

高等学校試用教科書



# 金屬壓力加工原理

哈爾濱工業大學等校壓力加工教研組編著

全书分三大部分，共九个章节。

本书主要阐述了金属塑性变形过程的物理基础、塑性变形的力学基础以及各种压力加工工艺过程的分析。

全书各部分皆引用了近年来最新研究成果，并结合生产实际进行了分析。

本书可供高等学校压力加工专业教学用书，亦可供其它有关专业或有关技术人员参考。

### 金属压力加工原理

哈尔滨工业大学等校压力加工教研组编著

\*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $14 \frac{1}{4}$  · 字数 330,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数 0,001—2,833 · 定价(1961)1.70元

统一书号: 15165·582(—Ⅰ—109)

## 前 言

本书是由哈尔滨工业大学、华中工学院、天津大学及清华大学并以哈尔滨工业大学为主，編写成这本試用教課书。

对1959年所拟訂的本課指导性教学大綱，有如下的更动：

1) 将“金屬的物理特性”一章的内容分为三章：第一章为金屬塑性变形的实质，并着重闡述塑性变形时，内部变化規律（变形机构、組織和性能的变化）及提高产品的途徑；第二章为金屬塑性变形时的流动規律；第三章为塑性、变形抗力及其影响因素。在分析这一方面問題时，尽力联系生产实际进行闡述。这样，可使問題更为集中。对后二章作了不少补充。加强了对塑性变形共同規律的分析。

2) 工程力的計算方面，以工程計算法代替了原来的主应力方法，其优点主要在于——避免了力的計算部分与应力应变理論部分的可能性的脫节。并帮助学者定量地了解由于求解条件的簡化，而带来某种程度的誤差。

3) 增添了板料冲压工序分析及机制过程分析两章。前者，部分学校已讲授过，但是，这次在内容上則有所加强；后者是新添的一章。同时，亦考虑了压力加工工艺正获得蓬勃的发展情况。这样，就其内容和实质出发，作为各压力加工工艺理論基础的压力加工原理課程才有足够的深度和广度。

第四章至第八章譯自苏联 M. B. 斯托洛夫与 E. A. 波波夫著“金屬压力加工原理”一书的相应部分（譯文中仍保留参考文献引号，但没有列出这些文献，如需要可查原书）。其余部分在編写时，除参考上书外，还着重参考并部分借用了哈尔滨工业大学雷文燦編“金屬压力加工原理”讲义中的有关部分。

緒論、第一章至第五章以及第九章，由哈尔滨工业大学王仲仁編譯，在整理手稿付印过程中曾得到康达昌等同志的协助。第六章及第七章的前部分由华中工学院蕭景容翻譯。第七章大部分由天津大学朱磊負責，由許昭仁、胡傳頌、張程勇、朱恩榮翻譯；第六章和第七章的整理付印工作亦由天津大学的同志們完成的。第八章由清华大学王祖唐、郑可鐘翻譯，曹起鵬参加校对。全书出版前由哈尔滨工业大学王仲仁粗閱一遍。

鉴于本书内容較多，章节按排亦为新的嘗試，希望在使用时，据各校情况选择讲授内容和按排讲授順序。

由于時間仓促，难免有忽略錯誤之处，我們恳切地希望能得到来自各方面的指正和意見。

# 目次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 前言 .....                       | 5  |
| 緒論 .....                       | 7  |
| 第一章 金屬塑性變形的實質 .....            | 10 |
| §1 金屬的構造 .....                 | 10 |
| §2 彈性變形與塑性變形 .....             | 11 |
| §3 單晶體的冷塑性變形 .....             | 12 |
| §4 多晶體冷塑性變形的物理特性 .....         | 15 |
| §5 冷變形硬化 .....                 | 17 |
| §6 附加應力及殘余應力 .....             | 18 |
| §7 恢復及再結晶 .....                | 21 |
| §8 壓力加工時變形的分類 .....            | 24 |
| §9 熱變形對金屬機械性能的影響 .....         | 24 |
| 第二章 金屬塑性變形流動規律 .....           | 26 |
| §1 體積不變條件 .....                | 26 |
| §2 最小阻力定律 .....                | 30 |
| §3 各因素對金屬流動的影響 .....           | 31 |
| 1. 摩擦的影響 .....                 | 31 |
| 2. 工具形狀的影響 .....               | 31 |
| 3. 金屬本身性質不均的影響 .....           | 32 |
| §4 壓力加工中之摩擦 .....              | 33 |
| 第三章 塑性、變形抗力及其影響因素 .....        | 38 |
| §1 金屬的塑性及變形抗力的概念 .....         | 38 |
| §2 硬化曲線 .....                  | 40 |
| §3 金屬組織及化學成分對塑性及變形抗力的影響 .....  | 44 |
| §4 溫度對塑性和變形抗力的影響及溫度規範的確定 ..... | 46 |
| §5 變形速度對塑性及變形抗力的影響 .....       | 51 |
| §6 主應力圖對塑性的影響 .....            | 53 |
| §7 主應力圖對變形抗力的影響 .....          | 56 |
| §8 尺寸因素對塑性和變形抗力的影響 .....       | 61 |
| 第四章 應力應變狀態 .....               | 63 |
| §1 一般概念 .....                  | 63 |
| §2 座標面上的應力 .....               | 63 |
| §3 斜面上的應力 .....                | 64 |
| §4 主法綫應力 .....                 | 65 |
| §5 應力張量概念 .....                | 66 |
| §6 應力橢圓體 .....                 | 68 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| §7 主切應力 .....                          | 68  |
| §8 八面體應力 .....                         | 71  |
| §9 平衡條件 .....                          | 73  |
| §10 軸對稱應力狀態 .....                      | 74  |
| §11 平面應力和平面變形狀態(平面問題) .....            | 76  |
| §12 變形分量與位移分量間的關係 .....                | 80  |
| §13 變形一致方程 .....                       | 83  |
| 第五章 塑性條件及變形力學簡圖 .....                  | 84  |
| §1 塑性條件 .....                          | 84  |
| §2 塑性條件之物理意義 .....                     | 85  |
| §3 塑性能量條件之幾何意義 .....                   | 87  |
| §4 塑性條件之特殊表達式 .....                    | 89  |
| §5 中間主應力的影響 .....                      | 90  |
| §6 應力和變形間的關係 .....                     | 92  |
| §7 變形力學簡圖 .....                        | 95  |
| 第六章 決定變形力及變形功的方法 .....                 | 104 |
| §1 概論 .....                            | 104 |
| §2 與塑性條件聯解微分平衡方程 .....                 | 107 |
| §3 按近似平衡方程和塑性條件計算金屬壓力加工時的力量的基本原理 ..... | 108 |
| §4 滑移綫方法 .....                         | 111 |
| 1. 滑移綫 .....                           | 111 |
| 2. 特征綫 .....                           | 115 |
| §5 塑性變形的材料力學方法[43], [44], [45] .....   | 117 |
| 第七章 決定變形力、單位流動壓力和鍛造與模鍛的工序分析 .....      | 121 |
| §1 鍛粗工序 .....                          | 121 |
| 1. 無限長矩形板鍛粗時的單位流動壓力和變形力 .....          | 121 |
| 2. 棱柱體和圓柱體鍛粗時的變形力和單位流動壓力 .....         | 132 |
| 3. 鍛粗長方柱體時的單位壓力 .....                  | 137 |
| 4. 鍛粗時的變形功 .....                       | 138 |
| 5. 鍛粗時的不均勻變形 .....                     | 141 |
| §2 均勻壓力下的厚壁管問題 .....                   | 144 |
| 1. 問題的通解 .....                         | 144 |
| 2. 在內壓力作用下的厚壁管問題 .....                 | 145 |
| 3. 具有內心軸的厚壁管受均勻的外壓力問題 .....            | 147 |

|                        |     |                                                  |     |
|------------------------|-----|--------------------------------------------------|-----|
| § 3 延伸工序 .....         | 149 | § 3 拉伸过程分析 .....                                 | 187 |
| § 4 圆形截面的坯料延伸 .....    | 151 | 1. 平毛坯的拉伸(第一工步) .....                            | 187 |
| § 5 挤压工序 .....         | 156 | 2. 圆柱形毛坯的拉伸(一次以后工序) .....                        | 194 |
| 1. 出口处圆柱形段 1 .....     | 156 | § 4 翻边过程分析 .....                                 | 198 |
| 2. 斜度较小的锥形段 2 .....    | 157 | § 5 缩径过程分析 .....                                 | 202 |
| 3. 斜度较大的锥形段 3 .....    | 159 | 第九章 轧制过程的分析 .....                                | 210 |
| 4. 圆柱形段——挤压筒 4 .....   | 160 | § 1 纵轧时变形区域及其参数 .....                            | 210 |
| 5. 挤压时决定单位压力公式汇总 ..... | 164 | § 2 金属的曳入条件 .....                                | 210 |
| § 6 冲孔工序 .....         | 166 | § 3 前滑 .....                                     | 212 |
| 1. 一般情况 .....          | 166 | § 4 宽展 .....                                     | 216 |
| 2. 开式冲孔时的单位压力 .....    | 167 | § 5 干摩擦滑动时接触单位压力的分布 .....                        | 219 |
| 3. 闭式冲孔时的单位压力 .....    | 168 | § 6 轧制时对轧辊作用力的方向 .....                           | 221 |
| § 7 体积模锻 .....         | 170 | § 7 轧制时对轧辊作用平均单位压力的<br>确定 .....                  | 223 |
| 1. 一般情况 .....          | 170 | § 8 无张力轧制时对轧辊作用的全压力及平<br>均单位压力的确定(采里克夫的方法) ..... | 224 |
| 2. 毛边上的单位流动压力 .....    | 170 | § 9 横轧与斜轧 .....                                  | 225 |
| 3. 金属在模槽内的单位流动压力 ..... | 172 | 参考文献 .....                                       | 228 |
| § 8 扭转工序 .....         | 177 |                                                  |     |
| 第八章 板料冲压工序分析 .....     | 178 |                                                  |     |
| § 1 分析方法的补充论证 .....    | 178 |                                                  |     |
| § 2 弯曲过程分析 .....       | 181 |                                                  |     |

高等学校試用教科書



# 金屬壓力加工原理

哈爾濱工業大學等校壓力加工教研組編著

全书分三大部分，共九个章节。

本书主要阐述了金属塑性变形过程的物理基础、塑性变形的力学基础以及各种压力加工工艺过程的分析。

全书各部分皆引用了近年来最新研究成果，并结合生产实际进行了分析。

本书可供高等学校压力加工专业教学用书，亦可供其它有关专业或有关技术人员参考。

### 金属压力加工原理

哈尔滨工业大学等校压力加工教研组编著

\*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $14 \frac{1}{4}$  · 字数 330,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数 0,001—2,833 · 定价(1961)1.70元

统一书号: 15165·582(—Ⅰ—109)

# 目次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 前言 .....                       | 5  |
| 緒論 .....                       | 7  |
| 第一章 金屬塑性變形的實質 .....            | 10 |
| §1 金屬的構造 .....                 | 10 |
| §2 彈性變形與塑性變形 .....             | 11 |
| §3 單晶體的冷塑性變形 .....             | 12 |
| §4 多晶體冷塑性變形的物理特性 .....         | 15 |
| §5 冷變形硬化 .....                 | 17 |
| §6 附加應力及殘余應力 .....             | 18 |
| §7 恢復及再結晶 .....                | 21 |
| §8 壓力加工時變形的分類 .....            | 24 |
| §9 熱變形對金屬機械性能的影響 .....         | 24 |
| 第二章 金屬塑性變形流動規律 .....           | 26 |
| §1 體積不變條件 .....                | 26 |
| §2 最小阻力定律 .....                | 30 |
| §3 各因素對金屬流動的影響 .....           | 31 |
| 1. 摩擦的影響 .....                 | 31 |
| 2. 工具形狀的影響 .....               | 31 |
| 3. 金屬本身性質不均的影響 .....           | 32 |
| §4 壓力加工中之摩擦 .....              | 33 |
| 第三章 塑性、變形抗力及其影響因素 .....        | 38 |
| §1 金屬的塑性及變形抗力的概念 .....         | 38 |
| §2 硬化曲線 .....                  | 40 |
| §3 金屬組織及化學成分對塑性及變形抗力的影響 .....  | 44 |
| §4 溫度對塑性和變形抗力的影響及溫度規範的確定 ..... | 46 |
| §5 變形速度對塑性及變形抗力的影響 .....       | 51 |
| §6 主應力圖對塑性的影響 .....            | 53 |
| §7 主應力圖對變形抗力的影響 .....          | 56 |
| §8 尺寸因素對塑性和變形抗力的影響 .....       | 61 |
| 第四章 應力應變狀態 .....               | 63 |
| §1 一般概念 .....                  | 63 |
| §2 座標面上的應力 .....               | 63 |
| §3 斜面上的應力 .....                | 64 |
| §4 主法綫應力 .....                 | 65 |
| §5 應力張量概念 .....                | 66 |
| §6 應力橢圓體 .....                 | 68 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| §7 主切應力 .....                          | 68  |
| §8 八面體應力 .....                         | 71  |
| §9 平衡條件 .....                          | 73  |
| §10 軸對稱應力狀態 .....                      | 74  |
| §11 平面應力和平面變形狀態(平面問題) .....            | 76  |
| §12 變形分量與位移分量間的關係 .....                | 80  |
| §13 變形一致方程 .....                       | 83  |
| 第五章 塑性條件及變形力學簡圖 .....                  | 84  |
| §1 塑性條件 .....                          | 84  |
| §2 塑性條件之物理意義 .....                     | 85  |
| §3 塑性能量條件之幾何意義 .....                   | 87  |
| §4 塑性條件之特殊表達式 .....                    | 89  |
| §5 中間主應力的影響 .....                      | 90  |
| §6 應力和變形間的關係 .....                     | 92  |
| §7 變形力學簡圖 .....                        | 95  |
| 第六章 決定變形力及變形功的方法 .....                 | 104 |
| §1 概論 .....                            | 104 |
| §2 與塑性條件聯解微分平衡方程 .....                 | 107 |
| §3 按近似平衡方程和塑性條件計算金屬壓力加工時的力量的基本原理 ..... | 108 |
| §4 滑移綫方法 .....                         | 111 |
| 1. 滑移綫 .....                           | 111 |
| 2. 特征綫 .....                           | 115 |
| §5 塑性變形的材料力學方法[43], [44], [45] .....   | 117 |
| 第七章 決定變形力、單位流動壓力和鍛造與模鍛的工序分析 .....      | 121 |
| §1 鍛粗工序 .....                          | 121 |
| 1. 無限長矩形板鍛粗時的單位流動壓力和變形力 .....          | 121 |
| 2. 棱柱體和圓柱體鍛粗時的變形力和單位流動壓力 .....         | 132 |
| 3. 鍛粗長方柱體時的單位壓力 .....                  | 137 |
| 4. 鍛粗時的變形功 .....                       | 138 |
| 5. 鍛粗時的不均勻變形 .....                     | 141 |
| §2 均勻壓力下的厚壁管問題 .....                   | 144 |
| 1. 問題的通解 .....                         | 144 |
| 2. 在內壓力作用下的厚壁管問題 .....                 | 145 |
| 3. 具有內心軸的厚壁管受均勻的外壓力問題 .....            | 147 |



|                        |     |
|------------------------|-----|
| § 3 延伸工序 .....         | 149 |
| § 4 圓形截面的坯料延伸 .....    | 151 |
| § 5 挤压工序 .....         | 156 |
| 1. 出口处圓柱形段 1 .....     | 156 |
| 2. 斜度較小的錐形段 2 .....    | 157 |
| 3. 斜度較大的錐形段 3 .....    | 159 |
| 4. 圓柱形段——挤压筒 4 .....   | 160 |
| 5. 挤压时决定单位压力公式汇总 ..... | 164 |
| § 6 冲孔工序 .....         | 166 |
| 1. 一般情况 .....          | 166 |
| 2. 开式冲孔时的单位压力 .....    | 167 |
| 3. 闭式冲孔时的单位压力 .....    | 168 |
| § 7 体积模鍛 .....         | 170 |
| 1. 一般情况 .....          | 170 |
| 2. 毛边上的单位流动压力 .....    | 170 |
| a. 金属在模槽内的单位流动压力 ..... | 172 |
| § 8 扭轉工序 .....         | 177 |
| 第八章 板料冲压工序分析 .....     | 178 |
| § 1 分析方法的补充論証 .....    | 178 |
| § 2 弯曲过程分析 .....       | 181 |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| § 3 拉延过程分析 .....                                 | 187 |
| 1. 平毛坯的拉延(第一工步) .....                            | 187 |
| 2. 圓柱形毛坯的拉延(一次以后工序) .....                        | 194 |
| § 4 翻边过程分析 .....                                 | 198 |
| § 5 縮徑过程分析 .....                                 | 202 |
| 第九章 軋制过程的分析 .....                                | 210 |
| § 1 纵軋时变形区域及其参数 .....                            | 210 |
| § 2 金属的曳入条件 .....                                | 210 |
| § 3 前滑 .....                                     | 212 |
| § 4 寬展 .....                                     | 216 |
| § 5 干摩擦滑动时接触单位压力的分布 .....                        | 219 |
| § 6 軋制时对軋輥作用力的方向 .....                           | 221 |
| § 7 軋制时对軋輥作用平均单位压力的<br>确定 .....                  | 223 |
| § 8 无張力軋制时对軋輥作用的全压力及平<br>均单位压力的确定(采里克夫的方法) ..... | 224 |
| § 9 橫軋与斜軋 .....                                  | 225 |
| 参考文献 .....                                       | 228 |

## 前 言

本书是由哈尔滨工业大学、华中工学院、天津大学及清华大学并以哈尔滨工业大学为主，編写成这本試用教課书。

对1959年所拟訂的本課指导性教学大綱，有如下的更动：

1) 将“金屬的物理特性”一章的内容分为三章：第一章为金屬塑性变形的实质，并着重闡述塑性变形时，内部变化規律（变形机构、組織和性能的变化）及提高产品的途徑；第二章为金屬塑性变形时的流动規律；第三章为塑性、变形抗力及其影响因素。在分析这一方面問題时，尽力联系生产实际进行闡述。这样，可使問題更为集中。对后二章作了不少补充。加强了对塑性变形共同規律的分析。

2) 工程力的計算方面，以工程計算法代替了原来的主应力方法，其优点主要在于——避免了力的計算部分与应力应变理論部分的可能性的脫节。并帮助学者定量地了解由于求解条件的簡化，而带来某种程度的誤差。

3) 增添了板料冲压工序分析及机制过程分析两章。前者，部分学校已讲授过，但是，这次在内容上則有所加强；后者是新添的一章。同时，亦考虑了压力加工工艺正获得蓬勃的发展情况。这样，就其内容和实质出发，作为各压力加工工艺理論基础的压力加工原理課程才有足够的深度和广度。

第四章至第八章譯自苏联 M. B. 斯托洛夫与 E. A. 波波夫著“金屬压力加工原理”一书的相应部分（譯文中仍保留参考文献引号，但没有列出这些文献，如需要可查原书）。其余部分在編写时，除参考上书外，还着重参考并部分借用了哈尔滨工业大学雷文燦編“金屬压力加工原理”讲义中的有关部分。

緒論、第一章至第五章以及第九章，由哈尔滨工业大学王仲仁編譯，在整理手稿付印过程中曾得到康达昌等同志的协助。第六章及第七章的前部分由华中工学院蕭景容翻譯。第七章大部分由天津大学朱磊負責，由許昭仁、胡傳頌、張程勇、朱恩榮翻譯；第六章和第七章的整理付印工作亦由天津大学的同志們完成的。第八章由清华大学王祖唐、郑可鐘翻譯，曹起驥参加校对。全书出版前由哈尔滨工业大学王仲仁粗閱一遍。

鉴于本书内容較多，章节按排亦为新的嘗試，希望在使用时，据各校情况选择讲授内容和按排讲授順序。

由于時間仓促，难免有忽略錯誤之处，我們恳切地希望能得到来自各方面的指正和意見。



## 緒 論

金屬壓力加工工艺是对金屬施以压力,使其不破坏本身完整性的条件下改变外形,从而获得需要工件的一种加工方法。这种能改变形状又能保持本身完整性的能力称为塑性。可見,以塑性为基础的压力加工是一种无屑加工过程。

以塑性为基础的压力加工方法有:軋制、拉拔、挤压、鍛造、模鍛及冲压。

塑性变形不仅仅是引起工件形状的改变,而且引起金屬內部組織及其性能的改变。

概括說来,以塑性为基础的压力加工方法有如下的优点:

- 1) 节约金屬;
- 2) 改善組織和性能;
- 3) 生产率高。

例如:生产齒輪时,若采用軋制加工齿形部分比切削加工的生产率将提高10倍以上,抗剝强度增加20%以上,金屬节约5%以上。

正因为用压力加工方法所获得的工件有如上的优点,在国民經济各部門中才得到了广泛的应用。我国很早就运用压力加工方法来制造各种产品。还在南北朝以前便掌握了兵器猴子甲的冷鍛工艺,宋朝以前便掌握了經鍛造而后逐次拉拔制針的方法。但是,解放前,由于长期封建統治的束縛,帝国主义的掠夺和国民党反动派的压迫,使整个国民經济(包括压力加工)的发展受到限制。解放后,在党的英明领导下,压力加工生产得到空前的迅速发展,特别是在1958年大跃进以来,开始出现很多符合我国特点的新設备、新工艺。生产的发展給理論工作提出了新任务。在学生尚未接触到各种具体的压力加工工艺的專門性問題之前,有必要首先熟悉一下各种工艺的共同基础和普遍規律,也是“金屬压力加工原理”課程研究的对象。压力加工的普遍規律是各种压力加工过程的概括,因此,为闡述問題方便起見,我們先扼要地提一提压力加工过程的基本特点和內部联系。

1) 鍛造和冲压。鍛造是借助于自由鍛錘和各种压力机对金屬施以一定压力而实现塑性变形的一种工艺过程。其特点是鍛造工具只作直綫运动,并且是間歇、断續地动作。

鍛造的基本工序有:а) 鍛粗;б) 延伸;в) 冲孔;г) 模鍛(图1)。

冲压时,工具的运动特性与鍛造类似,所不同的是原材料为板料,而成品是薄壳零件。

2) 拉拔。該过程是将外力加于变形金屬的前端(图2)。使金屬通过固定模孔实现变形。

3) 挤压。挤压过程与拉拔的区别在于:力作用在变形金屬的后端,挤过模孔(图3),这样,变形程度便可不受物体本身强度的限制。

4) 軋制。軋制过程是金屬从两个旋轉的軋輥間通过,金屬在軋輥間之收縮性間隙中被軋軋,使其高度(或断面)减少,长度增加(图4)。

变形过程的特点是:金屬是連續的变形过程,沿长度方向各断面的变形情况相同,这与挤压和拉拔是一致的。

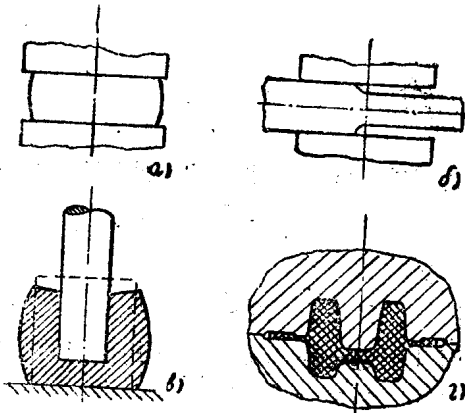


图 1

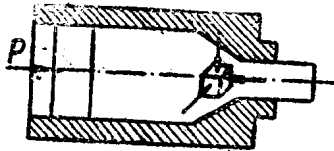


图 3

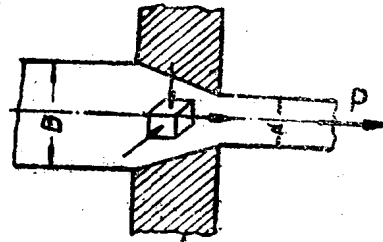


图 2

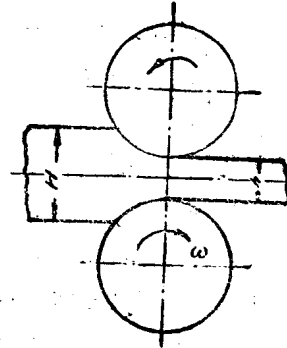


图 4

可見，每一种压力加工过程皆包括了相互作用的两个方面，即工具为一方，被加工工件为另一方。两者之間既是对立的（有作用力及变形抗力存在——尽管力的大小及其分布与傳遞方式各不相同）。又是統一于特定的压力加工过程之中，相互依存。正确地認識其运动規律是有重大意义的。由于工件是直接与滿足社会的物质需要（包括品种、数量、精度等）相联系，而这种需要又是不断增长的，因此，可以认为被加工工件，通常总是推动压力加工生产向前发展的积极的活跃的經常起作用的因素。然而，帶有质的发展又总是通过工具的变革来实现。即往往在轉变的关头，工具又变成矛盾的主要方面。

例如，火車輪軸的生产，最初是用自由鍛的方法，随着社会生产的发展，对其数量、尺寸精度的要求日益提高，便逐步过渡到了用胎模鍛造，继而模鍛，最近苏联又运用三輦橫軋的办法生产。

同时，发展又沿着节约金屬和提高生产率的途徑进行的。例如，用自由鍛造火車輪軸时，平均每根需金屬 560~590 公斤；在水压机上模鍛时需 510~520 公斤；而軋制仅需要 460~470 公斤。这种跳跃式的发展就是通过变革工具来实现的。由此可見，各种压力加工是相互联系的，最后采用何种压力加工方式，須据具体条件而定，絕不能孤立地进行分析和研究。

稍加考察，我們便会发现，尽管工具的种类及工件的形式不一，同时，又在不断地变化和发展，但有其基本屬性。压力加工过程中，工具仅产生彈性变形，而工件則产生应有的塑性变形。图 5 示意表明，工件在压力加工时，工具所受的应力在拉伸曲綫上所处的范围，即各种压力加工方式都是获得一定的塑性变形。这种共性乃是作为研究各种压力加工工艺之基础的“金屬压力加工原理”課程中存在的客观基础。就是說，“金屬压力加工原理”是探討各种压力加工过程中的塑性变形的共同規律的一門科学，是压力加工工艺的技

术理論基础。而其又以塑性力学，金屬物理等有关的科学研究及生产实践为基础。課程的主要任务是为制訂和創立多快好省的工艺过程提供科学依据，具体地說来，将分析以下各个問題：

1) 金屬塑性变形时，金屬内部变化規律（变形机构、組織、性能的变化）及提高产品质量的途徑。

2) 金屬塑性流动特性和如何迅速得到所需几何尺寸工件的主要途徑。

3) 創造尽可能大的变形程度而不至使金屬破坏（即高强度）的条件。

4) 变形力学基础，变形力的确定及减少变形抗力的主要措施。

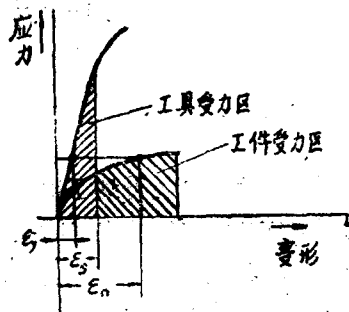


图 5

金屬塑性变形理論是比較年青的科学，本世紀才得到迅速的发展，金屬压力加工原理更加年青，在20世紀30年代，由于压力加工在国民經济中的地位日益重要，才开始設立。但目前尚有很多問題沒有得到統一的、完善的解釋。例如，在分析金屬塑性变形实质时，將金屬視為均匀結晶体，而在处理力学問題时，則將金屬視為連續体。很多人在变形力計算方面进行了細致的工作，誠然，由于种种原因，与实际仍有較大的距离，金屬成形理論亦不充实。与上述两方面有密切联系的摩擦問題研究得亦不够。虽然，近年来塑性变形的物理化学理論有了較大的发展，不仅在揭示塑性变形实质方面具有意义，而且对制訂合理的内部因素（化学成分及其分布、显微組織等）和外部条件（溫度、变形速度、受力方式等）对金屬塑性变形的綜合影响的实际資料仍較貧乏，有的研究結果甚至还相互矛盾。

因此，在学习这門科学时，既要理解基本規律和現象的实质，建立准确的概念；又要避免停止在部分因素和現象上孤立地、片面地理解問題。一刻亦不能忘記，將主要概念及基本規律如何应用于实际。亦只有通过实际的应用，才能認識其本质和彼此相互間的联系。同时还應該注意，由本門科学发展現狀所决定的，在闡述及認識所建立的概念和規律时的条件性，以便进一步地推动其发展。

# 第一章 金屬塑性變形的實質

## §1 金屬的構造

近年來原子學說得到了很大的進展。一般地講來，原子是處於熱運動的狀態中。此種運動的速度及特點即決定了物質組成的狀態。在氣體狀態中，原子在空間的位置是雜亂而無秩序的，並且以高速度運動。原子間互相撞擊，排斥力占優勢。在一定溫度及壓力的條件下，原子的運動速度降低，彼此之間的排斥力漸趨減小，即產生了液體狀態。當溫度繼續降低，原子的運動速度更趨於緩慢，到達一定限度時，即產生了固體狀態。

在固體和液體之間有一個非常明顯地，而且非常嚴格重要的分界線。這個嚴格的分界線就是：在空間中原子呈有規律性和周期性的分布，這就是所謂結晶物體的根本特性。不過在自然界中也可以遇到非結晶的固體。例如：玻璃、松香、樹脂等，在實質上它們是過度冷卻的液體。它們的原子是處於不穩定的平衡狀態，在空中的排列也是沒有一定的規律，所以它們也不具有結晶物體的一般特性。

關於晶體生成過程的理論另有專門文獻來探討，此處不詳加敘述。

結晶體的主要標志為：

- 1) 有平面或直稜的存在；
- 2) 有不等的方向性，即異向性；
- 3) 有內部結構的規律性。

在金屬晶格的結點上，存在的並不是中性原子，而是帶正電荷的離子。在金屬晶格中所有的價電子組合在一起形成統一的電子系統。通常金屬都處於異號電荷間的吸引力及同號電荷間的排斥力之平衡狀態中，因之即構成整個晶格（即帶電的離子系統及電子系統）的穩定。由近代物理知識可知，此時原子仍圍繞其穩定作振動而不是絕對的靜止。

有秩序、有規律排列的晶格，原子之間的距離為一定。在保持此種距離的情況下，它們之間相互作用的能量為最小。

晶格的位能與原子間距離有關。

$$u = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n} \quad (1-1)$$

式中  $u$  ——位能；

$A$  和  $B$  ——決定於物質成分的常數；

$r$  ——原子間距離；

$m$  和  $n$  ——決定於晶格形式的常數。對於金屬來說  $m=1$ ， $n=3$ 。

我們取位能方程式的一階導數：

$$\frac{du}{dr} = \frac{A \cdot m}{r^{m+1}} - \frac{B \cdot n}{r^{n+1}} \quad (1-2)$$

$\frac{du}{dr}$  的物理意義為：用  $\frac{du}{dr}$  決定內力的大小，也就是強制原子離開其原來穩定位置的力。

上式中第一項代表吸引力，第二項代表排斥力。

由物理中大家都知道，当沒有內力时，对于某物体在某溫度下原子間距离为一常数，此常数为晶格常数。

用  $r_0$  表示此值。

$r_0$ ——正常原子間距离。如果沒有內力时，显然

$$\frac{du}{dr} = 0; \quad 0 = \frac{A \cdot m}{r_0^{m+1}} - \frac{B \cdot n}{r_0^{n+1}};$$

即

$$\frac{A \cdot m}{r_0^{m+1}} = \frac{B \cdot n}{r_0^{n+1}}.$$

也就是說原子間的吸引力和排斥力处于平衡状态。

$\frac{du}{dr} = 0$  的物理意义为：当沒有內力时物体的位能为一最小值

$$u_{\text{MIN}} = -\frac{A}{r_0^m} + \frac{B}{r_0^n}. \quad (1-3)$$

物体的位能升高时，按照第 (1-1) 和 (1-3) 式原子間的距离也要发生变化，也就是改变原子的位置，則  $r_0 \neq r$ ，因此  $\frac{du}{dr} \neq 0$ 。也就是呈現了內力。

晶距之单位以 Å 表示之。1 Å =  $10^{-8}$  厘米。

如一般結晶学中所指出，金屬的原子晶格有以下几种型式：a) 面心立方晶格，b) 体心立方晶格，c) 六方晶格，d) 四面体晶格，e) 斜方六面体晶格。

屬面心立方晶格的金屬有鋁、鈣、γ 鉄、β 鈷、α 鎳、銅、銻、鉍、銀、鈷、白金、黄金、鉍等。

屬体心立方晶格的金屬有鋰、鉀、鈉、鉻、α 鉄、β 鉄、鉬、鉭、鎢等。

屬六方体晶格的金屬有鉍、鎂、鈦、α 鈷、鋅、銻、鈦、鎢、α 鈷、鐵等。

屬四面体晶格的金屬有白錫和銻等。

屬斜方六面体晶格的金屬有鉍和銻等。

但是，無論在自然的条件下，或在生产實踐中，我們都不可能获得物理——机械性能完全一致的絕對純金屬，沒有例外。所有工业上用的金屬都是包括了一些可溶的和不可溶的其他組成的合金。这样，在工业上所用的金屬就反映不出結晶体的标志。相反地，大多数的物理——机械性能試驗指出；工业用金屬是具有等方向性的。原因为金屬是多晶体，也就是由大量不同方向性的結晶体的堆集，单个晶粒虽然具有方向性，但多晶体所显示出的就在各方向上都一致了。近来实验証明，每个单晶或晶粒是由嵌鑲块所組成，其大小約为  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  厘米。相邻的嵌鑲块其角約为  $10^\circ \sim 20^\circ$ 。另外由于結晶过程的影响，所以晶粒的外形也是不規則的，同时晶粒的格子結構中也有不完善的缺陷（即位錯）存在。

## §2 彈性变形与塑性变形

物体受力（外力，內力）时，并保持自己的完整性的条件下，其微粒的相对位移的总和称之为变形。

变形的几何特性为物体个别部分的形状以及物体的外部形状的改变。

在变形的过程中，据外力数值的变化，可以把变形分为負荷变形及卸荷变形。負荷变形即增加荷重时产生的变形。卸荷变形即荷重减少时所产生的变形。

按变形的物理特性，可以分为彈性变形及塑性变形。



假如作用于物体的作用力被取消后，物体又恢复到原始的形状与大小，则此变形称为弹性变形。

金属弹性变形的产生是由于原子离开自己的平衡位置，而晶格的距离发生变化的结果。产生弹性变形时，晶格中原子移动的距离是小于晶距的。

弹性变形时，物体的密度及体积均发生变化。例如处于100公斤/厘米<sup>2</sup>的流体压力下，对于钢，体积减小近0.6%；对于铜，体积减小1.3%。在弹性形变时，物体的温度也发生变化，例如：在拉伸时温度降低，而塑压时温度升高。

在弹性变形范围内，如物体的负荷变形，卸荷变形，以及再一次新负荷变形三种情况下的应力——变形曲线完全重合时，则此种物体称为绝对弹性物体。

金属并不具有绝对的弹性。在弹性理论中，金属才被视为是绝对弹性的。

假如作用于物体的外力被取消后，物体不能恢复到原始的形状和大小则此变形称为塑性变形。

用压力加工的方法来生产工件，就是靠塑性变形来实现的。在塑性变形时不仅改变了物体的外形也改变了其本身所具有的机械性能和物理化学性能。

塑性变形是靠原子相对移动至新的稳定位置来实现的。此移动距离往往超过了晶格中原子间距。更确切地说原子已失去恢复至原始状态的能力。

在塑性变形时，由外力所引起的总变形中既包含有塑性部分也包含有当外力去除后而消失的弹性部分。

### §3 单晶体的冷塑性变形

所有金属都是由单个晶粒所组成的多晶体。要想研究多晶体塑性变形的实质，首先必须研究单晶体的塑性变形过程。实验也证明了：当外力作用于多晶体金属时，多晶体的单个晶粒的塑性变形与单晶的塑性变形类似。单晶体与构成多晶体的单个晶粒同样是由原子晶格整齐排列而组成的。

实验研究结果指出，单晶体的冷塑性变形可以通过滑动作用（或称传播作用）及双晶作用来实现。

滑动变形机构的近似概念可用一付纸牌推错来形象。

通常滑动发生于具有一定方向的平面上。此平面称之为滑动平面。一般滑动平面是原子密度最大的平面而滑动方向是沿着原子密度最大的即具有最小原子间距的方向。这是因为这时滑动所遇到的阻力最小的缘故。例如对于面心立方晶格，滑动平面通常为八面体平面 $[111]$ ，滑移方向为 $[10\bar{1}]$ ；对于六方晶格滑动平面通常为其基面 $[001]$ 而滑动方向为对角线方向 $[100]$ 。

温度对可能产生滑动的晶面影响很大。例如对密集六方晶格而言，室温下的滑动平面为基面 $[001]$ 而当温度达200°C时，除基面外 $[10\bar{1}1]$ 及 $[10\bar{1}2]$ 晶面亦可能产生滑动。

滑动是在切应力的作用下，单晶体的某些部分沿着一定的结晶平面在一定的方向上产生相对平行的移动。每两相邻原子平面上的原子之间的相对位移距离等于晶距的整数倍。

在一定的温度——速度条件下，对一定的金属来说，当切应力达到一定值时，滑动即开始产生。使得塑性滑动产生的切应力叫做临界切应力，其数值与滑动平面及外力间方位