

通电加热铣削原理及试验验证

吴林涛, 王希, 周竞, 张天宇

(厦门大学 物理与机电工程学院 厦门 361005)

摘要: 提出了一种通电加热铣削方法,介绍了其基本原理与实验装置。通过试验及分析用小波变换处理采集到的振动信号来证明这种方法能够大幅降低切削过程的振动,提高刀具寿命,降低表面粗糙度,并且成本低、实验装置简单实用。提出了一种基于通电加热的新型高温硬度测量方法,用该方法分析淬火钢在高温下的硬度变化情况,发现常温 57HRC 的淬火 T10A 工具钢在 300 °C 左右,硬度就急剧降低至 30HRC,这也证明了加热切削的有效性。

关键词: 通电加热铣削; 小波变换; 振动信号; 高温硬度

中图分类号: TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8728(2015)04-0560-05

The Principle of Electric Hot Milling and Its Experimental Verification

Wu Lintao , Wang Xi , Zhou Jing , Zhang Tianyu

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering , Xiamen University , Xiamen 361005)

Abstract: A new electric hot milling method is proposed firstly , and then this paper has proposed the theory and the experimental device of the new method. It has been proved by experiment and analyzing the vibration signal processed by wavelet transform on the new method that it really can significantly reduce the vibration and increase the tool life in milling process. And it also can reduce the surface roughness of the material. Besides , the device is not only cheap but also simple and practical. A new high-temperature hardness measurement method based on electric hot technology is proposed. The change of hardness at high temperature of the hardened steel has been analyzed. The hardness of T10A carbon tool steel which has been hardened is nearly 57HRC in normal atmospheric temperature , but the hardness drastically reduce to hardness 30HRC when the material is heated to 300 °C. So the efficiency of the new electric hot milling method has also been proved.

Key words: carbon steel; design of experiments; efficiency; electric hot milling; experiments; hardness; high-temperature hardness; MATLAB; measurements; milling(machining) ; schematic diagrams; support vector machines; temperature; tools; vibration signal; vibrations (mechanical) ; wavelet transforms

最早开始研究加热切削的是德国的梯努曼,他通过试验还获得了美德两国的专利。后来,凯纳巴切和默钱特也对加热切削的方法进行了研究^[1]。美国的 Copley 和 Bass 对激光加热切削进行了研究,后来又有很多学者对激光加热切削进行了研究^[2-4]。该方法是将高功率的激光束聚焦在切削刃前的工件表面,在材料被切除前的短时间内将局部

加热到很高的温度,使材料的切削性能在高温下发生改变,从而可以采用普通刀具进行加工^[5]。但是激光器价格昂贵,而且对于透光和反光的材料,加热前需处理^[6]。等离子加热切削,是用等离子弧对靠近刀具即将被切除的工件表面进行加热^[7-8]。因为等离子气体是由惰性气体及氢气电离生成,因此工作中放出有害气体,使用中要进行防护^[6]。

还有气体火焰加热法和感应加热法。这两种加热法是整体加热,只适用于加工小零件,而且加热效率较低。

日本的上原邦雄等明确提出了导电加热切削方法(Electric Hot Machining, 为 EHM)。该方法在切

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875120)资助

作者简介: 吴林涛(1989-), 硕士研究生, 研究方向为先进制造

lintaobruce@gmail.com; 王希(联系人), 副教授, 硕士生导师, huanan3000@gmail.com

削过程中利用刀具和工件构成回路, 通以低压大电流, 使切削区材料产生焦耳热而软化工件的一种加工方法^[9-10], 其原理如图1所示。

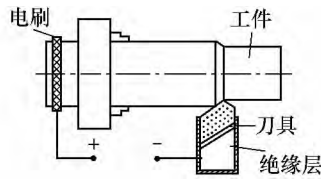


图1 导电加热切削原理图

赵学智等对导电加热车削的接触电阻进行了建模分析^[10], 孙鹏对导电车削的一些基础问题进行了研究^[11]。目前国内外学者研究的都是如图1所示的导电加热车削, 因为其加热的效果取决于工件和工具的接触情况, 切削中的振动会造成加热的不稳定, 影响加工质量, 且刀具本身参与加热, 影响刀具寿命^[6]。

从现有文献来看, 还没有检索到导电加热铣削, 因为铣削是断续切削, 如果也把铣刀和工件直接连接电源两级, 组成回路, 会形成电火花, 就不是导电加热了。因而, 提出了一种导电加热铣削方法, 其加热稳定、温升迅速, 操作更简单、可控性好, 而且成本低。

1 通电加热铣削原理及加热模型

1.1 基本原理

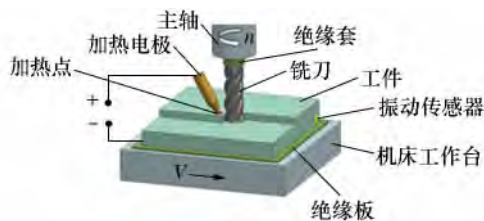


图2 通电加热铣削示意图

通电加热铣削的原理如图2所示。增加一个加热电极, 将其放在切削刃前的工件表面(点接触, 接触电阻大), 在材料被切掉前短时间内将局部材料加热到指定的较高温度, 使材料软化, 然后进行铣削加工。从加热布局来看, 该方法跟激光加热切削相类似, 相当于用加热电极代替激光头。

在给工件通电加热时, 电源正极与加热电极相连, 负极接导线与工件非加工区相连(面接触, 接触电阻很小, 不发热), 使加热电极与工件之间形成闭合回路, 加热电极与机床主轴固连(不转动), 工件与机床工作台绝缘, 铣刀与机床主轴绝缘, 由可调直流稳压电源给回路通以低压大电流, 使加热电极附近的材料产生焦耳热, 进而使材料温度升高。加热电极与工件接触点电流密度最大, 而且接触电阻比

金属本身的电阻大得多, 所以发热量最大。而工件其它地方因为电阻太小, 电流小, 几乎不产生焦耳热, 所以在分析时, 假设其它地方不产生焦耳热, 热量只在电极与工件接触的地方产生。由于热传导作用, 使得切削区温度上升。

这种加热方法带来的好处如下:

1) 刀具不参与导电加热, 不存在电火花问题, 不需要对高速旋转的铣刀导电, 大大简化了加热系统的结构;

2) 先使工件加热软化后, 再进入切削, 而不是刀具工件同时加热, 工件的加热时间充分、可控, 大大提高刀具耐用度;

3) 铣刀在切削中的振动也不会影响加热过程的稳定;

4) 可以通过选择合适的辅助加热电极材料, 提高接触电阻, 提高加热效率。

5) 相比激光加热切削, 加热过程可控性好, 成本低。

这种加热方法带来的问题如下: 如果铣刀做平面运动, 加热电极就不会总在切削点之前了, 做一个简单辅助夹具, 可以解决此问题, 就能使该方法在型腔加工中得到较好的应用, 实际工程应用性强。而且, 激光、等离子加热切削也存在此问题。

1.2 加热模型

为了便于分析, 选择刀具转一圈所要切掉的材料为研究对象, 如图3所示。

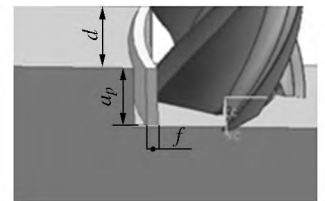


图3 通电加热铣削局部放大示意图

加热电极所产生的总热量为 $Q_{\text{总}}$

$$Q_{\text{总}} = I^2 R t \quad (1)$$

式中: I 为加热电流, A ; R 为加热点总电阻, Ω ; t 为铣刀转一圈的时间, 也就是加热时间, s , $t = 60/n$, n 为主轴转速, r/min 。

刀具转一圈所要切掉的材料所吸收的热量 Q_1

$$Q_1 = \eta Q_{\text{总}} \quad (2)$$

式中 η 为加热效率。加热过程中所损耗的热量包括电极发热、工件与空气发生对流和辐射, 还有热量在传递过程中的损失。

$$Q_1 = cm\Delta\theta \quad (3)$$

式中: c 为材料的比热容, $J/kg \cdot ^\circ C$; m 为刀具转一圈所要切掉的材料的质量, kg ; $\Delta\theta$ 为材料的温升, $^\circ C$; m 为刀具转一圈所要切掉的材料的质量。

$$m = \rho v = \rho d f a_p \quad (4)$$

式中: ρ 为工件材料的密度, kg/m^3 ; v 为刀具转一圈所要切掉的材料体积, m^3 ; d 为切削宽度, m ; f 为每转进给量, m/r , $f=v_f/n$, v_f 为进给速度, m/min 。

联立式(1)~式(4)可得刀具转一圈所要切掉的材料温升为 $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \frac{\eta I^2 R t}{c p d f a_p} = \frac{\eta I^2 R \frac{60}{n}}{c p d \frac{v_f}{n} a_p} = \frac{60 \eta I^2 R}{c p d v_f a_p} \quad (5)$$

从式(5)可看出:因为加热区的总电阻仅为毫欧姆数量级,为了得到足够的加热温度,加热电流要达到几百安培。但是,切削区被加热的温度小于加热电极处的温度,且它的温度与切削区和加热电极之间的距离关系密切。距离越大,切削区温度必然越小;距离越小,切削区温度必然越大,但又不可离的太近,否则容易使加热电极与刀具相碰。故在试验前必须确定该距离大小,不同的工件材料在被加热时,热量在传递过程中的损耗肯定是不同的,故必须通过多次试验来确定该距离对切削区温度的影响。

通电加热铣削中加热总电阻 R 主要由接触区工件材料电阻 R_c 、加热电极电阻 R_d 和电极-工件接触电阻 R_t 这三部分组成,如图4所示。 R_c 和 R_d 相对于 R_t 很小,可以忽略不计,所以主要发热在接触点处,工件本体发热很小。在实验过程中发现,刚开始通电的时候,随着温度升高,电阻会有所降低,然后稳定在一个值。

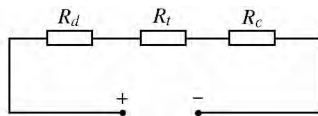


图4 通电回路示意图

对于碳素工具钢,当工作温度大于等于 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时,硬度和耐磨性将迅速下降^[12]。为了解决此问题,就要采用高温硬度测量方法对工件进行单独试验测量。

1.3 工件高温硬度分析

日本AKASHI SEISAKUSHO公司生产的HVK-HF型高温硬度计^[13],在实际测量时很不方便,工件需放在抽成真空的加热炉里面整体加热,测硬度压头整体伸进加热箱中去加载测量,由温度控制装置保持温度恒定。这些硬度测量装置设备复杂,操作繁琐,不能方便快捷的测出金属在高温下的硬度。还有一点就是,这些设备体积大,价格昂贵,不适合在实际生产中广泛的应用。

为此提出了基于通电加热的新型高温测硬度方法:把工件放在常规硬度计的试台上,直接用两个加热电极对工件局部通电加热,加热电极放在工件侧

面靠近上表面边缘处,压头可直接在上表面靠近边缘处测硬度。为了测得某一确定温度值下的硬度,可在测硬度之前,用热电偶在压头正下方工件表面测量温度,如图5所示。当温度达到某一确定值时,再进行硬度测量。

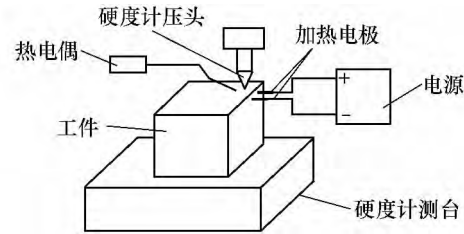


图5 各器械相对位置示意图

用上述高温硬度测量方法测得T10A工具钢在不同温度下的硬度值,经过4次试验,得到4组数据,如图6所示。

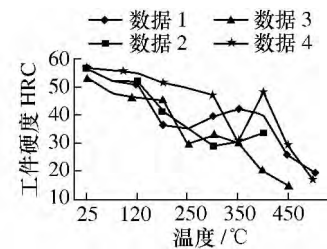


图6 4次试验数据对比

随着温度的升高,工件硬度降低,在 250

$\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 的时候,工件硬度达到一极小值。温度继续升高,工件硬度略有上升,升到一定值后,又开始降低,总的趋势还是降低的,而且效果显著。这与理论上工件的材料性能^[11]基本一致,所以说上面提到的高温硬度测量方法是切实可行的。

若能使切削区的温度保持在 $250\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,那么工件软化程度将达到最大,加工效果最好。

2 通电加热铣削试验验证

为了验证这种通电加热方法的有效性,同时也要证明通电加热干铣削确实在加工效果上优于正常铣削。设计了如图2所示的试验系统,具体的试验实物图如图7所示。

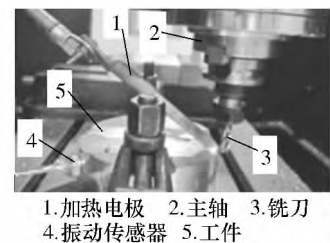


图7 通电加热铣削试验实物图

2.1 试验方案

利用单因素法进行试验,变量有通电电流 I 、进给速度 v_f 、背吃刀量 a_p 、主轴转速 n 。在通电加热铣削与不通电铣削(传统铣削)这两种情况进行对比分析。具体实验方案见表1。

表1 单因素试验方案

| 序号 | 转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$ | 进给速度 $v_f/(mm \cdot \min^{-1})$ | 背吃刀量 a_p/mm | 电流 I/A | 电压 U/V |
|----|-------------------------------|------------------------------------|------------------|-------------|-------------|
| 1 | 1 500 | 30 | 0.1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 500 | 60 | 0.1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 500 | 90 | 0.1 | 0 | 0 |
| 4 | 1 500 | 180 | 0.1 | 0 | 0 |
| 5 | 1 500 | 30 | 0.1 | 150 | 2.9 |
| 6 | 1 500 | 60 | 0.1 | 150 | 2.9 |
| 7 | 1 500 | 90 | 0.1 | 150 | 2.9 |
| 8 | 1 500 | 180 | 0.1 | 150 | 2.9 |
| 9 | 1 500 | 30 | 0.2 | 0 | 0 |
| 10 | 1 500 | 30 | 0.2 | 150 | 2.9 |
| 11 | 1 500 | 30 | 0.4 | 0 | 0 |
| 12 | 1 500 | 30 | 0.4 | 150 | 2.9 |
| 13 | 1 500 | 180 | 0.4 | 0 | 0 |
| 14 | 3 000 | 180 | 0.4 | 0 | 0 |
| 15 | 5 000 | 180 | 0.4 | 0 | 0 |
| 16 | 1 500 | 180 | 0.4 | 150 | 2.9 |
| 17 | 3 000 | 180 | 0.4 | 150 | 2.9 |
| 18 | 5 000 | 180 | 0.4 | 150 | 2.9 |

在表1中,当电流达到150 A时,加热点温度达到600℃左右,而此时,距加热点5 mm的切削区温度正好在250℃左右。由1.3节中分析可知,此时切削区软化程度较大,能达到的加工效果最好。在此,切削区和加热电极之间的距离确定为5 mm是通过多次试验验证得出的结果。在本试验中,只需用加工过程的振动信号和加工面的表面粗糙度就能较好的表征铣削加工效果的好坏,无需对切削力进行研究,优化了试验过程,节省了试验成本。在每次试验时都有采集加工过程的振动信号(用电压表示幅值)和加工面的表面粗糙度。

2.2 试验装置

图2所示的试验主要设备仪器如下:

- 1) 加工机床: 立式加工中心 VMC650E;
- 2) 加热电源: DYT-15V400A 型可调直流稳压恒流电源;
- 3) 工件: 经过淬火处理的高级优质碳素工具钢(T10A), 其硬度值在57 HRC左右;
- 4) 刀具: Y.M.X 硬质合金端铣刀, 刀具参数为10.0*25*75L*4T, 材质为硬质合金YG6;
- 5) 其它测量装置: TR200 便携式表面粗糙度测量仪、热电偶和 ICP 压电式加速度传感器(即振动传感器, 型号为 CA-YD-4182)。

2.3 试验结果分析

将表1中不同工况采集的振动信号,用小波变换进行分析处理。小波变换是一种时频分析方法,

可以同时得到时域和频域的信息,因为信号的低频部分,反映的是信号的主要、趋势性特性,而高频部分反映的是信号的细节特征。所以以下就用二进离散小波变换,处理振动数据,取其低频信号,来评价加工过程的优劣。

在 MATLAB 软件中,用小波工具箱进行处理,采用2进离散小波变换,用 db3 小波基函数进行14层小波分解,并对第14层低频信号进行重构,结果如图8~图10所示。

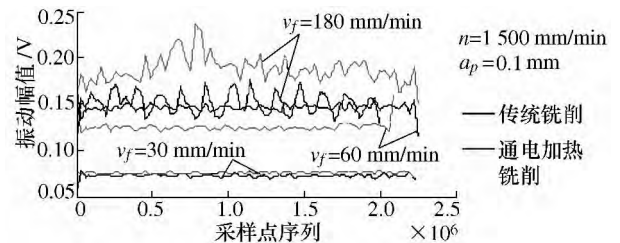


图8 不同进给速度下两种铣削方法的振动对比

从图8中可看出:在转速为1500 r/min,切削深度为0.1 mm的情况下,不同的进给速度下,两种铣削方式下的振幅都很小,说明在低速、小切削深度情况下,体现不出通电加热辅助加工的优势。

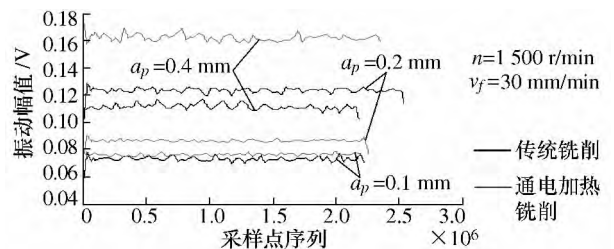


图9 不同背吃刀量下两种铣削方法的振动对比

从图9中可看出,两种铣削方式在不同的背吃刀量下的振动幅值都差不多。说明在低速、小进给量情况下,体现不出通电加热辅助加工的优势。

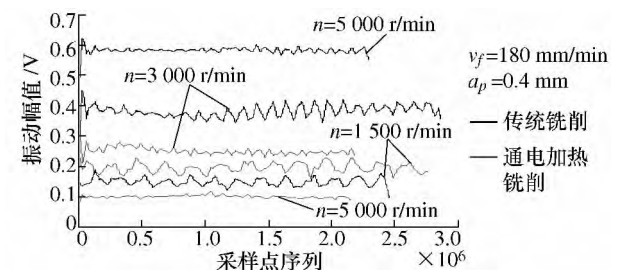


图10 不同主轴转速下两种铣削方法的振动对比

从图10中可看出:在进给速度为180 mm/min,切削深度为0.4 mm的情况下,当转速为1500 r/min时,两种铣削方式下的振动都很小,相差无几。当转速为3000 r/min时,通电加热铣削的振动比传统铣削小了

约一半。当转速为 5 000 r/min 时,两种铣削方式下的振动大小区别很明显。通电加热铣削下的振动比传统铣削下的振动减小了 4 倍。这说明采用通电加热铣削技术确实是有效果的,使加工过程振动减小,加工更稳定。同时也说明切削速度对振动的影响最大。

通过分析表 1 中不同工况下测得的表面粗糙度,得如图 11 所示的结果。

从图 11 中可看出:表面粗糙度一般是针对精加工后的最终表面,所以取小的切削参数加工表面测量粗

度。当转速为 1 500 r/min,切削深度为 0.1 mm 时,4 个进给速度下,通电加热铣削后的表面粗糙度都比传统铣削低。而且在进给速度为 60 mm/min 时,差别特别明显,所以,在精加工时采用通电加热铣削可以减小表面粗糙度。

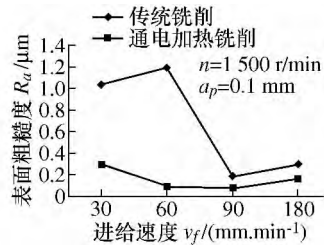


图 11 不同进给速度下两种铣削方法的表面粗糙度对比

3 结论

1) 所使用的通电加热方法,加热稳定,温升快,结构简单方便,而且加热过程可控性好,成本低。

2) 通电加热干铣削相对于正常铣削,可以降低加工振动,也可以减小表面粗糙度,特别是在精加工参数下。

3) 基于通电加热的高温硬度测量方法是可行的,相对于日本 AKASHI SEISAKUSHO 公司生产的 HVK-HF 型高温硬度计,结构简单,成本大幅降低,且操作更方便。

4) 常温下淬火的 T10A 工具钢硬度为 57HRC,在 250~350 °C 时硬度迅速降低为 30HRC,也说明通电加热确实能够软化工件。

【参考文献】

- [1] Krabacher E J, Merchant M E. Basic factors in hot-machining[J]. Trans. of the ASM E, 1951, 73
- [2] Masood S H, Armitage K, Brandt M. An experimental study of laser-assisted machining of hard-to-wear white cast iron[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, (51): 450-456
- [3] Ding H T, Shin Y C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, (50):

106-114

- [4] Anderson M, Patwa R, Shin Y C. Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, (46): 1879-1891
- [5] 王扬, 吴雪峰, 张宏志. 激光加热辅助切削技术[J]. 航空制造技术, 2011, (8): 42-45.
Wang Y, Wu X F, Zhang H Z. Technology of laser assisted machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, (8): 42-45 (in Chinese)
- [6] 王慧艺, 林建平, 阮雪榆. 加热辅助切削研究[J]. 机械设计与制造, 2002, (1): 75-77
Wang H Y, Lin J P, Ruan X Y. Researching on heating-assisted cutting[J]. Machinery Design & Manufacture, 2002, (1): 75-77 (in Chinese)
- [7] Leshock C E, Kim J N, Shin Y C. Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, (41): 877-897
- [8] Thomas A, Böhm G. Application of atmospheric plasma jet machining (PJM) for effective surface figuring of SiC[J]. Precision Engineering, 2012, (36): 546-553
- [9] 陈文戈, 叶邦彦. 导电加热切削技术综述[J]. 电加工与模具, 1999, (2): 28-30
Chen W G, Ye B Y. Overview of electric hot machining technique[J]. Electro Machining & Mould, 1999, (2): 28-30 (in Chinese)
- [10] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 导电加热切削切削区加热电阻模型及试验分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 115-123
Zhao X Z, Ye B Y, Chen T J. Model of heating resistance of shear zone in electric hot machining and its experiment analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 115-123 (in Chinese)
- [11] 孙鹏. 淬硬钢导电加热切削技术基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005
Sun P. Basic study on hardened steel using EHM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005 (in Chinese)
- [12] 张崇才, 贺毅. 工程材料[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012: 159
Zhang C C, He Y. Engineering materials[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012: 159 (in Chinese)
- [13] 游学见. 金属高温硬度测量装置[J]. 试验机与材料试验, 1986, (6): 39-40
You X J. Measuring device of metal high temperature hardness[J]. Testing Machine & Material Testing, 1986, (6): 39-40 (in Chinese)