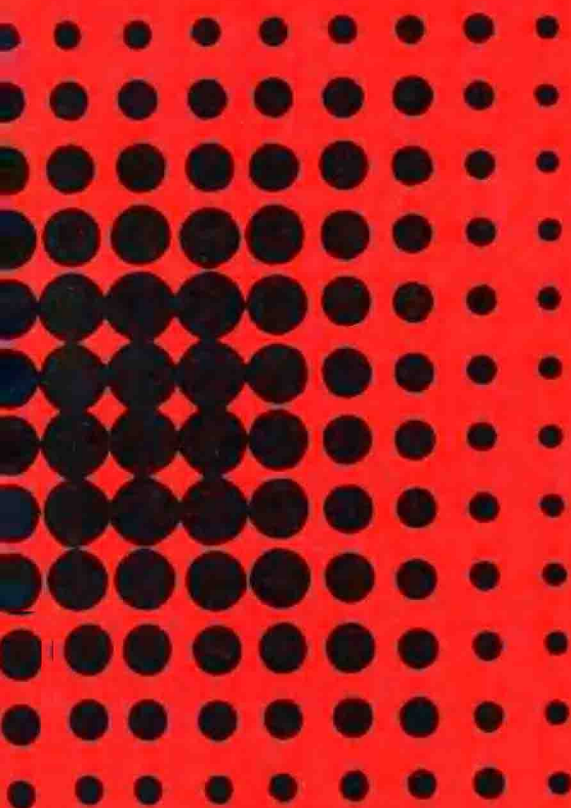


电加工手册

苏 联 科 学 院 包 比 洛 夫 著



机械工业出版社

电加工手册

〔苏〕 Л. Я. 包比洛夫 著

谷式溪 梁春宜 译



机械工业出版社

本书叙述了电加工的特点和分类,叙述了电加工各个分支的原理和具体应用,其中包括电火花、电化学、激光、电子束、等离子体、超声、磁脉冲、电液压等加工方法,也包括新近发展起来的电加工的各种复合加工方法。本书数据丰富,应用实例较多,原理叙述简洁,对各种电加工设备的使用、维护、设计以及开拓电加工技术的应用范围均具有参考价值。

本书是电加工专业工人、技术人员的工具书,亦可供非电加工专业的革新者、管理人员查找有关数据。

**Электрофизическая и электрохимическая
обработка материалов (справочник)**

Л. Я. ПОПИЛОВ

Издательство «Машиностроение»

1982 г.

* * *

电加工手册

〔苏〕 Л. Я. 包比洛夫 著

谷式溪 梁春宜 译

*

责任编辑:熊万武

封面设计:刘代

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张 13¹/₂·字数 355 千字

1989年1月北京第一版·1989年1月北京第一次印刷

印数 0,001—24,600·定价:6.80元

*

ISBN 7-111-00171-0/TH·35

译 者 的 话

近年来，随着新技术革命的发展以及物质文化生活水平的提高，电加工受到各国工业界的普遍重视，并得到迅速的发展。

众所周知，模具是生产各种先进设备的高效工具。家用电器、汽车、钟表、飞机、电子设备等等，几乎没有一种工业生产能离开模具，而电加工是模具制造的重要手段；新型陶瓷、聚晶金刚石、永磁材料、钛锰合金等新型材料的出现，是新技术革命的重要内容。这些材料的加工却直接或间接需要电加工的介入；高技术工业的发展，导致采用尺寸细小或形状复杂的零件，制造这种零件，电加工又常常是唯一可行的手段。上述几点，就成为电加工获得迅速发展的原因，也会成为今后持续发展的动力。

适应这种发展，近年来国内外出版了不少电加工方面的专著、教科书及通俗读物，其中Л. Я. 包比洛夫所著的这本电加工手册，却有其显著的特点。

本书的第一个特点是数据丰富。书中以表格的形式，列出了数千项数据，其中有常用的工艺规准、电气参数、机械参数、物理化学参数、工作液配方、应用效果比较、设计制造数据……，这些数据常常是十分需要而又取之不易的。第二个特点是以具体实例介绍了十五类、六十余种电加工方法，其中有些加工方法的经济技术效益明显，在国内还很少采用或鲜为人知。这两个特点就使本书既对从事电加工的专业人员有较大的参考价值，又会成为富有创造精神的各行各业革新者的有用工具。

有鉴于此，我们将本书译出，若读者能从本书中得到启发，为祖国的四化作出新的贡献，我们将感到极大的欣慰。

本书第一章到第十一章由谷式溪翻译，第十二章到第二十章由梁春宜翻译，并由后者对全书译稿略作统一润色。由于本书涉

IV

及的专业较多以及译者的水平所限，译述欠妥之处，欢迎批评指正。

在本书翻译过程中，曾得到陆乃焜、马永年等高级工程师的多方面帮助，在此一并致谢！我们还衷心感谢中国机械工程学会电加工学会给予的支持和鼓励。

译者 1986年9月于苏州

序 言

在促进和保证金属加工科技进步的许多先进工艺方向中，材料的电加工方法是主要方向之一。它们在工业方面的应用逐年广泛，并且获得了巨大的经济效益。

本手册的第二版（第一版于1969年出版），在内容上焕然一新，在结构上亦作了变动。全书改写的必要，在于电加工领域中科学技术的进步。实际上，电加工方法的物质基础已彻底更新，工业部门掌握了许多新的、在第一版时还未应用的方法，其中有电化学尺寸加工、复合加工、激光加工以及其它某些加工。

在改变本手册的组成和内容时，考虑到了在最近十年中，未来的读者在其专业范围内的一般教育和职业培训有显著的发展，在企业中将涌现大量在职业技术学校中受过电工艺教育的工人。为此，适当减少了介绍这些加工方法基本知识的份量。

作者在为本手册选择资料时的宗旨之一，是最大限度地丰富这些加工方法的应用实例，以期这些内容有助于普及电加工。

目 录

译者的话

序言

第一篇 电工艺的基本概念

第一章 电加工及复合加工方法的分类4

参考文献9

第二章 电加工和复合加工方法的应用范围及效果11

参考文献23

第二篇 基于电化学作用的加工方法

第三章 电化学加工的一般概念和基本关系27

参考文献37

第四章 电化学表面修饰38

电化学抛光工人技能分等规定51

参考文献53

第五章 电化学尺寸加工54

电化学加工工人技能分等规定86

参考文献87

第三篇 基于热作用的加工方法

第六章 一般概念和基本关系90

参考文献95

第七章 电蚀加工96

材料电蚀加工的可加工性157

工具电极尺寸的计算157

电蚀加工工人技能分等规定157

参考文献159

第八章 等离子体加工162

参考文献172

第九章 光束(激光)加工174

参考文献	190
第十章 电子束加工	192
电子束焊接工人技能分等规定	203
参考文献	205

第四篇 基于脉冲机械作用的加工方法

第十一章 概述和基本关系	207
第十二章 超声加工	209
在化工过程和化工工序中超声振动的应用	220
在冶金过程和工序中超声振动的应用	235
在热处理及热化学过程中超声振动的应用	241
超声振动破碎和凝结	244
硬脆材料的超声振动加工	248
超声振动焊接	264
超声设备操作人员技能分等规定	273
参考文献	275
第十三章 电液压加工	277
参考文献	294
第十四章 磁脉冲加工	295
参考文献	312

第五篇 复合加工方法

第十五章 电化学复合加工	315
电刃磨操作人员技能分等规定	361
参考文献	362
第十六章 电火花复合加工	364
参考文献	373
第十七章 超声复合加工	374
引进超声振动的变形加工	374
切削加工过程的超声强化	392
参考文献	397
第十八章 等离子-机械加工	398
参考文献	403



第十九章 磁复合加工	404
参考文献	413
第二十章 金属在电解质中的加热	414
电解质加热工序的实例	417
参考文献	422

第一篇 电工艺的基本概念

通常所说的“电工艺”是各种工艺过程的统称，这些工艺过程的主要特点是利用电能实现所需要的材料工艺改变（如材料的状态、成分、形状、使用特性的变化等等）。

电工艺还没有一个精确规定的独立范畴，不过实际上认为下述过程和方法属于电工艺：

- 1) 电焊（电弧焊、接触焊、电渣焊等）；
- 2) 电镀金属镀层（电镀、电铸）；
- 3) 高频电流感应加热和电介质加热（熔炼、钎焊、烘干、热处理等）；
- 4) 电子-离子工艺方法（静电着色、电泳等）；
- 5) 电化学产生转化层（阳极氧化等）；
- 6) 材料电加工和复合加工方法[⊖]。

按苏联国家标准 ГОСТ 推荐以及在本书中采用的电加工和复合加工方法和工序的名称及其代号，摘录如下：

ААБО——阳极磨料加工

ААБП——阳极磨料研磨

АБЭХО——磨料电化学加工

АБЭЭО——磨料电蚀加工

АЛЭХО——金刚石电化学加工

АЛЭХШ——金刚石电化学磨削

АЛЭЭО——金刚石电蚀加工

АЛЭЭШ——金刚石电蚀磨削

АМО——阳极机械加工

АМР——阳极机械切割

⊖ 自1981年起以电加工和复合加工方法代替过去采用的电物理和电化学加工的名称。

АМШ——阳极机械磨削
 МАО——磁磨料加工
 МИО——磁脉冲加工
 МКО——磁复合加工
 НЭ——电解质加热
 ОКД——短弧加工（电蚀加工的一种）
 ПЗО——等离子体加工
 ПЗМО——等离子体机械加工
 ПЗКО——等离子体复合加工
 СЛО——光（激光）加工
 КМО——复合加工
 УЗДО——超声振动变形加工
 УЗМР——超声振动机械切割
 УЗМС——超声振动机械钻孔
 УЗМТ——超声振动机械车削
 УЗМШ——超声振动机械磨削
 УЗНР——超声振动切螺纹
 УЗО——超声加工
 УЗП——超声钎焊
 УЗР——超声切割
 УЗС——超声焊接
 УЗКО——超声复合加工
 УЗСФ——超声振动超精加工
 УЗУПР——超声强化
 УЗШ——超声磨削
 ЭАБО——电磨料加工
 ЭАБШ——电磨料磨削
 ЭАЛЗ——电金刚石刃磨
 ЭАЛО——电金刚石加工
 ЭГО——电液压加工
 ЭИМ——电脉冲加工（电蚀加工的一种）
 ЭИС——电火花加工（电蚀加工的一种）
 ЭКАР——电接触-磨料切割

- ЭКО——电接触加工(电蚀加工的一种)
 ЭКУЗ——电接触-超声加工
 ЭЛО——电子束加工
 ЭМТ——电机械车削
 ЭХАХО——电化学金刚石搪磨
 ЭХАЭО——电化学-磨料-电蚀加工
 ЭХГ——电化学打光(使有光泽)
 ЭХЗ——电化学修整
 ЭХО——电化学加工
 ЭХОП——电化学表面精饰
 ЭХП——电化学抛光
 ЭХРО——电化学尺寸加工
 ЭХКО——电化学复合加工
 ЭХТ——电化学蚀刻
 ЭХУЗ——电化学超声加工
 ЭХШ——电化学磨削
 ЭЭО——电蚀加工
 ЭЭКО——电蚀复合加工
 ЭЭУЗ——电蚀-超声加工
 ЭЭХАБ——电蚀电化学-电磨料加工
 ЭЭХАЛ——电蚀电化学-电金刚石加工
 ЭЭХО——电蚀-电化学加工
 ЭЭХР——电蚀-电化学切割

第一章 电加工及复合加工方法的分类

尽管在方式、设备、外形、用途上各不相同，但是，利用电能或电能产生的特殊物理现象以去除金属或使被加工工件变形的加工方法均属于电加工和复合加工。

在图 1-1 中列举了电加工和复合加工方法。它们是根据实现这些方法的主要电化学和电物理现象，并考虑了原理上的一些特点分类的。这些特点使电加工和复合加工与主要是利用机械(力)作用到被加工材料上的传统材料加工工艺方法有了区别，其主要特点如下：

1. 任何材料的电加工和复合加工都和材料的机械性能（硬度、粘性、脆性等）无关，加工时不需施加很大的机械力。在大多数情况下，加工是在加工工具和被加工零件无机械接触状态下进行的。

2. 电加工和复合加工时完全没有必要使用比被加工材料更硬、强度更大的特殊加工工具，因而也不需要通过机床—夹具—刀具—零件系统传递很大的机械力。这样就可简化运动并减轻设备重量，因为机床部件所需要的刚性和精度可以得到足够的保证。在许多情况下，根本不用加工工具（按通常理解那样的工具），工具的功能是由以适当方式形成的电子、离子、光子等的束流实现的。

3. 借助于电加工和复合加工可以完成很多工艺工序，这些工序用切削加工和压力加工方法是无法完成的。这就使设计师能利用本质上新颖的原理解决开发机器、机械、仪器结构的任务，从而提高产品的可靠性和技术参数。

4. 在很多情况下，电加工和复合加工能降低昂贵工具和磨料材料消耗，能减少被加工材料的损失。

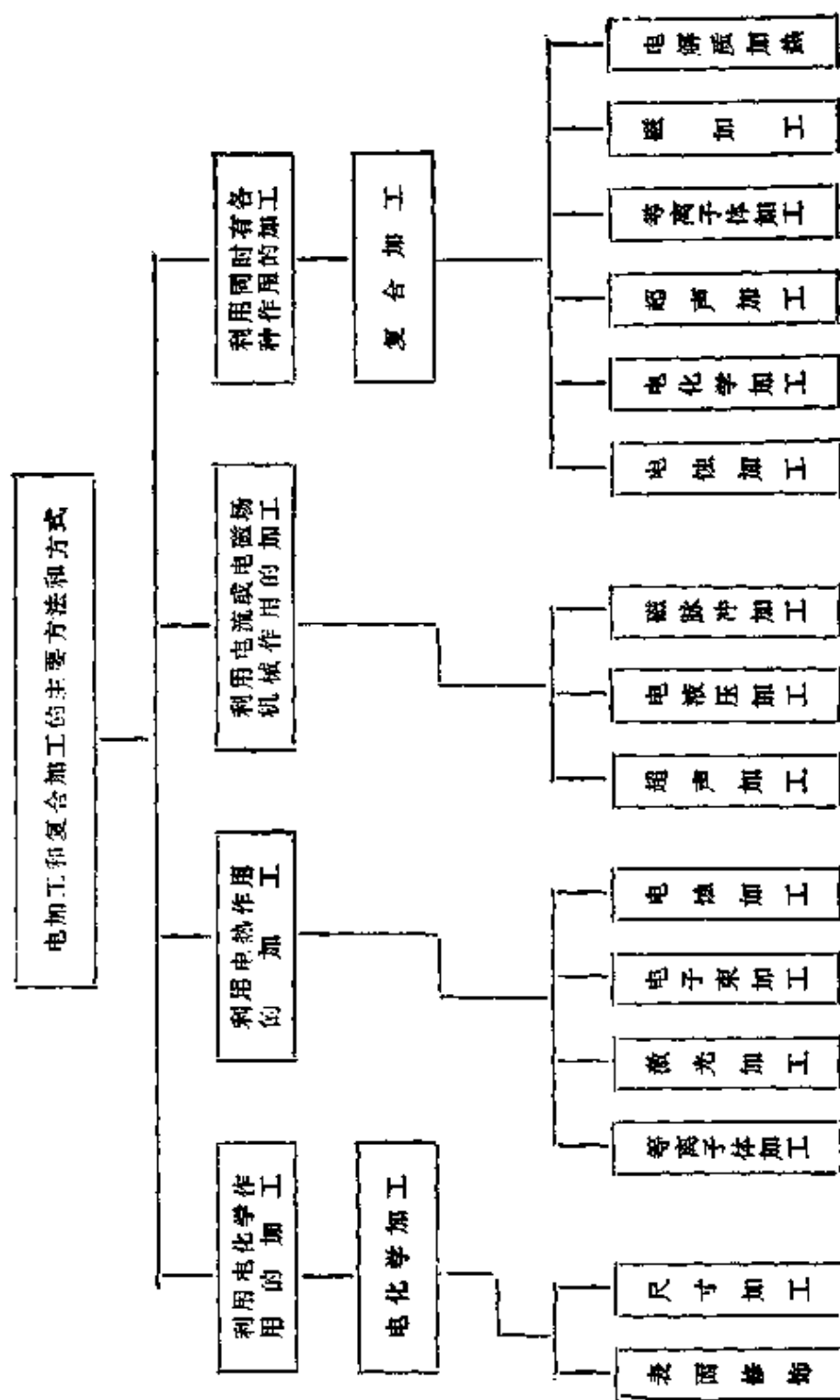


图 1-1

表1-1 金属加工工艺过程

工 序	金属体积比变换		变 换 速 度 (cm/s)	被加工表面 (μm)
	(cm^3/s)	(cm^3/J)		R_a
冷挤压	0.3~1.6	$(1.2\sim1.8)\times 10^{-8}$	0.2~2	0.32~1.25
冷顶锻	30~80	$(7\sim14)\times 10^{-4}$	40~100	1.25~2.5
冷弯薄板	—	0.1~0.2	1~10	—
冷轧、成型弯曲	160~320	$(2.5\sim2)\times 10^{-2}$	7~13	—
热变形 (不考虑加热 能量)	0.1~150	$(1.2\sim1.6)\times 10^{-2}$	$5\sim2\times 10^3$	—
在卧式锻压机上热锻	0.1~50	—	30~50	—
热变形加工	1~350	$(0.3\sim1)\times 10^{-4}$	3×10^{-2}	—
电镀: 电镀	$1.4\times 10^{-4}\sim$ 8×10^{-6}	$(0.2\sim1)\times 10^{-5}$	$7\times 10^{-6}\sim$ 8×10^{-8}	—
等离子喷涂	$(7\sim14)\times 10^{-2}$	$(0.14\sim1)\times 10^{-6}$	$4.3\times 10^{-2}\sim$ 3.3×10^{-4}	—
单行程剥取 (去壳、 去皮、粗加工)	—	$(2\sim2.5)\times 10^{-3}$	30~50	—
拉削	$4\times 10^{-3}\sim$ 1×10^{-1}	$(2.5\sim4)\times 10^{-4}$	1~10	0.16~2.5
铰孔 (极限值)	$5\times 10^{-3}\sim$ 5×10^{-1}	$(3\sim8)\times 10^{-5}$	15~160	0.16~2.5
切断: 冲击式	—	$(0.3\sim1)\times 10^{-3}$	$(1.5\sim1.8)\times 10^5$	1.25~2.5
在剪床上	—	$(2\sim2.5)\times 10^{-3}$	30~50	—
车削	$5\times 10^{-2}\sim 5$	$(4\sim6)\times 10^{-4}$	$(1.5\sim7.5)\times 10^2$	0.16~2.5
磨削	$(0.5\sim3)\times 10^{-2}$	$(1.1\sim1.2)\times 10^{-5}$	$(2.5\sim5)\times 10^3$	—
模压: 爆炸法	$(0.5\sim1)\times 10$	$(1.3\sim4.6)\times 10^{-2}$	$(0.5\sim1)\times 10^4$	0.32~1.25
在水压机上冷 压	—	$(1.5\sim5)\times 10^{-2}$	90~130	0.16~2.5
铣削 (极限值)	$2\times 10^{-3}\sim 1$	$(1.3\sim2)\times 10^{-4}$	$(2\sim6)\times 10^2$	0.32~2.5

程和工序的参数概值

的粗糙度	加工 精度 等级	变质层 (应变层) 深 (μm)	金属转化的比能量消耗		电加工和复 合加工方法
			(J/cm^2)	($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$)	
—	3~3 a	—	$(5.5\sim 8.5)\times 10^2$	$(2\sim 3)\times 10^{-2}$	МИО, УЗДО, ЭГО
10~20	3~3 a	—	$(7.3\sim 14)\times 10^2$	$(2.5\sim 4.4)\times 10^{-2}$	МИО, ЭГО
—	—	—	5~10	$(1.7\sim 3.5)\times 10^{-4}$	МИО, УЗДО, ЭГО
—	—	—	20~40	$(7\sim 14)\times 10^{-4}$	
—	—	—	60~80	$(2.1\sim 2.8)\times 10^3$	НЭ + ЭГО
10~160	5~7	—	—	—	МИО, ЭГО + НЭ
—	—	—	$(9\sim 34)\times 10^3$	$(3.1\sim 12)\times 10^{-1}$	НЭ
—	—	—	$(0.5\sim 10)\times 10^4$	2.5~14	ПЗО
—	—	—	$(1\sim 7.3)\times 10^5$	3.5~25.5	ПЗО
40~320	8~11	—	400~500	$(1.4\sim 1.7)\times 10^{-2}$	ПЗО, ПЗМО, ЭКО, ЭЭО
10~20	2~5	10~25	$(2.5\sim 4)\times 10^3$	$(8.7\sim 13)\times 10^{-2}$	АМО, ЭЭО
10~20	2~3 a	10~60	$(1.2\sim 3)\times 10^4$	0.4~1.0	АМО, КМО
10~80	2~4	50~70	$(1\sim 1.3)\times 10^3$	$(3.5\sim 4.5)\times 10^{-2}$	МИО, ЭГО
20~320	8~11	—	400~500	$(1.4\sim 1.7)\times 10^{-2}$	АМР, ЭКАР
10~320	2~8	20~200	$(1.7\sim 2.5)\times 10^3$	—	АМО, ЭЭО
10~20	1~4	1~60	$(5.5\sim 7)\times 10^4$	2~2.5	ЭКАР
—	3~4	—	22~76	$(0.75\sim 2.6)\times 10^3$	КМО, МАО, УЗЦ, ЭХО
—	3~5	—	20~65	$(7.5\sim 22)\times 10^{-4}$	МИО, ЭГО
10~80	2~7	20~70	$(5\sim 7.5)\times 10^2$	—	АМР, УЗР, ЭЭО, ЭКАР, ЭХРО

5. 与一般机械加工方法不同,电加工和复合加工的比生产率和速度与被加工材料的硬度和脆性无关,而一般机械加工受材料的硬度和脆性的影响是非常明显的。电加工和复合加工方法加工硬质和脆性材料的劳动量及加工持续时间要比切削加工小。

增大送入加工区的电能容量(密度),可以显著地提高比加工生产率和总加工生产率。在很多情况下,这并不要求成比例地增加设备的重量和外形尺寸以及工具或夹具的尺寸。

6. 与切削加工相比,电加工和复合加工可利用更为简单和现代化的手段,部分地或全部地实现机械化和自动化,可以更容易地过渡到同时看管多台设备和程序控制各道工序。电加工和复合加工中的大多数方法,其成形运动比切削加工简单。加工用的工具电极比切削刀具易于制取。

7. 电加工和复合加工的特点是工艺能力广泛,几乎包括了在金属加工、机器制造和相近领域中所遇到的所有工序,而且能保证在最佳情况下达到所要求的精度、表面质量、使用特性等指标,并能提高工具寿命等。

8. 电加工和复合加工通常不需操作者付出很大的体力,操作者不会感到增加多大的负担或者感到疲倦。对操纵机械化、自动化装备的工人技艺也不要求很高。但是,这些装备的调整工和编程人员的技艺则应该是很高的。

对于工人来说,在电加工和复合加工工段工作点的人机工程和美学的特性比起传统切削加工方法要好得多。

9. 利用电加工和复合加工的某一种方法与机械加工或化工中的很多工序相复合,可在不使工艺和设备复杂的情况下显著地强化后者。

10. 借助于电加工和复合加工可容易地实现大型零部件的局部加工,而不需要采用专门的大型机床或者笨重的设备。

除了具有良好的技术、工艺和经济指标方面许多优点之外,电加工和复合加工的每一种方法也存在着缺点或局限性,这是由其本质决定的并带有时间性。这些都应在选择电加工和复合加工