

电加工工藝学

勃彼洛夫、杰姆丘克、И. Я. 保高拉德、
Л. Я. 保高拉德、卡兹納切依、別里亞也夫、
阿斯基納澤、扎依采娃、賈特欽科合著



机械工业出版社

15.12.12.
5910
(1)

电 加 工 工 藝 学

勃彼洛夫、傑姆丘克、И. Я. 保高拉德、
Л. Я. 保高拉德、卡茲納切依、別里亞也夫、
阿斯基納澤、扎依采娃、賈特欽科合著

李玉璣、陈 燕 譯

熊大達、王子馨 校

出版者的話

本書全面地綜合了已經研究成熟、并且已在工业中行之有效的金屬电加工工艺的各个方面: 电化学加工(电抛光和电成型), 电热加工(熔化材料的和不熔化材料的)和电蚀加工(阳極机械加工和电火花加工)。这些方法在国外已广泛地采用, 在我国好些工业企业中也已試用成功, 它将对提高劳动生产率和改进产品质量起一定的作用。因此翻譯出版本書, 以便能更好地推广这一先进經驗。本書供工程技术人員、設計人員和科学研究人員們参考, 也可供高等和中等技术学校的同學們學習。

苏联Л. Я. Попилов, И. С. Демчук, И. Я. Богорад, Л. Я. Богорад, Б. Я. Казначей, Г. С. Беляев, Б. М. Аскинази, Л. П. Зайцева, А. П. Дятченко合著‘Электротехнология’(Судпромгиз 1952 年第一版)

*

*

*

NO. 1039

1956 年 10 月第一版 1959 年 10 月第一版第二次印刷

850×1168^{1/32} 字数 273 千字 印張 10^{12/16} 10,001—12,020 册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第 008 号 定价(11) 2.00 元

目 次

原序.....	6
緒論.....	7

第一部分 电化学加工法

第一篇 金屬的电抛光.....	11
第一章 电抛光法的实質	11
1. 金屬去除过程的本質 (12)——2. 应用範圍 (15)	
第二章 电抛光的技術特性	15
3. 机械性質 (15)——4. 表面微觀幾何 (17)——5. 表面的耐腐蝕性 (21)——6. 光学性質 (23)	
第三章 电抛光的設備与材料	23
7. 槽、陰極、夾具 (24)——8. 用电量与电源 (32)——9. 电解液 (35)——10. 工段設備与設計 (44)	
第四章 电抛光工藝.....	45
11. 操作技術 (45)——12. 管道附件、管子、渦輪机葉片的电抛光 (48)——13. 刀具及量具的加工 (52)——14. 金相学中的电抛光 (55)	
第二篇 电成型.....	66
第一章 电成型法的实質	66
1. 电成型过程的主要規律 (66)——2. 应用範圍 (69)	
第二章 設備及材料	70
3. 工段設備 (70)——4. 模型 (72)	
第三章 电成型技術	74
5. 模型表面的加工 (75)——6. 積聚工序 (89)	

第二部分 电熱加工法

第一篇 不熔化材料的电熱加工99

第一章 加熱方法99

1. 电解液加熱 (101)——2. 接觸加熱 (102)——3. 感应加熱 (105)——4. 电介質加熱 (111)

第二章 黑色金屬的表面強化114

5. 电解液加熱淬火 (115)——6. 接觸加熱淬火 (120)——7. 感应加熱淬火 (124)

第三章 压力加工前金屬的加熱133

8. 在电解液中加熱的金屬压力加工 (134)——9. 用接觸加熱的金屬压力加工 (138)——10. 用感应加熱的金屬压力加工 (143)

第四章 金屬的电气机械精加工155

11. 精車 (155)——12. 整平 (160)

第五章 用高频电流乾燥及粘合材料及零件163

13. 木材的乾燥 (163)——14. 木材的粘合与製膠合板 (165)——15. 型砂的乾燥 (169)

第二篇 熔化金屬的电熱加工174

第一章 黑色及有色金屬及其合金的熔化174

1. 在有鋼心的感应爐中熔化金屬 (175)——2. 在無鋼心感应爐中熔化金屬 (179)——3. 在真空爐中熔化金屬 (186)

第二章 金屬的鑄鋸188

4. 鑄鋸時的加熱方法 (189)——5. 鋸料与熔剂 (190)——6. 結構零件用感应加熱的鑄鋸 (194)——7. 在刀具上鑄鋸硬質合金刀片 (197)

第三部分 金屬的电蝕加工法

第一篇 金屬的陽極机械加工208

第一章 陽極機械加工的實質	208
1. 去除金屬過程的本質 (209)——2. 加工過程的基本規律 (213)——3. 各種金屬的被加工性 (218)——4. 工具 (219)	
第二章 切刀與銑刀的陽極機械刃磨	220
5. 硬質合金刀具的刃磨工藝 (220)——6. 機床 (232)	
第三章 金屬的陽極機械切割	246
7. 切割工藝 (247)——8. 機床 (254)	
第四章 陽極機械加工法應用範圍的擴展	267
9. 特形槽穴的插削 (367)——10. 精加工 (269)	
第二篇 金屬的电火花加工	271
第一章 加工方法的實質	271
1. 加工過程的物理原理 (271)——2. 應用範圍 (273)	
第二章 电火花加工法的技術特徵	275
3. 加工用量 (277)——4. 电火花加工後的表面質量 (279)——5. 金屬去除的強烈程度 (283)——6. 加工精度 (285)	
第三章 电火花加工的工具及設備	286
7. 工具與媒質 (286)——8. 設備的分類 (292)——9. 設備的電路元件及自動控制 (294)——10. 幾種標準的機床及器械 (302)	
第四章 电火花加工工藝	318
11. 操作技術 (318)——12. 穿製孔穴 (320)——13. 鋼表面的強化 (332)——14. 各種电火花加工工序 (339)	
參考文獻	342

原 序

提高勞動生產率及改善產品質量，改進產品的結構，繁重操作過程的機械化，縮短生產週期——這些都是工業中技術改進的最重要的問題。

對於解決這些問題來講，新的工藝方法，特別是在蘇聯所創造的、以廣泛直接應用電能為基礎的電加工工藝，有着重要的意義。近年來，由於許多巨大水電站的建立，電能的生產增加了許多倍。因而，就給電加工工藝的發展創造了更有利的條件。

當然，工程技術人員及科學工作幹部們，對電加工工藝問題付了足夠的注意。但是，在討論電加工方法的豐富的書籍中，直到現在還沒有一本綜合所有種類的应用方法的書籍。

這就使電加工工藝在工業上的推廣遇到一定的困難，而這也就是編寫本書的理由。本書包括的材料反映了工業界及科學研究機關、從事研究與推廣電加工工藝的經驗。

書中着重闡明電加工的一些主要方法的工藝問題與物理本質問題，至於有關電加工機床與裝置的設計問題，由於它們總是在不斷地改進，因此只用少量篇幅敘述。

書中第一部分討論利用電化學現象的加工方法；第二部分討論利用電流的熱效应的電熱加工法；第三部分敘述根據電的侵蝕現象利用放電破壞金屬的電蝕加工法。

本書不敘述某些久已熟知並且廣泛發表了的電加工方法，例如，金屬的電鍍和電沉積；也不敘述某些研究很少和幾乎在工業上沒有应用的方法，例如，電氣滲碳，電氣合金法，電氣着色。

還必須指出，由於缺乏關於電加工的公認的術語，所以書中保留了很多常用的名詞。例如，用電拋光代替電磨光，用穿孔代替開孔及挖穴，用粗加工與研磨代替初加工與終加工。

這本書是關於電加工工藝基本知識的綜合敘述的初次嘗試，缺點自然在所難免，編者以感謝的心情歡迎批評和指正。

[蒸汽机把熱能轉变成机械運動，但是电的利用給我們開闢了一條道路，那就是把所有種類的能量——熱能，机械運動，电，磁，光——从一种形式轉变成另一种形式或者还原，並且把它們应用到工業中去……

……十分明顯，由於这个緣故生產力已如此地增長，致使它們的管理越來越不是資產階級力量之所及。]

弗·恩格斯

緒 論

电加工方法的產生与發展，光輝地說明了每一种社会結構都是与它自己的生產力發展水平相適應的这一著名的馬克思主义法則。

电能巨大能力——电的万能性，發電和輸电的簡單性，便於集中为大的或分散成为小的能量，能够变成任意其它形式的能量——在技術上已經熟知100年以上，但在財產私有制的資本主义社会条件下則不能利用到应有的程度。

潛藏於电的性質中的所有的能力要想完全發揮，只有在生產力已經从資本主义的人为的桎梏中解放出來了的社会才能实现。

苏联國民經濟所生產与使用的电能是巨大的。看一下明天的光輝远景，那時幾十億仟瓦·小時的电能，沿着高压輸电綫路，通向廣大的國土的所有角落。

在社会主义國家裏，生產關係完全適合於生產力的特徵，这就能够把整个國民經濟導入統一的計劃之內，也就能够推動与解決那些在資本主义社会条件中連提都提不出來的科学技術問題。

电加工工藝就是開闢这个可能性的生動的例証。在这領域內，苏維埃技術界把电能的間接利用（即把电能变成熱能或机械能之後

再予利用)轉變成電能的直接利用,這種轉變比從前業已熟知的工藝過程更加適合於電的本質。

電加工工藝的產生與發展是利用電的新型方法的綜合,是蘇維埃科學與技術的巨大成就。這只有在近代的條件下才有可能實現。然而,為了創造必需的基礎和前提,千百的學者們、工程師們、研究工作者們、發明家們和工人們曾經進行了兩個世紀的工作。

蘇維埃人民深深地尊敬羅蒙諾索夫(М. В. Ломоносов)——首先從事電的性質的研究並且提出了電學的理論基礎的學者;彼得羅夫(В. В. Петров)——發現電弧並指出利用它的可能性;雅柯貝(Б. С. Якобь)——電成型(電鑄)及電動機的發明者;楞茨(Э. Х. Ленц)——奠定了利用電熱過程的基礎;契柯列夫(В. Н. Чиколев)——許多有關實際利用電的方法的創作者;別納爾道斯(Н. Н. Бенардос)及斯拉汶諾夫(Н. Г. Славянов)——金屬的電銲、熔煉及切割的創造者;涅羅格金(В. П. Вологдин)——在工業中利用高頻電流的創始者。

在蘇維埃年代裏,為發展電加工工藝準備基礎的工作有着特別廣大的規模。

伊格納節夫(А. М. Игнатъев)應用電能加工金屬的工作是眾所週知的;蓋維林格(Н. В. Гевелинг)關於接觸電熱加工法的研究結果已在工業上應用;杜里切夫斯基(Д. А. Дульчевский)所創議的用震動石墨電極進行電氣強化的方法已經得到專利。

由涅羅格金所創造並且由巴巴特(Г. И. Бабат)和羅金斯基(М. Г. Лозинский)所發展的高頻電流在工業上應用的技術,已被廣泛採用。在工業上到處應用着由古雪夫(В. П. Гусев)(陽極機械加工)、Б. Р. 拉札連科和 Н. И. 拉札連科(Лазаренко)(電火花加工)所發明的金屬的電加工方法。在電解液中加熱的方法有着相當的應用;電接觸磨削法和幾十種其他新型的電加工工藝也是常見的了。

毫無疑問，我們还是处在这个很有前途的技術的起始階段，這項技術的發展規模在不久的將來必然会得到不可限量的成長。

現有的技術提供了利用電能的廣闊的可能性。但到現在為止，在工業上还不是全部都能有效地實現。

研究得最透徹及工業上掌握得較好的電加工工藝方法，列於表1內。

電加工工藝與現有技術上採用的加工方法截然不同。由於它的利用，使工業上的能量、燃料、貴重及稀少材料的消耗顯著降低。

應用電加工工藝，可使繁重的手工操作改為機械化，提高生產技術水平並簡化生產組織，增加高質量的產品。

電加工工藝的推廣為導向流水生產創造了條件，改善了勞動條件，有助於創立更合乎工藝要求的設計，並且把新的設計材料引到技術規程中來。

電加工工藝對於解決某些複雜的技術問題顯得很是有利，它能促進快速加工法的推行，並且成為工業中技術改進的重要因素。

利用電的新的性質還只是剛剛開始。

無疑地，在這條道路上繼續前進必將獲得新的成就。

表1 电加工方法的分类

加工方法 的 名 称		加 工 時 的 主 要 作 用													
		电 化 学 法						电 熱 法						机械法	
								脈衝电流		穩 定 电 流					
		表面 層的 成分 改变	成分 不改 变	金屬 溶解 於溶 液中	形成 容易 去除 的膜	形成 牢固 的薄 膜	从溶 液中 析出 金屬	短 於 100 公 秒 脈 衝	長 於 100 公 秒 脈 衝	局 部 熔 化	全 部 熔 化	局 部 不 熔 化	全 部 不 熔 化	動 力 學 的	靜 力 學 的
陽極-机械精加工法(拋光、磨削、研磨)				+										0	
陽極-机械粗加工法(切断、粗加工、銑削)				0			+							0	
高頻熱处理(淬火、退火、回火)										0	+				
高頻及低頻熔煉									0	+				0	
接觸加熱及鍍鋅									0		+				
接觸及电容鍍接							+		0					0	
接觸切断及刃磨									+				0		
电解液中加熱		+							0	0	0	0			
电气合金法、电气渗碳法、陰極法去除氧化皮	+											0			
电气机械切削及整平											+		0		
电火花穿孔、切割、刃磨、刻寫							+								
电火花強化及積聚	0							+					0		
电气鑽孔及电气插削			0	+											
电浸蝕			+												
电沉積及电成型						+									
电气氧化处理及电着色	0				+										
电拋光			+	+											
化学-机械加工(磨削、研磨)		0	+										0		

代号：(+)——主要作用； (0)——次要作用。

代号: (+)——主要作用; (0)——次要作用。

第一部分 电化学加工法

当电流通过电极及电解液时，在电极表面及电解液中发生化学作用，以利用这种化学作用为基础的金属加工方法称为电化学加工法。电化学加工法中最常用的有：电抛光、电沉积、电成型、电浸蚀及电磨削。

第一篇 金属的电抛光

金属的电抛光——整平金属粗糙表面的不平度的电化学加工法——是在俄罗斯发明的。电抛光的特點是工藝簡單及能被廣泛应用。电抛光近年來在工業上被廣泛地用作金属零件的修飾加工，改善其微觀幾何，提高其耐腐蝕性，並被用以使零件獲得各种特殊性質。

电抛光工藝尚未完全確立，它的理論問題尚未全部澄清，但現有經驗已經使我們目前就有可能在工業上廣泛地应用电抛光法。

第一章 电抛光法的實質

目前關於电抛光过程的實質有很多不同的觀點，但是其中沒有一個觀點是完整詳盡的，因为电抛光过程是由很多各种各样的因素所决定的。

1 金屬去除过程的本質

当直流电流通过各种化合物（鹽、酸、碱）的水溶液時，發生一般称之为电解的物理化学現象。

电解時，通常在放入电解液中的导体电极表面上有气体析出（圖1）。

有如电解水時形成的結果，連結在电源負極的导体——陰極1上析出氫气，而連接於正極的导体——陽極2上析出氧气。在很多情況下，与上述現象同時發生陽極表面的溶解（陽極溶解），金屬進入溶液而成为鹽。

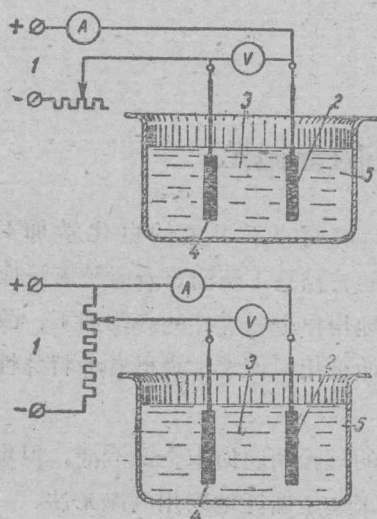


圖1 电解槽原理示意圖：

1—电源； 2—陽極； 3—电解液；
4—陰極； 5—槽。

假如以各种金屬鹽類作电解液，在陰極表面上時常發生純金屬的沉積。当电解液的成分适当並符合一定的条件時，在陽極溶解的同時，陽極表面上出現强烈的光澤及其表面粗糙度的整平。这些現象就是这一金屬表面加工新法——电抛光的基礎。

將金屬零件放入裝有特殊的电解液的槽子5中作为陽極（圖1），在短時間內即可得到平滑和光亮的零件表面。

电抛光時，在陽極表面上發生的过程的實質还没有充分研究明白。但是可以確定，由於許多因

素的影响可以發生各种不同性質的过程。这些过程之一就是：由於被加工表面的个别部分的不均匀的陽極溶解而達到粗糙度的整平，而这不均匀的溶解則受一种粘性过饱和鹽層（薄膜）的產生所制約。

圖 2 表示薄膜的生成順序，以及它在被加工表面的分佈情況。

從圖 2 可以清楚地看出，突起部分 1 的電阻顯著地低於凹入部分 2 的電阻。其結果是突出部分溶解較快和較劇烈，也就是粗糙的表面逐漸地被整平。

實踐證明，在電拋光的許多場合中，表面上不生成粘性薄膜。這個事實引起了各種不同的假設。一說認為：電拋光時粗糙表面的凹入處被電解過程中產生的較厚的（比突起部分）氣體層所絕緣。

有一種獨創的和更正確的觀念[●]是：電拋光的主要原因是構成金屬表面的晶體的不同界面的選擇性的不均勻溶解。

與此類似的稱為金屬的陽極結晶破壞的過程（與陰極結晶生成相對），是金屬晶體的不同界面的不同性質的結果。這種現象又是與金屬的本性，其所處狀態及加工條件相關聯的。

在前一工序中受到較大程度的變形的表面突起部分，在構造上不完善的及成長不充足的晶體界面以及其他有缺陷部分，在電解時一般以較高速度溶解。結果表面被整平。在文獻中也有指出[⊙]，電拋光只有在這樣的條件下才能很好地進行：就是在陽極表面上形成的薄膜能隔絕陽極表面與電解液的直接接觸，並且能防止金屬在酸中的自溶或電化學浸蝕。

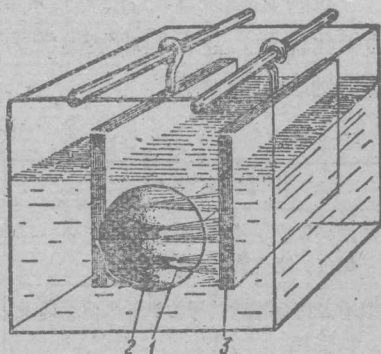


圖 2 電解時陽極表面上粘性薄膜的形成：
1—陽極表面上的突起處（放大的）；2—陽極表面上的凹處；3—陰極。

● 伏茲德維任斯基(Г. С. Воздвиженский)編：[嘉桑基洛夫嘉桑化工學院(КХТИ)金屬電拋光科學技術會議(1947年)資料]。

⊙ 托爾齊曼諾夫(Л. А. Торшманов)著：[陽極精密光整加工](嘉桑基洛夫嘉桑化工學院的學位論文)(1950年)。

也可以遇到[●] 这样一种观念：电抛光的過程是在陽極上生成硬的氧化薄膜，这薄膜由於电流力綫的緊密集中及由此而引起的表面張力的改变而破裂。

表 2 电抛光的用途

电 抛 光 的 对 象	电 抛 光 的 目 的
由鋼、青銅、黃銅製造的水力、蒸汽、煤氣、空气管道系統的附件	改善內表面的微觀幾何及減少摩擦損失，提高耐腐蝕性，改善外觀
具有表面金屬鍍蓋層的机器機構及儀器的零件	鍍蓋前的加工，为了更好地与表面附着及提高鍍蓋層的光滑度，簡化主要工序及節約稀有金屬
具有衝壓的或擊鑿的孔的零件	去除孔邊上的毛邊及飛刺
由高合金鋼製造的零件	顯示晶體間的腐蝕傾向
照明技術儀器上的鏡面与反射面，光学机械工業的零件	提高光綫反射係數，提高耐腐蝕性
用於金屬切削的、衝擊的、木材加工的、測量的、衝壓的及鍛造的工具	由於除掉回火層及改善表面微觀幾何而提高其寿命。切削刃面的刃磨与研磨。減低刀具与被加工材料的摩擦
測定微量硬度及各种物理研究用的試件。金相研究用的磨片	把会影响研究与測量結果的已經變形的及冷硬化的表面層除掉。顯露出軟金屬及合金的金相組織的細節，減少製備試片的困难
圓柱形的、帶狀的、平面的及特殊的彈簧	提高耐疲勞強度及耐腐蝕性。消除氫氣飽和的危險，減少加工的困难
各种用途的貯藏器、空心的外殼、製品及零件	用通常的方法难以接觸到的部分的拋光
特殊鋼製的管子	提高耐腐蝕性
渦輪机葉片	提高耐腐蝕性，減少加工困难及使加工機械化，提高生產率

● 列汶(А. И. Левин)編：「机器製造科学技術工程学会(Труды Уралмашин)工作彙報」第一期，1946年。

關於在表面整平時粘性薄膜的作用及結構的意義是正確理解電拋光工藝所需的足夠的基礎。

2 應用範圍

電拋光給金屬表面的全部性質以重大的影響。電拋光顯著地改善表面的微觀幾何，提高其耐腐蝕性，增加鍍蓋層的附着力，減低摩擦係數，增大光線反射係數。

電拋光對金屬表面各種性質都有好的影響，因此這種加工方法得到各種各樣的应用。

在表 2 中列出數種用於造船工業範圍的電拋光對象。

第二章 電拋光的技術特性

在電拋光過程中，由於去除了表面層金屬，引起被加工零件很多技術特性的重大改變。若干物理化學性質（微量硬度、耐疲勞強度、表面微觀幾何、耐腐蝕性、電化學性質、光學特性等）得到顯著的改善。

在大多數情況下，上述性質的變化是平行地發生的，這更提高了這種加工方法的實用價值。

3 機械性質

電拋光整平金屬表面的粗糙度，溶解掉金屬表面的變形及冷硬層，消除以前工藝工序所造成的表面層內應力的集中，所以電拋光對被加工零件性質的影響都是有利的。

在大多數情況下，電拋光後金屬在靜載荷下的機械強度指標提高。在交變載荷下機械強度指標的改變情況沒有一定。在實際中，已知電拋光對這些指標的影響有時是良好的，有時是不良的。例如機械拋光的與浸蝕過的鋼彈簧在斷裂前所能承受的彎曲次數比電拋光的少 20~40%，這證明了電拋光的有利的影響。

此外，也已知有某些特殊鋼經過電拋光後降低了耐疲勞強度。

仔細的分析後得知，耐疲勞強度的降低是由於原來在零件表面上的能提高強度指標的冷硬層被去除的緣故。

表 3 3X 2 號鋼製零件在不同方式加工後的耐疲勞強度

從表 3 看出，當有冷硬表面的零件受到消除冷硬性的熱處理時（回火），則機械拋光的及電拋光的零件的耐疲勞強度即相接近。

加工方法	耐疲勞強度（公斤/公厘 ² ）	
	機械拋光後	電拋光後
不進行回火	32.5	29.5
在 250° 回火（兩小時）	29.0	30.5

電拋光並不給予金屬以附加的強度，它僅僅使得金屬能夠最充分地發揮其本來所具有的全部潛在強度。所觀察到的強度的提高是由於改善了表面微觀幾何，去掉了應力集中的部分或消除了金屬浸蝕時的氫氣飽和。甚至在表面上還保留着用肉眼能清楚地看到的粗糙度及溝紋時，仍能觀察到強度的提高。

但是，當電拋光的用量不正確時，由於金屬的過度浸蝕，可能劇烈地減低強度。

眾所周知，電拋光時表面層金屬溶解。溶解的速度決定着得到所需的表面性質的快慢。被去除的表面層的大小也決定着表面性質改變的特徵。在這些性質改變之中包括由於去掉了通常集中在很薄的表面層內的冷硬性而引起的表面微量硬度的降低。因而用電拋光去除冷硬性的方法被廣泛地使用在研究表面真正硬度的工作上。

下面（表 4）列出電拋光時金屬被去除的速度的一些數據。

表 4 電拋光時金屬去除的速度

（XPC 牌號電解液，電流密度 40 安培/公寸²，溫度 80~90°C）

拋光時間（分）	去除層厚（公忽）	拋光時間（分）	去除層厚（公忽）
3.0	5.0	6.0	22.0
3.5	8.0	8.0	29.0
4.5	15.0	10.0	34.0