

电解研磨精密加工

陈守春

(上海科技大学, 上海 201800)

摘要 电解研磨精密加工方法是把电解加工和研磨加工结合起来, 利用中性电解液, 通以适当的电流密度, 在磨料研磨和电解溶解共同作用下, 对零件进行快速、高效的精密加工, 使表面粗糙度可达到 $R_a 0.01-0.02\mu\text{m}$ 。这种加工方法适于一般碳钢, 不锈钢, 钛合金钢等零件的精密加工。

本文阐述电解溶解和磨料研磨结合精密加工的效果, 表面粗糙度形成机理和实验结果。

关键词: 电解研磨; 精密加工; 表面粗糙度; 电流密度

1 概述

电解研磨精密加工, 是把电解加工和研磨加工结合起来, 对零件表面进行精密加工的一种方法。其加工原理如图 1(a) 所示。是加工系统原理图 1(b) 为研磨头结构原理图。

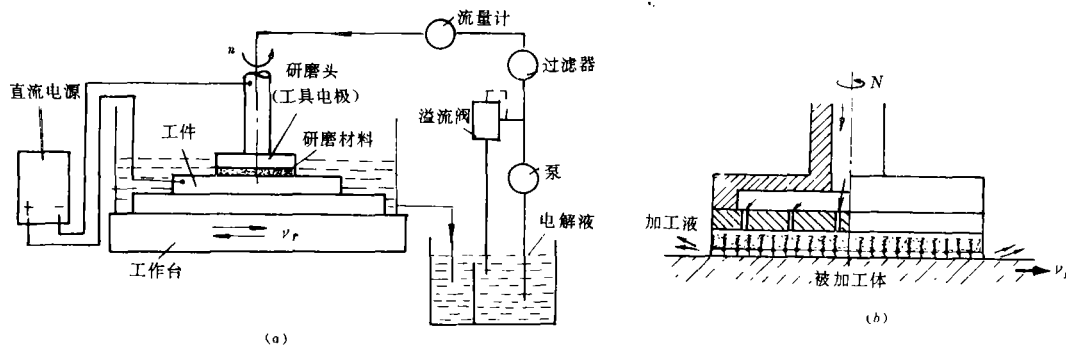


图 1

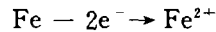
从图 1(a) 可以看出, 电解液由泵经过滤器过滤, 由流量计控制压力和流量, 经研磨头(工具电极)喷向加工表面, 由直流电源通电进行电解研磨加工, 电解液经回流管流回电解液槽。研磨头以一定转速 n 旋转, 工作台带动工件作进给运动 V_f 。图 1(b) 表示研磨头的结构原理, 电解液从中间通过, 研磨头粘上一层有弹性的, 多孔能透过电解液的, 上面粘有磨料微粒的研磨材料。加工时, 工件接正极, 研磨头接负极, 使工件表面电解而溶去金属, 研磨头旋转和工件往复

进给运动,使整个表面得到加工。

2 电解研磨精密加工机理

2.1 电解加工机理

电解加工如图 2 所示,被加工工件放在 20%NaNO₃ 溶液中,电解液 NaNO₃ 溶液中有 Na⁺、NO₃⁻ 以及少量的 H⁺、OH⁻ 离子。当工件和电极接通电源时,溶液中的 Na⁺、H⁺ 离子移向电极,而 NO₃⁻、OH⁻ 离子移向工件表面,使工件表面处负离子浓度增加,在工件表面发生如下反应:



NO₃⁻ 离子较稳定,小电流的情况下不会失电子。OH⁻ 离子稳定性较差,易失电子放出 O₂ ↑,但溶液中 OH⁻ 离子的浓度较低,可不必考虑。

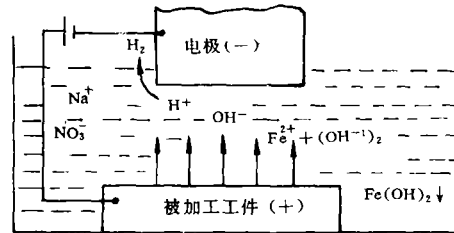
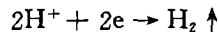


图 2

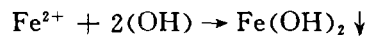
电极表面发生如下反应:

Na⁺ 离子较稳定,不易得电子还原;

H⁺ 离子不稳定,易得电子还原。



电解液中发生如下反应:



以上反应继续进行,被加工工件表面不断以离子为单元溶解,如果使电极(研磨头)在被加工工件表面上作 x 、 y 方向移动,则电解在整个工件表面上进行,达到了对工件表面加工的目的。

电解反应时,溶去金属量,依据法拉第定律,有下列关系:

$$W = KI t \tag{1}$$

式中: W —单位面积溶去金属量(mg/cm^2);

I —电流密度(A/cm^2);

t —电解反应时间(s);

K —被加工材料的电化学当量。

电解加工时,阴极表面生成的氢气不断逸入空气中,工件表面生成的氢氧化物 $[\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、

Cu(OH)₂、Al(OH)₃ 等视被加工材料而定]都不溶或微溶于水,呈胶体状沉积在工件表面上。这些生成物的电阻较大,如一道屏障阻碍着电解的进行。随着电解的继续进行,这些生成物沉积层越来越厚,电流越来越小,工件表面离子溶解越来越困难,金属溶解量也就越来越小。电解时溶去的实际量值如以下关系:

$$W' = \eta KI t \quad (2)$$

式中 η —电流效率。

$$\eta = \frac{\text{实际金属溶解量 } W'}{\text{按(1)式计算的金属溶解量 } W}$$

图 3 是用 20% NaNO₃ 溶液电解 45# 钢时的关系特性曲线。

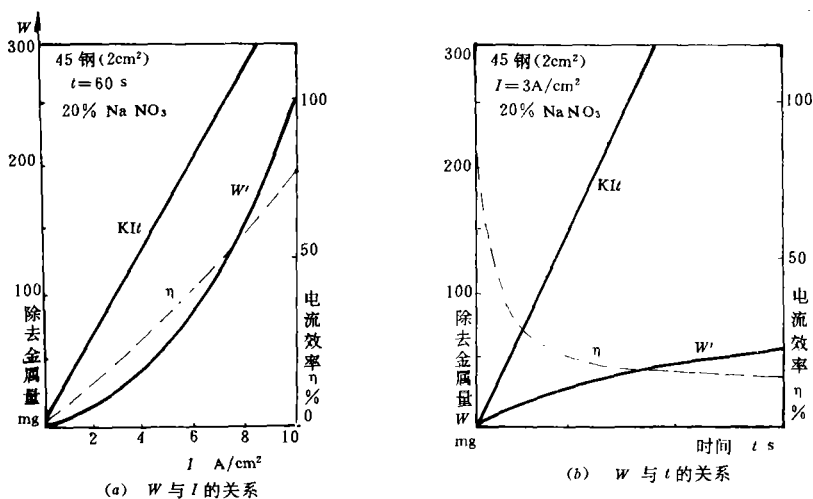


图 3

从图 3(a)可见,当电流密度小时,随着电流密度的增大,溶去金属量缓慢上升,当电流密度增大到一定值后,溶去金属量急剧上升,这是因为在电解过程中钝化膜的影响。

图 3(b)中当电流密度一定后,随着时间的增加,溶去金属量越来越少,这是由于电解生成物的沉积层越来越厚和钝化膜的影响有关。

2.2 钝化膜的形成及作用

当使用钝化型电解液时,电解过程中,阳极(工件)表面由于电流作用产生一层氧化膜,称为钝化膜,其厚度约为几十 Å,其基本形态如图 4 所示。在被电解的工件表面上,除了电解生成物沉积层外,还生成 Fe₂O₃ 钝化膜。两者共同作用影响金属溶去量。电解生产物成胶体状的沉积层容易被液体冲洗,而钝化膜与基体结合牢度大,不能用液体冲走,一定要用切削方法去除。

2.3 研磨加工机理

电解研磨精密加工用的研磨材料与普通研磨材料不一样,是把磨料粘结在具有弹性、能透水的基体上,对工件表面进行研磨。因此它与普通的研磨机理有许多不同之处。

- ①由于研磨材料有弹性,可以在工件表面以很小的加工压力进行高速研磨加工;
- ②研磨材料有大量气孔,在电解液冲洗下,排屑容易,大量电解液起到冷却作用;
- ③磨料弹性刮擦和切削,使工件表面粗糙度不断均化,缩小,机床本身误差不会影响工件,因而对机床的精度要求不高;
- ④研磨头高速转动增加电解液的冲洗效果,使加工效率大为提高。

2.4 电解研磨精密加工机理

电解研磨精密加工,是用特殊的研磨材料,把电解加工和研磨加工有机的结合起来,利用电解加工的高效率和研磨加工的高精度,研磨加工促使电解加工保持高效率。

电解研磨精密加工机理如图 5 所示。采用钝化型电解液 20%NaNO₃ 溶液。电解反应作用使工件表面溶出一定的金属后,产生钝化膜,阻止阳极工件进一步溶解。当研磨材料对工件表面研磨时,磨粒对工件表面进行切削加工,磨粒的轨迹如图 5 中虚线所示。因此工件微观表面上各峰点的钝化膜被磨去露出金属基体,各个底处的钝化膜仍然保留着。被除去钝化膜的各峰点又产生新的阳极溶解,形成新的钝化膜,循环交替,使微观表面上峰点的高度越来越低,直到整个表面磨平,均化,达到小的粗糙度的光洁表面。

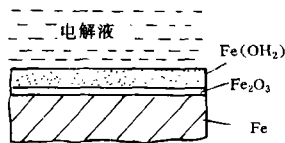


图 4

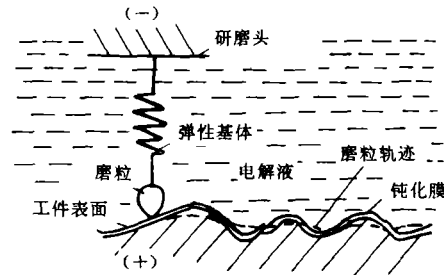


图 5

电解研磨精密加工开始时,微观表面高低不平。电解时,电流分布不均匀,凸起处电流大,金属溶解量大,凹下的地方电流小,溶去金属量少,起到均化工件表面微观不平度的作用,随着粗糙度减小,电流分布逐渐均匀。

电解研磨精密加工的压力很小,几乎所有金属除去都是由电解溶解而完成。电解生成物又呈胶体状,排除容易,不会划伤表面。只要改变电流密度,改变研磨材料的粒度,很容易把粗糙的表面加工成粗糙度很小的镜面,工序少,操作简单,容易。

3 精密表面的形成机理

(1)电解研磨精密加工时,如果最终的表面是由电解溶解得到,此时表面粗糙度取决于材料本身的特性。因为溶解是以离子为单元溶出,在工件表面上必然留下离子为溶出后形成的空穴。如图 6(a)所示即为电解溶解时留下的工件表面形貌特征。

(2)电解研磨精密加工时,随着表面均化,使电流逐步减小,最后使电流密度 $I=0$,再继续用超细磨料研磨而得到最终的表面。此时,表面粗糙度由磨料磨粒磨削的痕迹来决定。由于电解研磨时,磨料粘结在富有弹性且多气孔的基体上。其加工痕迹由磨料最外一圈上的磨粒所决定,设最外一圈只有一颗磨粒,则得到的轨迹如图 7 所示。其轨迹间的距离可由图 8 进行计算。

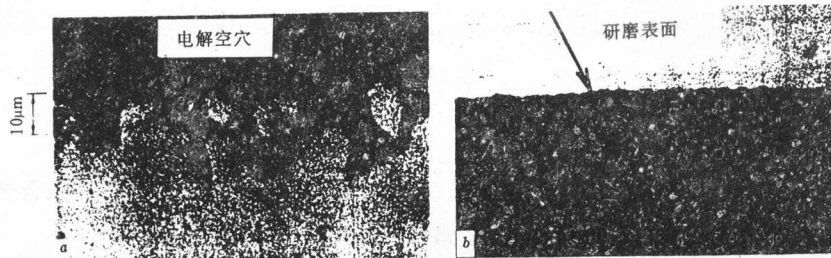


图 6

轨迹方程为 $(x - v_f t)^2 + y^2 = r^2$ (3)

式中: v_f —进给速度, (mm/min)

t —时间; (min)

研磨头每转进给量 $f = v_f / n$ (4)

式中: f —每转进给量; (mm/r)

n —研磨头转速; (r/min)

两条轨迹间的距离为 $\Delta f = f \cdot \cos(\sin^{-1} \frac{y}{r}) - r + [f^2 \cdot \cos^2(\sin^{-1} \frac{y}{r}) - f^2 + r^2]^{\frac{1}{2}}$ (5)

当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\Delta f_{\max} = f$

单颗磨粒作用时, 加工表面的理论粗糙度 R_z 就等于磨粒的切削深度 h 。

切削深度 h 与磨粒的压强 p , 材料硬度 H_v 有如下关系:

$$h = K \sqrt{\frac{p \cdot \cos(\theta/2)}{H_v \cdot \pi \cdot \tan(\theta/2)}} \quad (6)$$

式中: H_v —工件表面维氏硬度;

θ —磨粒的顶锥角。

图 9(a) 为单一磨粒加工时加工面沿进给运动 x 轴方向的截面形状。

$$x = 2h \cdot \tan \theta / 2 \quad (7)$$

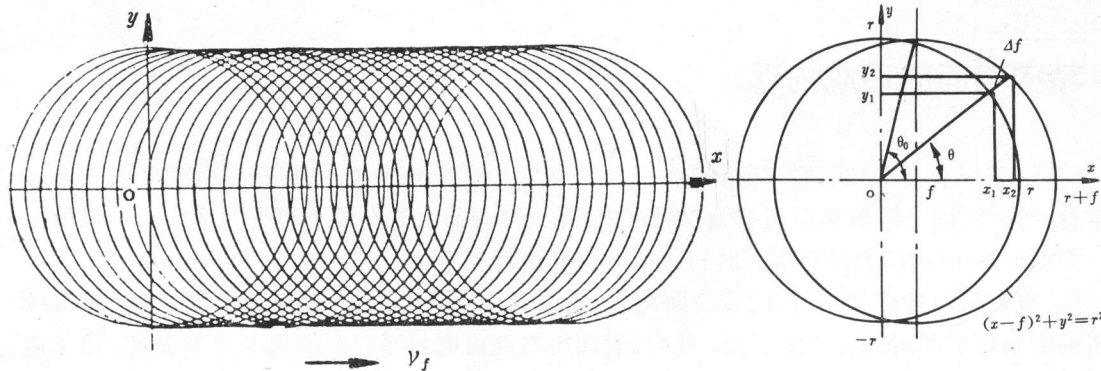


图 7

图 8

实际加工时, 磨料最外一圈上有许多磨粒, 因此其表面由许多磨粒共同切削而成图 9(b)。设磨料最外一圈上有磨粒数为 m , 且均匀分布, 则:

$$\Delta f_{\max} = f/m \quad (8)$$

当 $\Delta f > x$ 时, $R_z = h$,

当 $\Delta f < x$ 时, 轨迹相互干涉, 如图 9(b) 所示, 则

$$R_z = \frac{1}{2} \Delta f \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{1}{2} \frac{v_f}{m \cdot n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

当 $\theta = 150^\circ$ 时

$$R_z = \frac{v_f}{2nm} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = 0.13 \frac{v_f}{n \cdot m} \quad (10)$$

式中: v_f —研磨头进给速度; (mm/min)

n —研磨头转速; (r/min)

m —研磨头磨料最外一圈磨粒数。

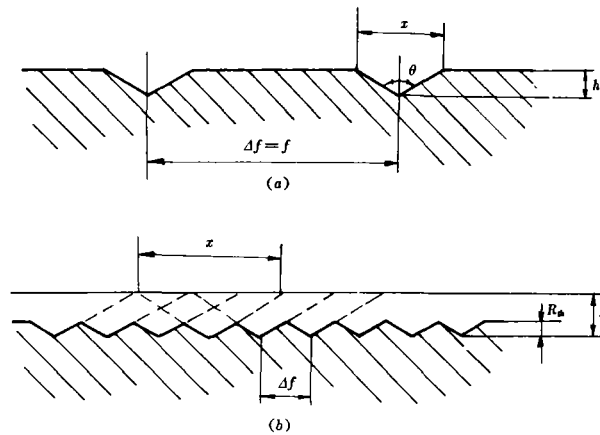


图 9

由式(10)可知, 为了得到高的表面质量, 减小表面粗糙度 R_z , 必须减小进给速度, 提高转速, 减小磨粒尺寸, 增加磨粒数 m 。

4 实验结果分析

用图 1 所示设备实验, 实验过程, 参数和结果如下:

第一种情况: 转速 n 与表面粗糙度关系:

实验条件: 被加工材料—45# 钢, 研磨前表面粗糙度 $R_a = 0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 电解液—20% NaNO₃, 研磨材料—320# SiC, 压强 $p = 5 \times 10^4 \text{Pa}$, $v_f = 50 \text{mm/min}$ 。

研磨过程:

$I = 0.2 \text{A/cm}^2$, 往返磨研二次;

$I = 0.1 \text{A/cm}^2$, 往返磨研二次;

$I = 0$, 往返研磨二次。

利用不同的转速 n , 得到的粗糙度如表 1

表 1 转速与表面粗糙度关系表

$n(r/min)$	$R_z(\mu m)$	相当的表面光洁度
166	0.5~0.8	▽10
484	0.200~0.205	▽11
610	0.100~0.103	▽12
1165	0.064~0.073	▽13
1779	0.03~0.05	▽14a

第二种情况:磨料粒度与表面粗糙度关系:

实验条件:被加工材料—45#钢,研磨前表面粗糙度 $R_a=0.08\mu m$,电解液—20%NaNO₃,
压强 $p=5\times 10^4 Pa$, $v_f=50mm/min$, $n=1779r/min$

研磨过程:

$I=0.01A/cm^2$,往返研磨二次;

$I=0.05A/cm^2$,往返研磨二次;

$I=0$,往返研磨二次。

当利用不同粒度磨料研磨时,得到数值如表 2。

表 2 磨料粒度与粗糙度关系

粒 度	$R_z \mu m$	相当的表面光洁度
320#	0.03~0.05	▽14b
800#	0.03~0.04	▽14a
1500#	0.01~0.03	▽14c

第三种情况:用低粗糙度表面直接加工成镜面的加工过程和参数控制如下:

被加工材料 45#钢,加工前表面粗糙度 $P_s=3.2\mu m(\nabla 5)$,

① $n=484r/min$, $v_f=300mm/min$,320# SiC 磨料, $p=1.7\times 10^5 Pa$,5%NaCl 溶液, $I=1A/cm^2$,除去深度 $20\mu m$ 达到 $R_z=2-3\mu m$

(2)20%NaNO₃ 溶液 $n=484r/min$, $v_f=100mm/min$,320# SiC 磨料, $I=0.1A/cm^2$, $p=5\times 10^4 Pa$,往返研磨 3 次除去深度约 $3\mu m$,达 $R_z=0.2\sim 0.4\mu m$ 。

(3)20%NaNO₃ 溶液, $n=1165r/min$, $v_f=50mm/min$, $p=5\times 10^4 Pa$,800# Al₂O₃ 磨料, $I=0.2A/cm^2$ 往返研磨二次, $I=0.07A/cm^2$,往返研磨二次, $I=0$ 往返研磨 2 次,得到 $R_z=0.05\mu m$ 。

(4)20%NaNO₃ 溶液, $n=1779r/min$, $v_f=50mm/min$,1500# Al₂O₃ 磨料, $I=0.2A/cm^2$, $p=5\times 10^4 Pa$,往返研磨二次, $I=0.07A/cm^2$,往返研磨二次, $I=0$, $p=3\times 10^4 Pa$,往返研磨 2 次,达到表面粗糙度 $R_z<0.02\mu m$ 。

从以上实验结果可以看出,只要采用合适的工艺参数可以把工件表面加工成镜面,可以从粗糙度较大的工件表面加工成镜面,也可以把比较粗糙的表面加工成镜面。被加工材料非常广泛,只要能导电的都可用电解研磨方法加工。

Electrolytic—abrasive Mirror—finishing

Chen Shouchun

(Shanghai University of Science & Technology, Shanghai 201800)

Abstract

Using the electrolytic—abrasive mirror—finishing method, large workpieces of ordinary steel and hard process material, for example, stainless and titanium alloy steel, can be easily mirror—finished in a short time and with high efficiency, resulting in a surface roughness of up to $R_a 0.01—0.02\mu\text{m}$. This method is based on the fact that the electrolytic effect is assisted by the removal action of abrasive grains within an appropriate current density range by the use of neutral salt—type electrolytes.

This paper clarifies the combined effects of the electrolytic dissolution and polishing action of abrasives. It also describes analysis of the surface roughness formation mechanism and the experimental results.

Key words: Electrolytic—abrasive, Mirror—finish, Surface roughness, Current density