

导电加热切削对加工表面粗糙度的影响

胡立新

叶邦彦

(机械工程系)

(华南理工大学)

摘 要

通过测定表面粗糙度参数 R_a ，研究导电加热切削对加工表面粗糙度的影响；根据表面轮廓曲线、轮廓幅度的概率分布曲线、轮廓支承长度率曲线、功率谱密度函数和自相关函数曲线进一步探讨了导电加热切削加工表面轮廓的形貌。

关键词：导电加热切削；表面粗糙度；积屑瘤；鳞刺；表面轮廓形貌

0 引 言

导电加热切削与普通切削相比有许多突出的优点，国内外许多学者对导电加热切削进行了研究，为研究导电加热切削的机理和应用做了许多工作。本文试图从导电加热切削对加工表面粗糙度的影响作一些量的分析和轮廓形貌的探讨。

1 实验方法及实验装置

在 CM6140 车床上，采用单相整流滤波直流电源，对 45 钢供应、调质、淬火三种状态进行导电加热外圆切削实验，加热装置如图 1 所示。

在图中，电源一端与碳刷 1 连接，另一端与刀具 3 相连，刀具因垫有绝缘层 8 而与刀架绝缘。切削时，电流经碳刷和紧套在机床主轴上的铜环 9、卡盘及工件、刀具而形成闭合回路。当电流流经图 1 (b) 中的 abc 窄小区域时，由于电流密度较大，

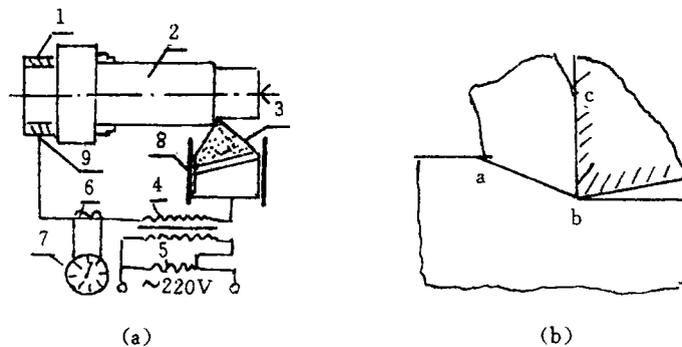


图 1 导电加热切削回路的组成及原理

本文于 1993 年 7 月 9 日收到

从而在这一区域产生焦耳热，使切削变形区得到加热。

加工表面粗糙度的测量和分析是采用表面轮廓分析系统进行的。图2为测试系统框图。采用国产YCL-1型便于携带式表面粗糙度轮廓计作为传感器和放大器，采用美国Interactive公司的高性能12位数据采样装置AI13和APPLE-I微机进行采样和数据处理。本实验采样长度 $L=1.36\text{mm}$ ，采样数据取256个。

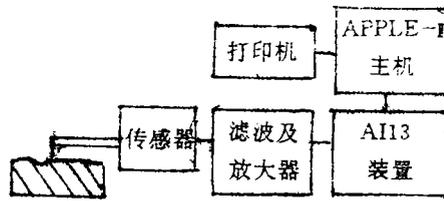


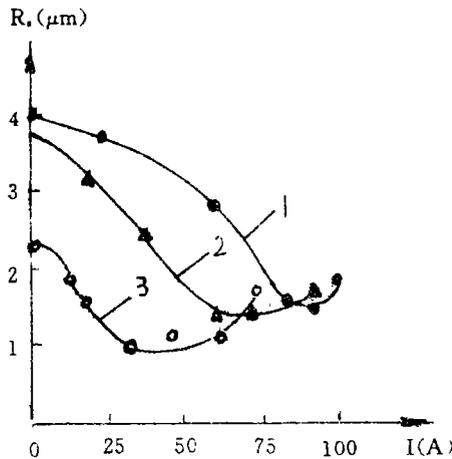
图2 表面轮廓分析系统框图

沿进给方向，对已加工表面轮廓进行采样，得到表面轮廓偏距的离散数据。按国标GB1031-83中所推荐的表面粗糙度参数，对已加工表面进行评价。由于采样所得到的是随机过程的数据，还利用快速富里叶变换(FFT)方法对表面轮廓的随机过程离散数据进行功率谱密度和自切相关函数分析。

2 实验结果及分析

2.1 表面粗糙度参数 R_a 随加热电流 $I(A)$ 的变化

图3表明了导电加热切削45钢调质状态，当进给量 f 和切削深度 a_p 一定，以三种不同的切削速度 v 车削时，加工表面粗糙度参数 R_a 随加热电流 $I(A)$ 的变化情况。开始 R_a 值随加热电流 $I(A)$ 值增大而减小；当加热电流 $I(A)$ 值增大到某一数值后， R_a 值又随着加热电流 $I(A)$ 值增大而增大。这一结果表明，采用导电加热切削，当进给量 f 和切削深度 a_p 一定时，在每种切削速度 v 的情况下， R_a 值都随着加热电流 $I(A)$ 值变化而变化。 R_a 的最小值都有一个相对应的 $I(A)$ 值，我们把这个加热电流 $I(A)$ 值称为在某种切削速度 v 时获得最小 R_a 值的最佳加热电流值 I_{op} 。也就是说，你要想在某种切削速度 v 的条件下，获得最小的表面粗糙度参数 R_a 值，就必须按该切削速度 v 相对应的最佳加热电流值 I_{op} 加热。



工件：45钢调质状态， $HB270\sim 284$ 。
 刀具：YW₁ 硬质合金； $r_0=0^\circ$ ， $a_0=8^\circ$ ，
 $K_r=90^\circ$ ， $K'_r=10^\circ$ ， $\lambda_s=0^\circ$
 用量：1— $v=9.5\text{m/min}$ ，
 2— $v=23.8\text{m/min}$ ，
 3— $v=38.2\text{m/min}$ ，
 $f=0.08\text{mm/r}$ ， $a_p=0.5\text{mm}$

图3 R_a 随加热电流 $I(A)$ 变化的曲线

从图4中可以看到，当进给量 f 和切削深度 a_p 一定时，导电加热切削的最佳加热电流 I_{op} 与切削速度 v 的关系呈现线性关系。经回归分析得到公式如下：

$$I_{op} = 109.15 - 2.09v。$$

2.2 表面粗糙度参数 R_a 随切削速度 v 的变化

根据表1实验数据作图5(a)、(b)、(c)三图,从这三图中都可看到,采用普通切削,开始时加工表面粗糙度参数 R_a 值随着切削速度 v 增加而增大,在切削速度 $v=12.5 \sim 15m/min$ 附近有一个驼峰,然后又随着切削速度 v 的增加逐渐减少,在高速区内 R_a 值的变化趋于平缓。

采用导电加热切削时,加工表面粗糙度参数 R_a 值明显减小,且随着切削速度 v 的增加没有多大的变化;当切削速度 v 增大到某一值时 R_a 值比普通切削的加工表面粗糙度参数 R_a 值要大。这说明导电加热切削只能在低、中速区能较大幅度减小加工表面粗糙度参数 R_a 值。根据实验结果,导电加热切削的加工表面粗糙度参数 R_a 值一般可减小 $0.5 \sim 3.5\mu m$ 左右。

2.3 表面粗糙度参数 R_a 随进给量 f 的变化

从图6中可以看到,切削碳钢时,当切削速度 v 和切削深度 a_p 一定,普通切削和导电加热切削的加工表面粗糙度参数 R_a 都随着进给量 f 的增加而增大。这主要是因为普通切削和导电加热切削的加工表面理论粗糙度 R_a 都受到进给量 f 的影响,理论粗糙度 R_a 与进给量 f 成正比^[1]关系。从图中还可看到,随着进给量 f 的增加,导电加热切削使加工表面粗糙度参数 R_a 值减小的效果逐渐下降。这是因为导电加热切削时,由于加热的电流不变,而导电加热产生的温升与进给量 f 成反比^[2]。也就是说,随着进给量 f 的增加,导电加热切削产生的温升逐渐下降,所以导电加热切削的效果逐渐下降。

表1 各种切削速度下的加工表面轮廓参数 R_a (μm)

V		4.77	5.96	7.52	9.55	11.94	14.92	19.10	23.87	29.84	38.2
45 钢供应 HB190	$I=0$	2.80	3.1	3.6	4.1	4.7	4.6	4.3	3.9	3.3	2.4
	I_{op}	99.2	96	93.4	89.2	84.2	78.0	69.2	59.3	46.8	29.3
	$I \neq 0$	1.68	1.56	1.7	1.7	1.6	1.64	1.74	1.85	1.68	1.76
45 钢调质 HB270 ~284	$I=0$	2.56	3.44	3.84	4.0	4.7	5.1	4.9	3.8	3.4	1.74
	I_{op}	99.2	96	93.4	89.2	84.2	78.0	69.2	59.3	46.8	29.3
	$I \neq 0$	1.8	1.84	1.56	1.66	1.9	1.94	1.56	1.5	1.62	1.4
45 钢淬火 HRC40	$I=0$	2.0	2.17	2.2	2.6	2.84	1.87	1.17	0.60	0.59	0.42
	I_{op}	99.2	96	93.4	89.2	84.2	78.0	69.2	59.3	46.8	29.3
	$I \neq 0$	0.92	0.99	0.9	0.83	0.67	0.61	0.56	0.53	0.59	0.51

注:表中测量数据有所省略。

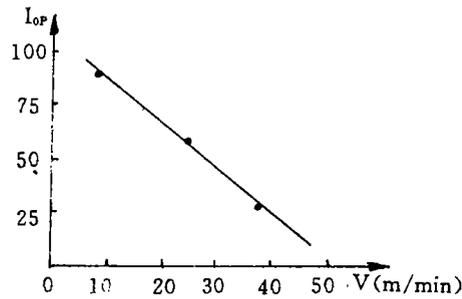
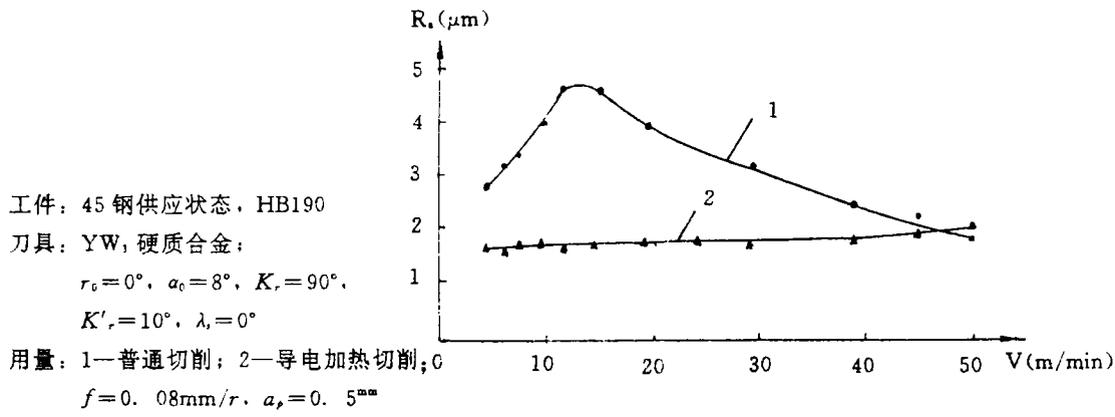
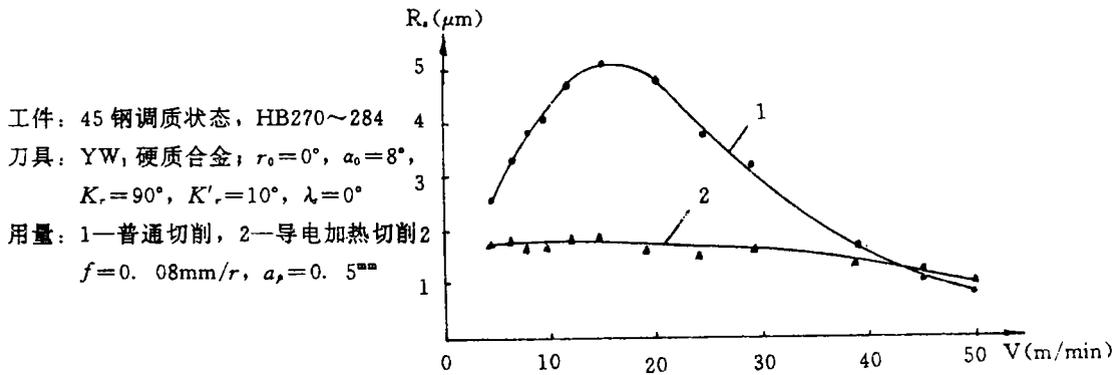


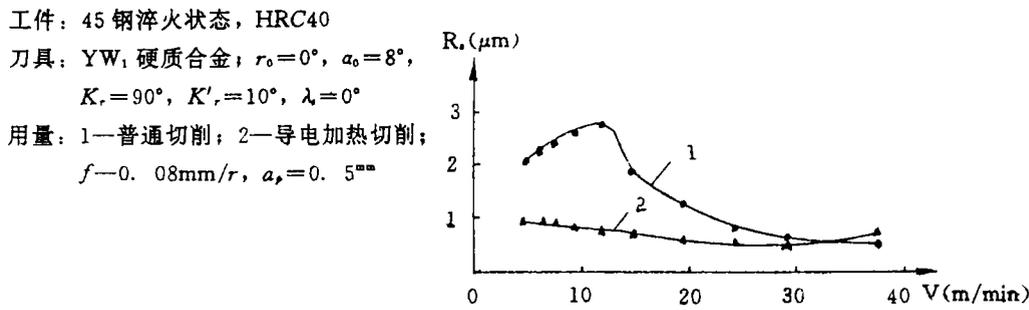
图4 最佳加热电流 I_{op} 与切削速度 v 关系曲线



(a)



(b)

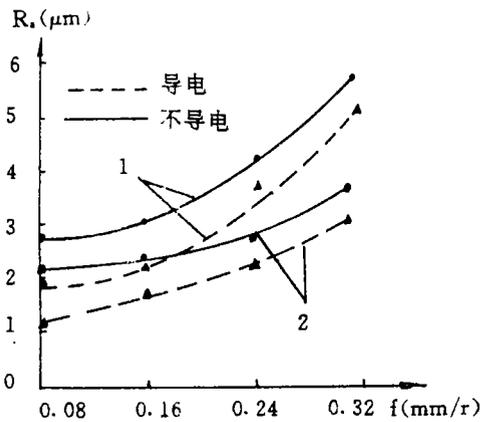


(c)

图 5 R_a 随切削速度 v 变化的曲线

2.4 表面粗糙度参数 R_a 随切削深度 a_p 的变化

从图7中可以看到, 切削碳钢时, 当切削速度 v 和进给量 f 一定, 普通切削和导电加热的加工表面粗糙度参数 R_a 都随着切削深度 a_p 的增加而增大, 这主要是由于切削深度 a_p 的增加, 切削力会上升, 切削平稳性变差, 刀具耐用度下降等因素造成。另外, 从图中还可看到, 随着切削深度 a_p 的增加, 导电加热切削使加工表面粗糙度参数 R_a 减小的效果逐渐下降。这是因为导电加热切削时, 由于加热的电流不变, 而导电加热切削产生的温升与切削深度 a_p 成反比^[2]。也就是说, 随着切削深度 a_p 的增加导电加热切削产生的温升逐渐下降, 所以导电加热切削的效果逐渐下降。要想保持加热切削效果, 当切削深度 a_p 增加时, 同时应增加加热的电流值, 使通过切削区的电流密度保持不变。



工件: 1—45 钢调质状态, HB270~284

2—45 钢淬火状态, HRC40

刀具: YW, 硬质合金; $r_0=10^\circ$, $a_0=8^\circ$, $K_r=90^\circ$, $K'_r=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$

用量 $v=9.04\text{m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$

加热电流: $I=89\text{A}$

图6 R_a 随进给量 f 变化的曲线

2.5 加工表面轮廓分析

为了进一步研究导电加热切削对加工表面粗糙度的影响, 分析加工表面轮廓形貌, 分别对 45 钢供应、调质、淬火三种状态的加工表面沿进给方向进行轮廓表面数据采样, 由采样数据绘出了加工表面轮廓曲线、轮廓幅度的概率分布曲线、轮廓支承长度率曲线、自相关函数和功率谱密度函数曲线, 由这些曲线分析得出的结果是基本相同的。下面仅对 45 钢淬火状态的加工表面轮廓形貌加以分析。

从图 8 (a)、(b) 中, 分别对普通切削和导电加热切削的加工表面轮廓曲线加以比较, 就可以看到, 淬火状态下的 45 钢, 在切削速度不太高的情况下, 导电加热切削的加工表面轮廓曲线显得比较规则, 比较接近理想表面轮廓, 表面粗糙度显著减小。而普通切削的加工表面轮廓则显得波峰形状不一, 峰谷距离处处不等, 没有规律。这表明普通切削过程中, 由于切削速度不高, 积屑瘤、鳞刺、侧流、撕裂等随机因素影响起着较主要的作用; 而导电加热切削由于切削区温度较高, 消除了积屑瘤、鳞刺等影响, 减少了切削力, 使切削平稳, 加工表面粗糙度显著减小。

从图 8 (a)、(b) 中的轮廓幅度分布曲线、轮廓支承长度率曲线比较也可以看到, 导电加

热切削的加工表面轮廓幅度分布更集中,轮廓支承长度率得到改善,这对提高零件表面接触刚度和耐磨性是有益的。

从图9(a)、(b)中的功率谱密度函数曲线可以清楚地看到,普通切削和导电加热切削的主要谱能量都出现在低频段上,估计这是由加工系统和切屑形成过程中的一些不稳定因素影响造成的。在相应于进给量的当量频率: $F(J) = 1/0.08 = 12.5 (1/mm)$ 处附近出现了主峰,这说明在纵向车削外圆时,影响加工表面粗糙度的主要因素是进给量。但是,普通切削在低频段的谱能量比导电加热切削的谱能量大。这可以认为,普通切削时,加工系统的不稳定因素和切屑形成的过程中由于产生积屑瘤和鳞刺等造成的切削不稳定因素对加工表面粗糙度的影响比导电加热切削更为严重。

从图9(a)、(b)中的自相关函数曲线比较也可以看到,导电加热切削的加工表面自相关函数呈现较好的周期性,这表明随机因素影响较小,其形成的表面轮廓比较规则;而普通切削的自相关函数,其周期性规律较差,这表明由积屑瘤、鳞刺、侧流、撕裂等随机因素影响较大,其形成的表面轮廓不规则,这可从图8(a)、(b)中与自相关函数曲线相对应的轮廓曲线中看到。

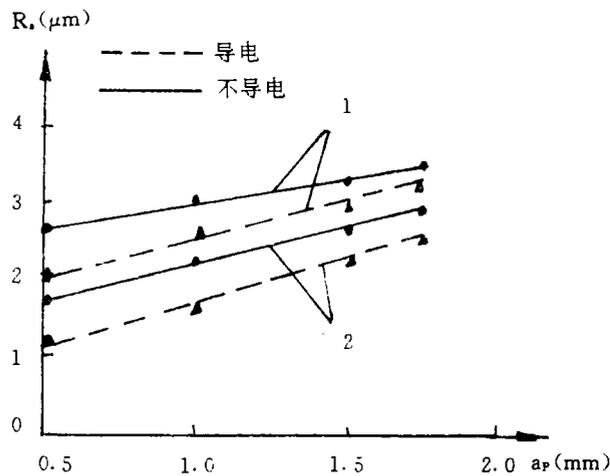
3 对导电加热切削减小加工表面粗糙度的原因分析

实验结果说明,对45钢供应、调质、淬火三种状态,导电加热切削可在一定条件下减少加工表面粗糙度。而在某些情况下,导电加热切削效果不明显,甚至表面粗糙度还会增加,对造成这种现象的主要原因分析如下。

3.1 导电加热切削在低、中速区可以抑制积屑瘤和鳞刺的产生

大家知道,切削过程中影响加工表面粗糙度的主要因素是理论粗糙度、积屑瘤和鳞刺。根据文献^[3]研究指出,切削碳钢时,当切削温度低于300℃,积屑瘤是随切削速度增加而长大的,当切削温度达到300℃时,积屑瘤的高度最大,当切削温度高于300℃以后,积屑瘤的高度又逐渐下降。如果切削温度高于500℃时,积屑瘤就趋于消失,加工表面粗糙度明显减小。

由于积屑瘤伸出切削线以下的头部会在加工表面上形成长而深的犁沟,而且积屑瘤的部



工件:1—45钢调质状态,HB270~284

2—45钢淬火状态,HRC40

刀具:YW1硬质合金, $r_0=10^\circ$, $a_0=8^\circ$, $K_1=90^\circ$, $K'_1=10^\circ$, $\lambda_1=0^\circ$

用量: $v=9.04m/min$, $a_p=0.08mm$

加热电流: $I=89A$

图7 R_a 随切削深度 a_p 变化的曲线

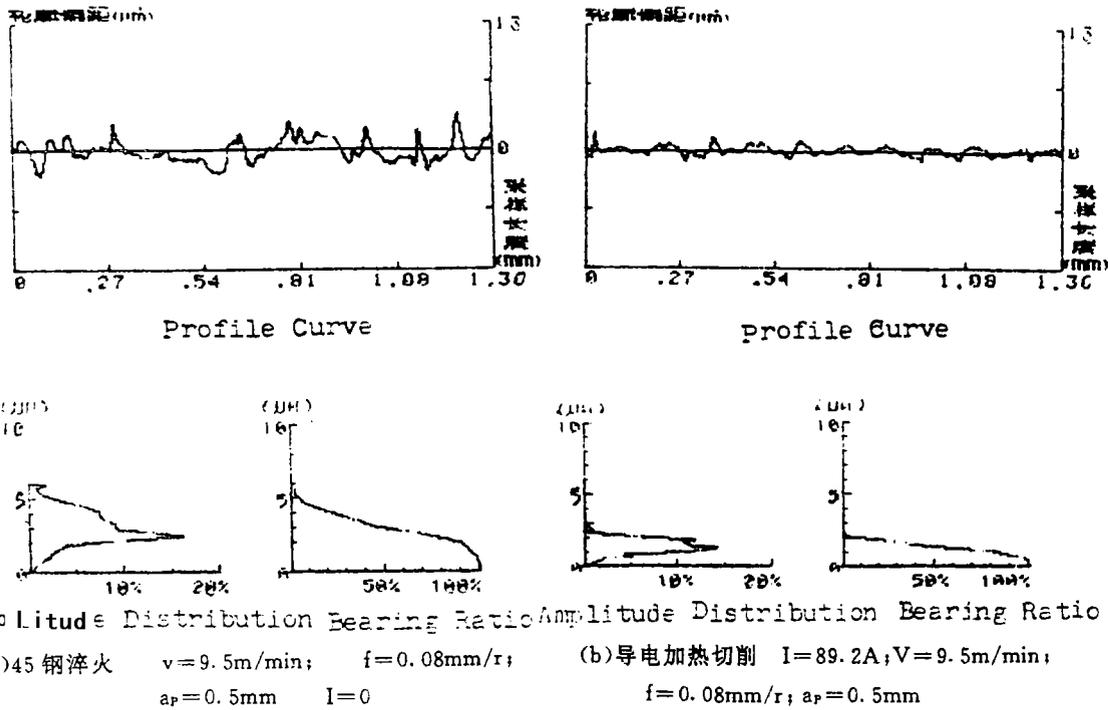


图8 普通切削和导电加热切削加工表面的轮廓曲线
幅度分布曲线、轮廓支承长度率曲线

分或整体偶尔还会脱落，使加工表面粗糙度大大增加。

另外，鳞刺的生长和消失也有类似的温度依存性。鳞刺的产生同样会对加工表面粗糙度造成很大的不良影响。由于使加工表面粗糙度显著增加的积屑瘤和鳞刺的生长和消失与切削温度（切削速度）有密切关系，这就充分说明了图5(a)、(b)、(c)中采用普通切削法加工表面粗糙度 R_v 值随切削速度 v 变化而形成的驼峰性道理。

导电加热切削时，由于导入电流的加热作用，使切削区的温度一般可达 $600\sim 800^\circ\text{C}$ ^[2]，在此温度下切削，积屑瘤和鳞刺都已消失，因此加工表面粗糙度明显减小。

在高速切削区，若切削温度高于 500°C 时，采用普通切削法，积屑瘤和鳞刺都已消失，加工表面粗糙度明显减小。在此情况下，若采用导电加热切削，利用加热来抑制积屑瘤和鳞刺的产生就失去了意义。这就是在高速切削时，采用导电加热切削效果不明显的道理。

3.2 导电加热切削使切削平稳轻快

导电加热切削时，剪切区和第二变形区材料因温度较高而软化，剪切强度和切削抗力下降^[2]。由于切削力下降，这将会使刀具——工件——机床系统产生振动的可能性减少，刀具切削平稳。实验中观察到，当加热电流较大时，切削几乎是以塑性流动的形式进行，切屑呈笔直带状，如图10所示。这时，切削过程显得轻快平稳，那些在普通切削中容易出现的不稳定因素，如形成积屑瘤和鳞刺，形成节状或单元切屑而造成摩擦角和剪切角的变化^[1]等影响都得

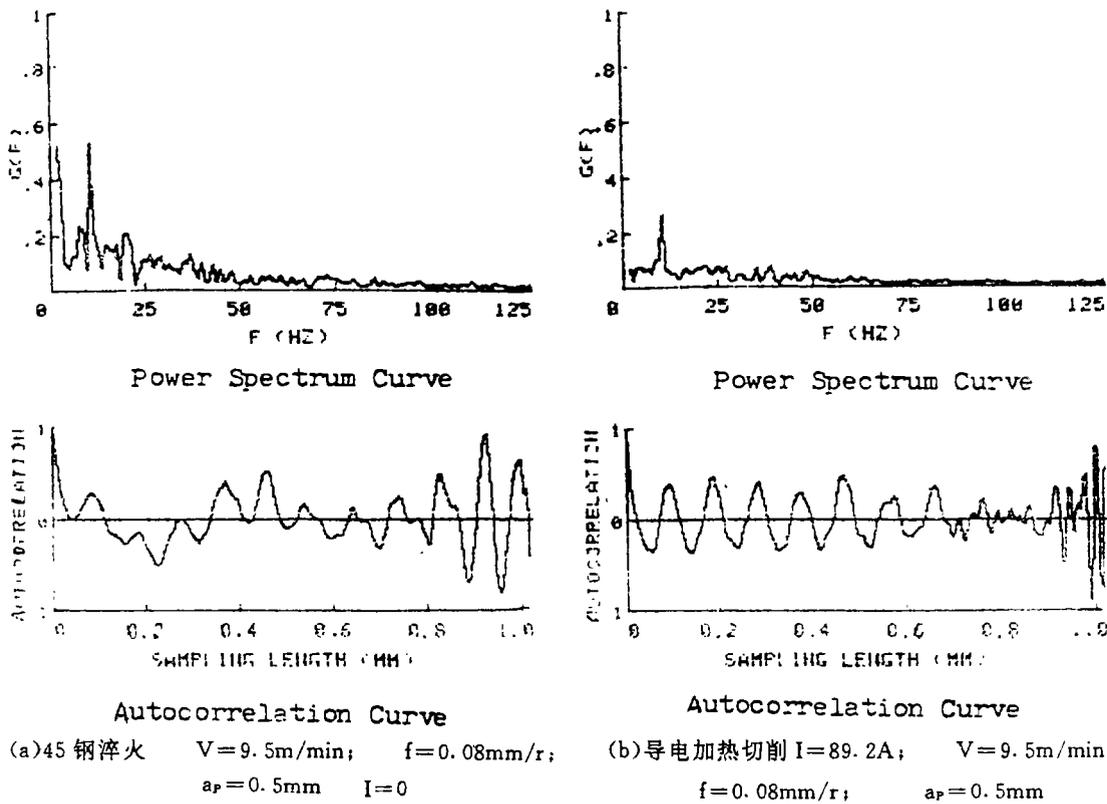


图 9 普通切削和导电加热切削加工表面轮廓的功率谱和自相关函数曲线

以消除。这是导电加热切削使加工表面粗糙度明显减小的又一原因。

4 结 论

(1) 采用导电加热切削, 要想获得最小的加工表面粗糙度, 必须按最佳的加热电流 I_{op} 加热。

(2) 在低、中速区, 导电加热切削可以消除积屑瘤和鳞刺, 并能较大幅度地减小加工表面粗糙度, 一般加工表面粗糙度可减小 $0.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 左右。

(3) 当切削速度和加热电流不变时, 加工表面的粗糙度随着进给量或切削深度增加而增加。为了使加热切削效果基本不变, 应该相应地增加加热电流值, 保持相同的电流密度。

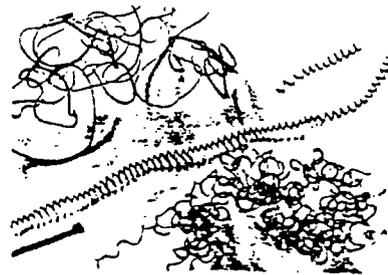


图 10 导电加热切削得到的切屑

(4) 在低、中速切削条件下, 采用导电加热切削要使加工表面轮廓分布更有规律, 轮廓幅度分布更集中、轮廓支承率长度获得改善, 这对提高零件加工表面的接触刚度和耐磨性是有益的。

附记: 本文实验在华南理工大学金属切削研究室完成。

参 考 文 献

- [1] 周泽华. 金属切削原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [2] 叶邦彦. 导电加热切削的机理及其应用. 华南理工大学博士论文集, 1989: 54~60
- [3] 周泽华. 切削碳钢时切削条件对积屑瘤的影响. 华南工学院学报, 1979, 7 (3)
- [4] 王荣本. 微机的工程测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1991

Research on the Influence of Electric Hot Machining on Roughness of the Machined Surface

Hu Lixing Ye Bangyan

ABSTRACT

In this paper, the influence of electric hot machining on the roughness of the machined surface has been investigated through the surface roughness parameter R_a . The topography of the machined surface profiles has been also discussed by means of studying the shape and probability distribution of amplitude of the surface profiles together with the bearing length ratio, power spectrum density function and autocorrelation function.

Key Words: Electric hot machining; Surface roughness; Built-up edge; Scale; Topography of surface profiles