

文章编号:1000-582X(2003)09-0047-03

超高速铣削刀具的磨损机理*

周忆, 梁锡昌

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:应用有限元法分析了超高速铣削刀具刀齿的受力和应力,并分析了超高速铣削刀具的热传导特点,根据刀具的受力和热作用分析表明,超高速铣削时最大主应力产生在刀具内周边处,且刀齿的受热过程为一个持续时间极短的热脉冲过程。在此基础上,讨论了超高速铣削刀具的磨损形式和过程,刀具的磨损形式主要有由机械摩擦引起的磨粒磨损、热脉冲应力和力脉冲应力引起的疲劳断裂及粘结磨损,并在刀齿根部产生最终断裂。

关键词:高速铣削; 刀具; 磨损机理

中图分类号: TG506.1

文献标识码: A

超高速切削加工(HSM)是指“加工过程中切削速度和进给速度远高于一般切削加工的切削速度和进给速度”的加工技术^[1]。钢管生产线上钢坯的高速切削是超高速加工的一个应用^[2]。在高速钢坯切割中,刀具切削速度高达8 482 m/min,进给量为100 mm/s,刀具材料为65 Mn,淬火硬度为HRC35-40。刀具寿命为24 h。

对刀具磨损分析可知,高速铣削刀具的磨损过程主要是由于刀齿承受脉冲载荷,在顶刃和前刀面上产生机械疲劳裂纹,裂纹的不断扩展而引起切削刃的破裂直至断裂。

作者将通过刀齿受力和应力分析以及刀具热传导的分析,探讨了在上述切削参数下,采用与工件材料相同的刀具材料进行高速铣削的机理以及提高刀具耐用度的途径。

1 高速铣削的刀齿应力和受热计算

1.1 刀齿应力分析计算

高速铣削无缝钢管时的刀具受力如图1所示。

当刀具高速切削时,刀齿所受主要载荷有:离心力 F , 圆周力 T , 正压力 R 。其大小如下计算:

$$F = m\omega^2 R^2 \text{ (kg)} \quad (1)$$

式中: m — 刀具质量(kg); ω — 刀具旋转角速度(1/rad); R — 刀具半径(mm)。

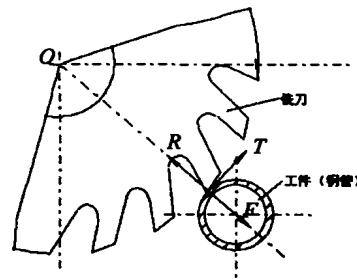


图1 刀具受力图

$$T = Ps \frac{uh}{1000V} \text{ (kg)} \quad (2)$$

式中: P — 单位切削力(kg/mm²); s — 刀具宽度(mm); u — 进刀速度(m/s); h — 工件断面高度(mm); V — 切削速度(m/s)。

$$R = \frac{T}{f} \text{ (kg)} \quad (3)$$

式中: f — 摩擦系数。

根据上述受力分析,采用有限元分析方法,可得出高速铣削工况下刀具的应力和变形情况。

1.2 有限元分析

(1) 几何模型及网络划分

该铣刀为外径 $D = 1700$ mm, 内径 $d = 400$ mm, 厚度 $s = 10$ mm 的圆盘,以 $n = 1500$ r/min 的速度旋转,可视为平面应变问题处理,圆盘结构和载荷都较简单,这里以三维弹性体来分析,在 I-DEAS6.0 建立实

* 收稿日期:2003-05-20

基金项目:上海宝钢集团攻关项目资助(990901)

作者简介:周忆(1957-),女,四川成都人,重庆大学机械工程学院副教授,在职博士生,主要从事精密,超精密加工和机电集成技术。

体模型。

根据圆盘的具体结构,用 I-DEAS6.0 中 meshing 模块沿其径向和周向自适应划分。径向取 50 mm 为单元长度,共 13 格,在其周向取 12° 为单元弧长度,单元高度取为圆盘的厚度 10 mm。生成 390 单元,840 个节点,如图 2 所示。

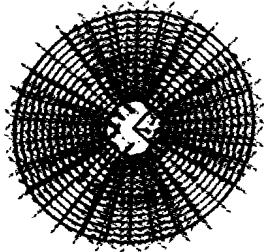


图2 圆盘有限元模型

(2) 载荷处理

根据上述受力分析,计算单元节点的离心力 F 、圆周力 T 、正压力 R ,并同时等效在该处节点上,若取圆盘进入角度 $\alpha = 60^\circ$, $P = 70 \text{ kg/mm}^2$, $s = 10 \text{ mm}$, $u = 250 \text{ mm/s}$, $V = \omega R = 153.51 \text{ m/s}$, $h = 100 \text{ mm}$, $f = 0.3$,则节点力为:

$$N_x = F_x + \frac{T}{2} \cos 30^\circ - \frac{R}{2} \cos 60^\circ = 1222.449 \text{ (N)}$$

$$N_y = N_y + \frac{T}{2} \sin 30^\circ + \frac{R}{2} \sin 60^\circ = -832.883 \text{ (N)}$$

上述载荷加到其相应节点上,得刀具应力和变形的有限元分析计算结果如图 3、4。

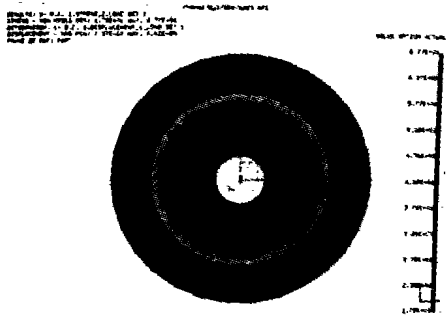


图3 主应力分布图

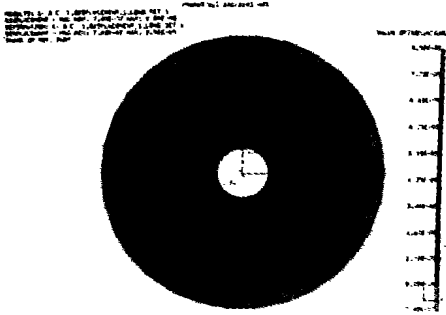


图4 变形图

计算分析可知:铣刀刀齿周向应力 σ_θ 和径向应力

σ_r 均为拉应力,其值正比于切削速度的平方值, σ_θ 为第一主应力,在内周边数值最大为 67.7 MPa,在刀具外周边处最小为 17.5 MPa。其最大变形为 $8.58 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

高速铣削刀齿的受力分析结果解释了刀具磨损时在顶刃和前刃上出现十字裂纹的现象。由于刀具径向应力和周向应力均为拉应力,导致了刀齿的最初破坏,即在刀齿内产生微小裂纹。同时,最大主应力产生在刀具内周边处,而不是在外园上,所以刀齿的最终断裂也是在刀齿根部。

1.3 刀齿受热作用分析

首先计算刀齿切削时受热的作用时间。

切削参数:铣刀直径为 $d = \phi 1800 \text{ mm}$,其周长为 5650 mm,转速 $n = 1500 \text{ r/min}$,切削管件宽度为 $s = 100 \text{ mm}$,铣削速度为 $v = 140 \text{ m/s}$ 。

则刀齿的受热作用时间为:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{100}{140 \times 1000} = 0.0007 \text{ (s)} \quad (4)$$

可见刀齿受热作用时间极短,仅为 0.7 ms,相当于一个热脉冲。而刀齿受热脉冲频率为:

$$f = \frac{1}{n} = \frac{60}{1500} = 0.04 \text{ (s)} \quad (5)$$

根据传热学理论,热在钢中的传播速度为 $v_1 = 0.5 \text{ mm/s}$,则可计算出切削热在刀齿中的作用深度:

$$\delta = v_1 t = 0.5 \times 0.0007 = 3.5 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (6)$$

上式表明切削区产生的热量在刀具中的传递深度极小,甚至根本来不及传递,刀具就切出了,因而刀具的温升也很小。

由上述计算分析可知,虽然在高速铣削加工中,切削区工件与刀具接触处温度最高温度可达 922 °C,但对刀具而言,由于刀具与工件接触时间极短,仅为 0.7 ms,且切削区产生的热量在刀具中传递深度极小,因此刀齿的受热过程为一个持续时间极短的热脉冲过程(图 5),而在热作用间隔时间内,刀具又被强制冷却到常温,这样即可保证刀具温度处于 300 °C 以下,从而保持刀具的硬度,提高耐用度。前述刀齿的破坏情况也

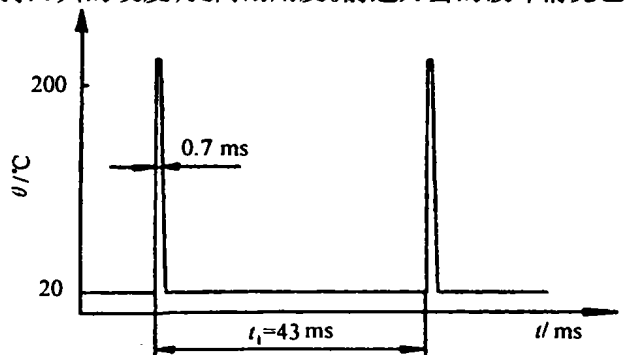


图5 刀齿受热图

表明刀刃没有退火或受高温软化、垮塌变形现象,而是机械磨损断裂破坏。

2 刀具磨损机理分析

根据刀具受力和热作用分析,刀具的磨损过程为:

如图6a所示,切削开始时,刀刃前角 $\gamma = 8^\circ$,后角 $\alpha = 15^\circ$,刀具材料为65 Mn,切削速度高达8 400 m/min。由于刀具材料与工件材料硬度相差不大,刀具材料和工件材料中的硬质点形成的磨粒在高速摩擦作用下,对刀具产生急剧的切削和划伤作用,因此刀具在切削开始1~2 s后就被磨掉了,磨成图6b的形状,约有2~3 mm的圆柱棱边,刀刃磨钝为约1 mm的圆弧,此即为刀具的初期磨粒磨损。

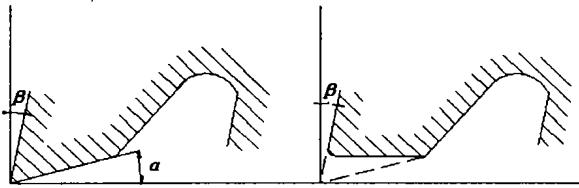


图6 刀具快速磨损图

当刀具经过初期快速磨损后,刀具的工作性质发生了变化,首先,2~3 mm的圆柱棱边,使刀刃有一定摩擦面积,从而产生一定的摩擦热,由此引起工件表面的温升和强度的下降,形成刀具与工件的强度差,工件表层的低强度、近熔化层被下一个刀具园角刮下,前角已完全不起作用,此时刀具的切削状态为摩擦加热的高速切削加工,刀具受拉应力和热脉冲应力的作用,在拉应力和热应力的作用下,刀具上产生十字形微裂纹,并不断发展成大裂纹,最后导致刀具的断裂,此为刀具的疲劳破坏。

此外,在相对高温下,刀具的某些凸出区与工件“冷焊”,但其强度不高,切削过程中极易被拉断,在刀具上拉去部分材料而引起粘结磨损。

由上可知,在给定的切削条件下,刀具的磨损形式主要有由机械摩擦引起的磨粒磨损、热脉冲应力和力脉冲应力引起的疲劳断裂及粘结磨损。

3 结 论

1) 适当选择切削参数,处理好刀具与工件的矛盾,铣削速度可达8 482 m/min的超高速铣削,并已在钢铁公司生产实践中实际应用,铣刀寿命达24 h。经过长期生产证明,超高速铣削是可以实现的。

2) 铣刀的应力应变分析表明,刀具在工作中承受周向和径向应力,且均为拉应力;刀具外周边处应力较小,内周边处较大,该应力以刀具的旋转频率作用于刀具上,导致了刀具的疲劳裂纹直至断裂,是刀具磨损破坏的主要原因。

3) 在给定的切削参数下,由于刀具与工件的接触时间仅为0.7 ms,切削热的传递来不及到达刀具内部,且刀具大部分时间处于冷却状态,因此刀具仅受到热脉冲的作用,该热脉冲没有引起刀具的热扩散和热氧化磨损以及强度硬度的丧失,但热应力导致了刀具的疲劳磨损破坏。

4) 在上述分析的基础上,可以推知:进行刀具形状的优化设计,减缓刀具的机械磨粒磨损,可延长刀具的初期磨损期;优化刀具的切削速度,使刀具受热时间和冷却时间最佳配合,则可保持刀具强度和硬度为最佳状态,从而提高刀具的耐用度。

参考文献:

- [1] 梁锡昌. 超高速铣削的新理论[J]. 机械工程学报, 2001, (3): 109-112.
- [2] 张伯霖, 谢影明. 高速切削的原理与应用[J]. 中国机械工程, 1995, 6(1): 14-17.
- [3] RANGA KOMANDURI, K. SUB. High speed machining [M], New York, 1984: 1-12.
- [4] R RADULESU, S G KAPOOE. An analytical model for prediction of tool temperature fields during continuous and interrupted cutting [J]. Journal of Engineering for Industry, ASME, 1994, 116: 135-143.
- [5] 吴善元. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 70-79.
- [6] 侯镇冰, 何绍杰, 李恕先. 固体热传导[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 88-92.

Analysis on Tool Wear for Super High-speed Milling

ZHOU Yi, LIANG Xi-chang

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The force and strain on the cut-tooth have been analyzed by using limited element method. And its conduction of heat also has been analyzed. The analysis shows that the biggest force is produced inside of it, and a heat pulse is formed during the cutting process. On this basis, the wear of cut-tool has been posed. It shows that its main wear are abrading wear and fatigue wear. And the break of the cut-tool is produced in the boot of the cut-tool.

Key words: super high-speed milling; cut-tool; wear

(编辑 成孝义)