

精密工學

特 殊 加 工

北海道大学教授

工学博士

佐 藤 敏 一 著

放電加工

電子束加工

離子加工

電漿加工

雷射加工

超音波加工

光蝕法與化學切削

化學鍍金

電解加工電解研削

電鑄加工

蘇品書 譯著 復漢出版社印行

精密工學

特 殊 加 工

北海道大学教授

工学博士

佐 藤 敏 一 著

放電加工

電子束加工

離子加工

電漿加工

雷射加工

超音波加工

光蝕法與化學切削

化學鍍金

電解加工電解研削

電鑄加工

蘇品書 譯著 復漢出版社印行

中華民國七十三年十一月出版

特殊加工

版權所有
翻印必究

平裝 二〇〇元
精裝 二〇四元

原著者：佐藤敏一

譯著者：蘇品書

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五一號

郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

生產加工所用的材料種類密切關連該國的產業構造，航空太空產業、海洋開發、核能產業等要求的材料常是被削性差的材料，難削性材料的用量可能日增。

因電子零件要求小形化而產生的積體電路已步入超LSI時代，須在微小容積中進行超微米的加工。各種網、陰蔽、影碟等都要求加工形狀的微細化、複雜化、高密度化。

在此情勢下，傳統的機械加工已難勝任，加工原理完全不同的嶄新加工法在生產加工技術中漸占較大的比重。這些加工法經不斷研究、開發、實用化，形成所謂的特殊加工（Non-traditional machining processes）。

本書的特殊加工定義為「利用機械能及熱能以外的能量為供給能量的加工法總稱」，除了放電成形、電磁成形、爆炸成形等外，以廣為實用的所有加工法為對象。

本書的記述以各種加工法的原理、構成、特色等為中心，着重基礎說明，未詳述實用時的加工條件或加工特性。期使讀者能有系統地瞭解特殊加工全貌。

特殊加工 / 目次

第1章 總 論	1
1.1 何謂特殊加工	1
1.2 特殊加工的發展經緯	1
1.3 特殊加工的分類	2
第2章 放電加工	5
2.1 放電加工的原理	5
2.2 脈衝性放電發生方式	
2.2.1 電容器放電回路	7
2.2.2 電晶體放電回路	11
2.2.3 電晶體控制式電容器放電回路	12
2.3 放電加工的加工特性	13
2.4 低電極消耗放電加工	15
2.5 線切割放電加工	17
2.5.1 線切割放電加工之構成	18
2.5.2 線切割放電加工的加工特性	19
2.5.3 線切割放電加工與雕模放電加工	21
2.6 放電加工的控制技術與加工技術	21
2.6.1 放電加工的適應控制	21
2.6.2 電極進給（極間隙）控制	23
2.6.3 搖控放電加工	24
2.6.4 NC 放電加工	24
2.7 放電加工的得失	25
2.8 放電加工的應用	27
2.8.1 雕模放電加工的應用	27

2.8.2 線切割放電加工的應用	31
------------------------	----

第3章 電子束加工 34

3.1 電子束加工的原理	34
3.2 電子束加工的構成	36
3.3 電子束用爲加工工具的特色	38
3.4 電子束加工的應用	40
3.4.1 電子束開孔加工	40
3.4.2 利用電子束的微小切削	41
3.5 電子束熔接的原理與構成	42
3.6 電子束用爲熔接熱源的特色	44
3.7 電子束熔接的應用	46

第4章 離子加工 48

4.1 離子束加工 (ion beam machining)	49
4.2 離子蝕刻與濺散蝕刻	50
4.2.1 濺散蝕刻 (sputter etching) 的構成	51
4.2.2 離子蝕刻 (ion etching) 的構成	52
4.2.3 濺散蝕刻與離子濺散的特色	53
4.2.4 濺散蝕刻及離子蝕刻的應用	54
4.3 濺散蒸着與離子鍍金	55
4.3.1 濺散蒸着 (sputter deposition) 的原理與方式	56
4.3.2 離子鍍金 (ion plating) 的原理與方式	58
4.3.3 濺散蒸着與離子鍍金的特色及應用，與真空蒸着的比較	60

第5章 電漿加工 65

5.1 電漿噴柱加工 (plasma jet machining)	66
5.1.1 電漿噴柱加工的構成	66
5.1.2 電漿噴柱加工的特色及應用	68
5.2 電漿噴柱熔接 (plasma jet welding)	71

5.3	電漿熔射 (plasma spraping)	73
5.4	電漿蝕刻 (plasma etching)	74
5.4.1	乾蝕的分類	74
5.4.2	電漿蝕刻的原理及構成	75
5.4.3	電漿蝕刻的特色及應用	76
5.5	電漿濺散複合蝕刻	81
5.6	電漿蒸着 (plasma deposition)	81

第6章 雷射加工 83

6.1	雷射的發光機構	83
6.2	加工用雷射的種類、振盪狀態及特色	85
6.2.1	固體雷射	85
6.2.2	氣體雷射	85
6.2.3	半導體雷射	86
6.2.4	加工用雷射的振盪狀態	86
6.3	雷射束加工 (laser beam machining)	88
6.3.1	雷射束加工原理	89
6.3.2	雷射束加工的構成	90
6.3.3	雷射束加工的應用	91
6.4	雷射熔接 (laser welding)	95
6.4.1	雷射熔接的機構	95
6.4.2	雷射熔接的應用	95
6.5	雷射加工的優缺點，與電子束加工的比較	97

第7章 超音波加工 100

7.1	超音波加工 (ultrasonic machining) 的構成	100
7.2	超音波振動的發生與放大	102
7.3	超音波加工的加工機構	104
7.4	超音波加工的加工特性	106
7.5	超音波加工的優點與缺點	108
7.6	超音波加工的應用	109

7.7 超音波熔接 (ultrasonic welding)	112
7.7.1 金屬材料的超音波熔接	112
7.7.2 塑膠的超音波熔接	113
第 8 章 光蝕法與化學切削	115
8.1 光蝕法的工程	115
8.2 光罩的製作	116
8.2.1 製作放大原圖 (art work)	116
8.2.2 照相工程 (camera work)	118
8.2.3 光罩的種類	119
8.3 感光耐蝕膜 (photo-resist)	121
8.3.1 感光耐蝕膜的種類	121
8.3.2 感光耐蝕膜的形成	124
8.4 曝光	124
8.4.1 密着曝光	124
8.4.2 非接觸式曝光	125
8.4.3 電子束曝光	129
8.4.4 X光曝光	129
8.4.5 遠紫外線曝光	129
8.5 現象	130
8.6 濕蝕	131
8.6.1 蝕刻方式	131
8.6.2 蝕刻液 (腐蝕液)	131
8.6.3 濕蝕法的加工形狀	133
8.6.4 異方性蝕刻	134
8.6.5 選擇腐蝕	135
8.7 光蝕法的應用	135
8.7.1 金屬材料的腐蝕法	136
8.7.2 半導體的腐蝕	138
8.8 化學切削的加工	140
8.8.1 化學切削的覆罩法	141

8.8.2	化學切削的腐蝕法	142
8.9	化學切削的優點及缺點	144
8.10	化學切削的應用	145

第9章 化學鍍金..... 148

9.1	化學蒸着	148
9.1.1	化學蒸着的原理	148
9.1.2	化學蒸着的特色	150
9.1.3	低溫 CVD 與低壓 CVD	151
9.1.4	CVD 的應用	152
9.2	電漿 CVD	153
9.3	無電解鍍金	154
9.3.1	無電解鍍金的原理	155
9.3.2	無電解鍍金的特色	156
9.3.3	無電解鍍金的應用	157
9.3.4	選擇無電解鍍金 (selective electroless plating)	160
9.4	浸漬鍍金 (immersion plating)	161

第10章 電解加工與電解研削..... 163

10.1	電解加工的一般構成	163
10.2	電解加工的加工速度及電流效率	165
10.3	電解加工的加工形狀生成過程	167
10.3.1	平衡加工間隙的生成	169
10.3.2	傾斜面的平衡加工間隙	169
10.4	電解加工用的電解液	169
10.4.1	電解加工電解液的機能及特性	169
10.4.2	電解加工用電解液的種類	170
10.5	工具電極的設計、製作及加工條件的控制	171
10.5.1	工具電極的修正	172
10.5.2	工具電極的製作法	173

10.5.3	加工條件的自動控制	174
10.6	電解加工的特色	174
10.6.1	電解加工的優點及缺點	174
10.6.2	電解加工與放電加工的比較	176
10.7	電解加工的應用	176
10.8	電解研削的原理及構成	180
10.9	電解研削用電解液	182
10.10	電解研削用砂輪	183
10.11	電解研削的特色及優缺點	184
10.12	電解研削的應用	186
第11章	電鑄加工	188
11.1	電鍍與電鑄加工	188
11.2	電鑄加工的工程	189
11.2.1	母模種類	190
11.2.2	母模的表面處理	191
11.2.3	電鑄金屬及電鑄浴的選擇	192
11.3	電鑄加工的優缺點	193
11.4	電鑄加工的應用	194
11.5	電鑄的應用技術	199
11.5.1	光電鑄 (photo-forming)	200
11.5.2	複合材料的電鑄	202
11.5.3	高速電鑄	204

第1章 總 論

1.1 何謂特殊加工

加工一詞在各分野有廣範圍的意義，機械製造分野的加工是指對有所要特性的材料供給能量，照希望作成材料的形狀、尺寸、表面狀態，賦予所要機能的操作。

特別着重表面狀態之成效時，稱為表面處理。

一般提到加工時，常指各種工作母機的加工——機械加工，這些機械加工的能源主要利用機械力加工材料，例如以高硬度材料作成的工具與被加工物相對運動，利用兩者的硬度差，除去被加工物的一部份（車床、鑽床、銑床、磨床等），或對被加工物施加超出彈性界限的機械力而改變形狀、尺寸的方法（鍛造、衝造等塑性加工）。

另有以熱能為加工主力，或併用熱能與機械力的一群加工法（鑄造、熔接、熱間鍛造等）。

傳統的加工法是供給機械能及熱能，用為加工的原動力，最近因各種要因，開發不以這些機械能及熱能為加工原理的多種加工法，而且實用化，這些加工法相對於傳統的常用加工法，總稱為特殊加工法，由此觀點，特殊加工可說是用機械能及熱能以外的能量為供給能量的加工法總稱。

1.2 特殊加工的發展經緯

超出傳統的機械加工法，以全新加工原理進行加工的方法已屬必要，促進特殊加工發達的要因大別有二：

- (i) 增大對難削性材料的加工能力。
- (ii) 加工形狀的複雜化、微小化、高密度化。

由於核能產業、太空產業、海洋開發等的進步，隨高速引擎的發達、重化學工業的高溫、高壓化等各種工業的發展，對材料特性（硬度、

韌性、耐熱性、耐蝕性、耐摩耗性等)的要求日趨嚴格,具備這些特性的特殊合金都是被削性差的材料,用傳統的機械式手段常不易加工,下舉數例:

(a) 模具的加工 大量生產的機械加工方式漸從切削加工移往塑性加工。此外,塑膠成形模具、壓鑄模具、橡膠、玻璃成形模具等模具用量日增,模具材料最要求硬度或韌性,若用傳統的機械加工必費時費事。又為延長模具壽命,常用超硬合金,此時,傳統的機械加工極難達成。

(b) 耐熱材料的加工 柴油、噴射、火箭引擎效率,對耐熱性的要求愈嚴格,此種耐熱材料的加工要求會日增。

可見特殊加工先是從難削性材料的加工出發。另有因加工的種類、形狀不易利用傳統的機械加工,例如:

(a) 鑽石眼模 抽線用鑽石眼模的開孔極費事,特別是機械性手段不易製作極小孔徑(例如直徑 0.02mm 以下)的鑽石眼模,工業上須利用機械加工以外的手段。手錶用寶石軸承、高純度氧化鋁基板等微小開孔亦屬同例。

(b) 異形穿孔 機械加工的鑽頭通常須旋轉,圓形以外的異形穿孔難辦,特殊加工有完全不用相當於鑽頭之固形物者,或即使用相當於工具者也完全不旋轉者,極有利於異形穿孔。

(c) 高密度、微細加工 各種網或陰蔽(shadow mask)等在相當寬度的面上高密度進行微小的加工。電子零件小型化而要求積體電路須在微小容積中高密度加工複雜形狀,此時常組合多種適當的特殊加工。

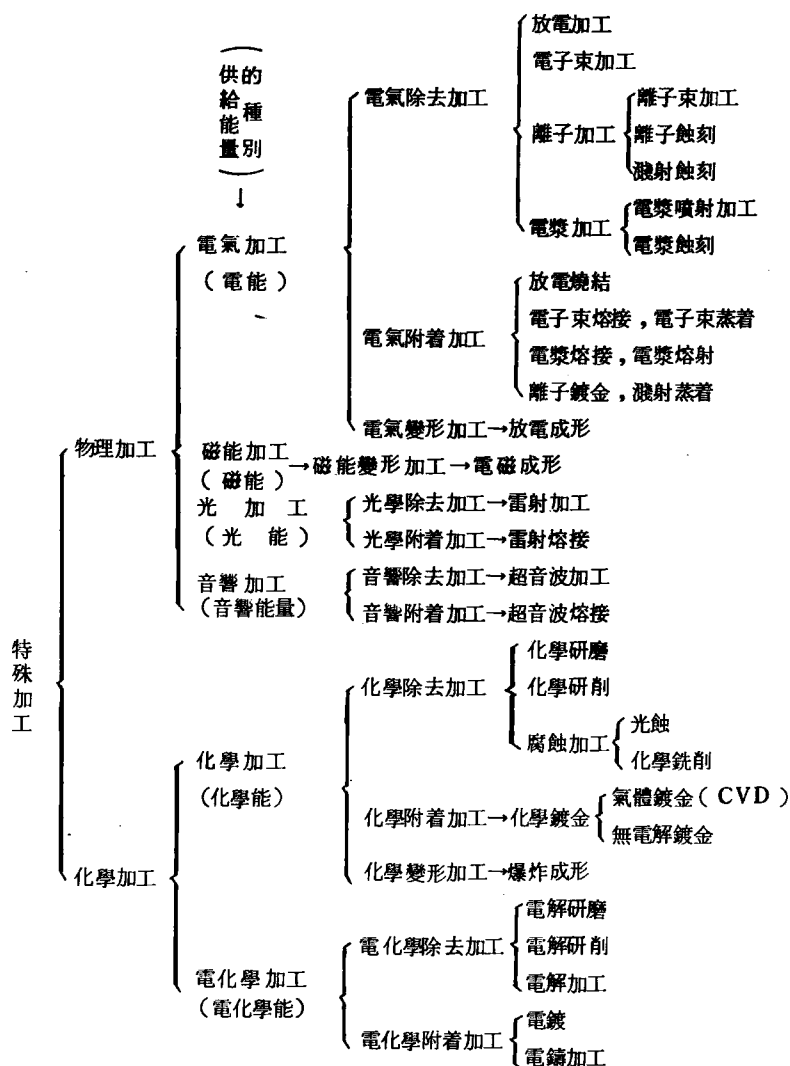
1.3 特殊加工的分類

材料的加工有從表面除去的方法、附着表面的方法、變形而不改變重量、體積的方法。所用的加工法大別有三。

(a) 除去加工 切削材料,從材料表面除去不必要部份,作成有所要幾何學形狀、尺寸、表面狀態的製品、包括用車刀或銑刀為工具的切削加工、用砂輪或磨料的研磨加工、磨料加工。

(b) 附着加工 設法使兩種以上的材料結合成有所望形狀、尺寸

表 1-1 特殊加工的分類



的製品，以各種熔接加工爲代表，熔射加工、蒸着、鍍金等也屬此範圍。

(c) 變形加工 對欲加工的材料施力或加熱，不改變體積或重量，變形到彈性界限以上，成爲希望的形狀、尺寸、諸如鑄造、鍛造、壓造等。

所有加工法都屬三者之一，各種特殊加工與它們有何關係，如何分類？

自然科學或技術的體系常分爲物理、化學、生理三大系，加工技術尙無生物法實用化，所以特殊加工暫先大別爲物理式與化學式，依成爲加工原動力的供給能量種別分類，再關連除去、附着、變形，如表 1.1 分類。

此表也列出化學研磨、化學研削、電解研磨之類純粹的表面處理，但下文省略。

第 2 章 放電加工

放電加工 (electric discharge machining, EDM) 又稱 spark-erosion machining, 為電氣除去加工之一, 初期放電加工的缺點是放電反覆頻度低, 加工速度小, 電極消耗大, 應用分野小, 後來顯著改善加工速度或電極消耗等加工特性, 擴大應用範圍, 此加工法為現在最廣用的特殊加工法之一, 從超過 1 m 的大模具到數 μm 的孔或溝加工, 特別是線切割放電加工機實用化後, 併用以往的刻模用放電加工機, 更擴大應用範圍。

2.1 放電加工的原理

放電加工是把電極 (工具) 和被加工物裝入絕緣性液體中, 其間通約 100 V 的電壓, 使兩者的距離徐徐接近, 電極及被加工物表面並非完全平滑面, 常有無數微小凹凸, 減小兩者的間隙時, 在電極或被加工物表面上某一點, 電場強度是可引起該點絕緣油的局部電離, 在此點經間隙發生火花放電。

火花 (spark) 溫度約 5000°C , 在發生火花的微小領域 (放電點), 被加工物的材料熔融或蒸發, 如此局部發生的火花使絕緣油也同時局部加熱, 油急速氣化, 使體積膨脹, 藉周圍油的慣性封閉作用而發生高壓力, 此高壓力使熔融或蒸發的材料從被加工物表面急速除去。

電極工具本身也因火花放電而消耗, 電極材料用銅之類熱傳導良好者或石墨等高融點材料, 放電條件適當的話, 電極的消耗只為被加工物消耗的 1% ~ 數%。

若持續放電, 火花放電會變成電弧放電, 電弧放電的放電域廣, 能量密度減小, 加工速度下降, 加工精度也差, 所以放電要止於火花放電及後續的短時間過渡電弧放電, 電極與被加工物之間連接適當電源, 以便反覆發生此種短時間脈衝性放電。因而, 最初的火花放電發生後數 μsec ~ 數 msec , 電極與被加工物之間的電壓消去, 絕緣油也回復原狀

態。

注) 放電形式分為電量放電、火花放電、輝光放電、電弧放電。電量放電為局部絕緣破壞狀態。輝光放電是在低氣壓、小電流時穩定存在的放電。都與放電加工不大有關係。火花放電為全路破壞狀態，但只存在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ sec，過一段時間就移成電弧放電，電弧放電在低電壓，大電流範圍為安定的放電。

電極與被加工物之間的距離徐徐減小的話，再度施加電壓時，會在被加工物面上的其他點發生第二火花。被加工面上依序發生此種脈衝性放電，被加工物會漸加工成電極形狀的反轉形狀。

放電加工的構成原理可總括為下示四要素：

- (1) 電極與被加工物浸入絕緣性液體中。
- (2) 使相互距離充分接近。
- (3) 在兩者之間發生短時間脈衝性放電。
- (4) 此放電盡量反覆多次。

隨加工的進行，電極與被加工物都消耗，為使相互的距離保持十分接近，需要精密控制的電極進給機構。除去的材料成為微粉狀加工屑而殘留液中，以泵浦和濾器使液循環而排除，它們的構成原理如圖 2-1 所示。

實際的放電加工是 1 秒間反覆數百～數十萬次脈衝性放電，各單發放電為 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 秒間的火花放電與後續的 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 秒間過渡電

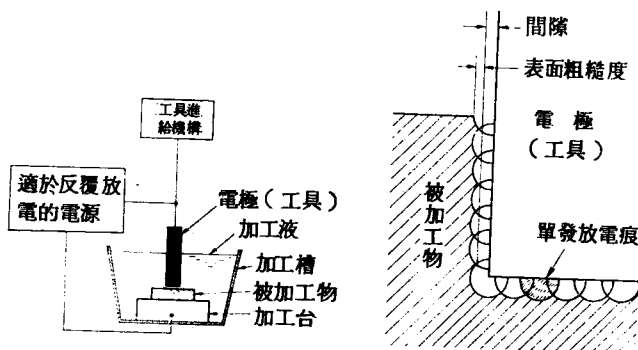


圖 2-1 放電加工的構成原理 圖 2-2 放電加工中加工形狀的生成

弧組成，各單發放電在被加工物面上生成微小放電痕（crater），累積如此發生的衆多放電痕而加工，圖 2·2 示此狀態，放電加工的加工形狀由單發放電痕集成，各單發放電的放電能大的話，放電痕增大，加工速度和間隙隨之增大，加工而粗糙度增大。放電加工用的放電是放電間隙小的液體中放電，放電柱因熱 pinch 效果而無法充分膨脹，成為高溫，在放電點有高電流密度。

注）電弧周圍被液體冷卻，該部份的電阻增加，電流集中於電弧中心部附近的高溫部，電弧的斷面積因冷卻而減小的現象稱為熱 pinch 效果。

2.2 脈衝性放電發生方式

放電加工須隔著某種時間間隔，依序反覆放電，此種反覆放電發生裝置有各種方式。

2.2.1 電容器放電回路

初期的反覆放電發生方式如圖 2·3 (a)所示，利用經充電電阻 R 之電容器 C 的充放電，稱為 RC 回路，設充電過程的端子電壓 V_c 、電源電壓 E 、電容器容量 C 、充電電阻 R 、充電電流 i ，則下式的電壓平衡式成立，

$$iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E$$

把兩邊微分，

$$di/dt + i/RC = 0$$

求得，

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

得，