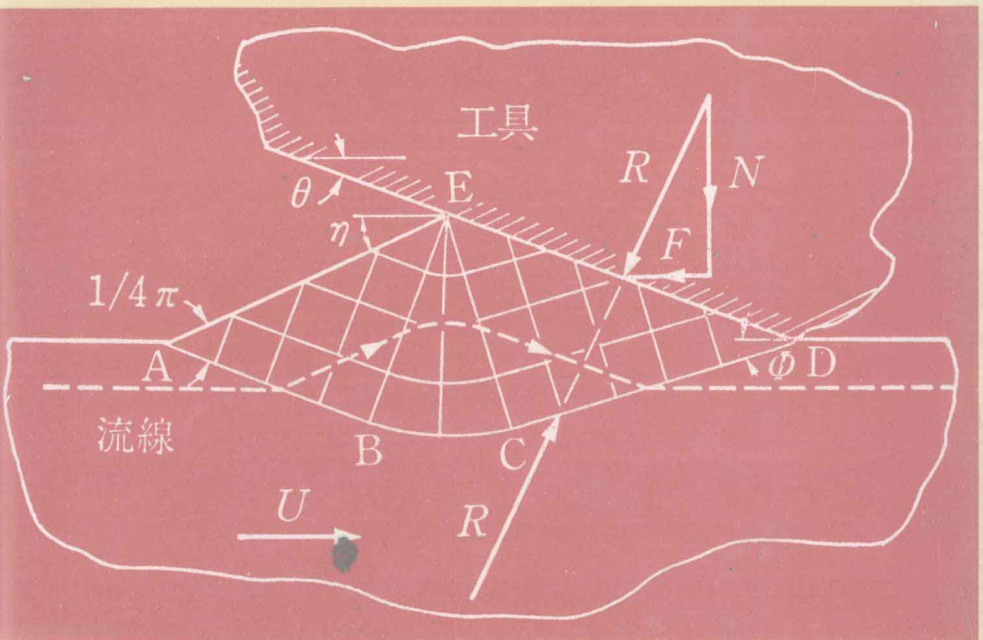


科技用書

塑性加工摩擦工學

跨分野精密加工科技工藝應用

TRIBOLOGY IN DEFORMATION
PROCESSES



復漢出版社印行

中華民國七十八年一月出版

塑性加工摩擦工學

版權所有
翻印必究

平裝 二元二角
精裝 二元六角

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 〇〇三一五九一—三號

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

1 項新技術課題供實用前，須同時解決多領域分野的很多問題。塑性加工的摩擦工學正是典型的多領域交界學問分野。交界領域的技術分野應如何推進研究？摩擦工學關連潤滑、摩擦、表面，各分野已開拓固有的研究方法和實驗技術，各有獨自的成果。已達非專家無法窺知的精緻程度。

塑性加工分野中，關連摩擦工學的內容有模與被加工材間接觸面的面壓、摩擦力、相對滑動速度、表面溫度、接觸狀態等，都在理論、實驗上究明相當程度。現場迫切的課題是防止磨燒和摩耗、改善製品表面品位。這些問題常因底細不詳而無法根本解決。

在多領域分野，相關專門知識的有機結合乃基礎解決所不可或缺。若特定的個人不可能精通相關分野，就須專家們協力。但這是好說不好做的事情，可能無領導者掌握全局，問題意識、着眼焦點也不同，或問題從任一分野都攻不破，為解決此種問題，須有效整理異質學問或技術，本書正以此宗旨編成。

本書敘述塑性加工摩擦工學的基礎到應用，立於上述觀點執筆。亦即，着重基礎、原理觀念的瞭解，進而學習實際的應用。執筆者都活躍於各專門分野的第一線。欲專攻塑性加工的學生、塑性加工的開發、研究者都可用本書為參考書。

1988年8月
編者

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 塑性加工摩擦學的發展與現狀 | 1 |
| 1.1.1 塑性加工摩擦學的研究起點 | 1 |
| 1.1.2 流體潤滑的實現 | 4 |
| 1.1.3 邊界潤滑機構的究明 | 5 |
| 1.1.4 磨損、摩耗問題 | 5 |
| 1.1.5 塑性加工用潤滑劑的開發 | 6 |
| 1.2 塑性加工摩擦學的展望 | 6 |
| 1.2.1 摩擦學的要求 | 6 |
| 1.2.2 摩擦係數的預知 | 7 |
| 1.2.3 磨損機構的解明 | 7 |
| 1.2.4 從基礎試驗值預知——試驗值間的相關 | 8 |
| 第 2 章 摩擦學的基礎 | 9 |
| 2.1 固體的表面與接觸 | 9 |
| 2.1.1 固體的表面 | 9 |
| 2.1.2 固體表面的接觸 | 11 |
| 2.2 摩擦 | 13 |
| 2.2.1 摩擦係數 | 13 |
| 2.2.2 摩擦機構 | 15 |
| 2.3 潤滑油 | 17 |
| 2.4 邊界潤滑 | 21 |

| | | |
|-------|------------|----|
| 2.4.1 | 邊界潤滑的機構 | 21 |
| 2.4.2 | 邊界潤滑膜 | 21 |
| 2.4.3 | 固體潤滑 | 22 |
| 2.5 | 流體潤滑 | 24 |
| 2.5.1 | 流體潤滑的原理與特色 | 24 |
| 2.5.2 | 流體潤滑理論 | 25 |
| 2.5.3 | 彈性流體潤滑理論 | 27 |
| 2.6 | 磨燒現象 | 29 |
| 2.6.1 | 磨燒的機構 | 29 |
| 2.6.2 | 摩擦面的溫升 | 31 |
| 2.6.3 | 溫升與潤滑膜 | 32 |
| 2.7 | 摩耗 | 33 |
| 2.7.1 | 摩耗的表現 | 33 |
| 2.7.2 | 摩耗的種類 | 33 |
| 2.7.3 | 磨損摩耗 | 34 |
| 2.7.4 | 凝着摩耗 | 36 |
| 2.7.5 | 腐蝕摩耗 | 37 |

第3章 塑性加工的摩擦學基礎 39

| | | |
|-------|---------------|----|
| 3.1 | 潤滑的目的及摩擦的功過 | 39 |
| 3.1.1 | 加工力及所需壓力 | 39 |
| 3.1.2 | 摩擦與材料流動 | 44 |
| 3.1.3 | 摩擦功與溫升 | 45 |
| 3.1.4 | 表面成效 | 47 |
| 3.2 | 塑性加工獨特的摩擦潤滑條件 | 49 |
| 3.2.1 | 降伏條件與摩擦的界限 | 49 |
| 3.2.2 | 塑性變形所致表面的變化 | 51 |
| 3.2.3 | 壓力及滑動速度的分佈 | 53 |
| 3.3 | 潤滑機構 | 54 |
| 3.3.1 | 潤滑劑的導入及捕捉 | 55 |
| 3.3.2 | 接觸狀態的模型 | 61 |

| | |
|----------------|----|
| 3.3.3 摩擦的機構及定律 | 63 |
|----------------|----|

第4章 摩擦學的計測 67

| | |
|------------------------|-----|
| 4.1 摩擦試驗的目的、功能與課題 | 67 |
| 4.2 泛用摩擦試驗法 | 71 |
| 4.2.1 點接觸形式 | 71 |
| 4.2.2 線接觸形式 | 74 |
| 4.2.3 面接觸形式 | 74 |
| 4.3 塑性加工用基礎摩擦試驗法 | 74 |
| 4.4 塑性加工模型摩擦試驗法 | 86 |
| 4.5 摩擦面的幾何學、物理、化學特性之計測 | 93 |
| 4.5.1 形狀觀察 | 96 |
| 4.5.2 元素分析及結合狀態 | 96 |
| 4.5.3 構造解析 | 99 |
| 4.6 潤滑油的物理、化學性質與其計測法 | 99 |
| 4.6.1 壓力—體積—溫度關係 | 99 |
| 4.6.2 粘度 | 100 |
| 4.6.3 熱性質 | 103 |
| 4.6.4 界面化學性質 | 104 |

第5章 塑性加工用潤滑劑 106

| | |
|--------------------------|-----|
| 5.1 塑性加工所用的潤滑劑與其特色 | 106 |
| 5.1.1 液體潤滑劑與基油 | 106 |
| 5.1.2 改善液體潤滑劑潤滑性的添加劑 | 112 |
| 5.1.3 在常溫、常壓為固形的潤滑劑及化成皮膜 | 115 |
| 5.2 塑性加工的潤滑條件與潤滑劑的適用 | 116 |
| 5.2.1 液體潤滑劑的適用與潤滑條件 | 116 |
| 5.2.2 固形潤滑劑的適用與潤滑條件 | 120 |
| 5.2.3 液體潤滑劑的使用特性與補助添加劑 | 120 |
| 5.3 塑性加工的機構學特色與潤滑劑的作用 | 121 |

第 6 章 塑性加工用工具材料 123

- 6.1 工具材料的組成與組織 123
 - 6.1.1 工具材料表面的組成與組織 123
 - 6.1.2 製造工具時的變質 128
 - 6.1.3 使用中發生的變質 128
- 6.2 工具材料的組成、組織與摩擦特性 132
 - 6.2.1 摩擦 132
 - 6.2.2 咬模 141
 - 6.2.3 潤滑劑的影響 143
- 6.3 工具材料的其他性質 144
- 6.4 工具材料及其熱處理、表面處理 144

第 7 章 塑性加工的摩擦課題 146

- 7.1 軋軋加工 146
 - 7.1.1 軋軋潤滑的特色 146
 - 7.1.2 冷軋油 151
 - 7.1.3 熱軋油 151
- 7.2 鍛造、擠壓加工 153
 - 7.2.1 摩擦條件的特色 153
 - 7.2.2 冷鍛的減摩對策例與其問題 155
 - 7.2.3 溫、熱間鍛造的減摩對策例與其問題 157
 - 7.2.4 熱間擠壓的減摩對策與其問題 159
 - 7.2.5 摩擦的課題與角色 160
 - 7.2.6 鍛造、擠壓加工用潤滑劑的分類 162
- 7.3 抽拉加工 162
 - 7.3.1 抽拉潤滑的特色 162
 - 7.3.2 潤滑機構 163
 - 7.3.3 抽拉用潤滑劑 163
 - 7.3.4 抽拉用工具材料 165
 - 7.3.5 強制潤滑法 165

| | | |
|-------|----------------|-----|
| 7.4 | 板材加工 | 167 |
| 7.4.1 | 深拉延加工 | 167 |
| 7.4.2 | 膨出加工 | 169 |
| 7.4.3 | 變薄拉延 | 170 |
| 7.4.4 | 輥軋成形 | 171 |
| 7.4.5 | 剪斷加工 | 171 |
| 7.4.6 | 表面損傷 | 172 |
| 7.4.7 | 板材加工摩擦學的未來 | 176 |
| 7.4.8 | 板材加工用潤滑劑的分類 | 177 |
| 7.5 | 旋轉加工 | 177 |
| 7.5.1 | 旋轉加工的摩擦特色 | 177 |
| 7.5.2 | 驅動工具的作業（滾製加工） | 180 |
| 7.5.3 | 驅動被加工材的作業（旋壓） | 181 |
| 7.5.4 | 表面光製作業（旋轉拋光作業） | 183 |
| 7.5.5 | 旋轉加工用潤滑劑的分類 | 184 |

第1章 序 論

1-1 塑性加工摩擦學的發展與現狀

1.1.1 塑性加工摩擦學的研究起點

在塑性加工的歷史中，摩擦學（tribology）扮演重要角色，有助於減摩、防止磨損（galling）、抑制模磨耗、提升製品表面品位，也直接關連材料破壞、工具破損等加工的成敗。1種塑性加工法的開發與其實用化都以適切的潤滑劑、潤滑法為必須條件。

（塑性加工的摩擦學問題大都靠現場、經驗、技能的試行錯誤累積而來。塑性加工早在紀元前十幾世紀（埃及、美索不達米亞、中國）的青銅器時代，就用於製作刀劍、農具、工藝品，却在本世紀才有學術文獻，摩擦、潤滑更慢了20～30年。）

塑性加工摩擦學開始科學研究以前，即已開始摩擦學本來的研究，其中不少成果至今仍活用於塑性加工。表1.1依年代列示有關塑性加工的摩擦學研究。

Amonton、Coulomb的摩擦係數一定律（1699,1785）、Reynolds的流體潤滑方程式（1886）、Hardy的邊界潤滑概念（1922）、Bowden的凝着說、極壓添加劑作用（1943）等至今在討論塑性加工摩擦學時，仍是基本觀念。

很難認定塑性加工摩擦學研究的起點，各種潤滑劑的實用化與評價都應併入塑性加工的起源。定量求模—被加工材面間摩擦係數的嚐試見於用旋轉模測定抽拉摩擦（1931）、經軋軋理論的逆算（1933,1948）。利用精密實驗的直接測定始於春日保男的深拉延（deep drawing）。

表 1-1 塑性加工的摩擦學研究

| 西元 | 研究者 | 內 容 | 西元 | 研究者 | 內 容 |
|------|---------------------------------------|---|------|---|--|
| 1470 | Leonardo da Vinci (義) | 摩擦的科學研究 | 1925 | Gumbel, L. (德) | 突起挖起變形論 |
| 1699 | Amonton, G. (法) | Amonton 第 1 法則： $F \propto P$ ，第 2 法則： F 與表觀接觸面積無關係 | 1931 | Linicus, W. Sachs, G. (德) | 測定旋轉模所致的抽拉摩擦 |
| 1785 | Coulomb, C.A. (法) Navier, C. | 第 3 法則： F 與滑動速度無關係 | 1933 | Ekelund, S. (德) Abott, E.J. (美) Boerlarge, G.D. (英) | 用輾軋理論反算摩擦 觸針式表面粗糙度計 四球式摩擦試驗機 |
| 1822 | L.M.H. (法) Stokes, G. G. (英) | 粘性流態方程式 | 1934 | Singer, F. (德) | 磷酸塩皮膜處理 |
| 1829 | 歐洲 | 軸承潤滑的研究 | 1937 | Block, H. (英) Vogelpohl, G. (德) | 表面閃光溫度解析 混合潤滑 |
| 1850 | | | 1938 | 福井伸二 (日) | 深拉延研究 |
| 1881 | Hertz, H. R. (德) | 彈性接觸解析 | 1943 | Bowden, E. P. (澳) | 凝着說，極壓添加劑的作用 |
| 1885 | Saybolt, G. M. (美) Redwood, B. (英) | Saybolt 及 Redwood 的粘度計 | 1946 | Holm, R. (德) | 摩擦研究 (電氣接點) |
| 1886 | Reynolds, O. (英) | 流體潤滑理論 | 1948 | Bland, D.R., Ford, H. (英) | 用板軋軋理論反算摩擦 |
| 1902 | Stribeck, R. (德) | $\mu - \nu v / p$ 線圖 | 1949 | Grubin, A.N., Vinogradova, E. (俄) | 彈性流體潤滑理論 |
| 1913 | Erichsen, A.M. (德) | Erichsen 試驗機 | 1950 | Bowden, F. P., Tabor, D. (英) | 極壓添加劑的作用機構 「The Friction and Lubrication of Solids」刊行 |
| 1917 | Langmuir, I. (美) | 表面薄膜研究 | 1951 | 曾田範宗 (日) | 四球式摩擦試驗機 |
| 1919 | Hardy, W. B. (英) | 凝着說 | | | |
| 1922 | Hardy, W.B. (英) Doubleday, I. (英) | 邊界潤滑概念 油性改善劑 | | | |

表 1-1 (續前)

| 西 元 | 研究者 | 內 容 | 西 元 | 研究者 | 內 容 |
|------|---|----------------------------|------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1952 | Burwext J. T., Strang, C.D. (美) | 用銷、盤摩擦試驗機研究摩托機構 | 1964 | Dowson, D. (美) | 熱、流體潤滑理論 |
| 1953 | Archard, J.F. (英) | 凝着摩托 $V = k(px) / (3H)$ | 1965 | Kragelskii, I.V. (蘇) | 疲勞摩托 |
| 1953 | 春日保男(日) 曾田範宗(日) | 深拉延摩擦試驗機 | | 工藤英明(日) | 潤滑劑封入押出法 |
| | | | | 中村寬(日) | 2 模式強制潤滑抽拉法 |
| | | | | 河合望(日) | 域差潤滑深壓拉法 |
| 1955 | Christopherson, D.G. (英) | 強制潤滑抽拉 | 1966 | 水野高爾(日) | 油膜厚度當量 |
| | Sejournet, J. (法) | 玻璃潤滑熱間押出(1941發明) | | Cheng, H.S. (美) | 塑性流體潤滑理論 |
| | Wistreich, J.G. (英) | 用分割模測定抽拉摩擦 | 1967 | Tallian, T. E. (英) | 臨界膜厚條件 |
| 1957 | Rooyen, G. T. (美) | 測壓銷(軋軋) | | 春日保男(日) | 接觸率概念 |
| | Courtney-Pratt, J.S. , Eisner, E. (英) | Junction growth 說 | 1971 | Rabinowicz, E. (美) | 固溶界限的適合性 |
| | Kruschov, M.M. (俄) | 磨料摩托 $V = k(px) / H$ | | Wilson, W. R.D. (美) | 等溫流體潤滑理論 |
| 1958 | 春日保男(日) | 壓力潤滑深拉延法 | | Suh, N.P. (美) | Delamination 摩托 $V = kpx$ |
| | Coupland, H.T. (英) | 深拉延的速度效果 | 1974 | Wilson, W. R.D. (美) | 熱、Reynolds 方程式 |
| 1959 | Dowson, D. (美) | 彈性流體潤滑理論的發展 | | Block, H. (英) | 熱的不安定條件 |
| 1961 | 山田嘉照(日) | 深拉延的衝頭面 | 1977 | 須藤忠三(日) | U形彎曲咬住試驗機 |
| | Wiegand, H. (德) | 摩擦解析 | 1978 | 新井透(日) | 模表面處理(TD處理) |
| | Pugh, H.L.I. D. (英) | 抽拉的焦着 | 1979 | 大矢根守哉(日) | 擠入旋轉進給摩擦試驗 |
| | | 靜水壓擠壓 | 1980 | Kramer, B. M., Suh, N. P. (美) | 熔解摩托 |

表 1-1 (續前)

| 西 元 | 研究者 | 內 容 | 西 元 | 研究者 | 內 容 |
|------|-------------------|------------------------|------|--------------|------------|
| 1981 | 大矢根守哉(日) | 圓管端面切削壓潰摩擦試驗 | | 保, 堂田邦明(日) | 驗機 |
| 1982 | 水野高爾(日) 合望, 中村 | 微視的塑性流體潤滑機構 變薄拉延摩擦試 | 1984 | 河合望, 堂田邦明(日) | 壓縮旋轉式摩擦試驗機 |

) 摩擦試驗機 (1953)。為經無相互干涉的行程精密測定作用於壓邊板 (blank holder) 的摩擦阻力與垂直力, 把壓邊板 2 分割。

其後陸續發表直接測定塑性加工摩擦係數的試驗機, 依序是把抽拉的圓錐模二縱割而測定摩擦係數的 Wistreich 方法 (1955)、測定前進率零時的輓軋扭矩而求摩擦係數的 Whitton 方法、分離測定軋軋接觸弧上垂直力與摩擦剪斷力的 Rooyen 測壓銷 (1957)、用圓柱面模抽拉、測定模分離力與抽拉力而算出摩擦係數 μ 的 Wiegand & Kloos 方法 (1966)、用平面模抽拉板材而直接測定模垂直力與切線力的 Lancaster & Rowe 方法 (1960) 及福井的方法 (1962)、把深拉延的壓邊板 2 分割而分離測定作用於它的壓邊力與摩擦力的河合方法 (1967) 及春日方法 (1967)、對板材抽拉的模面與壓板面 4 面同時分離測定垂直力與水平力的河合方法 (1973)、同時分離測定作用於板材變薄拉延加工模面之垂直力與摩擦力的河合方法 (1981)。

這些試驗機的結果奠定今天知識的基礎——諸如摩擦係數的大小與行程中變化、速度效果、各種潤滑劑的性能、巨視塑性變形的影響等。

1.1.2 流體潤滑的實現

為減低摩擦阻力, 最好實現流體潤滑。在塑性加工的嚙試始於 Robertson 的專利 (1893)、Pugh 開發的靜水壓擠壓 (1961)、Christopherson 的強制潤滑抽拉法 (1955)、春日的壓力潤滑深拉延法 (1958)、工藤的潤滑劑封入擠壓法 (1965)、中村的 2 模式抽拉法 (1965) 等。

只要流體潤滑成立, 應可行流體力學解析, 水野把 Reynolds 方程

式用於板軋軋，提案油膜厚當量尺度為判定軋軋潤滑狀態的參數（1966）。Wilson 也用同樣的觀念解析擠壓、抽拉的摩擦。Wilson、Mahdavian 更考慮油膜內發熱、材料的塑性變形熱。

1.1.3 邊界潤滑機構的究明

Butler（1960）、春日（1967）、水野（1970）、河合（1971）、工藤（1972）用圖 1.1 的混合潤滑模型探討塑性加工的工具與被加工材面間的接觸機構。圖中畫示較平坦的工具面、因巨視塑性變形而粗面化、被工具面壓下修正的被加工材面。表示粘性流體潤滑部

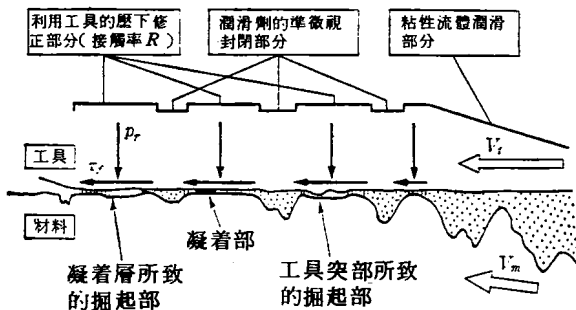


圖 1-1 工具—被加工材面間的接觸機構模型

份的動水力學潤滑、準微視封閉部份的靜水力學潤滑、工具壓下修正部份的邊界潤滑部、凝着部、挖起部等。所占比率因潤滑劑的物理、化學性質和粘度、滑移速度 (V_t, V_m)、面壓 (p_r)、溫度、導入角等摩擦條件而大異。

古今一直都在探討邊界潤滑領域的摩擦剪斷應力 τ_f 或摩擦係數 μ 值取決於什麼？提案取決於潤滑劑 (lubricant) 的 τ_f 一定或 μ 一定。

1.1.4 磨損、摩耗問題

1 種新的塑性加工性在工業上是否成立的準繩之一為工具壽命，影響工具壽命的第 1 要因為磨損、摩耗 (wear) 問題。

摩耗式的導出有 Archard 的凝着 (adhesion) 摩耗式 (1953)、Kruschov 的磨料摩耗 (1957)、Kragelski i 的疲勞摩耗 (1965)、Suh 的薄層剝離摩耗 (1971)、Kramer 的熔解摩耗 (1980) 等，却很少報告凝着、磨損的量發生條件。

四球式之類基礎摩擦試驗法定義耐荷重能的耐磨損性之量評價尺度，但塑性加工用基礎摩擦試驗法、塑性加工模型試驗法尚未確立合理的尺度。磨損 (galling) 的評價在板材抽拉或變薄拉延是用面壓和滑動距離尺度表現磨損臨界條件，板材變薄拉延加工以正常部殘存率為尺度、從壓縮旋轉式摩擦試驗與板材變薄拉延試驗的摩擦係數值提案各種評價尺度、以擠入旋轉進給摩擦試驗、圓管端面切削壓潰摩擦試驗測定摩耗量。

檢討工具—被加工材面間的耐磨損性時，工具—被加工材間的適合性成問題。Rabinowicz (1971) 報告容易形成固溶體的材料組合會有高摩擦係數、容易磨損、摩耗量也多。

1.1.5 塑性加工用潤滑劑的開發

Singer 的磷酸塩皮膜處理 (1934)、Sějournet 的玻璃潤滑 (1941) 分別使鋼的冷鍛、熱擠壓實用化。

塑性加工近年的潤滑問題有冷、溫、熱間鍛造的磨損及工具摩耗、板冷軋的熱條痕、軋淨性潤滑油的開發、板材高張力化所致成形時的磨損與表面損傷問題。

針對上述問題，陸續開發耐壓耐熱性的各種固體潤滑劑 (MoS_2 系、石墨系、玻璃、金屬氧化物、耐熱樹脂)、各種皮膜處理、各種添加劑、添加油等。

1-2 塑性加工摩擦學的展望

1.2.1 摩擦學的要求

塑性加工的目標是最經濟生產有所需機能的製品、條件之一為摩擦學問題，摩擦學的課題如下：

(1) 減低加工力、節減消費動力的減摩

- (2)加工機構上必要的增摩
- (3)改善製品表面品位
- (4)防止磨損、表面損傷
- (5)抑制工具磨耗

這些問題將來如何解決或應如何解決，簡述如下：

1.2.2 摩擦係數的預知

(1)(2)的課題實即瞭解所需摩擦係數值，預知、設定實現該值的摩擦條件。(1)的理想是摩擦阻力零，實現流體潤滑狀態可近似達成。

課題(2)見於域差潤滑(differential lubrication)深拉延法、域差潤滑凸出法，問題在預知與設定摩擦係數 μ 的最適值與其分佈。

摩擦係數 μ 的評價有數學解析、實驗解析法。用Reynolds方程式的流體潤滑理論有助於預想流體潤滑狀態。在理論中添加壓力和溫度增加所致潤滑油的粘度變化、工具的彈性變形、被加工材的塑性變形、摩擦面的表面粗糙度等，能正確定量把握現實摩擦狀態要何程度？

在邊界潤滑摩擦係數的數學評價今後的課題是設定物理意義明確的數學模型。有待實驗測定潤滑膜的吸着強度和剪斷強度、微視接合的形成機構與其剪斷強度等。

1.2.3 磨損機構的解明

課題(3)(4)(5)實即解明邊界潤滑狀態的保持條件及磨損發生條件。

邊界潤滑狀態保持條件的預知仍有很多問題，諸如被加工材巨觀塑性變形所致的粗面化與出現新生面時潤滑膜的 formed 與破壞、被加工材的粗面化與工具所致的壓下修正機構、被加工材粗面化所致潤滑劑的封入與流出、高壓、高剪斷速度及高燒化溫度下的潤滑膜強度與剪斷強度、被加工材與工具材間的凝着、相互移着、脫落等。

解明的手段之一為表面的微視分析，期待可分析nm級表面層的分析方法——諸如X光電子分光法、掃描形Auger電子分光法、2次離子質量分析法等。

磨損現象的解明本以實驗解析為主，但也寄望於數學解析，例如磨損的起點可視為接觸點的熱擾亂所致，以統計法求接觸點溫度變成潤滑

膜轉移溫度以上的機率。

磨損機構實驗解析上最大的問題之一在摩擦試驗機（tribometer）的選擇，另一是磨損起點的認定、耐磨損能的規定法。

加工者的理想在找出不用潤滑劑不磨損的對策，期待利用工具—被加工材間的適合性（compatibility），工具材料可望利用陶瓷、塑膠等各種無機材料、有機材料的皮膜處理。

1.2.4 從基礎試驗值預知——試驗值間的相關

四球式試驗之類泛用基礎試驗、壓縮旋轉式摩擦試驗之類塑性加工用基礎試驗的目的在由測定值預知實加工的潤滑劑性能、摩擦係數的大小、磨損發生限度等，但是，基礎試驗與實加工結果之間幾無相關（correlation），連各種基礎試驗值間也缺乏相關。有待究明相關成立條件與開發試驗機。

第 2 章 摩擦學的基礎

2-1 固體的表面與接觸

2.1.1 固體的表面

實際的固體表面並非單純把固體切斷成幾何學平面或曲面，如圖 2.1 的 Rabinowicz 概念圖所示，有複雜的構造，第 1，表面必有微視性凹凸，非如巨視性形狀。第 2，依表面的作成法，表面正下方有加工變質層，其性質異於固體內部。第 3，表面常被氧化膜、吸着膜及其他污物包覆。

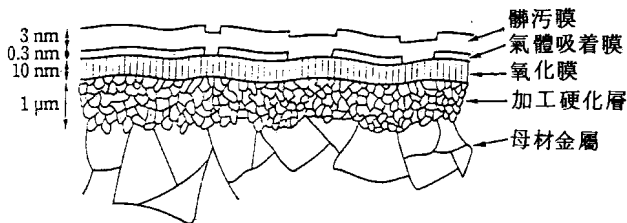


圖 2-1 表面的構造 (Rabinowicz , E.)

表面依加工法而各有獨特的微視性形狀，因摩擦所致的局部塑性變形與摩耗而產生順應，改變其形狀。圖 2.2 為以觸針式粗糙度計測定的表面粗糙度曲線例，最近提案若干以非接觸方式進行同樣測定的方法。此種曲線的特性表示法是用數種定義的表面粗糙度或高度分佈等有關高度方向性質的參數、相關係數或相關距離、譜密度等有關沿面方向變化