

速度效应对淬硬钢最小切削厚度的影响

马 晶, 刘献礼, 岳彩旭, 张安山, 李荣义

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 塑性材料加工中, 存在一个最小切削厚度, 当切削加工中实际有效切削厚度小于工件材料的最小切削厚度时, 将造成刀具与工件无法正常切削, 而主要以滑擦为主, 此时加工精度很难保证, 确定材料的最小切削厚度对提高工件的加工质量及精度具有重要意义. 针对以上问题以淬硬钢 Cr12MoV 材料为研究对象, 提供了一种确定工件材料最小切削厚度的试验方法, 并通过提供的试验方法, 确定了淬硬钢 Cr12MoV (58 HRC) 不同切削速度下的最小切削厚度值, 试验结果表明: 在所选的速度范围内, 热软化效应对淬硬钢 Cr12MoV (58 HRC) 成屑机制的影响大于应变率效应的影响, 淬硬钢 Cr12MoV (58 HRC) 最小切削厚度值的确定, 为汽车覆盖件模具精加工余量的选取提供了理论依据.

关键词: 速度效应; 模具钢; 硬态铣削; 最小切削厚度

中图分类号: TG506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0066-05

The Effect of Speed Effect on the Minimum Cutting Thickness of Hardened Steel

MA Jing, LIU Xian-li, YUE Cai-xu, ZHANG An-Shan, LI Rong-Yi

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: For the process of plastic materials working, there is a minimum cutting thickness. When the real effective cutting thickness is less than the minimum cutting thickness of workpiece materials in the actual cutting process, it will cause abnormal cutting of the tool and the workpiece, mainly in the sliding friction. So the machining accuracy is hard to guarantee. It is significant to determine the minimum cutting thickness of the materials to improve the machining quality and precision. A test method was provided to determine the minimum cutting thickness of workpiece material, focusing on the material of hardened steel Cr12MoV and the minimum cutting thickness for different cutting speed was determined by this test method. The test results show that: the thermal softening effect has greater effect on the chip formation mechanism of hardened steel Cr12MoV (58 HRC) than strain rate effect in the selected speed range. The determination of the minimum cutting thickness has provided a theoretical basis for selecting the allowance of finish machining of automobile covering mold.

Key words: speed effect; die steel; hard milling; minimum cutting thickness

收稿日期: 2013-07-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51235003).

作者简介: 马 晶(1989—), 女, 博士研究生, E-mail: majing2211@163.com;

刘献礼(1961—), 男, 教授, 博士研究生导师;

岳彩旭(1982—), 男, 讲师, 硕士研究生导师.

0 引言

我国现已成为世界汽车制造大国,汽车覆盖件模具常用材料为 Cr12MoV,淬火后硬度高达 55~62 HRC,属于高强度高硬度材料^[1-2]。在加工这种塑性材料时,存在一个最小切削厚度,该最小切削厚度为刀具与工件之间产生滑擦的临界厚度,当精加工切削深度选择不当时,会造成切削加工有效切削厚度小于工件材料的最小切削厚度而造成刀具与工件之间产生滑擦,使得加工质量及精度很难保证^[3-4]。切削速度的变化能够引起材料加工特性的转变,并因此引起工件材料成屑机制的转变,最终导致工件材料最小切削厚度的改变^[5]。因此,研究速度效应对淬硬钢材料最小切削厚度的影响,确定不同切削速度下淬硬钢最小切削厚度值,对提高汽车覆盖件模具精加工质量具有重要意义。

对于工件材料的最小切削厚度,国内外学者进行了较多研究,获得了许多显著的成果。其中,文^[6]根据力平衡原理,指出对于铝合金材料,当刀-工之间的摩擦系数分别为 0.12 和 0.26 时,材料的最小切削厚度与切削刃钝圆半径之间的比值分别为 0.322 和 0.26。文^[7]采用有限元仿真软件 ABAQUS 确定了珠光体及铁素体对应的最小切削厚度与钝圆半径之间的关系。文^[8-9]假设摩擦角等于分流角和力平衡原理建立了适合铝材料加工的最小切削厚度。文^[10]采用金刚石刀具进行车削铝合金试验,指出当刀具的刃口圆弧半径为 1~2 μm 时,铝合金最小切削厚度为刃口圆弧半径的 20%~40%。文^[11]进行了钛合金车削试验,通过高速摄影观察不同切削深度下切屑的形成情况,确定了钛合金材料的最小切削厚度与刀具刃口钝圆半径的比值,该比值为 0.17~0.25 之间。文^[12]通过有限元方式确定了铜 OFHC 最小切削厚度与切削刃钝圆半径的关系,结果表明:对于铜 OFHC 材料最小切削厚度与刀具刃口钝圆半径的比值为 0.2。文^[13]基于分子动力学理论建立了最小切除厚度和切削刃圆弧半径的关系,并指出切削速度、热软化效应及刀具刃口钝圆半径均会影响材料的最小切除厚度。

综合以往文献可知,目前所确定的材料的最小切削厚度大多适用于铜、铝、钛合金等材料,对于难加工材料淬硬钢最小切削厚度值的确定未见报导,本文采用切削试验方法,确定淬硬钢 Cr12MoV(58 HRC)材料不同切削速度条件下最小切削厚度值,

为汽车覆盖件模具精加工余量的选取提供理论参考。

1 工件材料的最小切削厚度

1.1 最小切削厚度定义

最小切削厚度指能使刀具与工件之间保持稳定切削时的最小有效切削厚度,是加工过程中由切削到犁耕之间转化的最小有效切削厚度^[14-15]。当加工过程中切削深度小于工件材料的最小切削厚度时,工件材料只发生弹性变形,不会形成切屑,当切削深度增加,近似等于最小切削厚度时,工件材料一部分产生塑性变形形成切屑,另一部分只发生弹性变形,只有当切削深度大于工件材料的最小切削厚度时,才能够形成明显的切屑,因此,工件材料的最小切削厚度决定材料加工所能达到的最小单元,确定工件材料的最小切削厚度值对提高工件的加工质量及加工精度具有重要意义。

1.2 速度效应对材料成屑机制的影响

根据塑性金属加工原理可知,变形速度影响材料的塑性指标,进而影响着材料的成屑机制^[16]。图1所示为变形速度对材料塑性指标的影响规律,当变形速度在某一范围内增大时,材料的应变率效应大于热软化效应,此时材料塑性降低,而当变形速度继续增大时,材料的热软化效应显著,随着变形速度的增大,材料塑性增加,成屑变得困难^[17]。

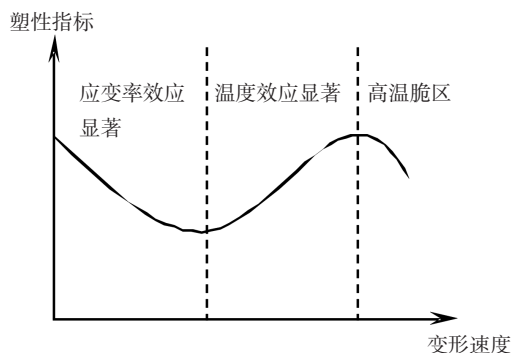


图1 变形速度对工件塑性影响示意图

2 速度效应对模具钢材料最小切削厚度的影响试验研究

2.1 试验设备

本试验是在 VDL-4000E 三轴加工中心上进行的,刀具采用日本戴杰公司生产的直径为 20 mm 的镜面球头铣刀,刀具刃口钝圆半径为 20 μm ,工件材料为淬硬钢 Cr12MoV,淬火后硬度 58 HRC,运用超

景深显微镜观察工件加工后的表面形貌,如图2所示为试验现场.



图2 试验现场

2.2 试验目的及方案

球头刀铣削过程中,切屑厚度是一个从小变大再从大变小的过程,球头铣刀每一刀刃的切削都会存在切削及滑擦的区域,即,当切屑厚度小的地方,小于材料的最小切削厚度时,此时,刀具与工件产生滑擦,而在切屑厚度较大处,大于材料的最小切削厚度时,此部分能够产生切屑^[18-20]. 本次试验的主要目的为: ①保留刀具的切削痕迹,观察每一刀刃切削过程中切削-犁耕-滑擦的阶段; ②通过观察计算,计算不同切削速度下模具钢材料的最小切削厚度.

为了实现以上试验目的,本文设计了如下试验方案: 试验方案如图3所示,将长方体材料分成5个区域,分别做5个不同转速的铣削试验,每个转速下的切削深度均为0.3 mm,行距为0.3 mm,每齿进给量为0.1 mm/z,如图3所示,每个转速下的铣削试验并不将该转速下的区域全部铣掉,而是保留一部分区域,这样就保留了铣刀刀刃回转一圈形成的完整切削-犁耕-滑擦痕迹. 采用超景深显微镜对如图3所示的铣削区域进行观察,即可通过工件的表面形貌观察出刀具与工件切削-犁耕-滑擦的区域形貌. 如图4为加工后工件.

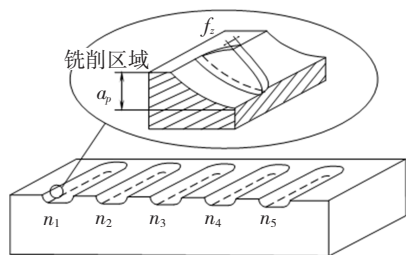


图3 平面铣削试验方案



图4 加工后工件

2.3 切削-犁耕-滑擦区域划分

如图5所示为主轴转速为2000 r/min时工件的切削痕迹表面形貌,图中d区域为工件未加工表面,从a到c区域为切屑的不同厚度处,从图中可以看到,a区域工件表面具有细小的不均匀条纹,此处由于切削厚度较小,刀具与工件刚刚接触,此时刀具擦过工件而形成如图中a所示的条纹,此条纹间隙不均匀且宽度较小,这是典型的刀具与工件之间滑擦导致的. 随着刀具的进一步进入,进入到如图中b区域,b区域的微观形貌与a区域存在着明显的差别,b区域表面比较光滑,此时由于切削厚度增加,工件材料一部分伴随着有切屑产生,另一部分工件材料产生弹性变形被刀具后刀面挤压形成已加工表面,此处为刀具与工件之间的犁耕区域. 当切削厚度继续增加,进入到如图5中c区域时,表面隆起高度明显增加,且隆起条纹间距均匀,通过测量隆起的间距可发现,隆起间距为每齿进给量值,此区域特征为典型的切削成屑特征.

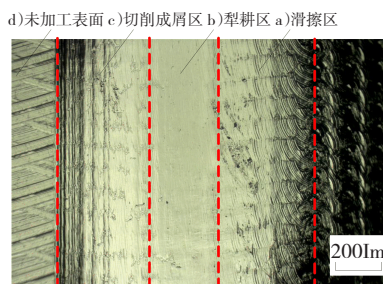


图5 铣削痕迹形貌图

2.4 最小切削厚度计算

铣削痕迹被清晰的分出切削、犁耕、滑擦三个区域,设 l 为犁耕与滑擦区域长度,通过测量 l 值来计算材料的最小切削厚度值. 如图6所示为最小切削厚度计算示意图,图6中 O_1 代表铣刀第一刀齿开始切入工件时刀具的中心位置, O_2 代表第二刀齿开始切入工件时刀具的中心位置. 以 O_1 点为坐标原点建

立坐标系,则平面铣削 O_2 点坐标为 $(0, f_z, 0)$, A 点为犁耕——切削分界面与第一刀齿铣削后工件表面边界线的交点,过 O_2 与 A 点做垂直于 XO_1Y 的剖面,获得未变形切屑断面, O_1' 为 O_1 点在做剖面的投影,图6中切屑断面上 BC 长度即为最小切削厚度 h_D ,本文通过几何关系确定 BC 长度。

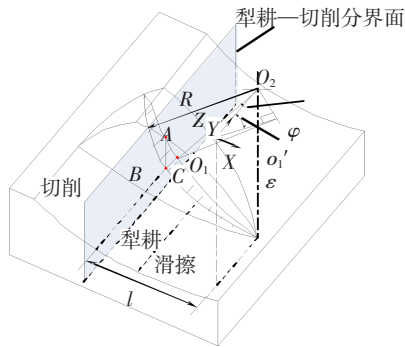


图6 最小切削厚度计算示意图

如图6中 A 点坐标可表示为:

$$\left. \begin{aligned} x_A &= -l \\ y_A &= \sqrt{(l + a_e)^2 - l^2} \\ z_A &= -\sqrt{R^2 - (l + a_e)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在三角形 O_2CO_1' 中,采用余弦定理有:

$$|O_1'O_2|^2 + |O_2C|^2 - 2|O_1'O_2||O_2C|\cos(90^\circ + \varphi) = |O_1'C|^2 \quad (2)$$

式(2)中各参量可由以下各式表示:

$$|O_1'O_2| = f_z \sin \varepsilon \quad (3)$$

$$|O_1'C| = \sqrt{R^2 - (f_z \cos \varepsilon)^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \arccos \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\sqrt{(l + a_e)^2 - l^2} - f_z)^2}} \quad (5)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{\sqrt{l^2 + (\sqrt{(l + a_e)^2 - l^2} - f_z)^2}}{R} \quad (6)$$

则在一定参数下材料的最小切削厚度值可由式(7)求得:

$$h_D = R - |O_2C| \quad (7)$$

式中, R 为刀具半径; a_e 为径向切削深度; f_z 为每齿进给量。在已知刀具半径 R 、径向切削深度 a_e 、每齿进给量 f_z 的情况下,只需通过实验测得犁耕与滑擦区域总长度 l ,即可通过式(2)求得 O_2C ,进而计算得最小切削厚度值。

2.5 试验结果及分析

通过上文的工件材料最小切削厚度的确定方法,在超景深显微镜下测量不同主轴转速下工件表

面滑擦——犁耕的区域总长度 l ,即可确定不同主轴转速条件下模具钢材料的最小切削厚度。如图7所示为主轴转速分别为 2 000 r/min、3 000 r/min、4 000 r/min、5 000 r/min、6 000 r/min 时获得的刀具与工件间切削与滑擦形貌图及测得的 l 值。

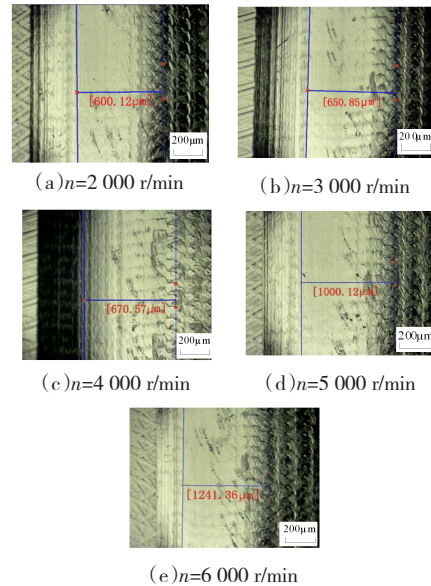


图7 不同主轴转速下滑擦——犁耕长度测量

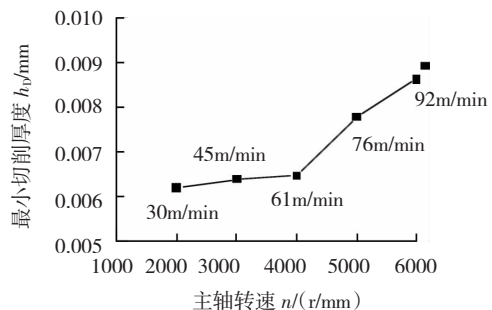


图8 不同切削速度下 Cr12MoV 材料最小切削厚度

根据图7所测得的5个不同主轴转速下犁耕——滑擦区域总长度 l 值,计算可得如图9所示的不同切削速度下 Cr12MoV (58 HRC) 材料最小切削厚度值 h_D ,由图8可以看出,在本文所选的速度范围内,随着切削速度的增大,Cr12MoV (58 HRC) 材料最小切削厚度是增大的。该速度范围内,随着切削速度的增加,应变率效应导致材料塑性降低,而随着切削速度增加,温度上升,热软化效应导致材料软化,塑性升高,材料塑性升高导致成屑困难,进而导致材料的最小切削厚度增大。因此,对于 Cr12MoV (58 HRC) 材料来说,在本文所选的速度范围内,随着切削速度的增加,热软化作用对材料成屑机制的

影响大于应变率效应的影响,进而导致材料最小切削厚度增大. Cr12MoV 材料不同切削速度下最小切削厚度的确定为汽车覆盖件模具精加工余量的选取提供一定的理论参考.

3 结 论

工件材料最小切削厚度决定着材料加工所能达到的最小单元,本文以模具钢材料 Cr12MoV 为研究对象,研究了当 Cr12MoV 淬火硬度为 58HRC 时,速度效应对其最小切削厚度的影响,提供了一种确定工件材料最小切削厚度值的试验方法,并通过提供的试验方法确定了不同切削速度下模具钢 Cr12MoV (58 HRC) 材料的最小切削厚度值,研究结果表明,在本文所选的速度范围内,随着切削速度的提高,模具钢材料最小切削厚度是增大的,说明在本文所选速度范围内,热软化效应对材料成屑机制的影响大于应变率效应的影响,模具钢 Cr12MoV (58 HRC) 材料最小切削厚度值的确定,为汽车覆盖件模具精加工余量的选取提供了理论参考.

参 考 文 献:

- [1] 姜彦翠,刘献礼,丁云鹏,等. 汽车大型覆盖件淬硬钢模具切削加工技术 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2013,1(18):7-13.
- [2] 徐微. 高速铣削淬硬模具钢刀具刃口作用机理试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2012:1-3.
- [3] 史振宇. 基于最小切除厚度的微切削加工机理研究 [D]. 山东: 山东大学,2011:1-2.
- [4] DORNFIELD D, MIN S, Takeuchi Y. Recent Advances in Mechanical Micromachining [J]. Annals of the CIRP, 2006, 55:746-748.
- [5] FILIZ S, CONLEY C M, WASSERMAN M B, et al. An Experimental Investigation of Micro Machinability of copper 101 Using Tungsten Carbide Micro end Mills [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2007,47:1088-1100.
- [6] YUAN Z J, ZHOU M, DONG S. Effect of Diamond tool sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996,62:327-330.
- [7] 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,2004,126:685-694.
- [8] SON S M, LIM H S, AHN J H. Effects of the Friction Coefficient on the Minimum Cutting Thickness in Micro Cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2005,45:529-535.
- [9] SON S M, LIM H S, AHN J H. The Effect of Vibration Cutting on Minimum Cutting Thickness [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2006,46:2066-2072.
- [10] BISACCO G, HANSEN H N, SLUNSKY J. Modeling the Cutting edge Radius Size Effect for Force Prediction in Micro Milling [J]. Annals of the CIRP,2008,57:113-116.
- [11] 杨树财. 精密切削钛合金 Ti6Al4V 刀具刃口作用机理及应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2011:76-81.
- [12] LAI Xinmin, LI Hongtao, LI Chengfeng, et al. Modelling and Analysis of Micro Scale Milling Considering Size Effect, Micro Cutter Edge Radius and Minimum Chip Thickness [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2008,48:1-14.
- [13] LIU X, DEVOR R E, G. KAPOOR S. The Mechanics of machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science [J]. Transaction of the ASME, 2014, 126:666-678.
- [14] 孙婉婷. 金刚石飞切最小切削厚度预测的研究 [D]. 吉林: 吉林大学,2011:15-18.
- [15] 吴继华. 基于应变梯度理论的正交微车削中最小切削厚度预测 [J]. 中国机械工程,2009,18(20):2227-2230.
- [16] 陈森灿,叶庆荣. 金属塑性加工原理 [M]. 北京: 清华大学出版社,1991,96-97.
- [17] 田霖,傅玉灿,杨路,等. 基于速度效应的高温合金高速超高速磨削成屑过程及磨削力研究 [J]. 机械工程学报,2013,49(9):169-177.
- [18] 巩亚东, 张金峰, 张永震,等. 微尺度高速铣削表面质量的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(13):190-198.
- [19] 马晶. 考虑刀具变形条件下模具钢铣削极限切削深度预报 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014:19-21.
- [20] MALEKIAN M, MOSTOFA M G, JUN M B G. Modeling of Minimum Uncut chip Thickness in Micro Machining of Aluminum [J]. Journal of Materials Processing Technology,2012,212:553-559.

(编辑: 王 萍)