

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.05.007

基于切削温度分析的刀具磨损状态研究

丁宁, 张敏良, 郭东升, 赵森, 吴经洋

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了解刀具在切削时的实际状况,课题组提出了基于切削温度的刀具状态实时监测的方案。采用仿真与试验相结合相验证的方法,对刀具在新刀、早期磨损、严重磨损以及失效4种状态下的切削温度进行分析。通过试验采集刀具磨损及失效的温度信号数据,建立了基于最小模糊度的隶属度函数优化模型,用于诊断刀具加工过程中的磨损及失效状态。应用结果表明,该方法可以实现对刀具磨损及失效状态的实时监测,对提高机床的加工效率及加工精度具有重要意义。

关键词:刀具磨损;切削温度;模糊隶属度;实时监测;特征数据库

中图分类号: TG501

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2019)05-0034-05

Research on Tool Wear State Based on Cutting Temperature Analysis

DING Ning, ZHANG Minliang, GUO Dongsheng, ZHAO Sen, WU Jingyang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To understand the actual condition of tool at the time of cutting, a real-time monitoring scheme of cutting tool condition based on cutting temperature was proposed. The cutting temperature of cutting tool in four states: new cutting tool, early wear, severe wear and failure was analyzed by combining simulation with experiment. An optimization model of membership function based on minimum ambiguity was established by collecting the temperature signal data of tool wear and failure to diagnose tool wear and failure during machining. The application results show that this method can realize the real-time monitoring of tool wear and failure state, and is of great significance to improve the processing efficiency and accuracy of machine tools.

Keywords: tool wear; cutting temperature; fuzzy membership; real-time monitoring; characteristics database

随着计算机技术、集成制造技术的不断发展,先进制造技术也逐渐向精密化、柔性化、集成化、网络化、全球化、虚拟化、智能化和清洁化的方向发展^[1]。

刀具状态智能监测技术作为先进制造技术的重要组成部分,对于推动我国制造业领域创新变革以及制造业自动化智能化有着极其重要的意义^[2]。

目前刀具监测方法主要分为直接测量法与间接测量法。直接测量法是在非切削时间内直接测量刀具或工件的尺寸,比如电阻测量法、射线测量法和探针法等。间接测量法是在切削时间内提取与刀具状态有关的间接信号,比如声发射法、红外热像法以及热电偶方法等^[3]。

从金属切削原理可知,刀具磨损状态与切削温度

的变化密切相关^[4]。根据这一原理可以对刀具状态进行监测,实验中对温度测量的常用方法主要有红外热成像法和热电偶法。但考虑到在实际切削过程中,会有高温切屑产生,会对红外热成像仪测量刀具温度产生很大的影响,而且这种方法的成本相对也比较高,不利于实际推广,故笔者采用热电偶测温法测量切削温度,即在刀具内部埋置热电偶,此种方法测量刀具温度灵敏度高,不受加工环境影响,仪器成本相对也比较低,经济性高,适合在实际生产过程中普遍使用,具有比较广泛的应用前景。

1 刀具温度仿真与分析

结合实际刀具在不同磨损状态下的样本模型,课题组建立不同状态下的三维刀具模型,导入 Third

收稿日期:2019-02-25;修回日期:2019-07-30

第一作者简介:丁宁(1994),男,江苏靖江人,硕士研究生,主要研究方向为金属切削加工中刀具状态的监测。E-mail: 1158434100@qq.com

Wave AdvantEdge 软件,进行刀具在新刀、早期磨损、严重磨损以及失效 4 种状态下的刀具温度仿真分析。

所用刀具材料为硬质合金刀具,工件材料为 45 号钢,仿真次数为 8 次,切削仿真参数如表 1 所示。

表 1 切削仿真参数表

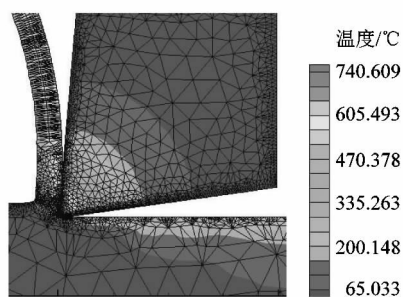
Table 1 Cutting simulation parameters

进给量/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	切削深度/mm	切削长度/mm	切削速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
0.125	3	30	300
刀具前角/(°)	刀具后角/(°)	外界温度/°C	切削形式
5	8	20	外圆干车削

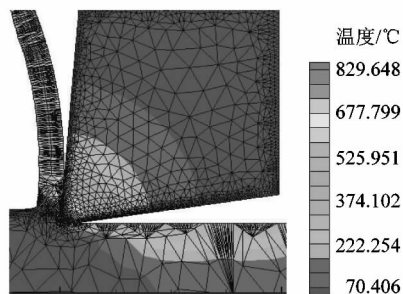
对刀具在新刀、早期磨损、严重磨损以及失效 4 种状态下的切削温度仿真分析,如图 1 所示。从图 1 中可以很直观看出刀具在切削时,刀尖温度最高,且随着刀具磨损状态的加剧,刀尖温度在逐步上升。

图 2 为新刀、早期磨损、严重磨损以及失效 4 种状态下切削区温度仿真结果。经过多次仿真分析结果对比,对同一磨损状态下刀具切削温度数据进行处理分析总结,得出如下结果:新刀切削最终温度约恒定在 800 °C;刀具早期磨损时切削最终温度约恒定在 840 °C;刀具严重磨损时切削最终温度约恒定在 880 °C;刀具失效时切削最终温度约恒定在 1 000 °C。

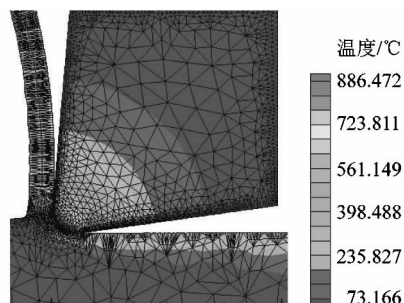
对比分析可知,随着刀具磨损状态的加剧,切削区的温度也在不断升高。由此便可以根据切削时温度的大小,来判断切削时刀具的磨损情况,对刀具的磨损状态进行实时监测。



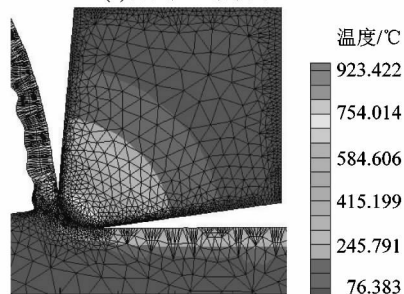
(a) 新刀



(b) 刀具早期磨损时



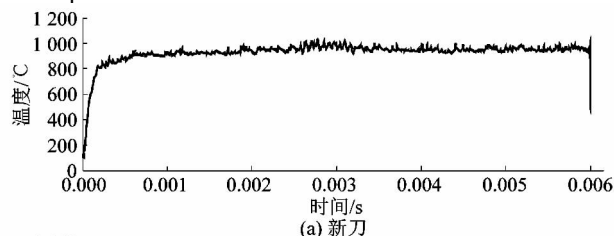
(c) 刀具严重磨损时



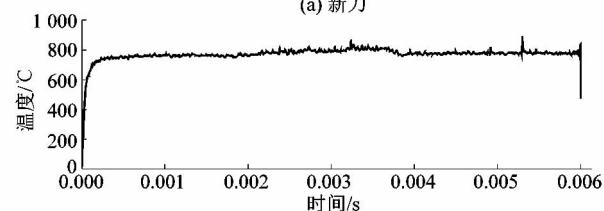
(d) 刀具失效时

图 1 刀具不同磨损状态下切削区温度仿真分布

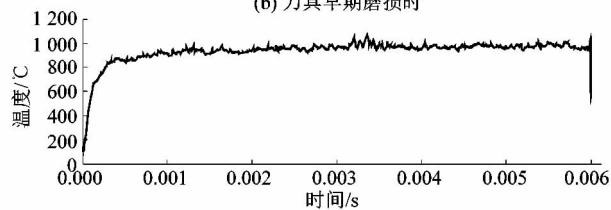
Figure 1 Simulation distribution of cutting zone temperature under different wear conditions of tool



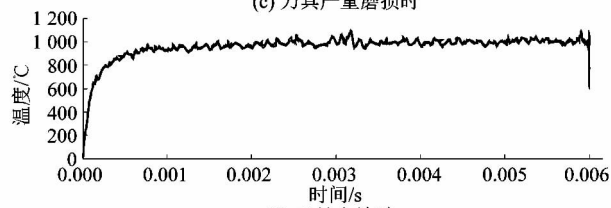
(a) 新刀



(b) 刀具早期磨损时



(c) 刀具严重磨损时



(d) 刀具失效时

图 2 刀具不同磨损状态下切削区温度仿真结果

Figure 2 Simulation results of cutting zone temperature under different wear conditions of tool

2 刀具切削温度试验

通过上文的仿真结果可以看出随着刀具磨损状态的加剧,刀具切削温度也在不断上升,并得到各磨损阶段刀尖处的切削温度。但是由于仿真结果采集的数据较少,对数学模型的建立有局限性,故笔者将对刀具在4种磨损状态下进行切削试验,采集其对应的各个阶段的温度信号数据并进行数据处理,最后将试验结果与仿真结果进行对比验证。

2.1 试验条件

试验设备为沈阳机床厂制造的数控系统 GSK980TDb,主轴最大转速 9 999 r/min。工件材料为 45 号钢。试验刀具为 YBC151 硬质合金刀具。测温仪采用 CEM DT-610B 热电偶数字测温仪。刀具检测采用工具显微镜。试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数表

Table 2 Experimental parameters

工件材料	切削形式	工件直径/mm	切削速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
45	外圆干车削	40	300
切削深度/mm	进给量/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	刀具前角/(°)	试验次数
3	0.125	5	10

试验中监测温度用的是 CEM DT-610B 热电偶数字测温仪(见图 3)。测温仪的测量范围 $-50 \sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$,分辨率 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试速度为 2.5 次/s,输入热电偶探头为标准 K 型热电偶探头。

工作原理:采用半人工热电偶法,在刀具被测点处钻一个小孔(孔径越小越好,通常 $\varphi < 0.5\text{ mm}$),再将一根热电敏感材料金属丝(如康铜)焊在待测温点上作为一极、以刀具材料作为另一极而构成的热电偶^[5](见图 4)。



图 3 热电偶测温仪
Figure 3 Thermocouple thermometer



图 4 测温示意图
Figure 4 Schematic diagram of temperature measurement

2.2 试验数据采集

笔者采用单因素法选择同一种硬质合金刀具在 4 种状态下对 45 号钢进行切削,保持刀具切削参数不变,采用热电偶测温仪对刀具工作过程中的温度信号进行处理。

刀具的 4 种状态如图 5 所示。切削试验现场如图 6 所示。

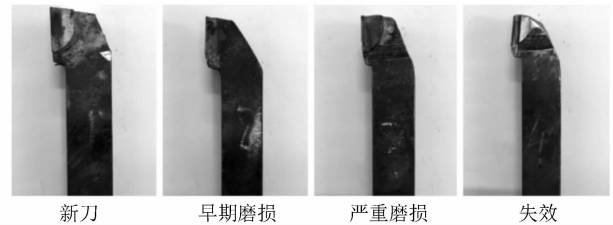


图 5 不同磨损程度的刀具试件

Figure 5 Tool specimens with different degrees of wear

保持试验参数不变,依次对 10 个相同型号、不同磨损程度的刀具(YBC151)进行试验,分别对各个状态刀具的温度值提取并记录,得到 4 种状态在工作时刀尖处闪温峰值^[6]。



图 6 切削试验现场

Figure 6 Cutting experiment site

笔者进行了 3 次试验,经过数值整理后提取有效值,取平均值,最终处理的数据如表 3 所示。

3 试验结果与仿真结果的验证

由 Third Wave AdvantEdge 仿真结果得出新刀切削最终温度恒定在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,早期磨损后切削最终温度恒定在 $840\text{ }^{\circ}\text{C}$,严重磨损后切削最终温度恒定在 $880\text{ }^{\circ}\text{C}$,失效后切削最终温度恒定在 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过对 10 个相同型号(YBC151)不同磨损程度的刀具的实验数据采集,由表 2 可知,新刀、早期磨损、严重磨损和失效 4 种状态的切削温度与仿真结果比较吻合。并且得出随着刀具磨损程度的加剧,刀具切削温度也在升高,与仿真结果一致。

表3 刀具切削刀尖处闪温峰值
Table 3 Peak flash temperature at
the cutting edge of the tool

序号	刀具状态			
	新刀	早期磨损	严重磨损	失效
1	781	823	861	982
2	786	825	866	985
3	791	830	870	989
4	796	836	873	994
5	800	839	876	998
6	801	842	879	1 000
7	803	845	880	1 002
8	806	846	882	1 004
9	810	848	886	1 006
10	812	850	888	1 100

由此可得不同磨损程度的 YBC151 硬质合金刀具在切削 45 号钢时的刀尖温度,因此可以在加工过程中对刀具的磨损状态进行实时监测。当刀具切削温度达到刀具失效温度时,应及时换刀,避免影响工件质量。

4 建立模糊隶属度数学模型

4.1 模糊隶属度函数模型的优点

利用传统算法进行刀具温度的监测,需要定量地对刀具温度数据进行准确的测量,建立刀具温度时间序列模型。但由于刀具在切削时,刀尖温度具有不稳定性,而且时间序列模型的输入信息量过少会降低刀具各个状态切削温度监测的准确性,所以利用传统时间序列模型进行监测具有诸多的缺陷和不确定性。

为了避免上述局限性,笔者决定采用一种基于模糊隶属函数优化的刀具温度监测的数学模型。先利用热电偶测温仪采集各个状态下的刀具温度信号,再添加模糊隶属度控制函数,从而实现各个状态下刀具温度的鲁棒性控制^[6]。查阅大量文献结果表明,利用该模型进行数据的处理,能够极大地提高刀具温度监测的准确性。

4.2 特征样本值模糊隶属度函数模型的建立

将新刀、早期磨损、严重磨损和失效 4 种刀具磨损状态用模糊集合 $\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 表示。其对应的各模糊子集的隶属度函数分别为 μ_1, μ_2, μ_3 和 μ_4 , 其隶属度函数图如图 7 所示。

根据隶属度函数图和温度信号参数的特征样本值,利用最小模糊度规则进行 p 值求解^[7]:

$$S_{\min}(T_1, T_2, T_3, T_4) = \frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \{U[\mu_j(t_i)] + V[\mu_j(t_i)]\} \quad (1)$$

其中, $U[\mu_j(t_i)] = -\mu_j(t_i) \ln \mu_j(t_i)$; $V[\mu_j(t_i)] = -[1 - \mu_j(t_i)] \ln [1 - \mu_j(t_i)]$ 。

式中: n 为模糊集所有样本的个数; t_i 为模糊集的第 i 个样本; n_j 为 T_j 中的样本个数。

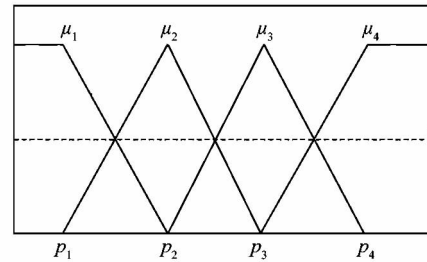


图7 刀具磨损程度隶属度函数图

Figure 7 Subordinate function diagram of tool wear degree

其对应的 $\mu(t)$ 的数学表达式分别为^[8]:

$$\mu_1(t) = \begin{cases} 1 & (t \leq p_1); \\ \frac{p_2 - t}{p_2 - p_1} & (p_1 < t < p_2); \\ 1 & (\text{其他}). \end{cases}$$

$$\mu_2(t) = \begin{cases} \frac{t - p_1}{p_2 - p_1} & (p_1 < t \leq p_2); \\ \frac{p_3 - t}{p_3 - p_2} & (p_2 < t < p_3); \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases}$$

$$\mu_3(t) = \begin{cases} \frac{t - p_2}{p_3 - p_2} & (p_2 < t \leq p_3); \\ \frac{p_4 - t}{p_4 - p_3} & (p_3 < t < p_4); \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases}$$

$$\mu_4(t) = \begin{cases} 1 & (p_4 < t); \\ \frac{p_4 - t}{p_4 - p_3} & (p_3 < t < p_4); \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases}$$

式中: p_1, p_2, p_3, p_4 为隶属度区间的限值, t 为自变量^[9]。

利用 MATLAB 软件编写式(1)隶属度函数优化模型的程序式,对隶属度函数的 p 值进行优化求解,结合图 7,得到刀具不同磨损程度温度信号特征参数的模糊隶属度函数,如图 8 所示。

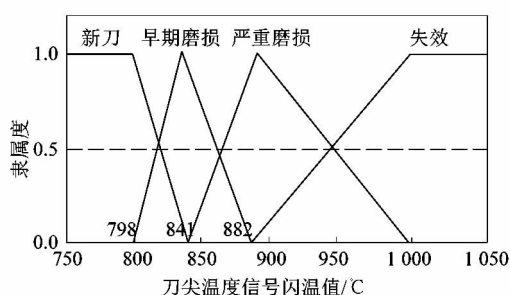


图8 温度参数的模糊隶属度函数图

Figure 8 Fuzzy membership function diagram of temperature parameters

如图8所示的即为YBC151硬质合金刀具在切削45号钢时,刀尖温度参数的函数图。经过实验结果与仿真结果统计表明,相比于传统的函数模型,该模糊隶属度具有鲁棒性高,实用性强的优点,对刀具切削实时监测具有重大的实用意义。

5 结论

课题组通过仿真和实验相结合验证的方法,对刀具在新刀、早期磨损、严重磨损以及失效4种状态下切削时的刀具刀尖温度进行了研究^[10-11],并建立了基于模糊隶属度函数的数学模型,大大提高了传统模型的鲁棒性,有效解决了加工过程中刀具实时监测的问题。这种对刀具切削温度的实时监测的方法比较方便简

单,监测仪器成本相对也比较低,经济性高,具有广泛的应用前景,对生产加工的自动化智能化有着极其重要的意义。

参考文献:

- [1] 李娜. 基于人工智能的刀具切削状态的监测研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008: 1-2.
- [2] 吴道全, 万光珉, 林树兴, 等. 基于人工智能的刀具切削状态的监测研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994: 3-5.
- [3] 朱红霞, 沈兴全. 金属切削温度测量方法的研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(1): 96-98.
- [4] 刘党生. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 78.
- [5] 刘战强, 黄传真, 万熠, 等. 切削温度测量方法综述[J]. 工具技术, 2002, 36(3): 3-6.
- [6] 张强, 闻学震, 王海舰, 等. 基于红外热像分析的刀具磨损及失效诊断[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(3): 142-146.
- [7] 袁晶, 陈群, 李自强, 等. 基于模糊隶属函数优化的炉内温控数学模型[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 298-301.
- [8] 刘晓明, 牟龙华, 张鑫. 基于信息融合的隔爆开关永磁机构储能电容失效诊断[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2121-2127.
- [9] 张强, 刘志恒, 王海舰, 等. 基于多特征信息融合的截齿磨损程度识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1974-1983.
- [10] 霍鹏程. 基于切削加工中音频信号分析的刀具状态监测系统研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2015: 70-71.
- [11] 程金强, 王扬渝, 王慧强, 等. 三明治结构淬硬钢 Cr12MoV 切削加工的数值模拟[J]. 机电工程, 2018, 35(9): 910-915.

(上接第33页)

- [4] ASTASHEV V K, BABITSKY V I. Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1): 89.
- [5] BABITSKY V I, MITROFANOV A V, SILBERSCHMIDT V V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1): 81-86.
- [6] KUMABE J, FUCHIZAWA K, SOUTOME T, et al. Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics [J]. Precision Engineering, 1989, 11(2): 71-77.
- [7] MAUROTTO A, MUHAMMAD R, ROY A, et al. Comparing machinability of Ti-15-3-3-3 and Ni-625 alloys in UAT[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 330-335.
- [8] MA C X, SHMOTO E, MORIWAKI T, et al. Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(11): 1295-1300.
- [9] KIM J D, CHOI I H. Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(1): 89-98.
- [10] MITROFANOV A V, BABITSKY V I, SILBERSCHMIDT V V.

Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning[J]. Computational Materials Science, 2005, 32(3/4): 463-471.

- [11] PATIL S, JOSHI S, TEWARI A, et al. Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V [J]. Ultrasonics, 2013, 54(2): 694-705.
- [12] MAUROTTO A, ROY A, BABITSKY V, et al. Analysis of machinability of Ti-Ni-Based alloys [J]. Solid State Phenomena, 2012, 188: 330-338.
- [13] NATH C, RAHMAN M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(9): 965-974.
- [14] AMINI S, SOLEIMANIMEHR H, NATEGH M J, et al. FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1/2/3): 43-47.
- [15] LIU C S, ZHAO B, GAO G F, et al. Research on the characteristics of the cutting force in the vibration cutting of a particle-reinforced metal matrix composites SiCp/Al [J]. 2002, 129(1/2/3): 196-199.