

内 容 简 介

本书较详细地介绍了各种特殊的现代加工方法，这些方法已经在工业上逐步得到采用。

本书共分四章，主要内容包括：超声波加工、磨料射流机械加工、水射流机械加工、电化学和化学的金属切除方法、电火花加工、等离子电弧加工、电子束加工、中子刻蚀加工、激光束加

本书可供机械制造专业的大、专院校师生、研究及生产部门的工程技术人员参考。

Modern Machining Processes

P.C. Pandey

H.S. Shan

McGRAW-HILL 1980年

*

现 代 加 工 方 法

[印度] P.C. 潘 戴 著
H.S. 沙 恩

董梅萼 译

吴天林 校

责任编辑 张赞宏

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

昌平展望印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 7 165千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷 印数：0,001—4,600册

统一书号：15031·3060 定价：1.45元

目 录

符号表	1
第一章 现代加工方法: 总 论	10
加工方法的选择	11
第二章 机械的加工方法	17
超声波加工	17
磨料射流机械加工	57
水射流机械加工	65
第三章 电化学的和化学的金属切除方法	74
电化学加工	74
电化学磨削	104
电化学去毛刺	107
电化学珩磨	108
化学加工	109
第四章 金属的热切除方法	114
电火花加工	114
等离子弧加工	148
电子束加工	174
中子刻蚀加工	185
激光束加工	186
高温机械加工	192
参考文献	198

符 号 表

第二章

- a 振幅 (m)
 α_1 工具端部矩形断面集中器的厚度 (m)
 α 任何截面上矩形断面集中器的厚度 (m)
 α_0 换能器端部矩形断面的厚度 (m)
 b 伯格矢量
 b_0 矩形断面集中器的宽度 (均匀的) (m)
 c 浓度系数 $\left(\frac{\text{磨料的质量}}{\text{磨料载体的质量}} \right)$
 d 磨粒的尺寸 (m); 或在任意距离 x 处圆形工具的直径 (m)
 d_0 圆形空心工具的外径 (m)
 d_1 圆形空心工具的内径 (m)
 f 振动频率 (Hz)
 f_0 临界频率 (Hz)
 h 穿透入工件的深度 (m)
 h' 穿透入工具的深度 (m)
 h $h + h'$ (m)
 i $\frac{S_0}{S_r}$ 比
 j $\frac{H_w}{H_i}$ 比
 l 集中器的长度 (m)

l_1, l_2 取决于磨粒的大小以及工具和工件材料硬度的参数

m $\frac{1}{\text{泊松比}}$

n $\frac{2l}{\lambda}$

p 磨料射流压力(N/m²)

p' 大气压力(N/m²)

q 工件硬化容量

r 圆形工具的半径(m)

t 任一瞬时

u 集中器上粒子的速度(m/s)

u_0 集中器端面的振动速度(m/s)

v 在磁致伸缩的材料中的声速(m/s)

x 工具—工件间的间隙或任意距离(m)

x_n 振动节点的坐标(图2.4)(m)

y 工具的位移(m)

y' 速度(m/s)

A 磨粒的投影面积(m²)

B $C \left[1 - \left(\frac{\beta C}{\omega} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$

C 在集中器材料中的声速(m/s)

C' $C \cdot B$

D 集中器在任意距离 x 处的直径(m)

D_1 集中器在工具端点处的直径(m)

D_0 集中器在换能器端点处的直径(m)

E 材料的杨氏模数(Pa)●

$\bar{F}$ 平均静力(N)

● 按我国国标GB3100-82的规定,改用Pa为单位。——译者

F 、 P	力(N)
$F(t)$	在任一瞬间的作用力(N)
G	材料的抗剪弹性模量(Pa)
H_a	磨料的硬度
H_t	工具材料的硬度
H_w	工件材料的硬度
ϵ 、 K	K_0 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 常数
K	概率因子
K	集中系数, 或变换比
L	孔距(m)
M	磨料和运载气体的体积比
N	同时切削的磨粒数
S	集中器在距离 x 处的横截面积 (m^2)
S_1	集中器在工具端部处的横截面积 (m^2)
S_0	集中器端部的横截面积 (m^2)
S_r	磁致伸缩器的放射表面积 (m^2)
T	循环时间(s)
ΔT	短暂的时间间隔(s)
V 、 Q	材料的体积切除速率(m^3/s)
V_c	每循环切除材料的体积 (m^3)
V_g	每磨粒切除材料的体积 (m^3)
V'	悬浮液的体积 (m^3)
Z	磨粒的尺寸(m)
Z_m	磨粒的最大尺寸(m)
Z	磨粒的平均尺寸(m)
β	半圆锥指数
θ_s	磨料切除材料的体积和穿透深度相关联的函数关系

λ	波长
λ_0	$\lambda(1 + \phi)$
ξ	塑性流动应力(Pa)
ρ	材料的密度(kg/m ³)
ρ_a	磨料的密度(kg/m ³)
σ	作用应力(Pa)
σ_m	最大作用应力(Pa)
σ_y	材料的屈服应力(Pa)
σ	工件表面上的应力(Pa)
σ'	工具表面上的应力(Pa)
ϕ	系数
ϕ_z	表示磨粒上的力和穿透深度相关的函数关系
ψ_z	磨粒尺寸的分布函数
ω	角速度, $2\pi f$

第三章

f	进给速率(m/s)
f_p	最大的允许进给(m/s)
h	工具—工件间隙(最小)(m)
j	x, y, z 变量
m	工件材料的质量(kg)
m_e	经过间隙的电解液质量(kg)
n	工件材料的原子价
q	电解液的体积流量(m ³ /s)
s	比金属切除速率(m ³ /A·s)
t	通电时间(s)
A	工具的横断面积(m ²)
A_0	电流通道的面积(m ²)
C	电解液的比热(cal·k/kg)

E	电位(V)
H	m_e kg 电解液从开氏温度 T_i 升高到 T_b 所需的热量(cal)
I	电流(A)
I_p	最大允许电流(A)
L	在进给方向的工具—工件间隙(m)
N	工件材料的原子量
P	H 的当量功(W)
R	电阻(Ω)
S	电流密度(A/m ²)
T_b	电解液的沸点(K)
T_i	电解液的入口温度(K)
ΔT	在工具—工件间隙的入口和出口处电解液的温差(K)
V_e	经过间隙的电解液体积(m ³)
α, γ	角度($^\circ$)
δ	表示增量的前缀
η	电流效率
ρ	工件材料的密度(kg/m ³)
ρ_e	电解液的密度(kg/m ³)
ρ_s	电解液的比电阻($\Omega \cdot m$)

第四章

a	分子反应的表面积(m ²)
a_0	一个分子的表面积(m ²)
b	$\frac{1}{\lambda}$
d	在工具—工件两个电极间的间隙(m)

e	电子电荷量
f	充电频率 (Hz)
f_e	电子压力 (Pa)
f_h	熔融表面所产生的液体静压力 (Pa)
f_s	单位长度表面张力所产生的力 (N/m)
f'	每单位面积的净热流率 (cal/m ²)
g	重力加速度 (m/s ²)
h	加工的内腔或弧坑的深度 (m)
h'	式4.44中的常数
i	电流密度 (A/m ²)
i_c	充电电流 (A)
i_d	放电电流 (A)
K	波兹曼常数
e	式4.44中的常数
m	指数
m_e	电子质量 (kg)
m_g	气体的分子的质量 (kg)
m_1	每单位平面面积所切除材料的质量 (kg/m ²)
m_0	每单位表面积每单位时间所切除材料的质量 (kg/(m·s))
m_p	质子质量 (kg)
n	指数
n_e	每单位面积每单位时间的电子数 (1/m ² ·s)
n_0	每单位面积每单位时间的分子数 (1/m ² ·s)
n'	每单位面积每单位时间离开膜表面的原子数 (1/(m ² ·s))
p	蚀刻压力 (Pa)
p_a	汽化原子的背压力 (Pa)

r	加工的孔或内腔的半径 (m)
s	材料的热导率 ($W/(m \cdot K)$)
t	时间 (s)
t'	电容器充电时间 (s)
v_a	原子速度 (m/s)
v_{ab}	稳定的消融速度 (m/s)
v_e	电子速度 (m/s)
x	任意距离 (m)
A	表面积 (m^2)
C	电容 (F)
C_p	材料的比热 ($J/(kg \cdot K)$)
E	每个火花能量 (J)
F_a	阳极功函数
F_{bp}	由背压力产生的力 (N)
F_c	阴极功函数
F_e	由电子轰击而产生的力 (N)
F_h	由液体静压力所产生的力 (N)
F_s	由表面张力所产生的力 (N)
H	在室温下汽化材料的总热量 (J/kg)
H_{cta}	表面粗糙度的中心线平均值 (μm)
H_f	熔化热 (J/kg)
H_v	汽化热 (J/kg)
I	电流 (A)
$K, K', K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$	$A, \bar{B}$ 常数
L	放电电路的当量电感 (H) ●
M	原子量

● 原文中 L 单位为 Ω ，应改为 H 。——译者

$$M_r \bullet \frac{M_w}{M_T^2}$$

M_T	工具电极材料的熔点(K)
M_w, T_m	工件材料的熔化温度(K)
N_0	在表面上未反应过的分子数
N_1	在表面上已反应过的分子数
O	过度切削(m)
P	汽化材料的功率(J/S)
Q	包含在工件材料里的热量(J)
R	电阻(Ω)
R_f	膜层表面的生长速率(m^2/s)
R_i	工具电极上的平均金属切除率($m^3/(A \cdot S)$)
T	温度(K)
T_b	材料的汽化温度(K)
T_i	材料的初始温度(K)
T_m	工件材料的熔化温度(K)
u	加速电压(V)
U_b	击穿电压(V)
U_o	产生火花的一瞬间电容器的电压(V)
U_s	电源电压(V)
V	材料的容积切除速率(m^3/s)
V_o	阴极电压降
V_1	每次放电所切除的体积(m^3)
V_m	一个分子的体积(m^3)
W	汽化材料的单位能量(J/ m^3)
W_R	磨损比(工件/工具)

- X 轰击原子数
 X_0 定义在式4.48●中的特征深度
 Y 由电化学反应除去的表面原子数
 α 圆锥角 ($^\circ$)
 β 材料的热扩散率
 η 工作效率或切削效率
 θ, Ψ 在式4.45中的原子类
 λ 电子的平均自由程
 ρ 工件材料的密度 (Kg/m^3)
 τ 一个未反应过的分子在表面上停留的平均时间
 (s)

● 原文为式4.49, 应改为式4.48。——译者

第一章 现代加工方法：总论

在最近二十年内，在发展坚硬而又难加工的金属和合金方面，已有了快速的增长。用普通刀刃的刀具来加工这样的材料是不经济的，而且所得到的精度和表面粗糙度不好。若加工工艺没有相应的改进，提高强度将使总的机械加工费用增加（图 1.1）。鉴于这个问题的严重性，在1960年，麦钱特(Merchant)强调金属机械加工方面需要发展更新的概念，靠采用联合程序并利用基本而实用的研究结果，现在已经能加工以前被认为在正常条件下不能加工的某些材料，这样发展起来的那些更新的机械加工方法，常称为“现代加工方法”或“特种加工方法”。所谓特种加工，在某种意义上说，即不使用普通刀具来切削金属，而是直接利用能量来进行加工。

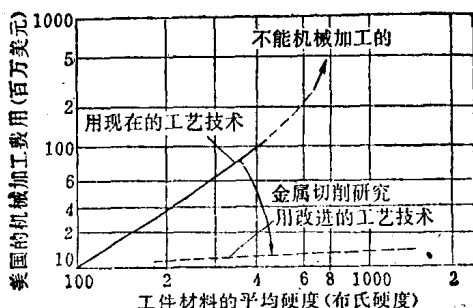


图 1.1 在美国工件材料强度对国家
标准机加工费用的影响 (1)

现代加工方法，根据使用能量的基本类型进行分类，例如，有机械的、电化学的、化学的或热电的。根据使用能量的

类型、金属切除机理、能源要求等，表 1.1 列出机械加工方法的分类。

表 1.1 现代加工方法的分类

能量类型	金属切除机理	传递介质	能源	方 法
机械能	腐蚀	高速粒子	风动/液压	磨料射流加工 超声波加工 水射流加工
	剪切	直接接触	切削工具	普通机械加工
电化学能	离子转移	电介质	大电流	电化学加工 电化学磨削
化学能	烧蚀定律	易反应的周围介质	腐蚀剂	化学加工
热电能	熔化	高温气体	游离材料	离子束加工 等离子电弧加工
	气化	电子 放射线	高 压 加强光	电火花加工 激光加工
		离子流	游离金属	等离子电弧加工

加工方法的选择

为了更有利的利用现代加工方法，必须知道加工问题的确切性质，这就是：(i) 这些方法不能取代一般的机械加工方法；(ii) 在一定条件下适用的特种机械加工方法，在其它条件下不

表 1.2 现代加工方法的物理参数

参数	超声加工	磨料射流加工	电化学加工	化学加工	电火花加工	电子束加工	激光加工	等离子电弧加工
电位(V)	220	220	10	—	45	150000	4500	100
电流(A)	12 (交流)	1.0	10000 (直流)	—	50 (脉动直流)	0.001 (脉动直流)	$\frac{2}{200}$ (平均峰值为200)	500 (直流)
功率(W)	2400	220	100000	—	2700	150 (平均峰值为200)	—	50000
间隙 (mm)	0.25	0.75	0.20	—	0.025	100	150	7.5
介质	磨料在水中	磨料在气体中	电解液	化学液体	不导电的液体	真空	空气	氢或氦

表 1.3 现代加工方法送用的形状

加工方法	孔				直通型腔		面		直通切割								
	精密的小孔			标准的		精密的	标准的	复式轮廓	旋转表面	浅的	深的						
	直径 ＜0.25mm	直径 ＞0.25mm	长度 ＜20直径	长度 ＞20直径	长度 ＞20直径												
超声波加工	—	—	—	好	不好	好	好	不好	—	不好	—						
磨料射流加工	—	—	—	尚好	不好	不好	尚好	—	—	好	—						
电化学加工	—	—	—	好	好	尚好	好	好	尚好	好	好						
化学加工	尚好	尚好	—	—	—	不好	尚好	—	—	好	—						
电火花加工	—	—	—	好	尚好	好	好	尚好	—	不好	—						
激光加工	好	好	—	尚好	不好	不好	不好	—	—	好	尚好						
等离子电弧加工	—	—	—	尚好	—	不好	不好	—	不好	好	好						

一定同样适用。所以，对一个给定的机械加工问题，恰当地选择加工方法是很重要的。

在选择使用的方法之前，必须考虑下列几个方面：

- (i) 物理参数；
- (ii) 工件材料的性质和加工的形状；
- (iii) 生产能力；
- (iv) 经济问题。

当比较现代机械加工方法的物理参数时（表 1.2）应注意到，电火花加工和超声波加工方法两者需要的功率大致相同，而电化学加工消耗的功率，约比电火花加工多 40 倍。从表 1.3 中可以看到，虽然电化学加工消耗的功率比较多，但它在钻长径比大于 20 的细长孔时，是一种极好的方法。

适用于各种机械加工方法的材料，简要地表示在表 1.4 中。从表可以看到，不导电的材料，对电化学加工和电火花加工两者都不适用，而用机械的加工方法，均能达到预期的效果。

现代机械加工方法的生产能力，已在表 1.5 中进行了比较。要注意，虽然电化学加工与磨料射流加工或超声波加工相

表 1.4 材料的适用性

加工方法	材 料							
	铝	钢	超级合金	钛	耐火材料	塑料	陶瓷	玻璃
超声波加工	不好	尚好	不好	尚好	好	尚好	好	好
磨料射流加工	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好	好	好
电化学加工	尚好	好	好	尚好	尚好	不能用	不能用	不能用
化学加工	好	好	尚好	尚好	不好	不好	不好	尚好
电火花加工	尚好	好	好	好	好	不能用	不能用	不能用
电子束加工	尚好	尚好	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好
激光加工	尚好	尚好	尚好	尚好	不好	尚好	好	尚好
等离子电弧加工	好	好	好	尚好	不好	不好	不能用	不能用

比较,可得到极好的表面粗糙度,但它可能导致大的表面损伤。电化学加工的另外一个优点是工具磨损比很低(见表1.6),但它有某些相当严重的问题,如电解液的污染和腐蚀机械零件。

表 1.5 生产能力

加工方法	金属切除速率 (mm^3/min)	公差 (μm)	表面粗糙度 (算术平均值 μm)	表面损伤深度 (μm)	圆角半径 (mm)
超声波加工	300	7.5	0.2~0.5	25	0.025
磨料射流加工	0.80	50	0.5~1.2	2.5	0.100
电化学加工	01500	50	0.1~2.5	5.0	0.025
化学加工	15.0	50	0.4~2.5	50	0.125
电火花加工	800	15	0.2~12.5	125	0.025
电子束加工	1.6	25	0.4~2.5	250	2.5
激光加工	0.1	25	0.4~1.25	125	2.5
等离子电弧加工	75000	125	粗 糙	500	—
钢的逆铣	50000	50	0.4~0.5	25	0.050

表 1.6 对设备和工具的影响

加工方法	工具磨损比	加工介质的污染	安全性	毒性
超声波加工	10	一般问题	无问题	无问题
磨料射流加工	—	一般问题	一般问题	无问题
电化学加工	0	关键问题	一般问题	无问题
电火花加工	6.6	一般问题	一般问题	一般问题
电子束加工	—	一般问题	一般问题	无问题
激光加工	—	无问题	一般问题	无问题
等离子电弧加工	—	无问题	无问题	无问题

注:工具磨损比=切除工件材料的体积/消耗掉的工具电极体积。