

金属切削实验中快速落刀速度 对切屑变形的影响*

蔡光仁 檀美德 吴惠贞 陈子文

(精密机械工程系)

摘 要

本文对“快速落刀法”其落刀速度的快慢对切屑根部变形的影响,进行理论分析和实验验证.指出实验对落刀速度的要求存在一个极限值,其大小决定于被切削金属材料的机械物理性质,修正了以往一般认为落刀速度应愈高愈好的看法,给今后落刀机构的使用和设计,带来方便.

一、前 言

为了研究金属切削过程的机理,目前广泛采用各种不同结构的“快速落刀”机构,以期达到“冻结”切削过程的目的.通过切削过程中的突然落刀,取得切屑根部的样本,然后采用不同的处理方法建立起各种切削模型,从而对切削过程中的一系列力学现象,物理现象等等所产生的机理进行分析研究,以便达到描述或预测切削加工的目的.因而采用“落刀”方法所取得的样本的真实性将直接关系到以后所有推论的正确性.样本的真实性主要反映在它是否能将切削过程中被切金属材料的变形情况以及伴随着切削过程而产生的许多微小的细节原封不动的保留下来.显然,切削过程中的一系列物理现象均和切削速度有着极为密切的关系,因此,落刀速度的大小将成为样本真实性的极其重要的参数之一.

目前资料一般都认为落刀速度越快越好,落刀速度愈快就愈能保持切削过程“冻结”的可靠性,本文对落刀速度的大小对金属切削过程所产生的影响问题,进行一些探索.

二、理 论 探 讨

1. 落刀速度

目前国内外所研制的落刀机构有很多种,但就其工作原理说,大体上可以分成两大类:一类是在切削过程中以极短的时间使刀具与工件实现同步运动,从而中断切削加工过程;另一类则是使刀具(或工件)在短时间内以极大的速度脱离接触,从而实现中断切削加工的目的,使切削过程得以冻结.这两类落刀机构的设计都以下述公式为设计依据:

$$\frac{t_s}{t_r} \ll 1 \quad \text{一般取} \quad \frac{t_s}{t_r} \leq \frac{1}{10} \quad (1)$$

本文1987年5月14日收到.

*本课题属国务院侨办三项经费资助.

式中, t_s 为刀具与工件的分离时间; t_r 为被切削金属材料的应变时间, 它决定于切削速度 v 的大小。换句话说, 即要求刀具与工件用比工件材料应变速度大 10 倍的速度分离。

上述设计依据给快速落刀机构的设计带来极大的困难, 因为目前金属切削加工正不断向高速切削发展, 随着切削速度的提高, t_r 目前已达到 10^{-4} s 以上, 但 t_s 却受到落刀体质量的影响而很难再提高了, 就目前国内所采用的最先进的爆炸式落刀机构(车削)其初始加速度约为 10^8 mm/s^2 , 其 t_s 也还很难达到 10^{-5} s 的要求, 因而有必要对公式 (1) 进行更细致的研究。

不管 t_s 如何的小, 从惯性定理可知 $t_s \neq 0$, 因此, 刀具与工件的分离总是存在着一个过渡过程。在此过程中, 实际切削速度将经由从最大的切削速度逐步下降到零, 从而完成刀具与工件的分离过程(图 1)。在整个分离过程中, 实际切削速度为

$$v_{\text{切}} = v_{\text{工}} - v_{\text{刀}} \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 在落刀过程中, 实际的切削速度 $v_{\text{切}}$ 将随着落刀速度 $v_{\text{刀}}$ 的增加而逐步下降到零。若假设金属材料的变形过程以及切削过程中的一切物理现象均与实际切削速度同步, 或者说其响应时间常数为零, 则只有当 $t_s = 0$ 时才可能取得真实的切屑根部样本, 否则无论如何减小 t_s 的数值, 均不可能靠落刀方式取得不同的切屑根部样本。

2. 金属在切削过程中的变形存在着“惯性”

通过各种不同实验, 可以认为切削加工中的金属变形存在着一定的“惯性”(称“惯性”是因为这些现象与物体的惯性有着类似的属性)。图 2 的曲线表示收缩系数与切削速度之间的关系^[1]。由图可见, 切屑变形量对切削速度的敏感性极差, 特别是在切削速度较高时更突出。日本土井静雄和加藤仁在研究切削振动时所做的实验得到如图 3 所示的结果^[5]。

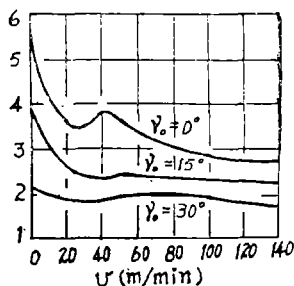


图 2 不同前角时收缩系数与切削速度之间的关系
(工件材料: 5120; 刀具材料: 高速钢)

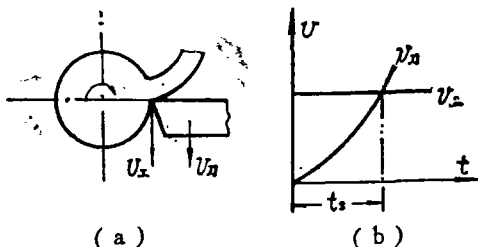


图 1

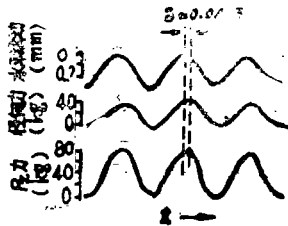


图 3

实验说明当在切削过程中在水平方向上周期性的改变切削厚度, 因此而引起的切削力的变化滞后一个角度, 其滞后量随着切削厚度加大而加大, 如图 4 所示。日本臼井英治等在实验中得到图 5 所示的关系^[2], 图中表示了被加工金属材料在变形时的应力与应变的关系。若材料以等应变速度变化时, 其应力按实线所示的规律变化, 当材料开始以较低的应变速度

变形而突然改变其应变速度, 则其应力也将出现滞后现象如图中小圈所示。

针对上述现象我们认为材料在变形过程中具有物体惯性的特征, 故当刀具脱离工件后变形速度将按指数函数衰减, 可用下式表示之。

$$\dot{\epsilon} = v_s e^{-\delta t} \quad (3)$$

式中, v_s 为切屑剪切变形速度; δ 为阻尼系数, 与金属材料的机械物理性质以及温度有关。

当不考虑剪切变形的惯性作用时, 其剪切速度用下式表示。

$$v_s = \frac{v_{\text{切}} \cos \tau_0}{\cos(\phi - \tau_0)} \quad (4)$$

式中 τ_0 为刀具前角; ϕ 为切削时的剪切角。根据式 (1)、(3)、(4) 可作出曲线如图 6 所示。可见当切削速度小于 v_0 时, 公式 (1) 是成立的, 这时落刀速度的大小可以按式

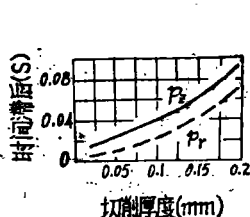


图 4

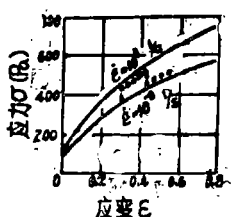


图 5 (温度 20°C, 7-3 黄铜)

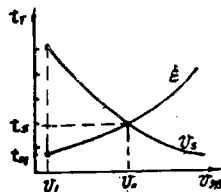


图 6

(1) 来决定, 例如图中 v_1 处落刀时间 t_{s1} 满足式 (1) 要求, 但随着 $v_{\text{切}}$ 的提高, 式 (1) 已不十分必要。当切削速度 $v_{\text{切}} > v_0$ 时, 金属变形的惯性速度已足够大, 其衰减时间较长, 故落刀速度已没有必要再提高, v_0 就是极限落刀速度, 由图可见, 落刀速度的进一步提高已完全没有必要, 由于这一原因, 给落刀机构的设计及选用带来极大的方便。

三、实验结果分析

1. 实验设计

根据上述分析, 必须证实如下两个问题, 即金属变形过程中当刀具与切屑脱离接触时, 变形存在着一定的惯性特征; 另一个问题即落刀速度存在着一个极限值。据此进行了两组实验, 第一组在牛头刨床上进行, 第二组实验在车床上进行。(1) 牛头刨床的实验: 前面已提到当快速落刀时, 刀具不可能立即与工件分离而是存在一个过渡过程, 利用曲柄摇杆机构牛头刨床的速度特性, 采用自由退刀的方法取得切屑根部的样本, 其方法如图 7 所示。在工件被切削的行程中, 其切削速度

$$v_{\text{切}} = v_{\text{max}} \sin \phi, \quad \phi = \omega t \quad (5)$$

即切削速度将随着时间 t 逐步下降到零, 从而模拟了落刀过程。然后利用撞击快速落刀机构, 取相同的切削用量, 获取切屑根部样本作对比, 其工作原理如图 8 所示。工件夹持于落刀虎钳中, 由剪切销止动, 当撞块撞断剪切销时, 工件与刀具同步运动, 其分离时间约 $1.7 \times 10^{-4} \text{s}$ 。(2) 车床实验: 在车床上用重锤式快速落刀机构, 改变重锤的行程长度以达到不同的落刀速度, 其示意图见图 9。

2. 实验数据

(1) 刨床实验条件: (i) 工件材料: 工业纯铁; 45[#] 钢。 (ii) 刀具参数: 高速钢刨刀, $\lambda_0 = 0^\circ$, $\gamma_0 = 20^\circ$, $\alpha_0 = 8^\circ$, 宽刃, 直角自由切削。 (iii) 切削层尺寸: $a_p = 0.15\text{mm}$,

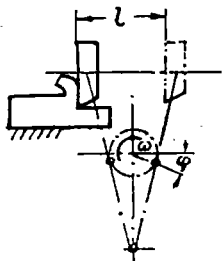
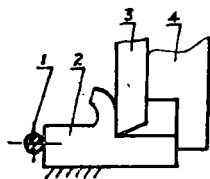
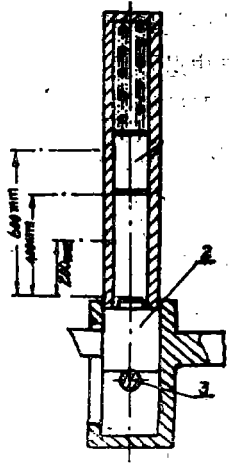
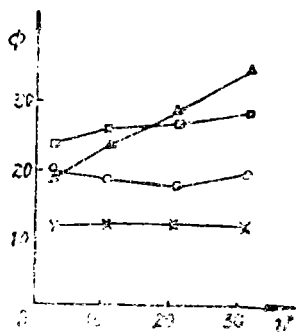


图 7

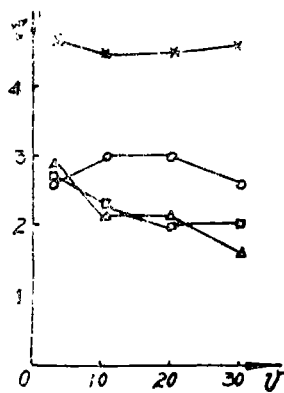
图 8 1—剪切销; 2—工件;
3—刀具; 4—撞块图 9 重锤式落刀机构示意图
1—4.5kg 重锤; 2—落
刀体; 3—剪切销

$a_w = 4\text{mm}$ 。在刨床上取四种不同的切削速度, 分别取得切屑根部的样本, 磨制金相试样后测得剪切角 ϕ 及切屑收缩系数 ξ 如图10、11所示。

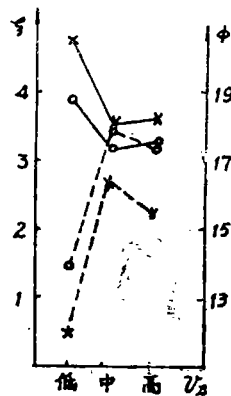
(2) 车床实验条件: (i) 工件材料: 45[#] 钢, 外径 $\phi 82\text{mm}$ 。 (ii) 刀具参数: 刀具材料 $W_{18}Cr_4V_2$, $\gamma_0 = 9^\circ$, $\alpha_0 = 6^\circ$, $k_r = 90^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$, $k'_r = 20^\circ$ 。 (iii) 切削用量: 外圆纵车, $f = 0.15\text{mm/r}$, $a_p = 3\text{mm}$, 车削快速落刀数据如图12所示。

图 10 $\phi-v$ 曲线

□—45[#] 钢, 快速退刀;
○—45[#] 钢, 自由退刀;
△—纯铁, 快速退刀;
×—纯铁, 自由退刀

图 11 $\xi-v$ 曲线

□—45[#] 钢, 快速退刀;
○—45[#] 钢, 自由退刀;
△—纯铁, 快速退刀;
×—纯铁, 自由退刀

图 12 (—为 ξ 曲线; ---为 ϕ
曲线)
×— $v = 10\text{m/min}$;
○— $v = 50\text{m/min}$

3. 实验数据分析

(1) 从刨床自由退刀实验的两组数据看出, 纯铁的剪切角 $\phi \approx 12^\circ$, 相差极小, 45[#] 钢

的剪切角最大及最小差 2° ，其中切削速度为 3m/min 和 31.6m/min 两个相同都是 20° ，不论纯铁还是 45° 钢的剪切角都普遍比快速退刀的最小速度 3m/min 的剪切角小很多。这些现象说明自由退刀的实际切削速度普遍小于 3m/min （由于刨床最低速度的限制，小于 3m/min 的快速落刀试样无法做出），对于上述种种现象若不考虑金属变形存在“惯性”现象的话很难作出合理的解释。

下面引用惯性概念加以解释，刨床的实际切削速度按正弦规律变化，即 $v_{\text{切}} = v_{\text{max}} \sin \omega t$ ，

$$\text{其加速度为 } \frac{dv_{\text{切}}}{dt} = v_{\text{max}} \omega \cos \omega t \quad (6)$$

这些关系见图13所示，在实验范围内其加速度为负值，对应于速度曲线上各点的加速度，可用该点的切线（图13中虚线）表示，金属材料的变形速度符合指数规律 $\varepsilon = v_0 e^{-\delta t}$ ，其加速度为

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -v_0 \delta e^{-\delta t} \quad (7)$$

其大小和 v_0 及 δ 有关，对同一金属材料，其 δ 为一常数，其起始点的下降率如图14。在加工

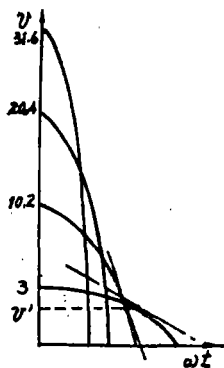


图 13

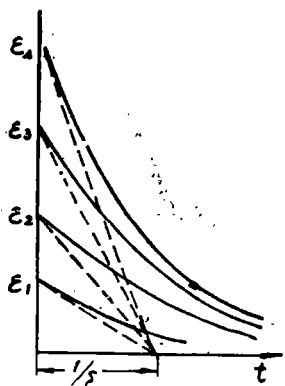


图 14

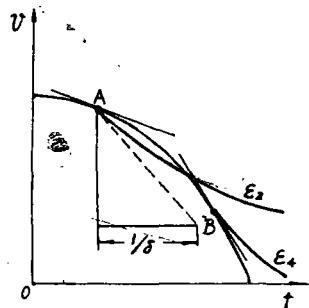


图 15

中，当刀具处于减速运动时，比较两者加速度的大小，即可说明刀具是否已分离，由图15可见，在A点，阻尼曲线下降快，故刀具仍然在起作用。在B点两条曲线的切线已重合，故这时刀具已不再起作用，落刀过程开始，对应这时的速度即实际切削速度。用这一观点，对自由退刀速度普遍小于 3m/min 、纯铁出现的速度大体相等和 45° 钢的速度参差不齐等现象，均能得到很好的解释（见图13 v' 处）。

（2）纯铁自由退刀的剪切角 $\phi \approx 12^\circ$ ， 45° 钢的剪切角 $\phi = 18^\circ - 20^\circ$ ，后者较大，这一现象和 δ 有关，限于条件限制， δ 的具体数值尚无法求出，但纯铁比 45° 钢软，其变形阻力小，故 δ 较大，其阻尼曲线的切线斜率较 45° 钢为大，因此，其与速度曲线相切时切点较低，故实际切削速度较小，这和实验结果相一致。

（3）上述惯性理论在车床的实验中进一步得到了证实（因受到实验条件限制，无法测出具体的落刀速度），低速落刀时，由于刀具退出的加速度小于金属的初始惯性加速度，故最终得到的是在落刀过程中某一点的实际切削速度值而非原来的切削速度值。当落刀速度达

到中速时,其初始惯性速度已足够大,所以在整个落刀过程中,刀具已不再影响金属的变形,见图版Ⅱ1—7。

四、结 束 语

采用落刀的方法获得切屑根部的样本是研究金属切削加工机理的重要手段之一,尤其当采用“滑移线场理论”和“图象-塑性技术”来研究金属加工机理时,其原始的切削速度值极为重要,落刀速度直接影响着原始切削速度的大小,而其所产生的影响,直接通过观察所取得的切屑样本是反映不出来的,因为当速度改变后,仍然可以反映出实际切削速度下切削过程中的许多细节,如刀瘤,滞流层、鳞刺,以及晶粒的变形与破碎情况等等(图版Ⅱ1—4),令人无法区别其真实速度的大小。

本文初步证实了落刀速度对原始切削速度的影响过程,以及在切削过程中金属变形过程存在着惯性现象。但由于实验条件的限制,尚未求出 δ 的表达式,这是有待进一步研究的课题之一。

参 考 文 献

- 〔1〕华南工学院等编,金属切削原理及刀具设计(上册),上海科学技术出版社,(1981)。
- 〔2〕全国高校金属切削原理与刀具研究会编,高速压缩试验及其有关的实验结果——金属切削时温度和应变速度效应的基础研究(1),金属切削译文集(第一集),(1983)。
- 〔3〕刘庆深,钻削快停装置的标定,工具技术,5(1986)。
- 〔4〕全国高校金属切削原理与刀具研究会论文编审委员会编,双剪切销爆炸式快停装置的研究,金切论文集,(1983)。
- 〔5〕S.A.托贝斯著,天津大学机械制造系译,机床振动学,机械工业出版社,(1977)。

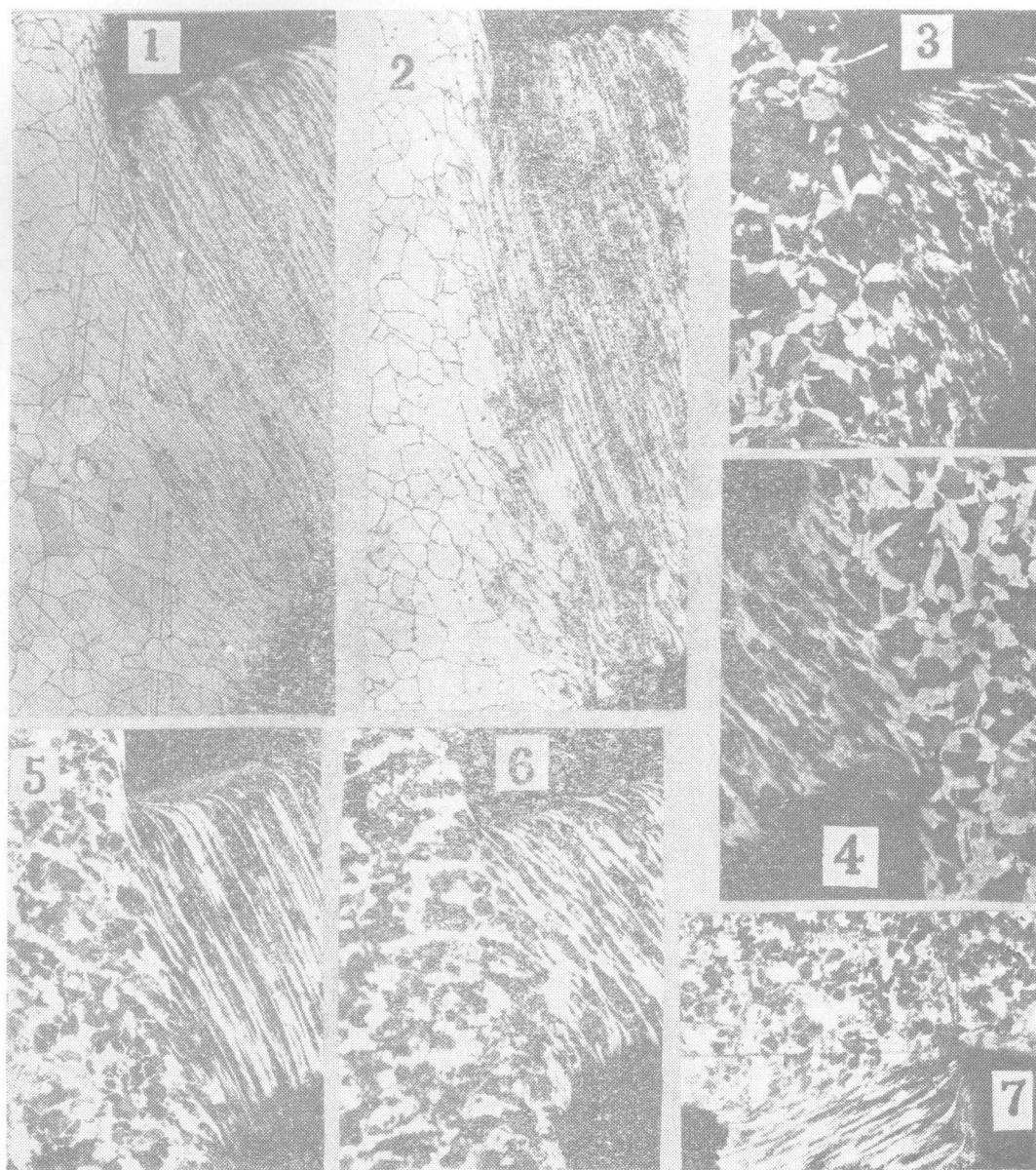
Influence of the Speed of "Quick Stoppage" on Chip Deformation in Metal-Cutting Experiment

Cai Guangren Tan Meide Wu Huiqin Chen Zhijun

Abstract

This paper analyses and demonstrates the influence of the speed of "Quick Stoppage", an useful experiment method in metal-cutting, on chip root deformation. With respect to the speed of "Quick Stoppage", there exists an extreme which depends on the mechanical and other physical properties of metal materials to be cut.

This conclusion makes correction for the conventional concept that the faster stoppage the better. It is meaningful for hereafter use and design of stoppage device.



图版 II 说明

1. 工业纯铁, $v = 3 \text{ m/min}$, 自由退刀, $\times 125$;
2. 工业纯铁, $v = 31.6 \text{ m/min}$, 自由退刀, $\times 125$;
3. 45#钢, $v = 20.4 \text{ m/min}$, 自由退刀 $\times 150$;
4. 45#钢, $v = 3 \text{ m/min}$, 自由退刀, $\times 150$;
5. 45#钢, 低速落刀速度, 切削速度 $v = 50 \text{ m/min}$, $\times 100$;
6. 45#钢, 中速落刀速度, 切削速度 $v = 50 \text{ m/min}$, $\times 100$;
7. 45#钢, 高速落刀速度, 切削速度 $v = 50 \text{ m/min}$, $\times 100$;