



电 解 磨 削

集 训 编

58

國 防 工 業 出 版 社

电 解 磨 削

〈集 训〉 编

國 防 工 業 出 版 社

内 容 简 介

本书是生产实践中的经验总结，主要介绍了硬质合金工具的电解磨削工艺。全书共分四章，分别叙述了电解磨削的原理、电解液的选择、绝缘保护和导电磨轮的制造。同时介绍了外圆、内圆、平面、刀具、成型零件等的电解磨削工艺以及机床改装。

本书可供电解磨削操作工人和工程技术人员阅读，也可供有关高等院校师生参考。

电 解 磨 削

*

<集 训> 编

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张3¹/₈ 77千字

1972年10月第一版 1972年10月第一次印刷

统一书号：15034·1133 定价：0.34元

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地
建设社会主义。

坚持政治挂帅，加强党的领导，大
搞群众运动，实行两参一改三结合，大
搞技术革新和技术革命。

什么工作都要搞群众运动，没有群
众运动是不行的。

目 录

第一章 电解磨削原理	7
§1 概述	7
§2 电化学反应过程	8
2-1 阳极电化学反应	8
2-2 阳极钝化反应	9
2-3 阴极电化学反应	10
§3 电流效率的测定及其实际应用	10
§4 提高生产率的途径	13
4-1 提高电流密度	13
4-2 增大磨轮（阴极）与工件间的导电面积	15
§5 影响加工精度的因素	15
5-1 电解液	15
5-2 阴极导电面积	16
5-3 磨轮精度	16
5-4 被加工材料的性质	17
5-5 机床和工夹具精度	17
§6 影响表面光洁度的因素	17
6-1 电解因素	17
6-2 机械因素	19
6-3 材料性质	20
第二章 电解磨削中使用的电解液及非加工面的保护	21
§1 电解液	21
1-1 选用电解液的原则	21
1-2 几种电解液的配方及其使用情况	22
1-3 几种电解质作用的分析	24
1-4 电解液的过滤	26

§2 非加工面的保护	27
2-1 环氧树脂保护法	28
2-2 聚苯乙烯保护法	31
2-3 聚氯乙烯保护法	32
2-4 鍍镍保护法	32
2-5 机械保护法	33
第三章 导电磨轮的制造	34
§1 燒結式磨輪	34
1-1 燒結式磨輪的組成部分及其選擇	34
1-2 燒結式磨輪的制造过程	42
1-3 金剛石磨料的回收	54
§2 填充式磨輪	55
§3 鑲嵌式磨輪	57
§4 組合式磨輪	58
第四章 电解磨削机床的改装及工艺	59
§1 外圆磨床的改装及工艺	60
1-1 机床改装	61
1-2 磨削工艺	64
§2 内圆磨床的改装及工艺	67
2-1 机床改装	67
2-2 磨削工艺	69
§3 平面磨床的改装及工艺	71
3-1 机床改装	71
3-2 机床的絕緣及电解液的輸送	73
3-3 平面磨削中使用的夹具、磁力台的保护与修复	74
3-4 磨削工艺	75
§4 万能刃具磨床的改装与工艺	77
4-1 机床改装	77
4-2 磨削工艺	80
§5 成型零件的磨削	82
5-1 螺紋塞規的磨削	82
5-2 鋸齒型面的磨削	97
5-3 凸輪的磨削	98

第一章 电解磨削原理

§ 1 概 述

电解磨削的原理，如图 1-1 所示，磨削时，工件接直流电源的正极，导电磨轮接负极，磨轮上凸出的磨料使工件与磨轮的金属基体构成一定的间隙，并和工件保持一定的接触压力。当电解液输入极小的间隙 Δ 中并接通电源时，工件表面金属被电解，并在工件表面上形成一层氧化物薄膜，称它为阳极薄膜。由于这层薄膜具有很大的电阻，如不及时刮除，将使阳极溶解过程的电位升高或使这一过程减慢，这种阻碍或减慢阳极继续溶解的作用，称作钝化作用。起钝化作用的阳极薄膜，称作钝化膜。

为了使阳极（工件）继续电解，需用磨轮将钝化膜及时刮除，并随电解液冲走，使阳极表面重新活化。这样在电化学和机械的综合作用下，工件表面钝化—活化不断交替进行，工件连续被加工，直至达到一定的光洁度和精度为止。

中极法电解磨削的原理与上述相似，如图 1-2 所示，只是磨料与阴极是分开的。

电解磨削去除金属的总量中，大部分是由电化学作用去除的，只有少量是由机械磨削作用去除的。机械磨削作用主要是去除钝化膜，使电解过程正常进行；其次是磨去未被溶解的碳化物“骨架”，从

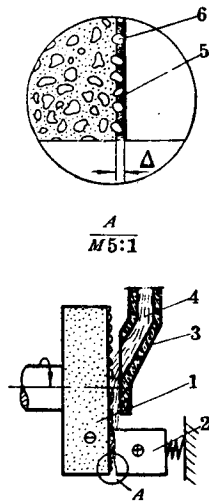


图 1-1 电解磨削示意图

- 1—导电磨轮； 2—工件；
- 3—喷嘴； 4—电解液；
- 5—氧化物； 6—磨料。

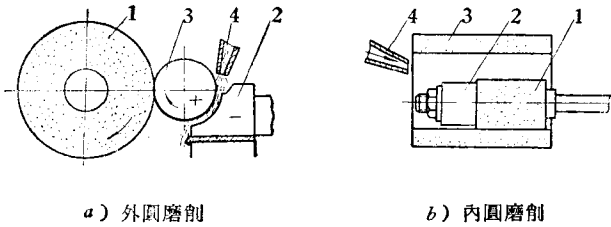


图1-2 中极法电解磨削

1—砂轮；2—阴极；3—工件；4—电解液喷嘴。

而提高表面光洁度。

由此可见，电解磨削就是利用电化学作用（电解作用）和机械磨削作用相结合去除金属材料的一种新工艺。

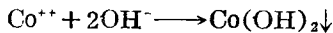
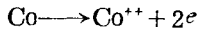
§ 2 电化学反应过程

电解磨削过程主要是阳极电化学反应过程。现以亚硝酸盐为主要成分的电解液加工 WC—Co、TiC—Co 系硬质合金为例，简单说明其电化学反应过程。

2-1 阳极电化学反应

一、钴的阳极氧化反应

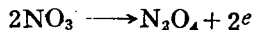
在中性或碱性介质中，钴首先被电离，产生的钴离子立即和介质中的氢氧根离子化合，生成溶解度极小的氢氧化钴：

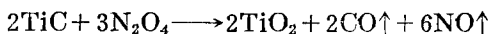


二、WC、TiC 的阳极氧化反应

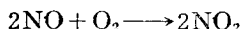
在以亚硝酸盐为主要成分的电解液中，WC、TiC 的阳极氧化，主要是由于具有强氧化性的 N_2O_4 氧化作用的结果。

其过程是亚硝酸根离子首先在阳极上氧化，并生成 N_2O_4 。 N_2O_4 再与 WC、TiC 作用，使之氧化。

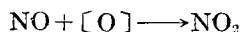




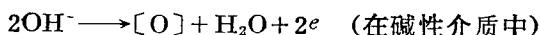
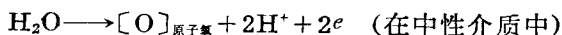
反应中产生的一氧化氮 (NO), 由于电极上氧或原子氧的作用, 立即被氧化为二氧化氮, 生成的二氧化氮一部分放出, 一部分溶于碱性溶液中, 再生成亚硝酸盐。



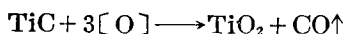
或



阳极上除了亚硝酸根离子被氧化外, 溶液中的水分子或氢氧根离子也可能在阳极上放电, 生成原子氧。



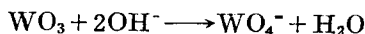
生成的原子氧, 一部分互相化合生成氧气而放出, 一部分吸附在活化金属的表面上, 使残留的碳化钨、碳化钛“骨架”发生氧化。



虽然阳极上产生的 N_2O_4 和原子氧, 都能使 WC、TiC 发生氧化, 但在亚硝酸盐为主要成分的电解中, 由计算可知, N_2O_4 的作用是主要的。

在生成高价氧化钨 (WO_3) 的同时, 也有一些低价氧化钨生成 (如 WO_2 , W_2O_5 等)。各种氧化钨生成的量, 在很大程度上取决于阳极氧化电位, 氧化电位愈高, 生成高价氧化物愈容易, 氧化电位愈低, 生成低价氧化物愈容易。

生成的 WO_3 在碱性溶液中, 将进一步发生化学溶解:

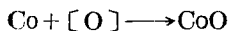
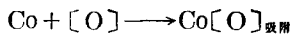


2-2 阳极钝化反应

电解磨削过程也是工件表面钝化—活化不断交替进行的过程。根据电化学反应理论, 钝化是由于吸附的或成相的氧化物层

或盐层在工件表面形成，而使金属的阳极溶解过程的电位升高或使这一过程减慢。

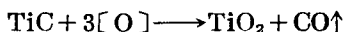
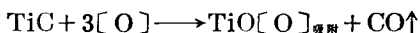
一、钴的钝化反应



二、钨的钝化反应

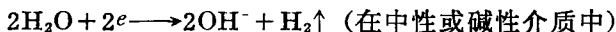


三、钛的钝化反应



2-3 阴极电化学反应

热力学数据和实验表明，阴极电化学反应主要是氢气的析出。



但是在某些情况下，也可能有其他副反应发生，如金属离子的还原或其氧化物的沉积等。

§3 电流效率的测定及其实际应用

在电解磨削这一电化学反应过程中，电极上反应产物的量与通过电极的电量在数量上仍然符合法拉第定律，即阳极(工件)上溶解物质的量 M 与通过电极的电量 Q 成正比：

$$M = KQ = KI t, \quad (1-1)$$

式中 M —— 电极上参与反应物质的量；

I —— 工作电流；

t —— 电解磨削时间；

K —— 反应物质的电化当量。

实际上，在电解磨削时，除阳极金属电化学反应外，还有某些同时发生的副反应以及在电极上形成的产物又转变成其他物质的次级反应，如气体的析出或溶解而生成新的物质等。因而实际

計算阳极金屬的磨除量时，需要引入一个校正系数 η ，这个校正系数称为电流效率

$$\eta = \frac{M_{\text{实际}}}{M_{\text{理论}}} \times 100\%, \quad (1-2)$$

式中 $M_{\text{实际}}$ ——实际的金属去除量；

$M_{\text{理论}}$ ——按法拉第定律計算的金属去除量。

在实际去除量中，因有机械磨削去除的部分，所以严格地说，这样計算电流效率的结果是不够确切的。但是为了方便，习惯上仍然称它为电流效率。于是，实际的金属去除量与电量的关系式为：

$$M_{\text{实际}} = \eta M_{\text{理论}} = \eta K I t。 \quad (1-2 a)$$

电流效率 η 近似值的测定方法是：磨削前用天平准确地称量試件的重量，然后进行磨削，记录电流和时间，磨完后称試件重量，按公式 (1-1) 計算出理論去除量，按公式 (1-2) 求出电流效率值。

电流效率一般低于 100%，如中极法磨外圆时，只有 70% 左右。但也有超过 100% 的情况，这是由于机械磨削作用或被加工材料中含有其他杂质，电解时自由脱落所引起的。

在电解磨削时，为了应用方便，将 (1-1) 式除以物质的比重，得出体积去除量的公式：

$$V_{\text{理论}} = \frac{M}{\gamma} = \frac{K}{\gamma} I t = \omega I t；$$

$$V_{\text{实际}} = \eta \omega I t, \quad (1-2 b)$$

式中 $V_{\text{理论}}$ ——去除物质的理論計算体积；

$V_{\text{实际}}$ ——实际去除物质的体积；

γ ——被加工物质的比重；

$\omega = \frac{K}{\gamma}$ ——去除物质的体积电化当量，

$$K = \frac{A}{nF}。$$

A ——元素的克原子量或物质的克分子量；

n ——元素的原子价或分子化合价；

F ——法拉第常数。

如果加工两种或两种以上的元素组成的合金，如 WC—Co 系，TiC—Co 系，这种多元系合金的电化当量按下式计算：

二元系合金

$$K = \frac{K_1 K_2}{p_2 K_1 + p_1 K_2};$$

多元系合金

$$K = \frac{K_1 K_2 K_3 \cdots K_n}{p_1 K_2 K_3 \cdots K_n + p_2 K_1 K_3 \cdots K_n + \cdots + p_n K_1 K_2 \cdots K_{n-2} K_{n-1}};$$

式中 $K_1, K_2, \dots, K_{n-2}, K_{n-1}, K_n$ ——分别为各元素的电化当量；

p_1, p_2, \dots, p_n ——分别为各元素在合金中的百分含量（重量比）。

电解磨削控制精度时，除了依靠操作者的实际经验外，有时还要用电流效率来计算时间以作参考。现举例说明如下。

设图 (1-3) 为光面塞规，材料为 YG8，从直径 $\phi 22$ 毫米，磨削至直径 $\phi 20$ 毫米，求所需加工的时间？

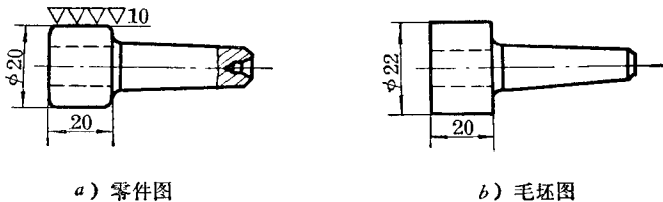


图1-3 光面塞规

已知 $\gamma = 14.5$ 克/厘米³， $I = 40$ 安，

$\eta = 70\%$ ， $F = 96500$ 。

Co: $A_1 = 59$ ， $n_1 = 2$ ， $p_1 = 8\%$ 。

WC: $A_2 = 196$ ， $n_2 = 8$ ， $p_2 = 92\%$ 。

解 由图可知，应磨去物质的体积为：

$$V = \pi L(R_1^2 - R_2^2) = 3.14 \times 20(11^2 - 10^2) = 1.32 \text{ 厘米}^3。$$

磨去物质的重量为:

$$M = V\gamma = 1.32 \times 14.5 = 19.14 \text{ 克}。$$

因为 $M = \eta K Q = \eta K I t,$

式中
$$K = \frac{K_1 K_2}{\rho_1 K_2 + \rho_2 K_1}$$

$$K_1 = \frac{A_1}{n_1 F} = \frac{59}{2 \times 96500} = 3.06 \times 10^{-4} \text{ 克/庫侖};$$

$$K_2 = \frac{A_2}{n_2 F} = \frac{196}{8 \times 96500} = 2.54 \times 10^{-4} \text{ 克/庫侖}。$$

則
$$K = \frac{3.06 \times 10^{-4} \times 2.54 \times 10^{-4}}{0.08 \times 2.54 \times 10^{-4} + 0.92 \times 3.06 \times 10^{-4}}$$

$$= 2.57 \times 10^{-4} \text{ 克/庫侖} = 0.926 \text{ 克/安培} \cdot \text{小时}。$$

所以
$$t = \frac{M}{\eta K I} = \frac{19.14}{0.70 \times 0.926 \times 40}$$

$$= 0.75 \text{ 小时} \approx 45 \text{ 分钟}。$$

§ 4 提高生产率的途径

4-1 提高电流密度

电流密度是影响生产率的主要因素。在一定的范围内，电流密度愈高，生产率就愈高。由法拉第定律 ($M = K I t$) 可知，阳极（工件）金属的去除量与电流强度成正比。因此，要提高生产率，应当适当的增大工作电流，即在一定范围内，尽可能地采用最大的电流密度。

电流密度的升高又依赖于工作电压、极间间隙和电解液的性能等，即

$$D = \frac{V}{\rho} \cdot \frac{1}{\Delta}, \quad (1-3)$$

式中 D ——电流密度;

V ——工作电压;

ρ —— 电解液的电阻率；

Δ —— 极間間隙。

从公式 (1-3) 可以看出, 要获得高电流密度, 可以通过以下途径:

一、升高工作电压

当电解液的电阻率和极間間隙为一定值时, 升高工作电压是提高电流密度的主要方法。电解磨削时, 在极間間隙較大的情况下, 适宜采用較高的工作电压, 如中极法磨外圓时, 由于极間間隙較大, 通常以升高电压的方法, 获得較高的电流密度, 以达到提高生产率的目的。

但是如果工作电压太高, 电流密度过大, 会因阳极副反应的增加而使生产率下降。甚至由于电压过高, 两极間产生火花放电, 使工件表面光洁度、精度显著下降。因此一般說来, 要获得高生产率, 应在两极間不产生电火花的情况下, 尽可能升高工作电压, 以得到較高的电流密度。

二、縮小极間間隙

当工作电压和电解液的性能不变时, 縮小极間間隙是减小电解液电阻, 提高电流密度的有效方法。因此, 在电解磨削过程中, 尽量采用最小的間隙, 以获得最高的电流密度。当然縮小間隙也不是无限制的, 而是由磨輪的結構和电解液的供給方式所决定的。通常以保証两极之間有足够的电解液为准, 极間間隙愈小愈好。如果极間間隙太小, 电解液不能充分輸入, 就不能充分发挥电解作用, 从而使生产率降低。这时如果还要减小, 就会产生严重的火花放电, 使工件表面质量恶化, 甚至产生裂紋。

三、减小电解液的电阻率

当工作电压和极間間隙为一定值时, 减小电解液的电阻率, 也可以提高电流密度。而电阻率的大小与电解液的成分、濃度和溫度等因素有关。强电解质电解液的电阻率較小, 弱电解质电解液的电阻率較大。如果要同时获得高生产率和良好的表面质量,

一般是选用较强电解质的电解液，如 NaNO_3 、 Na_2HPO_4 等水溶液。

4-2 增大磨輪（阴极）与工件間的导电面积

当电流密度一定时，通过的电量与导电面积成正比。阴极和工件的接触面积愈大，通过的电量就愈多，单位時間內金屬的去除率就愈大。实验表明，电解磨削的生产率与有效加工面积的平方根成正比，有效加工面积愈大，加工过程的稳定性愈高。因此为了提高生产率，在中极法磨削外圆时，尽量增加輔助阴极与工件間的相对面积。一般采用阴极面为工件圓周面积的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。用燒結式磨輪时，也应尽可能增加两极之間的导电面积，以达到提高生产率的目的。

此外，磨削压力、工作台走刀速度等，对生产率也有影响。在一定程度上，磨削压力愈大，工作台走刀速度愈快，阳极金屬被活化的程度愈高，这样就相应地提高了鈍化—活化交替进行的速率。但是压力也不能过大，否則磨料容易磨損或脫落，以至于使极間間隙接近于零，影响电解液的輸入，引起火花放电或发生短路現象，大大地降低生产率，甚至影响电解过程繼續进行。通常磨削压力采用 $1 \sim 3$ 公斤/厘米²。

§5 影响加工精度的因素

目前电解磨削的精度，在磨削外圆时，在最佳条件下可达到 $0.001 \sim 0.003$ 毫米，磨削平面时，通常在 $0.01 \sim 0.03$ 毫米之間。由此可见，电解磨削的精度是較高的，但是还不能与精密机械加工相比，尤其很难保証零件的棱边和尖角。现将影响电解磨削加工精度的主要因素作如下分析。

5-1 电解液

一、电解液的成分

硬质合金氧化后，生成低价氧化物的藍色鈍化膜，其結構紧密，电阻較大，具有良好的保护性能。高价氧化物为乳白色的鈍

化膜，其結構疏松，保护能力較差。要获得高精度的产品，在加工过程中，需要在工件表面不断生成一层結構紧密的保护性能良好的低价氧化物。鈍性电解液，由于氧化能力較差，低价氧化物在其中可以保持較长的時間，同时由于对阳极鈍化膜的溶解能力較差，鈍化膜也不容易受到破坏。如硼酸盐、磷酸盐等弱电解质的含氧酸盐的水溶液都是較好的鈍性电解液。

二、电解液的 pH 值

电解液的 pH 值是影响电解产物溶解度的重要因素。当加工硬质合金时，如果采用高 pH 值的电解液，則容易破坏阳极鈍化膜，因为硬质合金的氧化物，易溶于碱性溶液中。所以要得到較厚的阳极鈍化膜，不应采用高 pH 值的电解液，一般 $\text{pH}=7\sim 9$ 为宜。

5-2 阴极导电面积

电解磨削平面时，为了保持高的加工精度，常常采用增大阴极面积的方法，使工件往复移动时，阴阳极的相对导电面积不变，保証工件表面各处的加工速度相等。

如果阴极导电面积較小，磨輪必須从工件表面退出时，工件往复运动的退出或进給过程中，由于两极之間的接触面积逐渐减小或逐渐增加，引起电流密度相应的逐渐增加或逐渐减小，造成表面电解不均匀，出現两端低下，中間凸起的現象。

相反，如果工件不全部退出磨輪，由于工件中間部分比两端多一倍的电解時間，出現中間凹下，两端凸起的現象。

5-3 磨輪精度

磨輪精度直接影响着零件的加工精度，磨輪精度不高，要磨出高精度的加工表面是比較困难的，要想获得高的加工精度，一方面采用較硬的磨料，减少磨料的磨損，使磨輪精度保持較长的時間；另一方面应及时修整磨輪，保証精度。反接处理磨輪时，要求平整，否則极間間隙不均匀，影响加工精度。在中极法磨外圓时，应保持阴极的正确形状和安装正确，在成型磨削时，应首