

金属电解加工工艺

〔苏〕 E. M. 鲁米扬采夫 著
A. П. 达维多夫
刘友轩 译

国防工业出版社

前 言

这本教学参考书专门探讨了从电化学工艺和金属加工工艺派生的一门工艺——电解加工。

本书是在伊瓦诺沃化学工艺学院对“电化学加工工艺”专业的大学生讲课所用教材的基础上编写而成的。

书中既系统总结了作者的研究成果，又概括了国内外电解成形方面最新的科学技术成就。

并系统阐述了电解加工原理，论述和列举了设计典型零件加工工艺规程的实例。同时，从加工精度的观点出发，分析了各种成形方法，电解加工机床布局，及其结构特点和技术性能。探讨了电解加工机床和辅助设备工作区的规划方案。总结了实验材料电解加工对各种金属和合金的物理-机械性能及使用性能的影响。在附录中列举了不同用途的苏联机床和辅助设备的技术数据。

作者在这里谨向本书的审阅者——莫斯科包乌曼高等技术学校化学教研室主任 B. B. 弗罗洛夫教授和新切尔卡斯克工学院 Ю. H. 库迪莫夫副教授；向提供编写第二章第二节素材的华沙工业大学 E. 科扎克副教授；并向为本书出版准备工作给予很大帮助的伊瓦诺沃化学工艺学院电化学加工工艺教研室的同事 Г. П. 库久科娃，Т. Е. 马雷舍娃，Н. Ф. 贝契科娃，以及苏联科学院电化学研究所 A. H. 马洛费耶娃研究员，表示诚挚的感谢。

作者

译 序

苏联电解加工的试验研究始于 1928 年，是应用这门新工艺的最早国家之一。半个多世纪以来，在电解加工的科学实验和生产应用方面，积累了丰富的经验。对于金属电化学溶解机理，已有较充分的认识；对于电解加工对各种金属和合金的物理-机械性能的影响，进行了大量试验，作出了比较明确的结论；对于电解加工机床以及与之配套的各种辅助设备，初步实现了规格化和系列化，为应用和发展这门工艺提供了可靠的保证；在加工工艺方面，大量采用了脉冲电解加工和阴极振动的电解加工，甚至还采用了复合加工工艺。这些加工手段使加工间隙不断缩小，加工精度不断提高，从而扩大了电解加工的应用范围；在电解加工过程的控制、检测和短路保护，以及电解液过滤净化等方面，采取了大量措施，创制了很多仪器和装置，为保证电解加工过程的稳定进行，创造了必要的条件；对于电解加工工区的布局，设备的配置，电解加工工作区的环境卫生，工作人员的技术安全，以及电解泥的回收利用，电解加工应用效益的核算等方面，都有科学的设想，严格的要求和颇有见地的方法。

综上所述，我们在这本书中，虽还不能全面了解当前苏联整个电解加工的技术状况，但从字里行间可以看到，在苏联已经初步形成了一个完整的电解加工体系。

我国电解加工工艺正式应用于生产，是在 1958 年，经过三十年的探索和实践，已奠定了良好的基础，在很多企业中早就开花结果。在工艺应用，比如，身管膛线、叶片、花键、锻模、异形孔加工，以及异形零件套料等方面，具有独到之处，在目前生产中发挥着积极的作用。但是，在人员培训，理论研究，电解加工机床及其辅助设备的供应，以及检测手段等方面，尚不能满足

电解加工应用的需要，在相当程度上严重影响着这门新工艺的发展。

翻译这本书的目的，就是为了使我国从事电解加工专业的同行们了解国外这方面的科技动态，加以借鉴，开拓思路，以促进我国电解加工技术的发展，更好地为四化建设发挥应有的作用。

对于国外电解加工专业技术书，在我国还是第一次翻译出版。这本书的原著是由莫斯科高等学校出版社于1984年出版的，它是经苏联高等和中等专业教育部准许作为高等技术学校学生的教学参考书。

由于译者水平有限，难免有误，敬盼读者指正。

译者

1988年6月

目 录

主要符号	1
绪论	3
第一章 电解加工的电极过程	7
§ 1.1 金属高速阳极溶解的规律性	7
1.1.1 铁、镍及其合金的阳极性状特性	7
1.1.2 电解加工过程中阳极溶解的选择性	11
1.1.3 其它金属阳极溶解的规律性	15
1.1.4 金属阳极溶解选择性程度的定量评价	16
1.1.5 电解液 pH 值的影响	19
1.1.6 合金的阳极溶解	22
§ 1.2 阴极过程	27
§ 1.3 金属电解加工过程的测试方法	28
第二章 电解加工的电流效率和精度	36
§ 2.1 电解加工的电流效率	36
§ 2.2 零件电解加工的精度	38
2.2.1 电解加工的“理想过程”	39
2.2.2 电解加工过程非理想性的计算	45
§ 2.3 阴极复杂动力运动的电解成形	50
第三章 零件电解加工的工艺规程	57
§ 3.1 编制工艺规程的一般原则	57
§ 3.2 叶片电解加工工艺规程的特点	59
§ 3.3 锻模、压模型腔和其它腔室的电解加工	68
§ 3.4 玻璃模的电解加工	72
§ 3.5 复杂形状大型零件的电解加工	75
§ 3.6 电解去毛刺	79
第四章 复合加工工艺	85
§ 4.1 电蚀-电解加工法	85
§ 4.2 砂轮-电解磨	88

第五章	电解加工对金属机械性能的影响	93
§ 5.1	电解加工对热强钢和合金疲劳强度的影响	94
§ 5.2	电解加工对钛合金机械性能的影响	95
§ 5.3	电解加工对不锈钢和高强度钢机械性能的影响	97
§ 5.4	电解加工对低合金钢和结构钢机械性能的影响	98
§ 5.5	电解加工对铝合金机械性能的影响	99
第六章	机械零件电解加工的设备	102
§ 6.1	对电解加工设备的一般要求	102
§ 6.2	机床构件的刚性	105
§ 6.3	电解加工设备的规格化	108
§ 6.4	仿形-打孔电解加工机床的几种类型	111
§ 6.5	阴极的结构特点和制造方法	126
§ 6.6	电解加工机床工段的组织	134
§ 6.7	电解加工机床的电源	138
§ 6.8	电解加工机床的控制系统	142
第七章	零件电解加工应用效果的经济论证	153
附录 I		157
附录 II		161
参考文献		167

主要符号

- A ——金属相对原子量;
 a ——加工间隙;
 a_0 ——初始间隙 (电解加工开始前);
 a_r ——现行间隙 (加工开始后经时间 t);
 a_e ——平衡间隙;
 a_n ——在给定点上与阴极曲面相切的法向间隙;
 C ——电解液热容;
 E ——比较电极的电极电位;
 E_c ——电解液中金属固有电位;
 E_a ——阳极电位;
 E_c ——阴极电位;
 E_r ——阳极析气初始电位;
 $E^*(E_1^*, E_2^*)$ ——阳极-负离子活化电位;
 F ——法拉第常数 (等于 96487 C/mol);
 h ——电解加工余量;
 h_0 ——加工开始前的余量值;
 h_r ——加工开始后经时间 t 的余量值;
 I, i, i_c ——电流, 电流密度, 临界电流密度;
 K ——电化当量;
 S ——加工面积;
 T ——热力学温度;
 t ——时间;
 t_s ——加工时间;
 U ——电解池电极外加电压;
 U_{oh} ——电解液欧姆压降;

v_p ——被加工零件金属溶解速度；

v_s ——阴极进给速度；

v_x ——零件移动速度；

V_s ——电解液流量；

v_s ——加工间隙中电解液流速；

ε ——电解液气泡率；

η ——电流效率；

γ ——被加工材料密度；

κ ——加工间隙中介质电导率；

ρ ——电解液密度。

绪 论

苏联的科学和工业领域研究了大量方法和手段，从而保证着公差越来越严的零件制造、新型超硬材料的加工和劳动生产率的提高。

虽然近世纪来，由于采用了机械进给、自动仿形、程序控制以及刀具装卡自动化，大大缩短了机动和辅助时间。可是，另外一些变化往往使这些成就失去了意义。比如，工业常用材料的强度、硬度和韧度的提高，以及对零件加工粗糙度和精度要求的提高，就降低了加工过程的生产率。估计每 10 年降低切削速度约 10~25%。因为要减少这些或另一些零件的机械加工劳动量，只可能通过提高切削速度和进给速度的途径，所以就十分自然地企求其使用效率与被加工材料硬度和强度无关的那样一种去除余量的加工方法。

苏共第二十六次代表大会批准的 1981~1985 年以及到 1990 年期间苏联经济和社会发展的基本方针指出，在科学技术成就的基础上，必须“采用旨在从本质上改善性能的……，电化学、等离子、激光、辐射以及其它高生产率的，金属、材料和产品的加工方法。必须采取和实现降低机器、设备的单位金属用量的措施，以及依靠……用经济的零件成形方法来取代以金属切削为基础的工艺规程，从根本上减少金属制品的废料和损耗[●]”。

为此目的，采用了去除大余量的磨削法、热态毛坯的或附加超声波的机械加工（切削速度可达 1200m/s）、电解加工、电火花加工、化学铣、电子束以及激光等工艺。

以金属局部高速阳极溶解为基础的电解加工法，是由 B. H.

● 苏共第二十六次代表大会资料，M.，1981，C. 147，154。

古谢夫和Л. А. 罗日科夫于1928年创始的。近几年来，无论是B. H. 古谢夫本人，还是其它一些科学家，都对电解加工的各种工艺方案和变种进行了深入研究。所有变种的共同点是，在高强度电能(kW/cm^2)集中作用于金属的条件下，以阳极溶解的方法来去除金属的机理相同。电解加工与也利用阳极溶解的腐蚀和电抛光过程的区别在于，采用了更高的电流密度(10~100倍以上)，而其溶解过程的局部性或选择性是靠阴极结构、电解液成分和建立小的加工间隙来保证的。

应用电解加工法完成的工序的比例并不大，在机器制造业中仅占3%以下，其设备约占1.5%。可是，由于电解加工的特殊性和高效率，使其有可能渗透到各个不同的生产领域中去。

电解加工与传统的机械加工法比较，具有下列主要优点：

1) 对于复杂型面可在阴极直线移动条件下一次成形，而机械加工复杂立体形状时，需围绕加工面逐层进行顺次切割；2) 主要加工工艺指标与被加工金属物理-机械性能的关系，比机械加工小得多；3) 阴极没有磨损；4) 加工区中产生的力和温度对被加工零件的影响很小；5) 加工过程对被加工零件机械性能和使用性能的影响最小。

尽管如此，电解加工法也不是万能的。它在高强度材料加工中可发挥出较高的效率。考虑到电解加工法的这一特殊性，及其所需设备的复杂性和高造价，电解加工适宜用于：机械加工切削速度不超过 $10\text{m}/\text{min}$ 的钢材和合金，以及机械加工要求使用很多种刀具的复杂形状零件(图1)。电解加工法对于产品结构及其制造工艺具有明显的影响。现在，各个工业部门已经考虑到电解加工法的工艺可能性，有很多零件和产品采用了电解加工，并使这些零件、部件和产品的结构得到

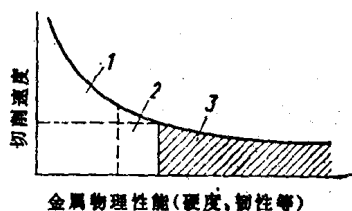


图1 金属加工中应用电解加工和机械加工的有效区

1—机械加工；2—任何形状零件的电解加工；3—复杂形状零件的电解加工。

了改进。

电解加工最普及的加工形式是，在阴极前进运动过程中完成的推削仿形工序，阴极形状同时以所有工作面复制在零件上。这些工序一般用来加工涡轮机的和燃气涡轮发动机压缩器的叶片叶身型面、锻模、压模、玻璃模、内槽、型腔、型孔以及狭缝等（图2）。

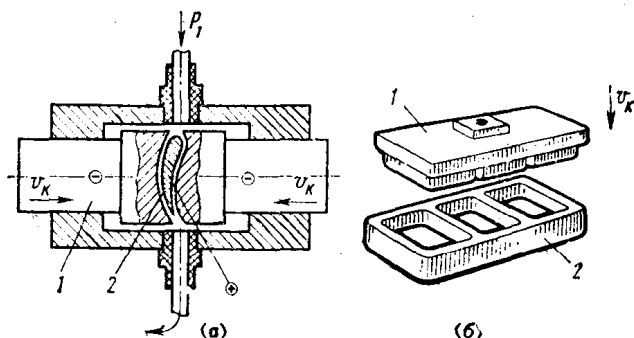


图2 叶片叶身型面(a)，型腔(b)电解加工成形示意图

1—阴极；2—被加工零件； v_K —阴极进给方向。

对于回转体零件的形状加工，既可从零件端面，也可从零件外表和内部来加工（图3）。而且，还可以加工那些机械切削法不能加工的薄壁零件。

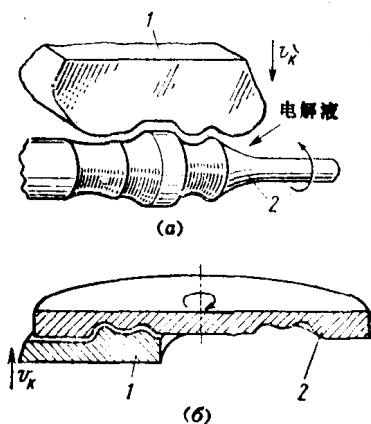


图3 轴(a)、薄壁盘(b)电解车削示意图（标识符号见图2）

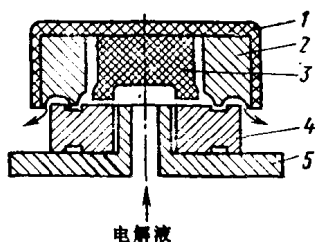


图4 电解倒锐边示意图

1—阴极握架；2—阴极；3—塑料压块；4—工件；5—底座。

电解加工还可用来去除齿轮、液压和燃料设备的零件、无线电小型零件、汽车发动机等零件的毛刺，以及倒钝锐边（图4）。

电解拉削可用来加工花键孔、修整齿形、减薄热强合金和钛合金异形零件的壁厚，以及粗切丝杠螺纹（图5）。电解拉削与推削的不同之处是，在加工过程中前者所用阴极的工作面是连续参与金属溶解的，应尽量增大，以使有可能实现高速进给。

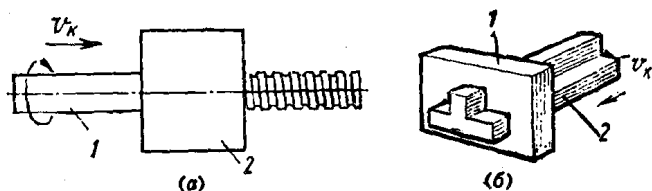


图5 电解拉削示意图

(a) 切滚珠丝杠螺纹；(b) 拉薄T型钢；其余标识见图2。

属于电物理-电化学复合加工法的金刚石-砂轮-电解磨，可用来加工硬质合金刀片、凸缘和叶榫、蜂巢形填衬、磁性合金零件的内外表面，以及刃磨刀具（钻头、车刀、铣刀头）。从被加工表面发生金属蚀除，是由于阳极溶解过程、砂轮或金刚石颗粒的机械切削以及电蚀现象同时作用的结果。

近几年来，精辟论述过程普遍规律的新资料丰富了电解加工的理论，同时创制了不少新颖的设备，使电解加工工艺得到了进一步的发展。

第一章 电解加工的电极过程

§ 1.1 金属高速阳极溶解的规律性

金属阳极溶解是电解加工法的基础，而溶解过程的规律性对加工结果具有决定性的影响。

在电解加工过程中，金属阳极溶解是在阳极和阴极之间的距离很小，加工间隙中电流密度很大和电解液流速很高的特殊条件下发生的。利用上述这些条件的目的是为了获得电解加工的各项高指标——生产率、精度、加工表面质量。

电解加工阳极过程最重要的特性曲线是极化曲线（阳极电位 E_a —电流密度 i ）和电流效率 η 与 E_a （与 i ）的关系曲线。

下面来探讨在电解加工条件下各种金属和合金的阳极性状特性。

1.1.1 铁、镍及其合金的阳极性状特性

图 6 中为电解加工提供了两条典型的阳极极化曲线。首先来探讨曲线 1，这条曲线描述了在 NaCl 溶液中铁、镍以及其它一系列金属的阳极性状。

在接通外电源之前，金属在电解液中具有某些固有的电位 E_0 。在外电源的作用下，电极电位从 E_0 正向移增到 E_1^* 的过程中，并不引起阳极溶解，因为金属的阳极钝性阻碍着这种溶解。当电位达到 E_1^* 之后，由于电极的阳极—负离子活化的结果，引起了

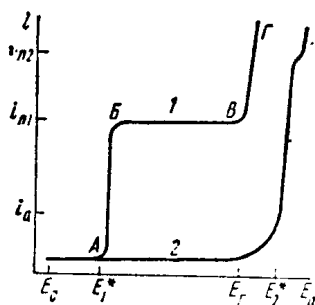


图 6 描述金属电解加工两种电化学性状的阳极极化曲线

电流密度的急剧增长 (AB 段)。可以认为, 活化过程的重要阶段之一, 是电解液的活性负离子 (如 Cl^-) 从电极表面吸附置换钝性离子 (如 OH^-)。此时, 金属表层的原子与活性负离子形成化合物, 随之转移到溶液中去。活性离子的性质和浓度, 溶液中非活性离子或分子的存在, OH^- 负离子含量的增大以及其它一些因素, 对钝化物从金属表面吸附置换过程都有很大的影响。相位氧化膜的存在, 例如在 Ti、Nb 上, 可能会使活化过程变得困难。氧化膜中存在的或产生的缺陷, 如裂缝、氧化夹杂物, 提高了电子传导性, 则大大减弱了氧化膜的作用。活性离子在这些缺陷中吸附和从氧化物表面置换的同时, 在提高 E_a 的过程中, 阻止了缺陷部位氧化膜的增厚, 并使阳极析氧过程造成困难。这些缺陷部位变成了阳极活化的中心。已经发生活化的阳极部分表面及时被扩大, 最后, 金属全部表面处于活化状态而溶解。

当达到临界电流 i_{n1} 时, 活化状态下的金属溶解速度就被限制 (BB 段)。BB 段中电流密度的恒定, 与电极表面排出的在溶液中形成的被溶解金属离子的扩散-迁移受到限制有关。由于金属阳极溶解产物达到了极限溶解度, 在电极表面将形成这些产物的积层 (如 FeCl_2)。而盐晶体则从过饱和溶液中沉淀下来。电极表面存在肤浅盐层和高浓度饱和溶液, 乃是金属在 BB 区钝化状态下得以保持的条件。“盐钝性”的机理和规律性不同于电位比 A 点更负区的金属钝性, 所以 BB 区的电流密度并不降低到很小值, 而停留在盐与溶液接触而溶解时能保持晶体, 也就是在电极表面附近保持盐溶液足够高浓度所必需的水平。与此相应的是, 在电解液浓度增高的情况下, 则 i_{n1} 降低, 而 i_{n1} 的降低将引起反应产物溶解度的相应降低。同时, 溶液酸度的变化 (比如, 在 NaCl 溶液中掺入 HCl 时) 对 i_{n1} 几乎不发生影响。只有在足够强的碱性溶液中, pH 值才会发生影响。

对于电解加工来说, 重要的是 i_{n1} 具有扩散的性质和电解液可数倍地提高搅拌速度。用提高电解液搅拌速度来消除钝态的方法, 称之为对流去钝化。

在相当于极化曲线 $B\Gamma$ 段的阳极电位下，开始析氧。可是，不要认为电流的增长，仅仅归之于这种反应，因为氧的电流效率是不大的（10%左右）。电流增长的主要原因，是由于金属电离速度提高的缘故（在溶液中此时形成的化合物的铁氧化度不发生变化）。盐膜（用显微镜在电极表面可以观察到）在向 $B\Gamma$ 段过渡过程中消失。在 $B\Gamma$ 段金属溶解速度的增长，与析出的气体提高了溶液搅拌速度有关。

在不同电位区阳极溶解后的金属表面性质是不同的。在相当于 AB 段的电位区金属和合金发生腐蚀；不同的表面微观段以不同的速度溶解；溶解后的表面粗糙度很大。当过渡到更高的阳极电位时（ BB 段），就发生表面整平，有时甚至是抛光。许多金属在 $B\Gamma$ 段电位下阳极溶解后，在近似抛光的表面上将出现特有的微量疵病——沿电解液流向的沟槽（流痕）。这些疵病的形成，与 $B\Gamma$ 电位区阳极溶解过程的速度取决于电极附近溶液层中物质交换条件有关。因此，引起扩散边界层厚度局部变化的电解液流的任何不均匀性，都将会导致金属溶解速度的局部变化。

临界电流 i_{n1} 的大小（图 6），取决于阳极溶解产物通过扩散边界层的排除速度和边界层厚度 δ 。因为 δ 是沿阳极表面顺溶液流向增大的，故在电解加工某些规范下，由电源提供的电流密度 i_p ，在阳极的一部分（图 7（a）中 AB ）将小于 i_{n1} ，而在扩散层较厚的另一部分（ $B\Gamma$ ），则大于 i_{n1} （图 7（b））。这将导致：一，阳极表

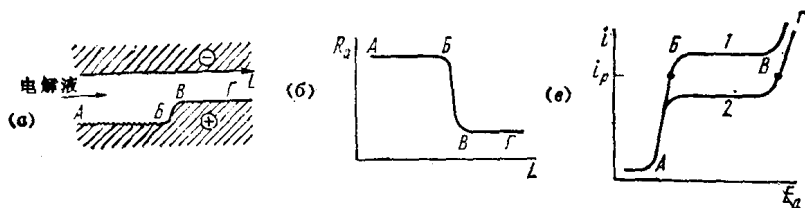


图 7 顺电解液流向阳极形状 (a) 和表面粗糙度 R_a (b) 的变化；(b) 相应于不同扩散边界层厚度 δ 的阳极极化曲线；

1— δ_1 (阳极 AB 段)；2— δ_2 (阳极 $B\Gamma$ 段)。 $\delta_1 < \delta_2$

面的电位明显的不等(阳极 AB 段中的 E_r 在电流密度 i_r 下相当于图 7(б) 所示极化曲线 1 的 AB 段; 阳极 BF 段中的 E_r 在同样的电流密度 i_r 下相当于图 7(б) 所示极化曲线 2 的 BF 段); 二, 由于在极化曲线 AB 和 BF 段的电位下金属电离反应的电流效率不相同, 阳极 AB 和 BF 段的(图 7(а)) 金属溶解速度也不相同; 三、阳极 AB 和 BF 段的表面粗糙度 R_a 不相同(图 7(б))。上述现象是以 NaCl 溶液中镍阳极溶解为例观测所得。(在形成的台阶高度非常小的情况下(图 7(а)), 所述论断无疑是正确的, 此时台阶的出现不会导致流体动力的根本变化)。

现在再来探讨电解加工过程中以图 6 中极化曲线 2 为特征的金属阳极性状的另一种形式。在 NaClO_3 或 NaNO_3 溶液中以铁、镍及其合金的阳极性状作为这种形式的例子。在这种条件下, 过程的主要特征是在 E_r 和 E_* 之间(包含钝态金属上阳极析氧区 $E_r \sim E_*$) 较宽的电位范围内, 实际上不发生阳极溶解。在 $E_r \sim E_*$ 电位区的析氧电流密度可能达到几个 A/cm^2 。

在上述溶液中发生阳极-负离子活化, 实际上要比在强活性

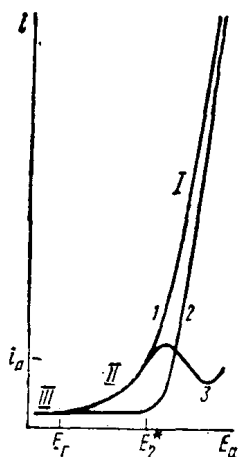


图 8 综合极化曲线(1)和金属阳极溶解(2)与阳极析氧(3)过程的部分极化曲线

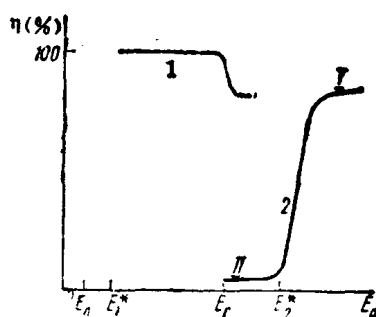


图 9 电流效率 η 与阳极电位 E_a 的关系曲线
1—NaCl 溶液; 2— NaClO_3 溶液。

的NaCl溶液中困难得多,并要求更高的阳极电位(E_2^*)——高于析氧分解水的初始电位(E_r)。当达到活化电位 E_2^* 之后,析氧就大大缓慢和金属开始快速电解。此时,如同在NaCl溶液中那样,铁发生溶解并形成化合物 $\text{Fe}(\text{I})$ 。

为说明以上探讨的情况,在图8中提供了金属电离反应和析氧反应的部分极化曲线以及综合极化曲线。

图9中提供了电流效率与阳极电位的关系曲线,图中曲线1采用NaCl溶液所得,曲线2采用 NaClO_3 溶液所得。这两条曲线反映了电解加工阳极过程两种典型实例的上述特征。

当达到阳极活化溶解的高电流密度时,比如镍在 NaNO_3 溶液中,溶解产物有可能达到极高的浓度,则如同前述采用NaCl溶液那样,在阳极表面将形成盐层。不过这里,临界电流 i_{n_2} 的区域(图6曲线2)只能在很狭的电位范围内存在。

1.1.2 电解加工过程中阳极溶解的选择性

电解加工过程中金属阳极溶解选择性的含义是,溶解应只在以很小极间距离与阴极相隔的阳极区发生。在这种情况下,当阴极向待加工零件表面金属去除方向移动时,在加工过程中保持限定的最小加工间隙,则阳极上将发生阴极形状的复制,即是,在毛坯上形成其形状和尺寸相当于阴极形状和尺寸的型腔。图10中示出了用管型阴极在被加工零件上电解打圆柱孔的情况,为了获得圆柱孔必须使阳极溶解仅仅在阴极端面工作部位下方发生(区I),这里的加工间隙最小,同时在阳极侧面(区II和区III)不发生溶解。消除II和III区内金属溶解的成功程度越大,则复制精度越高。

为进行电解加工,电极外加电压值 U ,应保证加工区I内的阳极电位高于 E^* 值(见图6、8、9)。在被加工零件侧面区II和III内的电位将低于区I内的电位,这是由于加工间隙较大和在电压 $U(U = E_a - E_k + U_{\text{om}})$ 总常数中欧姆损耗量 U_{om} 较大的缘故。加工区I内金属溶解过程的选择性程度和电解复制精度,将取决于区II和III内的阳极电位值和相应于这些电位的电流以及此时