

美国生产工程技术代表团访华讲学稿

金属切削及可加工性评述

金属切削研究联合公司

美国 辛辛那提

Dr. Michael Field

Dr. Marvin Devries

Dr. William J. Zdeblick

Mr. John D. Christopher

Mr. Guy Bellows

Mr. John Krebs

由M. 菲尔德博士演讲

(1980.8.)

第一机械工业部成都工具研究所

出版者的话

应中国机械工程学会的邀请,美国生产工程技术代表团于1980年8月6日至8日在北京进行了讲学和技术座谈。“金属切削及可加工性评述”一文是M·Field博士的讲学稿。M·Field博士是美国金属切削联合公司(简称Metcut)的主席和干事长,国际著名的金属切削专家,国际生产工程研究协会(CIRP)会员,美国国家工程研究院会员。他对金属切削理论、材料的可加工性,宇航材料的加工、表面完整性、切削经济学、切削数据库等方面都有很深的造诣。由于他对机械加工技术作出的杰出贡献,因而荣获1978年美国著名期刊“美国机械师”颁发的“AM”奖。

M·Field博士在这篇讲稿中系统的阐述了金属切削理论、材料的可加工性、切削和磨削时的表面完整性、特种加工和美国可加工性数据中心等问题。内容丰富新颖、实用性、科学性很强,具有较高的参考价值。根据同志们的要求,我们翻译和印制了这份资料。由于时间仓促,水平有限,译文中如有不当,望予指正。我们衷心希望这份资料的出版有助于提高我国金属切削加工的技术水平,为加速实现我国机械工业的现代化作出贡献。

1980、8、 成都

目 录

1. 导 言	(4)
2. 金属切削理论	(4)
3. 材料的可加工性	(5)
3.1可加工性试验及其评定	(6)
3.2可加工性试验的程序	(6)
3.3金属切削时的磨损	(7)
3.4表面光洁度	(8)
3.5切削力及机床功率	(10)
3.6刀具寿命特性	(14)
3.7可加工性试验的试验设计和模型	(14)
3.8刀具材料	(20)
3.9铸铁的可加工性	(31)
3.10锻钢的可加工性	(36)
3.11宇航合金的切削加工	(41)
4.切削和磨削时的表面完整性	(49)
4.1工件表面金相组织的改变	(49)
4.2变形和残余应力	(50)
9.特种加工引论	(53)
6.美国可加工性数据中心	(57)
6.1引 言	(57)
6.2 MDC的经营管理	(58)
6.3手册和出版物	(59)
6.4可加工性研讨会议程	(60)
6.5成本和生产分析技术	(63)
6.6数据中心的未来计划	(64)
附录 A: 金属切削理论 综述	(66)
A1. 切削形成力学	(66)
A2. 剪切角预测	(71)
附录 B: 刀具磨损导论	(72)
B1. 引言	(72)

B2. 磨损机理.....	(72)
B3. 磨粒磨损.....	(73)
B4. 粘结磨损.....	(73)
B5. 扩散磨损.....	(74)
B6. 金属切削过程中的刀具磨损.....	(74)
B7. 由于过高温度而发生的刀具磨损.....	(77)
B8. 由于过高应力而发生的刀具破损.....	(77)
B9. 刀具后面上的逐渐磨损.....	(78)
B10. 刀具前面上的逐渐磨损.....	(80)
B11. 刀具磨损的延缓.....	(81)
附录 C. 材料的名称及代号.....	(83)
参考资料.....	(87)

注： 图27、30、32、34、48、60、64附在本书末。

1、导 言

切削加工是一个及其广泛而又十分重要的领域。它是靠将原有形状上多余的材料切去得到所要求的物件，从而增加了成品成本的一种加工法。与其他加工法相比，由于其他一些加工法的投资和模具费用大，因此切削加工往往最经济。此外，切削加工法出几何形状，表面光洁度和公差都是其他加工法很少能达到的。切削加工是一个能用于一切材料切除加工的广义词，本文的中心，金属切削，是用硬度较大的刀具将多余的材料切去的一种受到控制的断裂过程。

最早的金属切削机床可追溯到十八世纪下半叶，十九世纪中期，机床的不断发展开始使人们对于了解金属切削过程发生了兴趣。由于缺乏适用的研究设备和技术，早期研究金属切削现象的尝试受到了阻碍。直到二十世纪初，理论和实践仍进展缓慢，在发展了高速钢刀具后一是在实验意义上促进了大量研究工作的一个重大事件，于是加快了步伐。在这一领域内被认为是创始人之一的泰勒曾经在他的经典论文〔1〕内提请注意。金属切削过程的特点在于其复杂性，例如举出了影响选择切削速度和走刀量以及最终性能的可变参数不少于12个。

2、金属切削理论

直到四十年代初，金属切削研究工作才开始有周密的科学方法。受到麦钱特(Merchant)创造性工作的鼓舞后〔2〕，人们开始了进一步研究切削形成的力学，并一直探索至今。在过去三十年当中，很多金属切削研究工作不但是针对切削过程和机床系统动态方面的方法问题，也针对切削加工、刀具材料和刀具磨损和温度方面的问题。近几年来，注意力已集中在这种加工的经济性问题上。

鉴于下述理由，需要准确的了解金属切削过程的机理是有道理的〔3〕，即这样可以导致：(a)更合理地发展刀具材料，从而进一步提高金属切除率；(b)更合理地设计出能采用新技术来达到较经济的金属切除量的工程用合金材料；(c)被加工表面完整性水平的提高；(d)进行实现真正的适应控制所必需的设备与加工工艺之间相互作用的模型试验。尽管对金属切削现象的分析已进行过很多尝试，但现在对于所涉及到的准确的机理仍然缺乏根本的了解。这一情况与了解形成加工所取得的相应的成就来说，形成了对照。在切削过程中，被加工表面是在违反许多科学戒律的过程中形成的。金属切削是涉及塑性流动受到部分制约的一个未得到解决的问题。简单地说，即使对于正交切削的初步情况来说也不能精确地预测出这种加工的几何形状(例如，切削厚度)。没有这种本领，就不能预先知道在已知的一组切削条件下完成切削形成所需要的应力、切削力和能量。

现已提出了各种不同的分析办法来研究金属切削过程，尽力达到一般程度的效果。此外，许多研究人员所做的大量实验研究已使金属切削过程加快，并使其经济合算。

附录 A为金属切削理论的综述。

3、材料的可加工性

在美国，材料的切削加工是个庞大的事业。在劳动力和营业费上，每年要花费1150亿美元。这样大的开销提供了大量节约的可能性，并且对提高材料的切除效率起促进作用。

数控机床的采用，在降低总加工工时和总加工费用上，曾经是个较大的冲击。数控和自动选刀结合的主要优点在于缩短了形成刀具走刀轨迹的时间。例如，一台数控车床应该加工出像三台或三台以上普通车床所加工出的那么多工件。但是，这种机床的购置费用以及与数控设备有关的外围装置费用比普通设备的高几倍，从而数控设备每小时的工作费用就比普通设备高得多。因此，有必要将数控机床的加工工时降低到最低程度。

美国有230万台机床，其中只有5万台是数控的。为了提高产量，显然就需要像在数控机床上一将普通机床的加工时间降低。

为了提高切削加工的效率，有几个重要的步骤是必需的。

1.应该预先确定刀具与工件搭配在一起的金属切削特性。这就是说，必须先确定刀具材料与工件材料搭配在一起时所谓的可加工性因素的关系。某一项具体加工的主要可加工性因素是（a）刀具寿命或刀具磨损；（b）表面光洁度和（c）切削力及车床功率的要求。

2.应准备好一系列基础数据。合适的基础数据包括关于可加工性的特性，机床以及刀具的基础数据。

3.为了将刀具寿命，表面光洁度，切削力以及机床功率，与提供的切削加工参数（这些参数又是由工件—刀具、切削速度、走刀量和切削深度组合而成的）联系起来，就应当推导出数学上的关系。

4.应当采用数学方法把任意一种切削加工的总加工时间和总成本确定好。最终目的就是要确定最佳的一套加工条件。

5.计算机化的数字加工数据系统可以代表最先进的目标。（图1）、这样的—一个系统可以将上述全部要素都包括进来，即（a）计算机化的可加工性数据库；（b）工件、机床及刀具资料；（c）刀具寿命、表面光洁度、切削力和机床功率数学模型试验的分类法，以及（d）

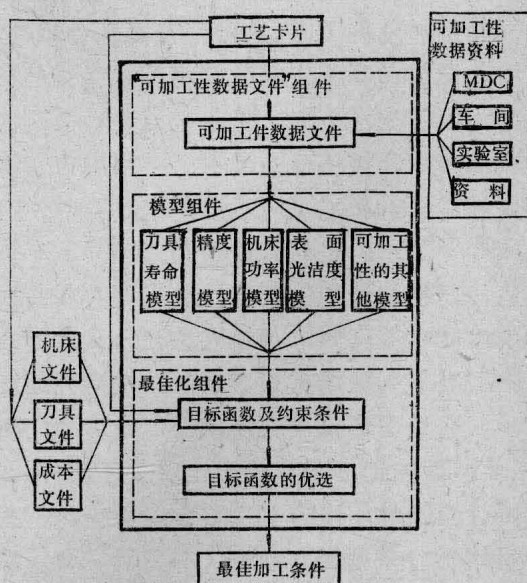


图1. 由下述组件，即可加工性数据文件组件、模型组件及最佳化组件，所组的计算机化数字加工数据库方框图

用数学计算来确定和分析以最佳条件为目的的切削加工成本和时间。

3.1 可加工性的试验及评定

为了在任一道工序上加工出工件，操作者就必须能在加工所规定的工件时选择他所要采用的切削切速、走刀量和切削深度。有效的加工数据种类繁多。最普通而又最简单的加工数据是根据前人的经验所推荐的加工条件，以及根据公司的样本或者是像《切削加工数据手册》这样的资料所介绍的数据。这种资料上的数据通常是非常保守的，并且代表了开始着手一项加工时的安全加工条件。这种数据一般是在较低的切削用量条件下保证较长的刀具寿命。这种数据实际上是以车间成熟的实践为基础的。

为了取得较好的加工数据，就需要进行可加工性的试验，以便评定切削切削条件与刀具寿命、表面光洁度和机床功率的关系。

3.2 可加工性的试验程序

选择适合的加工条件所要求的主要数据是刀具寿命、表面光洁度、机床的功率以及切削力。所提供的条件（如切削速度、走刀量和切削深度）与刀具寿命的关系是切削加工因素中最重要和最难预测的。根据所提供的参数，到现在为止还不能科学的方法预测出刀具的寿命，因此可以得出适用的刀具寿命数据的最好办法就是进行刀具寿命试验。进行试验的一种好办法是在走刀量不变的条件下确定出刀具寿命与切削速度的关系。在进行刀具寿命试验时，对刀具的后面磨损定期进行观察，并将磨损作为时间函数记录下来。然后把刀具寿命定成某一具体寿命极限值上的磨损。常用的刀具寿命极限值随刀具和加工的不同而有差异(图 3)。(图 4)所示，是在高速和低速条件下车削时的后面磨损与切削时间对比的典型关系曲线。切削速度非常高时，很快就出现刀具后面的磨损，而且不久就严重地磨损坏。在切削速度低时，刀具后面磨损出现得较慢。除后面磨损外，大多数加工中刀具都会出现月牙洼(图 2)。也可以测量月牙洼的宽度和深度。但是，我们发现后面磨损更能实际地说明刀具寿命。除了均匀的磨损外，刀具的后面也会出现局部磨损。正如图8中可以看到的一样，局部磨损大小也是确定刀具寿命极限的一个因素。可根据均匀的磨损值或最大磨损值选定刀具寿命极限点。

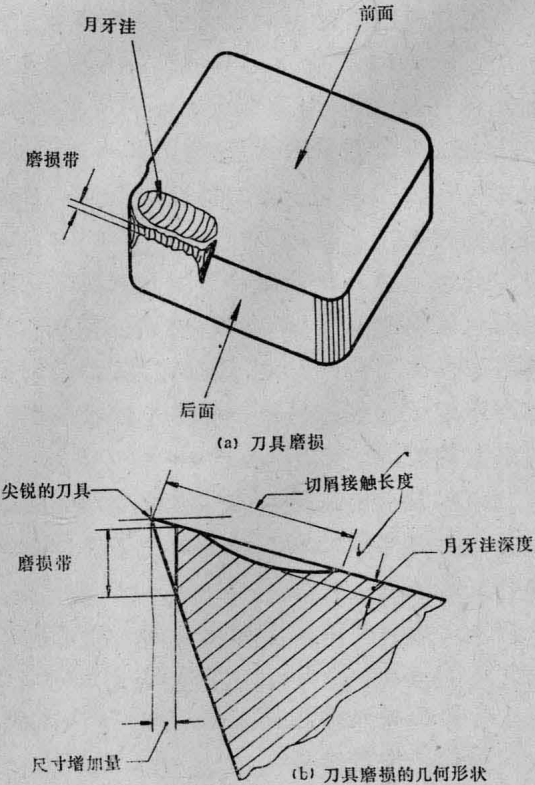


图 2

刀具寿命极限值

加工类型车削	工件材料	后面磨损宽度 (英寸)	
		平均磨损	局部最大磨损
车削	高速钢 硬质合金	.060 .015	.060 .030
		.060 .015	.060 .030
端铣	“	.012 .012	.020 .020
		.012 .012	.020 .020
立铣刀铣槽	“	.015 .015	.015 .015
		.006 .006	.006 .006
立铣刀铣周边	“	.006 .006	.006 .006
		.006 .006	.006 .006
攻丝	高速钢	过端—不过端量规	丝锥断裂

算术平均不平面度—— R_a , AA 或 CLA (算术平均高度)

距离中心线的算术平均偏差为:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{X=0}^{X=L} |y| dx$$

式中、 R_a = 距离中心线的算术平均偏差,

y = 轮廓曲线的纵坐标。

L = 取样长度

表面粗糙度峰谷间最大高度—— R_{max} 或 R_{tc}

也就是在粗糙度取样长度内, 与轮廓最高点和最低点相接触的两条中线平行线之间的距离。

3.3 金属切削时的刀具磨损

刀具的损坏可以按照成刀具损坏过程而分类。这就是:

1. 使刀具寿命突然过早地告终的刀具损坏。

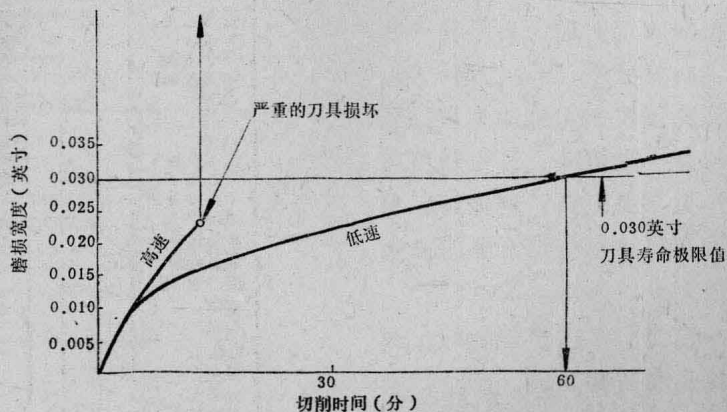


图4. 磨损宽度与切削时间关系曲线图

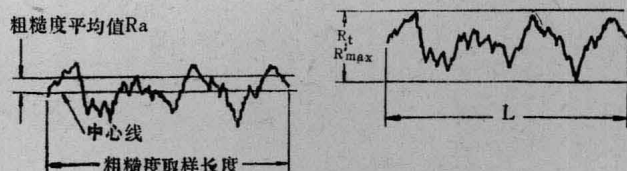


图5. 表面粗糙度的参数

2.在刀具的后面或前面逐步增大的磨损，即后面或前面磨损。

见附录B 关于刀具磨损的概要。

3.4 表面光洁度

加工过程有两个方面可确定表面光洁度或表面粗糙度。第一个方面是几何粗糙度，这就是刀具在加工表面时所形成的几何形状。这种粗糙度一般是由刀具的形状及每转走刀量（或每齿走刀量）来确定。实际的粗糙度通常比几何粗糙度差些，因为在切削过程中，刀具上会产生积屑瘤。切削加工过程中的振动或颤振还会使表面光洁度降低。表面形成光洁度或表面粗糙度可以用轮廓仪测量，如Profilometer或Tally Surf（均为仪器的商业名称——译注）。标注表面粗糙度的一般方法是用算术平均值RA。（图5）。用一些带测头的量仪可以测出表面的峰——谷高度值Rt以及其他的特性。对大多数切削加工来说，峰——谷高度值与算术平均值的比率一般为4：1。不同的切削加工会加工出不同的特性表面粗糙度，图6。几何表面粗糙度代表了切削加工中能测出的最小粗糙度。该粗糙度可以作为刀尖圆弧、副偏角、每转走刀量或每齿走刀量的函数而预先予以测出，图7及图8。已制订出了车削和铣削加工的几何表面粗糙度表。图9及图10。可以看出：当刀具的刀尖圆弧半径减小，或者走刀量变大时，表面粗糙度就会很差。

图6. 采用一般加工法加工出的表面粗糙度

粗糙度平均值Ra—微米 μm （微英寸 μin ）		50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.012
加工方法		2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0.5
火焰切割														
荒磨														
锯切														
刨削														
钻削														
化学铣削														
电火花加工														
铣削														
拉削														
铰削														
电子束加工														
激光加工														
电化学加工														
镗削														
车削														
滚桶抛光														
电解磨削														
滚子挤压														
磨削														
珩磨														
电抛光														
抛光														
研磨														
超精加工														
砂型铸造														
热轧														
锻造														
金属模铸造														
熔模铸造														
挤压加工														
冷轧														
冷拉														
压铸														

上述粗糙度平均值的范围均为表中所示各种加工的典型范围 ■ 一般用途
在特殊条件下得出的数值可能较大或较小 ▨ 较少的用途

采用一般加工法加工出的表面粗糙度

图7. 经车削的表面

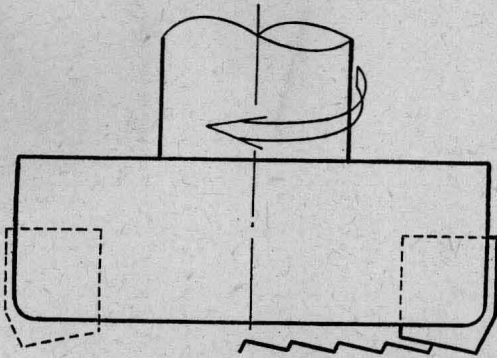
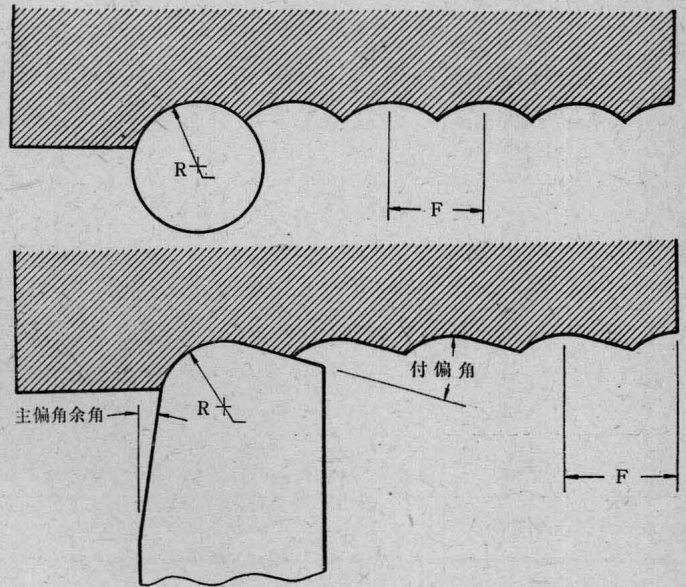
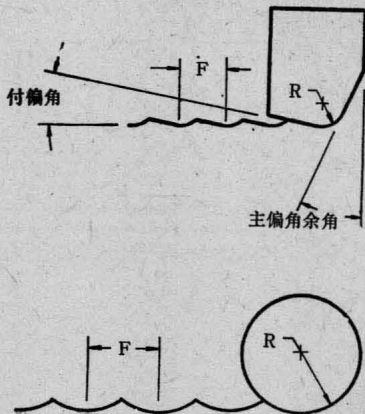


图8. 经端铣的表面



车 削 的 几 何 表 面 粗 糙 度			
刀尖圆弧半径 (英寸)	副 偏 角 (度)	走 刀 量 (英寸/转)	微 英 寸 (RA)
•031	6	•001	1
•031	6	•002	4
•031	6	•005	26
•031	6	•010	100
•031	6	0•15	193
•031	6	•020	293
0•31	6	•030	505

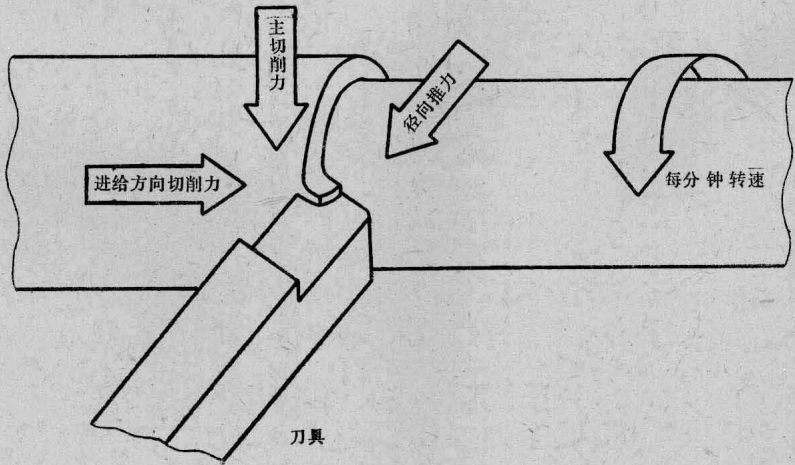
图 9

车 削 的 表 几 何 粗 糙 度			
刀尖圆弧半径 (英寸)	副 偏 角 (度)	走 刀 量 (英寸/转)	微 英 寸) (RA)
•015	9	•005	50
		•013	200
•030	6	•007	50
		•015	200
•062	6	•010	50
		•020	200
0•250	园形刀片	•020	50
		•040	200

图 10

3.5 切削力和功率

图11. 车削时的切削力



切削加工中的切削力可以用一台刀具测力仪测定。在车削加工时，测力仪一般是测量三个分力，即主切削力、径向推力及走刀方向的力（图11）。主切削力乘以切削速度后决定了切削加工所要求的功率，因此主切削力很重要。径向推力能确定工件上的加工精度。表1所示为几种工件材料切削分力的典型表格。

此外，在铣床工作台上安装一台测力仪也能测定铣削时的切削力。在钻削和攻丝时，采用一台适用的测力仪也能测定轴向力和扭矩。

采用测出机床驱动电机输入功率的办法，可以求出车削和铣削加工所需功率的近似值。检测出机床输出功率对输入功率的比率，就能更精确地确定机床主轴所需要的功率。检测时，用Prony制动器可以平衡主轴上的功率。表2内所列为各种不同的加工条件下，提供计算功率和扭矩的方程式。

大多数工序的功率可以从表3的单位功率中近似地计算获得，主轴上的功率可以由单位功乘以金属切除率得到（表2）。

表1、车削力*

每英寸深度的切削力（磅）								
工件材料 及其硬度	刀具前角	进给量 (英寸/转)	主偏角余角：0°+			主偏角余角：30°+		
			Ft ⁺	Fr ⁺	Ff ⁺	Ft ⁺	Fr ⁺	Ff ⁺
钢 HB135—200	+5°~+10°	•005	1853	541	1116	1928	588	1244
		•010	3062	725	1324	3196	788	1476
		•020	5060	970	1570	5265	1055	1750
		•030	6790	1150	1736	7064	1250	1934
钢 HB200—325	+5°~+10°	•005	1942	497	1183	2015	529	1313
		•010	3256	738	1429	3373	785	1587
		•020	5460	1095	1727	5662	1165	1918
		•030	7396	1380	1930	7662	1467	2142
	-5°~-10°	•005	2192	1040	1842	2285	1117	2038
		•010	3592	1478	2268	3748	1587	2503
		•020	5885	2100	2778	6134	2254	3075
		•030	7857	2578	3134	8188	2767	3468
铸铁 HB200—260	+5°~+10°	•005	1636	474	1097	1692	486	1180
		•010	2790	833	1546	2976	856	1662
		•020	4727	1466	2180	4880	1506	2344
		•030	6447	2040	2665	6663	2096	2866

* 每1英寸深度切削力的近似值（磅）。将所列的数值乘以切削深度（单位：英寸），可得出切削力。

⁺Ft = 切向力或主切削力。

Fr = 径向力

Ft = 进给方向的力。

表2. 切削加工时, 功率及切削力的要求
用于车削、铣削、钻削及拉削的车间用公式

	车 削	铣 削	钻 削	拉 削
切削速度 (英尺/分)	$V_c = 0.262 \times D_t \times \text{RPM}$	$V_c = 0.262 \times D_m \times \text{RPM}$	$V_c = 0.262 \times D_d \times \text{RPM}$	V_c
每分钟 转 数	$\text{RPM} = 3.82 \times \frac{V_c}{D_t}$	$\text{RPM} = 3.82 \times \frac{V_c}{D_m}$	$\text{RPM} \times 3.8 \times \frac{V_c}{D_d}$	—
每分进给量 (英尺/分)	$f_m = f_r \times \text{RPM}$	$f_m = f_t \times n \times \text{RPM}$	$f_m = f_r \times \text{RPM}$	—
每齿进给量 (英寸)	—	$f_t = \frac{f_m}{n \times \text{RPM}}$	—	f_t
切削时间 (分钟)	$t = \frac{L}{f_m}$	$t = \frac{L}{f_m}$	$t = \frac{L}{f_m}$	$t = \frac{L}{12V_c}$
金属切除率 (立方英寸/分钟)	$Q = 12 \times d \times f_r \times V_c$	$Q = W \times d \times f_m$	$Q = \frac{\pi D^2 d}{4} \times f_m$	$Q = 12 \times W \times d \times V_c$
主轴所需功率	$\text{HP}_s = Q \times P$	$\text{HP}_s = Q \times P$	$\text{HP}_s = Q \times P$	—
电机所需功率	$\text{HP}_m = \frac{Q \times P}{E}$	$\text{HP}_m = \frac{Q \times P}{E}$	$\text{HP}_m = \frac{Q \times P}{E}$	$\text{HP}_m = \frac{Q \times P}{E}$
主轴扭矩	$T_s = \frac{63030 \text{HP}_s}{\text{RPM}}$	$T_s = \frac{63030 \text{HP}_s}{\text{RPM}}$	$T_s = \frac{63030 \text{HP}_s}{\text{RPM}}$	—

符 号

D_t = 车削时的工件直径、英寸

D_m = 铣刀直径, 英寸

D_d = 钻头直径, 英寸

d = 切削深度, 英寸

d_1 = 拉削单行程总深度, 英寸

E = 主轴驱动效率

f_m = 每分进给量, 英寸/分

f_r = 每转进给量, 英寸/转

f_t = 每齿进给量, 英寸/齿

HP_m = 电动机功率, 马力

HP_s = 主轴功率, 马力

L = 切削长度、英寸

n = 铣齿数

* P = 单位功率, 力马/立方英寸/分钟

Q = 金属切除率, 立方英寸/分钟

RPM = 工件或铣刀每分钟转数

T_s = 主轴扭矩, 英寸磅

t = 切削时间, 分钟

V_c = 切削速度, 英尺/分

W = 切削宽度, 英寸

* 用于车削, 铣削及钻削, 见图7.9、用于拉削, 见图7.10

表 3、切削加工时，功率及切削力的要求
车削、钻削及铣削时的平均单位功率
马力/立方英寸/分钟

工 件 材 料	布 氏 硬 度	单 位 功 率 * (马 力 / 立 方 英 寸 / 分 钟)					
		车削Pt高速钢及 硬质合金刀具进给 量为0.005~0.015 英寸/转		钻削Pd高速钢 钻头进给量为 0.002~0.008 英寸/转		铣削Pm高速钢 及硬质合金刀 具每齿进给量为 0.005~0.012英寸	
		锋 利 的 刀 具	钝 的 刀 具	锋 利 的 刀 具	钝 的 刀 具	锋 利 的 刀 具	钝 的 刀 具
锻钢及铸钢 普通碳钢 合金钢 工具钢	85—200	1.1	1.4	1.0	1.1	1.1	1.4
	HRc35—40	1.4	1.7	1.4	1.7	1.5	1.9
	HRc40—50	1.5	1.9	1.7	2.1	1.8	2.2
	HRc50—55	2.0	2.5	2.1	2.6	2.1	2.6
	HRc55—58	3.4	4.2	2.6	3.2**	2.6	3.2
铸铁：灰铸铁、高强 度铸铁及可锻铸钢	110—190	0.7	0.9	1.0	1.2	0.6	0.8
	190—320	1.4	1.7	1.6	2.0	1.1	1.4
锻造及铸造的不锈钢： 铁素体，奥氏体及马氏 体的	135—275	1.3	1.6	1.1	1.4	1.4	1.7
	HRc30—45	1.4	1.7	1.2	1.5	1.5	1.9
弥散硬化不锈钢	150—450	1.4	1.7	1.2	1.5	1.5	1.9
钛	250—375	1.2	1.5	1.1	1.4	1.1	1.4
耐热合金：镍—钴基	200—360	2.5	3.1	2.0	2.5	2.0	2.5
铁基耐热合金	180—320	1.6	2.0	1.2	1.5	1.6	2.0
抗高温合金：钨	321	2.8	3.5	2.6	3.3**	2.9	3.6
钼	229	2.0	2.5	1.6	2.0	1.6	2.0
铌	217	1.7	2.1	1.4	1.7	1.5	1.9
钽	210	2.8	3.5	2.1	2.6	2.0	2.5
镍合金	80—360	2.0	2.5	1.8	2.2	1.9	2.4
铝合金	30—150 500公斤	0.25	0.3	0.16	0.2	0.32	0.4
镁合金	40—90 500公斤	0.10	0.2	0.16	0.2	0.16	0.2
紫 铜	HR _B 80	1.0	1.2	0.9	1.1	1.0	1.2
铜合金	HR _B 10—80	0.64	0.8	0.48	0.6	0.64	0.8
	HR _B 80—100	1.0	1.2	0.8	1.0	1.0	1.2

*主轴驱动电机的功率要求，已修正适用于80%的主轴传动效率。 **硬质合金

3.6 刀具寿命特性

图12所示为刀具寿命与切削速度的典型曲线图。在直角座标线上作图时，可以看出：高速时刀具寿命很低；在速度降低时，刀具寿命就迅速提高。向工厂推荐的切速，一般都是能提供相当长的刀具寿命的切削速度，即从20分钟到几小时。将相同的刀具寿命和切削速度的数据绘制在对数座标纸上时，得到的往往是一条直线。若出现了这样的一条直线，那它就能够应用简单的泰勒刀具寿命公式用数学来表示这个数据。泰勒方程式 $VT^n = C$ ，

式中 V 为切削速度， T 为刀具寿命， n 为对数座标纸上曲线的斜率， C 为刀具寿命为1分钟时的切削速度。图13所示为切削速度不变时刀具寿命与进给量之间的关系。应该注意到，刀具寿命一般是随着进给量增大而提高，达到高峰后就开始下降。当然，最好能得出在任意切削速度和进给量条件下的刀具寿命，这是能办到的，但却是一种既费时又费钱的办法。在加工大多数工件材料时，是能够确定令人满意的切速和进给量的，办法是在规定的进给量条件下先改变切速进行一组简化了的切削试验，然后在获得较高刀具寿命的切削条件下进行进给量试验。若需要进行更广泛的试验时，最好象下面将谈到的那样，进行用统计法所设计的试验，以便将试验次数减少到最低程度。

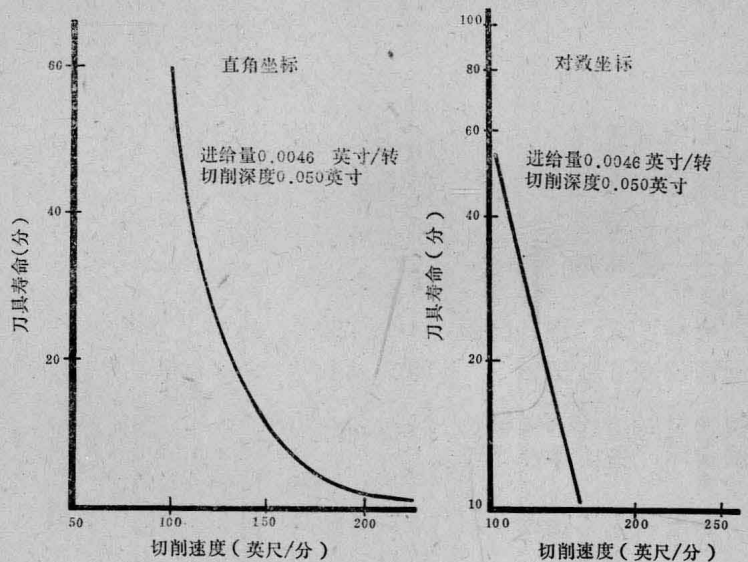


图12. 用高速钢刀具加工合钢金时的刀具寿命与切削速度的关系图

3.7 可加工性试验的试验设计及模型

将原始的可加工性数据缩减成能说明可加工性性能的可靠的数学方程式是非常有用的。如果有了刀具寿命的数学模型，切削力、功率和表面光洁度就允许在未经试验的条件下预测出这些特性曲线。作经济分析和求最佳参数也都必须有数学模型，它又可

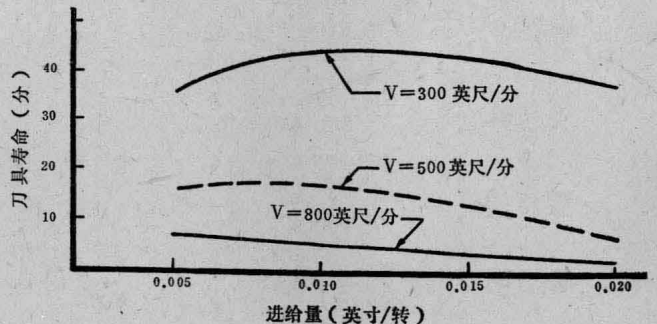


图13. 采用C-6硬质合金刀具车削AISI8640190号钢(布氏硬度190)时，切削速度及进给量对刀具寿命的综合影响

以用于计算机辅助加工编制程序。在为了研究数学模型而进行可加工性试验时，有两方面需要谈谈：即试验设计以及模型选择和拟合。

3.7.1 试验设计

试验设计技术是要编制出程序，在这个程序里全部独立的可变参数是同时进行研究，而不是对每一个可变参数一次一个地进行研究。用统计法设计的试验对金属切削行业来说是较新的，但在减少大量试验次数提高试验的效率，以及有具体的目标（即预测、对比两个分量等）可加工性试验程序上，显示了巨大的潜力。下述试验设计已显示出对可加工性试验是很适用的：

- (i) 因子设计
- (ii) 中心组合设计
- (iii) D最优设计

因子式设计对于范围比较窄的独立可变参量的一般试验来说是有用的；对于目的辨别几个重要变量而涉及很多自变量的初步试验来说，也是有用的。对二水平因子设计来说，每个数值大（十）和数值小（一）的独立的试验可变量都有规定。将各个可变量的高数值和低数值全部组合，就可以得出一个全因子试验计划。对于部份因子设计来说，规定有全设计的子集（Subset）。例如，涉及到切速（V）、进给量（f）和切削深度（d）的刀具寿命试验就要求下述8次试验：

试	验	V	F	d
1		100	•010	•060
2		200	•010	•060
3		100	•020	•060
4		200	•020	•060
5		100	•010	•125
6		200	•010	•125
7		100	•020	•125
8		200	•020	•125

图14说明了这种三个变量的全因子设计表示成立方体的情况。可能的部份因子设计可以进行第2、3、、5、8次试验。图14内加有园圈的试验说明了这种部份因子设计。

当研究需要一个模型形式的宽范围自变量时，中心组合设计是很有用的。中心组合设计是将附加的试验点加到因子设计上。图15表明了二个量变的中心组合设计。注意，组成正方形的四个点就是两个变量的全因子设计。现已加上了一个中点和四个“米字形”点。包括了范围较宽的变量，并对各个变量的附加水平（在此情况下为五水平）进行了试验，这样就可

以推算出模型的二次项。采用中心组合设计的一般程序是先进行因子设计,并拟合一个一阶模型,这时如果这个模型不够用,就找出几个附加的试验点,并拟合一个更高阶的模型。

图 14

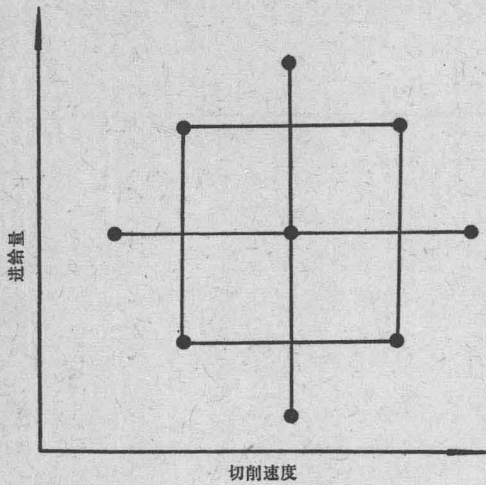
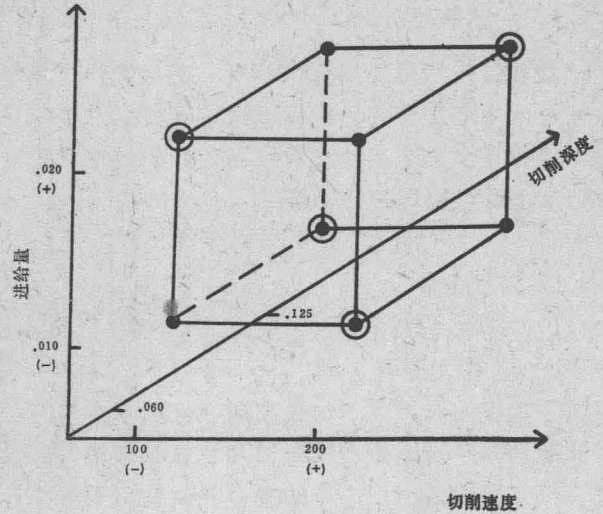


图 15

在下述情况下, D最优设计很有用: 即1) 已知正确的模型形式时; 2) 要进行试验的绝对次数最小时; 3) 限制试验布局的各种不同加工制约条件已知时; 4) 试验的主要目的是要发展一种可预测性最好(最小方差)的模型。D——最优设计试验的主要优点在于可将为了得出可预测性较好的模型而要求进行的试验次数大大减少(经常可减少40~50%)。D——最优设计是在试验时进行的, 而因子设计和中心组合设计则都是固定的试验设计(即这些试验是在计划试验前确定的)。

D——最优设计的程序是: 1) 进行一组初步的小试验, 如因子设计或部份因子设计; 2) 在试验结果的基础上提出模型, 并选出能将该模型改进得更完善的下一次试验(D——最优设