来, 此时会增加毛刺的产生。

另外还可以采用合理的加工工序、适当的热处理技术, 同时还可结合不同的走刀方向等, 均可最大限度地减少毛刺的生成, 提高表面质量。

在未来, 表面毛刺去除技术应该朝着设备结构简单、降低投资成本、去除质量稳定、操作自动化、环保安全生产、降低劳动强度的方向发展。

5 结语

微细切削表面加工质量的影响因素有切削条件、刀具、工件材料、加工装备等, 因此, 针对不同的加工工艺有不同的影响因素, 需要针对具体切削工况深入展开试验研究, 才能提高微细切削加工表面质量。

在切削参数方面, 主要是调整切削速度、切削深度、进给量并结合工艺特点相关的技术参数, 才能有效提高微细切削加工的表面质量。在刀具几何方面, 应该深入研究切削刀具的几何形状以及摩擦磨损和失效机理, 提出改进刀具切削性能的设计方法和理论, 使刀具在材料改进、形性控制和相关效能上有质的飞跃。在加工材料匹配方面, 应该考虑材料本身的切削加工性能和匹配适宜的刀具材料, 使刀具-工件材料能够减摩相克、易切增效, 不断探索新的刀具-工件相匹配的材料副, 并配以适当的热处理工艺, 提高切削表面的加工质量。此外, 可以考虑增加一些辅助微细切削加工的方法, 如增加超声、电解、激光等特殊方法, 将大大提高微细切削加工表面质量。

参考文献:

[1] 苑伟政. 微机械与微细加工技术[M]. 西安: 西北工业

- 大学出版社, 2000.
YUAN Wei-zheng. Micromachining and Microfabrication Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000.
- [2] 荣烈润. 微机械及其微细加工技术的现状和应用研究[J]. 机电一体化, 2002(3): 11—13.
RONG Lie-run. The Current Situation and Application of Micromachine and Microfabrication Technology[J]. Mechatronics, 2002(3): 11—13.
- [3] 贾宝贤, 王振龙, 赵万生. 微细切削加工与微机械制造[J]. 机械制造, 2003, 41(8): 7—9.
JIA Bao-xian, WANG Zhen-long, ZHAO Wan-sheng. Micromachining and Micromechanical Manufacturing[J]. Machinery, 2003, 41(8): 7—9.
- [4] DEVILLEZ A, COZG L, DOMINIAK S, et al. Dry Machining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1590—1598.
- [5] 石文天. 微细切削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 131—133.
SHI Wen-tian. Micro-cutting Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011: 131—133.
- [6] VOGLER M P, DEVOR R E, KAPOOR S G. On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-end Milling, Part I: Surface Generation[J]. ASME J Manuf Sci Eng, 2004, 126(4): 684—693.
- [7] 石文天, 刘玉德, 丁悦, 等. PCD 刀具微细车削硬铝合金的表面质量研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(17): 15—17.
SHI Wen-tian, LIU Yu-de, DING Yue, et al. Research of Surface Quality in Micro-turning Aluminum Alloy Using PCD Tools[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2011, 39(17): 15—17.
- [8] 张慧萍, 张校雷, 张洪霞. 300M 超高强钢车削加工表面质量[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 181—187.
ZHANG Hui-ping, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Hong-xia, et al. Surface Quality of High-speed Turning 300M Ultra-high Strength Steel[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 181—187.
- [9] 罗智文, 焦黎, 赵文祥, 等. 58SiMn 高强度钢车削表面完整性的试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 234—240.
LUO Zhi-wen, JIAO Li, ZHAO Wen-xiang, et al. Experimental Investigation of Surface Integrity in Turning of High Strength Steel 58Si Mn[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 234—240.
- [10] 张涛. 微切削加工单位切削力及表面加工质量的尺寸效应研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
ZHANG Tao. Study on Size Effect of Cutting Force and Surface Machining Quality in Micro Machining[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [11] 吕玉梅. 微细切削加工技术的基础研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
LYU Yu-mei. Study on Micromachining Technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [12] 石文天, 王西彬, 辛民, 等. 微细干车削硬铝合金 LY12 的表面粗糙度研究[J]. 工具技术, 2009, 43(1): 39—42.
SHI Wen-tian, WANG Xi-bin, XIN Min, et al. Study on Micro-turning Surface Roughness of Aluminum Alloy LY12 without Cutting Fluid[J]. Tool Engineering, 2009, 43(1): 39—42.
- [13] 孔金星, 邓飞, 赵威, 等. 冷却润滑方式对纯铁车削表面完整性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 378—385.
KONG Jin-xing, DENG Fei, ZHAO Wei, et al. Effect of Cooling Lubrication on Surface Integrity of Pure Iron Turning[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(6): 378—385.
- [14] MULT H C, SPUR G, HOLL S E. Ultrasonic Assisted Grinding of Ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996(62): 287—293.
- [15] ZEMANN R, KAIN L, BLEICHER F. Assisted Machining of Carbon Fiber Reinforced Polymers[J]. Procedia Engineering, 2014(69): 536—543.
- [16] XU W X, ZHANG L C, WU Y B. Elliptic Vibration-assisted Cutting of Fibre-reinforced Polymer Composites: Understanding the Material Removal Mechanisms[J]. Composites Science & Technology, 2014, 92: 103—111.
- [17] CONG W L, PEI Z J, TREADWELL C. Preliminary Study on Rotary Ultrasonic Machining of CFRP/Ti Stacks[J]. Ultrasonics, 2014, 54: 1594—1602.
- [18] 朱林, 耿怡. 超声振动车削光整技术研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(13): 90—92.
ZHU Lin, GENG Yi. Investigate on Ultrasonic Vibration Turning Finishing Technology[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2015, 43(13): 90—92.
- [19] 张晓武. 超声波加工对工件加工质量的影响研究[J]. 中国高新技术产业, 2015(5): 81—83.
ZHANG Xiao-wu. Study on the Effect of Ultrasonic Machining on Workpiece Quality[J]. China High-tech Enterprises, 2015(5): 81—83.
- [20] UCUN I. Effect of Tool Coating Materials on Surface Roughness in Micromachining of Inconel 718 Super Alloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 55: 1550—1562.
- [21] SCHMIDT J, TRITSCHLER H. Micro Cutting of Steel[J]. Microsystem Technologies, 2004, 10(3): 167—174.
- [22] ADAMS D P, VASILE M J, BENAVIDES G. Micromilling of Metal Alloys with Focused Ion Beam-fabricated Tools[J]. Precision Engineering, 2001, 25(2): 107—113.
- [23] 朱黛茹. 微细铣削表面粗糙度和残余应力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHU Dai-ru. Research on Surface Roughness and Residual Stress of Micro-milling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [24] 张欣欣, 于化东, 徐金凯, 等. 高速微铣削铝合金铣削力与表面粗糙度研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(7): 46—49.

- ZHANG Xin-xin, YU Hua-dong, XU Jin-kai, et al. The Research on Milling Force and Surface Roughness of High Speed Micro-milling Aluminum Alloy[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2015(7): 46—49.
- [25] 曹自洋, 何宁, 李亮. 微细铣削表面粗糙度实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(5): 785—788.
- CAO Zi-yang, HE Ning, LI Liang. Experimental Study of the Surface Roughness in Micro-milling[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2011, 30(5): 785—788.
- [26] 王建平. 复杂曲面微细零件切削加工研究[J]. *机床与液压*, 2011, 39(10): 49—51.
- WANG Jian-ping. Research on Cutting Machining of Complicated Curved Surface[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2011, 39(10): 49—51.
- [27] BISSACCO G, HANSEN H N, CHIFFIRE L D. Micro Milling of Hardened Tool Steel for Mould Making Application[J]. *J Mater Process Tech*, 2016, 167(2/3): 201—207.
- [28] FILIZ S, CONLEY C M, WASSWEMAN M B, et al. An Experimental Investigation of Micro-machinability of Copper 101 Using Carbide Micro-endmills[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(7/8): 1088—1100.
- [29] MIAN A J, DRIVER N, MATIVENGA P T. Micromachining of Coarse-grained Multiphase Material Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers[J]. Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(4): 377—385.
- [30] LIU K, MELKOTE S N. Effect of Plastic Side Flow on Surface Roughness in Micro Turning Process[J]. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 2006, 46(14): 1778—1785.
- [31] 石文天, 刘玉德, 王西彬. 微细铣削表面粗糙度预测与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1): 211—215.
- SHI Wen-tian, LIU Yu-de, WANG Xi-bin. Prediction and Test of Surface Roughness in Micro Milling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 211—215.
- [32] 季思慧. 环铣刀加工淬硬钢模具拐角的表面粗糙度分析及预测模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- JI Si-hui. Analysis and Model Prediction of the Surface Roughness for Hardened Steel Die Corner in Annular Milling Process[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [33] 李灵光. 航空铝合金三维端铣表面粗糙度的 LS-SVM 控制研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(3): 256—259.
- LI Ling-guang. The Research on the Control of Surface Roughness Based on LS-SVM for Three Dimensional End Milling of Aviation Aluminum Alloy[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2015(3): 256—259.
- [34] 贾春德. 正交车铣运动的矢量建模及表面粗糙度的理论分析[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(3): 62—64.
- JIA Chun-de. Vector Modeling of Orthogonal Turn-milling Motion and Theoretical Analysis of Surface Roughness[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(3): 62—64.
- [35] 刘克非. 微小型零件车铣加工表面粗糙度单因素试验[J]. *广西轻工业*, 2007, 10(5): 42—43.
- LIU Ke-fei. Single-factor Test on Surface Roughness of Miniature Part Turning and Milling[J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2007, 10(5): 42—43.
- [36] 冯佳彬. 切向车铣工件表面粗糙度的试验研究[J]. *新技术新工艺*, 2015(5): 91—93.
- FENG Jia-bin. Experimental Research on Surface Roughness of Tangential Turning and Milling Part[J]. *New Technology and Technology*, 2015(5): 91—93.
- [37] 李江南. 微细车铣加工表面质量[D]. 哈尔滨: 沈阳理工大学, 2015.
- LI Jiang-nan. The Surface Quality of Micro Turning Milling [D]. Harbin: Shenyang University of Technology, 2015.
- [38] 金成哲. 基于人工神经网络的微细车铣表面粗糙度预测模型[J]. *工具技术*, 2015, 49(8): 92—95.
- JIN Cheng-zhe. Measurement of Surface Roughness Based on Artificial Neural Network for Machining Milling [J]. *Tool Technology*, 2015, 49(8): 92—95.
- [39] WANG T G, WANG L, ZHONG W, et al. Large-scale Wind Turbine Blade Design and Aerodynamic Analysis[J]. *China Science Bulletin*, 2012, 57(5): 466—472.
- [40] VEERS P S, ASHWILL T D, SUTHERLAND H J, et al. Trends in the Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades[J]. *Wind Energy*, 2003, 6(3): 245—259.
- [41] ZHAO F, XU X, XIE S Q. Computer Aided Inspection Planning & Mdash the State of the Art[J]. *Computers in Industry*, 2009, 60(7): 453—466.
- [42] LI Y D, GU P H. Free-form Surface Inspection Techniques State of the Art Review[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(13): 1395—1417.
- [43] 吴艾奎. 金属材料微尺度磨削表面质量研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- WU Ai-kui. Microscale Grinding Surface Quality of Metal Materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [44] 郑伟生. TC4 钛合金微磨削表面质量影响因素研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- ZHENG Wei-sheng. Study on the Influence Factors of Micro-grinding Surface Quality of TC4 Titanium Alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [45] 郑青竹. 微细磨削性能及微径砂轮磨损试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZHENG Qing-zhu. Experimental Study on Micro grinding Performance and Micro-grinding Wheel Wear[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [46] 明兴祖, 高钦, 肖磊, 等. 面齿轮磨削表面粗糙度建模与实验分析[J]. *机械传动*, 2016, 40(1): 1—5.
- MING Xing-zu, GAO Qing, XIAO Lei, et al. Modeling and Experimental Analysis of Surface Roughness of Face Gear Grinding[J]. *Mechanical Transmission*, 2016, 40(1): 1—5.

- 1—5.
- [47] 蒋为. 基于微量润滑的磨削强化实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
JIANG Wei. Experimental Investigation on Grinding-hardening with Minimum Quantity Lubrication-MQL Technology[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [48] GUILLEMOT N, MAWUSSI B K, LARTIGUE C. A First Approach to Characterize the Surface Integrity Generated by Ball-end Finishing Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013(64): 269—279.
- [49] 王立涛. 关于航空框类结构件铣削加工残余应力和变形机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
WANG Li-tao. Research on Residual Stress and Deformation Mechanism of Aerospace Frame Structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [50] MOUSSA N B, SIDHOM H, BRAHAM C. Numerical and Experimental Analysis of Residual Stress and Plastic Strain Distributions in Machined Stainless Steel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64: 82—93.
- [51] AGRAWAL S, JOSHO S S. Analytical Modelling of Residual Stresses in Orthogonal Machining of AISI4340 Steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15: 167—179.
- [52] CAPELLO E. Residual Stresses in Turning: Part II. Influence of the Machined Material[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(3): 319—326.
- [53] 徐飞飞, 张效栋, 房丰洲. 金刚石刀具单点切削单晶硅加工表面特性的实验研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2013(6): 485—491.
XU Fei-fei, ZHANG Xiao-dong, FANG Feng-zhou. Experimental Study on the Surface Characteristics of Diamond Cutting Tool for Single-point-cut Monocrystalline Silicon[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013 (6): 485—491.
- [54] OKUSHIRNA K, KAKINO I. The Residual Stress Produced by Metal Cutting[J]. Annals of the CIRP, 1971, 21(1): 13—14.
- [55] FANG F Z, WU H, LIU Y C. Modelling and Experimental Investigation on Nanometric Cutting of Monocrystalline Silicon[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 2005, 45(15): 1681—1686.
- [56] 张蓉蓉. 车削工艺参数对铝合金 211Z 加工表面质量的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
ZHANG Rong-rong. Effect of Turning Parameters on Surface Quality of Aluminum Alloy 211Z Machining[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [57] YU X X, LAU W S, LEE T C. A Finite Element Analysis of Residual Stresses in Stretch Turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(10): 1525—1537.
- [58] ARRAZOLA P J, KORTABARRIA A, MADARIAGA A, et al. On the Machining Induced Residual Stresses in IN718 Nickel-based Alloy: Experiments and Predictions with Finite Element Simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 41: 87—103.
- [59] SHIH A J. Finite Element Simulation of Orthogonal Metal Cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117(1): 84—93.
- [60] YAN Ji-wang, ZHAO Hong-wei, KURIYAGAWA T. Effects of Tool Edge Radius on Ductile Machining of Silicon: An Investigation by FEM[J]. Semiconductor Science and Technology, 2009, 24: 1—11.
- [61] NG C K, MELKOTE S N, RAHMAN M, et al. Experimental Study of Micro/Nano-scale Cutting of Aluminum 7075-T6[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 929—932.
- [62] 吴宝森. 超精密车削加工铝合金表面物理力学性能研究及工艺优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WU Bao-sen. Study on Physical and Mechanical Properties of Surface of Aluminum Alloy Machined by Ultra-precision Turning and Optimization of Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [63] JOHNSON G R, COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Temperatures in Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics[J]. World Journal of Mechanics, 1983: 541—547.
- [64] 常艳艳, 孙涛, 李增强. 硬铝合金超精密车削残余应力的仿真及试验[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 41—47.
CHANG Yan-yan, SUN Tao, LI Zeng-qiang. Simulation and Experiment of Residual Stress in Ultra-precision Turning of Hard Aluminum Alloy [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 41—47.
- [65] 王明海, 刘中海, 王虎军, 等. 精密切削钛合金 TC4 表面残余应力的模拟研究[J]. 制造业自动化, 2010, 32(11): 69—71.
WANG Ming-hai, LIU Zhong-hai, WANG Hu-jun, et al. Study on Simulation of Surface Residual Stress of Precise Machined Titanium Alloy TC4[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(11): 69—71.
- [66] SALONITIS K, KOLIOS A. Experimental and Numerical Study of Grind-hardening-induced Residual Stresses on AISI 1045 Steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9—12): 1443—1452.
- [67] MAMEDOV A, LAZOGLU I. Thermal Analysis of Micro Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 659—667.
- [68] NAVAS V G, GONZALO O, BENGOTXEA I. Effect of Cutting Parameters in the Surface Residual Stresses Generated by Turning in AISI 4340 Steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61: 48—57.
- [69] TAMPUN C, CHIRITA B, HERGHELEGIU E, et al. Influence of the Cutting Regime on the Residual Stresses Generated by Carbon Steel Milling[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2014, 21(3SI):

- 283—288.
- [70] 马艳. 钛合金车削已加工表面残余应力建模与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
MA Yan. Modeling and Experimental Research on Surface Residual Stress in Machined Titanium Alloy Turning [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [71] THORNTON H R, HENRIKSEN M. Effect of Load Rate on the Fatigue Life of Graphite/Epoxy Composites[J]. *Sampe Quarterly*, 1979, 10(4): 1—5.
- [72] 刘文文, 刘长毅. 钛合金切削加工表面残余应力有限元仿真[J]. *现代设计与先进制造技术*, 2012, 41(3): 39—42.
LIU Wen-wen, LIU Chang-yi. Finite Element Simulation of Surface Residual Stress in Titanium Alloy Cutting Process [J]. *Modern Design & Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 41(3): 39—42.
- [73] 原一高, 畅晓振, 施耀祖, 等. 超细硬质合金磨削表面残余应力的实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(7): 1217—1220.
YUAN Yi-gao, CHANG Xiao-zheng, SHI Yao-zu, et al. Experimental Study on Surface Residual Stress of Superfine Cemented Carbide[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2011, 30(7): 1217—1220.
- [74] 刘莉娟. 磨削表面残余应力控制及零件表面完整性实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
LIU Li-juan. Experimental Study on Control of Surface Residual Stress and Surface Integrity of Parts[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [75] 朱跃伟, 张家梁, 郑小虎, 等. 高速磨削砂轮磨损对磨削表面质量的影响研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(3): 138—141.
ZHU Yue-wei, ZHANG Jia-liang, ZHENG Xiao-hu, et al. Study on the Effect of Abrasive Wear on Grinding Surface Quality in High Speed Grinding[J]. *Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2015(3): 138—141.
- [76] 张雪萍, 王和平, 卢光辉, 等. 轴承钢顺次磨削表面残余应力离散度试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15): 89—94.
ZHANG Xue-ping, WANG He-ping, LU Guang-hui, et al. Experimental Study on Surface Residual Stress Dispersion of Bearing Steel in Sequence Grinding[J]. *Technical Means of Mechanics*, 2010, 46(15): 89—94.
- [77] 郭培燕. 高速切削加工表面残余应力的分析和模拟[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
GUO Pei-yan. Analysis and Simulation of Surface Residual Stress in High Speed Machining[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [78] 孙青. 超声振动微铣削残余应力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
SUN Qing. Study on Residual Stress of Ultrasonic Vibration Micro-milling[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [79] 李江南. 微细车铣加工表面质量研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
LI Jiang-nan. Study on the Surface Quality of Micro Turning and Milling[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2015.
- [80] 焦锋, 牛赢, 赵波, 等. 难加工材料铣削残余应力研究进展[J]. *表面技术*, 2017, 46(3): 267—273.
JIAO Feng, NIU Ying, ZHAO Bo, et al. Research Progress of Residual Stress in Milling of Difficult-to-machine Materials[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(3): 267—273.
- [81] OUTEIRO J C, DIAS A M, JAWAHIR I S. On the Effects of Residual Stresses Induced by Coated and Uncoated Cutting Tools with Finite Edge Radii in Turning Operations[J]. *Annals of the CIRP*, 2006, 55(1): 167—172.
- [82] KING J E, KNOTT J F. The Effects of Crack Length and Shape on the Fracture Toughness of a High Strength Steel 300M[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1980, 28(3): 191—200.
- [83] MMBRELLO D. Investigation of Surface Integrity in Dry Machining of Inconel 718[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013(7): 23—26.
- [84] COKER S A, SHIN Y C. In Process Control of Surface Roughness Due to Tool Wear Using a New Ultrasonic System[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 1996(36): 411—422.
- [85] 付秀丽. 高速切削航空铝合金变形理论及加工表面形成特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2007: 87—91.
FU Xiu-li. Study on Deformation Theory and Machining Surface Forming Characteristics of High Speed Machining Aluminum Alloy[J]. Jinan: Shandong University, 2007: 87—91.
- [86] 王文龙. 小型精密机械零件微细切削的表面质量及其切削工艺性研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2015.
WANG Wen-long. The Surface Quality and Cutting Technology of Micro-machined Parts of Small Precision Machine Parts[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2015.
- [87] 张为, 郑敏利, 徐锦辉, 等. 钛合金 Ti-6Al-4V 车削加工表面硬化实验[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 34(8): 1052—1056.
ZHANG Wei, ZHENG Min-li, XU Jin-hui, et al. Experimental Study on Surface Hardening of Ti-6Al-4V Turning[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 34(8): 1052—1056.
- [88] 王素玉, 杨文杰, 马淋淋, 等. 高速铣削 3Cr2Mo 表面加工硬化试验及微观形貌分析[J]. *铸造技术*, 2013(7): 1154—1156.
WANG Su-yu, YANG Wen-jie, MA Lin-lin, et al. Experimental Study on Microstructure and Surface Morphology of 3Cr2Mo Surface in High Speed Milling[J]. *Foundry Technology*, 2013(7): 1154—1156.
- [89] 辛民, 解丽静, 王西彬, 等. 高速铣削高强高硬钢加工表面硬化实验[J]. *北京理工大学学报*, 2008(3): 154—157.
XIN Min, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. Experimental Study on Surface Hardening of High Strength and High Hardness Steel by High Speed Milling[J]. *Journal of Bei-*

- ing Institute of Technology, 2008(3): 154—157.
- [90] 周子同, 陈志同, 蒋理科, 等. 钛合金 TB6 铣削加工硬化实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 135—140.
- ZHOU Zi-tong, CHEN Zhi-tong, JIANG Li-ke, et al. Milling Hardening Experiment of Titanium Alloy TB6[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 135—140.
- [91] 张修铭. 小切深磨削条件下工件表面硬化机理[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 149—153.
- ZHANG Xiu-ming. Surface Hardening Mechanism of Workpiece under Small Depth of Cut Grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7): 149—153.
- [92] 田春林, 杨海洋, 范景峰, 等. 高速研磨表面加工硬化的研究[J]. 长春理工大学学报, 2005(8): 19—21.
- TIAN Chun-lin, YANG Hai-yang, FAN Jing-feng, et al. Study on Surface Hardening of High Speed Grinding[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2005(8): 19—21.
- [93] 王贵成. 金属切削毛刺分类体系的研究及其应用[J]. 中国机械工程, 1996, 6(6): 40—42.
- WANG Gui-cheng. Study on Classification System of Metal Cutting Burr and Its Application[J]. China Mechanical Engineering Press, 1996, 6(6): 40—42.
- [94] 杨凯, 白清顺, 于福利, 等. 微细铣削加工过程中微毛刺形成机理的模拟与实验分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(1): 25—27.
- YANG Kai, BAI Qing-shun, YU Fu-li, et al. Simulation and Experimental Analysis of Micro-burr Formation Mechanism in Micro-milling Process[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(1): 25—27.
- [95] 白清顺, 刘立飞, 卢礼华, 等. 微细铣削圆弧槽微结构时的微毛刺分析及预测[J]. 机械设计与制造, 2011(11): 229—231.
- BAI Qing-shun, LIU Li-fei, LU Li-hua, et al. Analysis and Prediction of Micro-burr in Micro-machining Arc-groove Microstructures[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2011(11): 229—231.
- [96] 陈玉龙. 飞刀切削加工中毛刺的形成过程仿真与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- CHEN Yu-long. Simulation and Experimental Study on the Formation of Burr in Flying Cutting Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [97] ARAMCHAROEN A, MATIVENG P T. Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 402—407.
- [98] LEE K, DORNFELD D A. An Experimental Study on Burr Formation in Micro Milling Aluminum and Copper [J]. Transactions of the NAMRI/SME, 2002, 354: 25—262.
- [99] 寇兆军, 万熠, 蔡玉奎, 等. 微细铣削加工中抑制微毛刺生成的新方法[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 7—10.
- KOU Zhao-jun, WANG Yi, CAI Yu-kui, et al. A New Method for Restraining Micro Burr Formation in Micro Milling[J]. Techniques in Engineering, 2015, 49(8): 7—10.
- [100] SCHALLER T, BOHN L, MAYER J, et al. Microstructure Grooves with a Width of Less Than 50 μm Cut with Ground Hard Metal Micro End Mills[J]. Precision Engineering, 1999, 234: 229—235.
- [101] CHANG S S F, BONE G M. Burr Size Reduction in Drilling by Ultrasonic Assistance[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21: 442—450.