

金属电腐蚀加工

A. Л. 里夫西茨 著

西安交通大学电工学教研组译

• 袁旦庆 校订

А. Л. ЛИВШИЦ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ

Машгиз, 1957

內 容 簡 介

本书从物理观点说明金属电加工方法的各种形式,反映了金属电腐蚀加工的现代技术工艺及其在生产中的应用,对电脉冲发生器的各种系统和类型作了全面的叙述,指出改善腐蚀机床的途径及金属尺寸电加工进一步发展的远景。

本书可供工厂、科学研究机关及实验室的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学电工学教研组袁旦庆、李希綬、庄 由、秦积荣、李宗林、浦华修、郑家麟、沈懋如译出。

金 属 电 腐 蚀 加 工

А. Л. 里夫西茨 著

西安交通大学电工学教研组译

袁旦庆 校订

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1963 年 3 月 第 一 版

书号: 2687 字数: 94,000

1963 年 3 月 第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

(京) 0001—2,500

印张: 3 5/8 插页: 4

定价: 0.75 元

目 录

引 言	1
第一章 电腐蚀尺寸加工的物理条件	6
1. 引入能量的方法	7
2. 金属电腐蚀加工各种形式	12
第二章 脉冲电流的发生	16
1. 发生方法	16
2. 电发生	17
A. 不独立脉冲发生器	19
B. 独立的单向脉冲发生器	27
B. 半独立的变号电压脉冲发生器	36
3. 机械的和复合的脉冲发生器	38
第三章 加工过程的自动调节	40
1. 调节对象的特性和对自动调节器所提出的要求	40
2. 自动调节器线路图	49
带有差动磁放大器的自动调节器	50
带有电子管放大器的自动调节器	59
第四章 电加工工艺的特性	62
1. “金属去除的速度—面积—形状—电流”的特性	62
2. 尺寸电腐蚀加工的特性和应用范围	71
3. 若干工序举例	73
第五章 金属电腐蚀尺寸加工的机床	77
1. 电火花机床	79
2. 电脉冲机床	86
3. 阳极机械机床	106
4. 电接触机床	109

引 言

电焊、电切割、电堆焊、电阻电热、利用高频电流的热加工、电解质加热、金属的电沉积(电铸和电镀)及利用电流的热效应和化学效应的许多其他工艺,所有这些已组成现代工艺的一个很大部门——电工艺。

近十年来获得巨大发展的金属电加工方法,也属于电工艺。

如果金属的去除或零件表面层质量和结构的改变,是由于直接通至零件和工具(电阻耦合)的电流的热效应、化学效应或二者的复合效应的结果,则称它为电加工法。同时在工具和加工零件相互作用面所组成的加工区域内,进行着能量的转换(由电能变成其他形式的能量)。

电加工包括电腐蚀、电化学、电腐蚀-电化学复合法以及机电加工方法(图1)。

电腐蚀方法去除金属和改变表面的性质,是利用电流的热效应;电化学方法是利用电流的化学效应;电腐蚀-电化学复合法是两种效应的共同结果(可同时或先后进行);机电加工法,是利用电流的发热使车刀去除金属容易。

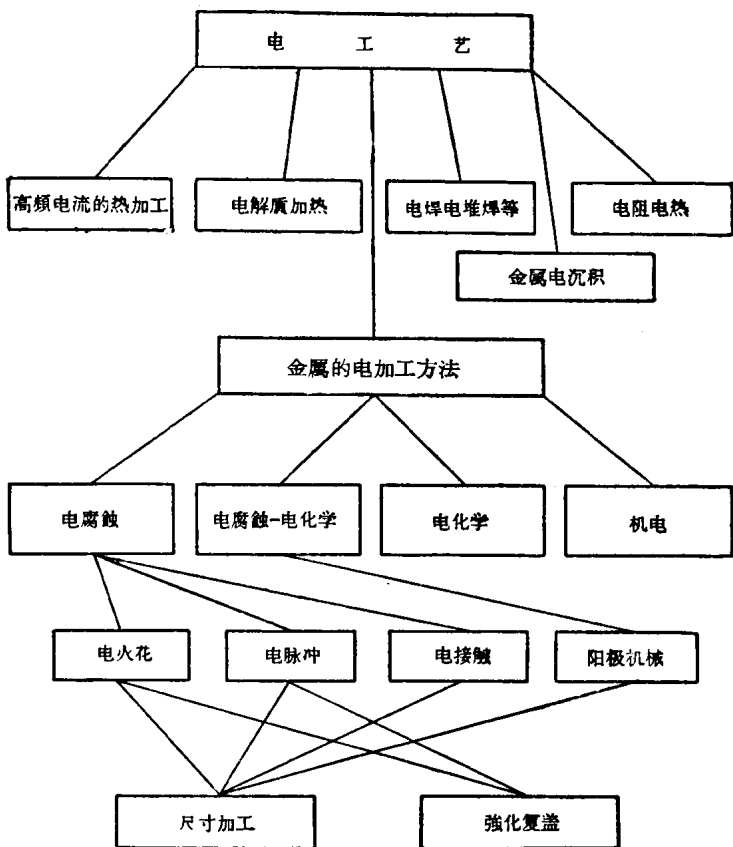
同样,金属电腐蚀加工法按照用途,可分为如下几种:

a) 金属电腐蚀尺寸加工(金属的去除及使毛坯具有给定的形状和尺寸)。

b) 电腐蚀强化或复盖(表面层性质的改变)。

现在已知的和应用着的电腐蚀加工法,主要有如下几种:电火花、电脉冲和电接触。实际上还应包括阳极机械加工法,因为电化学去除金属(阳极溶解)只用在精磨情况下,并不是在所有情况都采用这个方法。

如图1所示,电火花及电脉冲方法可用于金属的去除和强化;



系统图 1 金属电腐蚀加工方法的一般分类

阳极机械和电接触方法只应用于金属的去除¹⁾。

根据加工和强化方法的不同，可分为电火花、电脉冲、电接触或阳极机械尺寸加工或强化。

上述的定义和分类，可将金属电加工看作是电工艺的一个独立部门。

由于电加工方法的出现，在理论上就有可能用电工艺的方法，来实现变毛坯为成品的一整套工序，其中包括热加工。

1) 忽略在阳极机械或电接触方法加工时零件表面层性质改变的次要现象。

电腐蝕方法并不排斥机械加工而是其补充,按电腐蝕方法本身的特点占一定的地位。它的特点是:可以加工具备各种物理和机械性质的导电材料,而且成品中可反映出工具的形状。因此随着加工材料的硬度和韧性的增强,随着零件形状和加工表面的复杂化(形状复杂的内腔、中心线弯曲的孔、直径特别小的孔、形状简单和复杂的细槽和深槽等等),以及电腐蝕加工方法的技术经济指标的改进(生产率的提高、表面光洁度的改善、精确度以及工件的强度的提高、生产过程中能量消耗的降低),电腐蝕加工方法将不断得到发展。

用电加工方法来加工硬质合金、高强度钢和加工特别困难的合金所制成的零件,具有很大的发展前途,而且这些材料随着机器和仪表中压力、温度和速度的提高,得到日益广泛的应用。

还应该指出,在现代的机器制造业的发展中,日益广泛地采用压力加工代替切削加工,而压力加工要求制造强度很大的冲床和压床,利用硬质合金做冲床和压床,其强度可提高几十倍。

本书讨论金属电腐蝕加工的一些问题¹⁾这种加工的效果,与各种基本机械加工(即在仿型、钻、凿、磨、切割及相类似的机床上所进行的加工)最后工序的结果相类似。

电化学尺寸加工法——阳极溶解、电抛光、电解加工以及这些方法的其他变态,在电腐蝕方法以前就早已产生了。现在已成为电工艺中有着丰富内容的独立部门,这部门有其自己的特点和规律,因此本书中就不讨论它们。

金属电腐蝕加工中的个别要素及金属电腐蝕加工法的部分应用,很早就知道了。例如利用电流切割金属(即所谓电摩擦切割,其线路和参数与电接触加工相类似),大约在30年前就应用了;而利用电流通过炭极来强化金属表面的方法,在1928年就有Д. И. 杜里切夫斯基法以及其他等法。

然而金属电腐蝕方法的飞速发展和成为电加工工艺的独立部

1) 用在金属电火花及电脉冲加工上的一些方法(主要的是脉冲发生器),也用在强化工序上。

門,是在 1943 年 Б. Р. 和 Н. И. 拉札連柯發明電火花法和 В. Н. 哥雪夫發明陽極機械法以後不久才開始的。

1948 年,在這些方法中又補充了電接觸加工的新用途(按 М. Е. 畢爾林工程師的方法磨刃),在哈爾科夫電工研究所、哈爾科夫軸承廠(按高夫曼工程師的方法加工滾珠)、以奧爾卓尼金命名的哈爾科夫拖拉機廠(加工鏈條)、船舶工業部的科學研究院(加工螺絲的螺紋)以及其他單位的工作中,電接觸加工的用途獲得了進一步的發展。

隨着一般的電腐蝕機床、專門的電腐蝕機床及自動調節器的試驗性結構的多次制成,隨着新工藝的掌握,電火花和陽極機械加工方法發展起來了。在這段時期,這兩種方法的技术指標——生產率、工具耐久性、能量容量、操作的方便性——沒有多大的改善。

應用不獨立的(電容器的)弛張式脈沖發生器的電火花加工法,實際上已不可能進一步提高生產率,減低工具的磨損及能量容量。因此避免電容器綫路而採用新方法成為必要了。在這方面走了第一步的是:1950 年由機床製造和工具工業部設計局(КБ МС и ИИП)為穿孔和制模而創造了獨立的脈沖發生器,及奧德薩工學院用旋轉工具在弱規准中(製造鼠尾銼)加工的脈沖電源作了研究。

應用獨立的電壓和電流脈沖發生器的新加工方法叫做電脈沖法。

在機床製造和工具工業部設計局、金屬切削機床實驗科學研究院電加工實驗室及哈爾科夫列寧工學院電機教研組的密切合作下,自 1951 年後對電脈沖方法進行了研究。

在穿孔和制模情況下來比較電脈沖加工方法和電火花法,前者在強規准时,去除金屬的速度要高 5—10 倍,甚至還可以更高;在工具磨損方面降低 5—20 倍,能量容量降低 2—3 倍。在文獻里充分詳細地敘述了電火花、陽極機械和電接觸的裝置以及這些機床上很多工序的工藝。但是沒有刊載過電脈沖加工方法¹⁾,其應用是

1) 除了“機床與工具”雜誌 1954 年第 11 期、1955 年第 1 期、1956 年第 11 期等刊載的論文外。

最近才开始的。关于电脉冲发生器各种系统和类型的分析比较、现代电腐蚀装置自动调节系统以及电工艺的基本原理等资料同样非常稀少。电腐蚀机床的各种结构和控制线路的介绍也很不够且不完整。

总的来说，本书内容反映了金属电腐蚀加工的现代技术工艺及其在生产中的应用。对于较电火花加工有更好经济技术指标和更广泛应用电脉冲法，给予更大的重视。在各种电脉冲方法的应用中，更多的研究了穿孔和制模工作，这是最困难的但在工艺上是最通用的。

金属的电加工和它的各种形式——电腐蚀加工——是电工艺的独立部门，现正处于发展的初始阶段上。因此作者认为最好从统一的物理观点上来叙述这些方法，确定个别的电腐蚀加工法所特有的共同规律，并引入一系列的定義和分类的特征。根据作者意见，这些定义和特征对于深入研究电工艺新部门的基本原理是有帮助的。

在1950至1955年間，作者与机床制造和工具工业部设计局、金属切削机床实验科学研究所电加工实验室及哈尔科夫列宁工学院电机教研组的同事们一起工作，本书主要就是在这基础上写成的。

第一章 电腐蚀尺寸加工的物理条件

为了保证应用电流热效应的金属尺寸加工的质量，必须遵守下列三个基本条件：

1. 电流的能量应以足够短的持续时间的脉冲形式引入到被加工的部分去(限制每次去除金属的时间)。

当连续引入能量时，就失去了加工的精确度，呈现出有凹陷的熔化层，表面的光洁度恶化，并失去电加工法的主要工艺性质之一——工件内复映(摹仿)工具形状的性质¹⁾。

用电弧切割或穿孔，可作为连续引入能量加工的一例，在这种情况下，切割表面的精确度和光洁度都不能满足尺寸加工的要求。

2. 承受脉冲能量的零件部分应该足够小(限制每次去除金属的空间)。

为了把脉冲能量引入到大的金属去除部分，必须相应地增加脉冲能量，以便使单元去除量增大。金属去除量部分愈大，表面的光洁度当然愈坏，加工的精确度也就愈差。

如果增大单元区域而使脉冲能量保持不变，则一般不可能去除金属，因为所加的能量不足以熔化去除单元。

3. 加到需要去除的那一部分金属体积上的脉冲能量应该是毫不间断，并且有足够的频率的(限制加工过程的时间)。这条件保证了过程的连续性 & 保证达到所要求的生产率。

以电流热效应为基础的加工方法，在不同程度上是满足上述三个条件的。

1) 第一个条件的实现是复映工具形状的必要条件，但仍不足。因为电脉冲应该发生在工具与工件间隔一定距离时相互作用的表面最近的单元部分(选择性条件)。

1. 引入能量的方法

大家知道引入电能量到被加工表面有三种方法,即:接触法、通过放电通道法及复合法三种。下面让我们来研究这些方法。

靠工具-工件的接触引入能量 接触的不是工具和工件整个表面,而是稍微不平的那些地方。在时间 t 内电流 I 在接触电阻 R_k 的体积中产生热量 Q ,

$$Q = 0.24 R_k I^2 t,$$

电阻 R_k 基本上由三部分决定:由接触突出部分的横截面急剧变化而引起电流线收缩产生的电阻;突出部分本身的电阻;最后,由于表面上的氧化层或吸附着的气体而引起的接触处的接触电阻。

在电加工情形下,由于电流线缩小产生的电阻具有最大量值。这电阻的数值决定于接触的压力、电流的大小及工件与工具的相对移动的特性。

当遵守一定的条件,例如工具和工件不动或在大的接触压力和小的电流情况下旋转运动的时候,才能形成纯粹接触引入能量。这时突出接触部分的电流密度不大,因为在大的压力下,突出接触部分的数量及其横截面同时增大。结果,突出接触部分处所产生的热量,不足以熔化或爆炸蒸发突出部分。这时不可能实现尺寸加工及去除金属。因为过程进行中沒有断开电路,因而就没有火花及电弧形成,只能使接触部分及与其附近的区域发热。

如果工具的相对运动不是旋转运动,而是往复运动,则纯粹地接触引入能量是不可能的,因为压力改变可能很小,但会引起电流密度增大,引起突出的接触部分熔化,并使电流中断。此外,当工具振动的幅度很大时,要产生电路的切断。

在上述两种情形下,可发生火花及电弧,并改变引入能量的方法。

在能量接触引入时,不能满足任何一个尺寸加工条件,所以接触引入能量的方法只能与机械加工配合运用。

應該指出,接触电阻的数值相对說来是不大的。为了引入足以使接触区域熔化的能量,要求有极大的电流大至几百几千安培。

靠放电通道引入能量 用任何一种方法在工具和工件突出部分間激起的放电(短电弧)都具有非常高的温度,可达 10000°C 。在这种情况下,单元体积內所产生的功率相当大,因为决定这一功率值的电弧上的电压降較接触法时大十倍以上。

由于电弧直径很小,并且因为相互作用的工件及工具的表面間,在这瞬間只存在着一个放电通道¹⁾,所以能满足第二个尺寸加工的条件——即将能量集中在单元区域上。除了所指出能量引入方法的特性外,短电弧还具有选择性:电弧放电一个接着一个地发生在工具和工件相互作用表面間的距离最近处。这时,在工件上可复映出工具的工作面的形状。

借放电通道引入能量的方法,广泛地应用在金属尺寸电加工上。

放电的发生和发展过程,可以分成两个阶段。

第一階段——放电通路的准备(小电流阶段) 根据起始接触放电的假設,浸沒工具和工件的液体中的导电微粒——悬浮物,在电场的影响下,沿着力綫排列(定向),在工具与工件間形成閉合电路的小桥²⁾。电流通过时,小桥的导电性很快地增加。当小桥炸毀及具有小电阻能通过大电流的游离通道形成时,第一阶段就結束。第一阶段的持續時間大約为 $0.1-0.2$ 微秒。

第二階段——大电流阶段 部分能量沿着已成的放电通道进入加工区。能量的大小,决定于脉冲电流的持續時間、幅度及腐蝕間隙間的电压降。

在这阶段可能发生火花-电弧或电弧放电,这决定于脉冲发生

1) 如果没有脉冲的分裂。

2) 根据无接触起始放电的假說,当电极很近时,在各个稍微突出的地方就产生足以使电子冷发射的电場强度。由于这假說没有得到确切試驗的証实,故在以后的說明中,我們仍采用接触起始放电的假說。

应该指出,起始放电的結構对于腐蝕过程的描述没有实际意义。

器的特性。当电流幅度达1—2000安时,火花电弧放电的特征是电压降较大(50—90伏)及较小的脉冲持续时间(10—500微秒)。当电流幅度相同时,电弧放电具有小的电压降(15—35伏)及较大的脉冲持续时间(100—10000微秒)。工件金属的去除,腐蚀产物的撤除及工具的磨损过程主要发生在第二阶段。

腐蚀间隙即电极的相互作用区及放电通道所占体积中所泄出的能量,分布在这些区域间(阳极及阴极)及外面的介质中。在工件电极上,能量作有用的功;而工具电极上的能量可引起工具的损坏。

导入电极的能量基本上可转换成热能,以熔化及蒸发电极单元体积¹⁾。

可以把电极上所放出来的热能,看作是体积及表面两个热源作用的结果。

体积热源,即电极单位体积散发热的源,是电流通过电极时焦耳-楞次效应的结果。因为在这种情况下发热量决定于体积电流密度,而电流密度随着放电通路与电极的接触表面的距离的增加急剧减小,最大温度将在表面部分。由于传热结果,把较热的表面层的热量传导到金属里面去。

表面热源,它的产生是由于热量从放电通道传递到通道与电极相接触表面上的结果。根据热的传导性,热量透过接触表面传到单元体积的里面。

熔化、发热及金属微粒的撤除与放电阶段是适应的。在准备放电的第一阶段因其时间短、电流小,对去除金属没有影响。第二阶段——大电流阶段,在表面源及体积源作用下,阳极和阴极上形成了熔化的金属小穴,并且一部分金属从表面蒸发出来。同时,为清除熔化物创造了条件,因为放电通路周围气体的压力不断增长²⁾。当增长着的压力足以除去熔化物时,熔化物离开小穴,落入

1) 此外有一部分电能转换成电磁能、机械能及化学能等。

2) 按照研究者一系列的假设,电弧通过单元区域时所产生的电磁力对除去熔化物也有作用。

液体媒介物內，然后凝結成点状，为了把微粒从加工区域中清除出，加到微粒上的冲击力必須足够大。

阳极和阴极金属去除的多少，决定于这些金属的物理常数：热传导、热容量、熔化温度及熔化热等等。在去除金属过程中，表面源及体积源所占的成分亦决定于这些常数。例如具有大的热传导的物质，在其他条件相同时，表面源的分量将增大，因为大量的热量来得及从表面层传导到里面去。相反，对于体积源，热传导的作用不大，因为所通过的电流在整个体积內发热。

脉冲持續時間也影响着两种热源的分量。在长的脉冲情况下得以使导热机构起作用，大部分热可以从表面通过。相反地，在短的脉冲情况下，体积源显得較重要。

計算指出，表面源所去除的金属，大大地超过体积源。

借助放电通道引入能量时，滿足尺寸加工的第一个基本条件（限制每次去除時間）就要求有特殊电源——脉冲發生器，将脉冲电压供給工具和工件。在这种情况下，电极間将发生具有一定持續時間和幅度的放电。

应用所需頻率、电压及进給調节的脉冲发生器，就可以滿足三个基本条件（限制加工过程的时间与被去除金属的体积）。

去除金属的速度及工具的抗腐性，一般說来，是电极材料的热的物理常数、工作液体的种类、脉冲的形式及电流极性的函数。其中任何一个因素都要影响其余因素；例如脉冲形式的改变就必须改变极性，或是工作液体的种类，或是工具电极的材料。

为了保証过程的連續性，相互作用着的工具和工件表面的距离不应大于某相应的电压值，在此电压下能形成小桥及維持燃弧的稳定性。因此，随着金属的去除，应进給工具和工件以补偿两个电极的腐蝕。

进給調节器在电腐蝕机床上完成这项职能。

复合引入能量 这种引入能量的方法，开始为接触过程¹⁾，然

1) 复合引入是在电极稍为突出部分形成接触引入，而不同于由导电质点及悬浮物形成的接触小桥，能量的引入是通过电弧放电通道的。

后接触断开,产生放电,通常是电弧放电。断开接触及激磁电弧的机构可以是各种各样的。

让我们讨论复合引入能量时最广泛应用的断开接触及激磁电弧的方法:

a) 机械断开法: 旋转和往复运动可以由两个极中的一个极运动。很少两个极同时运动。将两个电极靠近,在某种压力下,在稍微突出的地方形成接触。

由于相对运动,突出接触部分的压力不断改变,流过的电流使接触小桥拉长。当电流或压力达到某临界值时,小桥熔化,同时断开电路,所以切断电弧发生在突出部分之间。相对运动的速度较大时,稍微突出部分的接触断开可能比它们的熔化还早。这样中断了金属的去除。

选择起始接触压力时,应使金属表面不要全部接触,因为这时突出部分遭到压碎,表面的洼处被金属所填满,不可能产生电弧。多半是电极作旋转运动时,可能呈现出这种情况;但往复(振动)运动时,如果振荡幅度超过稍微突出部分的弹性应变值,在大的压力下也将产生电弧。

复合引入能量及机械法激磁电弧放电时,由工件与工具相对运动所形成的机械断路器,起着在时间上限制去除金属的脉冲发生器的作用。稍微突出部分的接触,保证了限制去除单元金属的空间。最后保证过程的连续性及去除金属的生产率,决定于进给调节器的工作及一定的相对运动速度的选择。

在复合引入能量时,由于存在相对运动,大部分旋转体失去了在工件内复映电极形式的性质。复映工件形式的性质决定于与工件形状有关的接触压力的选择。

6) 水力断开法: 这方法在于在压力下把冷的液体,一般从空心工具电极压入到接触区域,以保证液体的通过。电极上的压力要比机械断开法小得多。接触断开和其后电弧的切断是由于液体流动力作用的结果。此外,气体或在接触区域的液体受热而蒸发的蒸汽,促使接触的断开和电弧的切断,被压入的液体也促使电弧

的断开及金属微粒的撤除。

如果接触压力小，則可能出现如上所述的借放电通道传递能量的机构。在这种情形下，形成导电微粒及悬浮物組成的小桥，会形成游离通道，沿着通道发展成电弧放电，同时压入的液体的压力可能下降或完全消失。

水力接触断开法有时与易于切断接触电弧及易于撤除微粒的电极振荡运动的方法配合使用。

复合引入能量的装置，大多是直流或交流电源供电，因为冲击性可用机械或水力断开接触的方法来达到。但是在很多情形下，把复合引入能量的方法与脉冲发生器供电结合起来使用是更为合适的。

2. 金属电腐蝕加工各种形式

根据引入能量方法的不同，可以把金属的尺寸电加工分成三类：

机电加工属于第一类，这类是建立在純粹的接触引入能量的基础上。

因为純粹接触引入能量不能满足尺寸加工的三个条件，因此不能达到去除金属的目的。在机电方法下，用切削工具去除金属，切削的边緣同时也就是接触的表面。

交流电被导入切削工具和被加工工件后，这电流使工件在接触的地方加热，电接触加热的目的在于减小切削应力及可以用另外的热源——电弧乙炔燃烧的火焰、高频加热等来代替。

計算及經驗指出，从能量的观点看，借切削工具引入电流在一般情况下是不适宜的，这样不能提高生产率及工具的耐久性。后者的原因是接触处的电压降低，要产生很大的热量，必須引入非常大的电流；这时从散热的观点看，切削工具比被加工工件更严重。所以切削边緣发热，切削工具的耐久性降低。

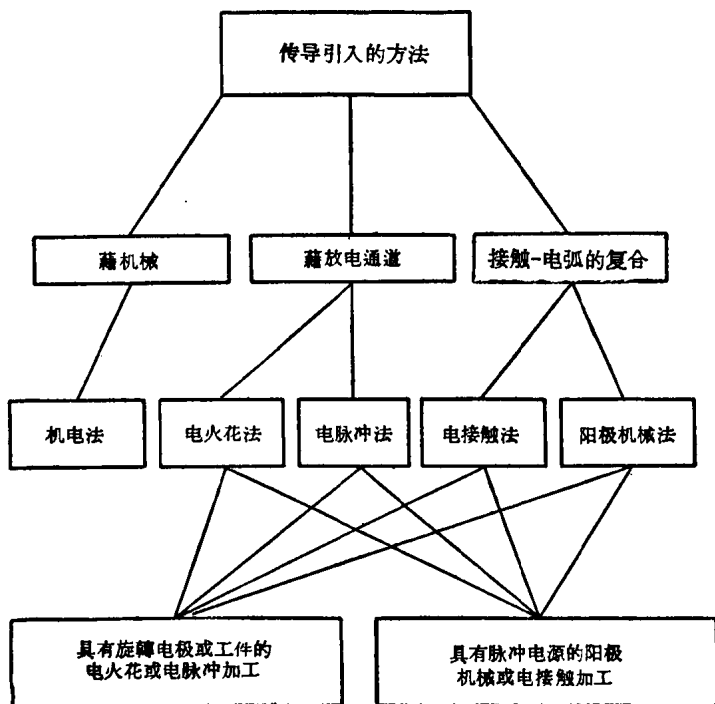
而在小电流时，制品的发热量是极其微小的，实际上不会影响机械切削应力的大小。

由于机电法¹⁾不能满足尺寸加工的条件,因此以后就不再讨论这种方法了。

第二类包括借放电通道引入一些加工方法。属于这一类的有电火花法,电脉冲法和一些中间形式,例如用张弛振荡器非周期性的脉冲加工,就包括两种方法要素。

属于第三类的有阳极机械法和各种形式的电接触法。这类基于应用接触电弧复合引入能量。

图2表示按照引入能量的方法,把金属电腐蚀加工法加以分类。同时也指出,工业上大家所知道的各种形式,按照绝大多数特



系統图2 按能量引入方法金属电腐蚀加工法的分类

- 1) 在文献中遇到电接触加工的各种形式的名称,例如,浇水的滚珠轴承的机电加工,浇油的刀具机电磨削等等。因为在这些形式中,发生接触-电弧引入能量,金属去除除非切削工具机械力作用的结果,所以把名称“机电加工”应用到这些作业上是不适当的,它们应该属于电接触加工的各种形式,在下面将要讨论。

征相似的原則,把各种形式归入某种方法。借放电通路引入能量时所需要的脉冲电流与复合引入能量时所应用的电极的相对运动结合起来,可得出很多加工形式。所謂低压电火花及电脉冲旋轉体加工或用旋轉电极的加工,以脉冲电源的阳极机械加工等等都属于这些形式。依此,無論哪一种方法的特征,例如是用脉冲电源的电接触加工或用旋轉电极的电脉冲加工,可以說在組合中占多数,这种加工方法同样也属于电腐蝕加工的四个基本方法的另外一个組合。

讓我們討論第二和第三类里电腐蝕尺寸加工形式的原則上的区别。

电火花与电脉冲方法的区别是发生脉冲的装置、脉冲的参数和脉冲形状以及电极的极性。在下面要詳細指出。

阳极-机械加工法与电接触法在采用电流的种类方面(第一种情形——直流;第二种情形——交流,而很少采用直流),及工作介质的种类方面(第一种情形——水玻璃,第二种情形——空气、水及油等)是有所区别的。

一般說来,与阳极机械法相比較,区别在于电接触法的技术特性較坏(表面光洁度相同时生产率低、工具磨損大、加工物质的种类受限制),但是操作方便,整个装置較簡單,因此就使得这两种方法应用在不同的場合。

由上面的分析可以看出,不管能量的引入方法如何,大家所熟知的金属电腐蝕加工法基本上有一个相同的物理性質,即由电流热效应而去除金属。

不同在于清除去除金属的机构及保証滿足尺寸电加工三个条件的技术設備。

不同方法去除金属的能耗率比較,表明最大的能量消耗发生在电化学溶解时(3.85 千瓦小时/公斤),其次发生于熔化时(0.35 千瓦小时/公斤)。

当机械加工时,在相当大的程度上,能耗率决定于加工的类型。例如在磨削时,这种能耗率平均为 2 千瓦小时/公斤;钻、鉋