

有色金屬及合金板帶材
的生產

上
冊



本书是根据高等工业院校有色金属及合金压力加工专业的教育计划和教学大纲编写的，内容适于120个学时。

全书分上下两册出版，上册为第一篇轧制原理和第二篇轧制车间设备；下册为第三篇生产工艺。在理论与实践相结合的原则指导下，书中分析并讨论了平辊轧制时的规律，讲述了所用生产设备的用途、构造及操作方法，以及各种合金板带材的生产工艺和新技术。

本书为高等工业学校有色金属及合金专业的试用教材，也可供生产企业和设计研究机构的工作人员参考。

有色金属及合金板带材生产

上册

东北工学院有色金属及合金压力加工教研

*

冶金工业部图书编辑室编辑（北京猪市大街

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

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ • 印张26 • 插页2 • 字数483,000

1962年1月北京第一版 • 1962年1月北京第一次印刷

印数001—660 • 定价（10—6）3.00元

*

统一书号：K15165 • 1315（冶金—229）

目 录

論	5	沿咬入弧上摩擦力不变之情形下 单位压力之分布(謝別尔理論)	83
第一篇 軋制原理		§ 6 沿咬入弧上有液体摩擦滑动时, 单位压力之分布(納代理論)	85
引言	5	§ 7 单位压力分布之实验研究	87
§ 1 研究軋制原理之意义及其基本內容	5	§ 8 有貼合区存在之情形下沿咬入弧 上单位压力之分布	92
§ 2 简单軋制过程及非简单軋制过程	7	§ 9 各种单位压力理論計算結果之比 較	101
§ 3 軋制变形指数	8	第六章 平均单位压力与軋制力	103
第一章 軋制过程之建立——咬着	12	§ 1 平均单位压力与軋制力之概念	103
§ 1 咬着时之作用力及其必要条件	12	§ 2 用采利柯夫理論公式求平均单位 压力	103
§ 2 金属被咬着并被填充于軋間之过程	15	§ 3 求平均单位压力之其他公式	110
§ 3 軋制时影响軋件被咬着之因素	17	§ 4 各种平均单位压力公式之評論、 比較及計算	113
§ 4 最大咬入角之决定及其数值	21	§ 5 軋件与軋輥間接触面积之确定	122
第二章 高向变形——金属之流动	22	§ 6 軋制力之实际測定	131
§ 1 金属在軋制时, 变形区之初步 概念——前滑区及后滑区	22	§ 7 采利柯夫公式与实验曲綫之比較	137
§ 2 軋制时金属在变形区内均匀流动 的理論——巴甫洛夫「剛端」理論	23	第七章 軋制时之作用力及力矩	141
§ 3 軋制时金属在变形区内不均匀流 动的理論——采利柯夫的理論	24	§ 1 軋制时作用力及其力矩	141
§ 4 关于軋制时金属流动不均匀分布 之实验	27	§ 2 简单軋制过程之作用力及力矩	141
§ 5 軋制时变形区应力状态之分析	32	§ 3 单輥传动軋制过程之作用力及其 力矩	143
第三章 橫向变形——寬展	34	§ 4 軋制时軋件运动不均匀情形下之 作用力及力矩	144
§ 1 寬展之分布	34	§ 5 軋制时軋輥圓周速度不同时之作 用力及力矩	146
§ 2 寬展之組成	38	§ 6 軋輥直径不同时之作用力及力矩	148
§ 3 各种軋制因素对寬展之影响	41	§ 7 軋件加热不均时之作用力及力矩	149
§ 4 寬展之公式	46	§ 8 有拉力軋制之作用力	150
第四章 縱向变形——前滑	50	§ 9 在多輥式軋机上力的分布情形	151
§ 1 中和点及临界角	50	§ 10 軋机軋輥轉动时所需电机輸出之 力矩計算	152
§ 2 前滑与前滑之发生	53	§ 11 靜負荷图	157
§ 3 前滑数值之决定	54	§ 12 帶有飞輪之軋机电机力矩計算	158
§ 4 各种軋制因素对前滑之影响	56	§ 13 可逆式作业方式中之传动負荷	161
§ 5 縱向变形与橫向变形間之关系	63	§ 14 电动机之最大力矩的决定	163
§ 6 前滑在实际生产中之意义	66	第八章 軋制功率之决定	164
第五章 咬入弧上单位压力之分布	68		
§ 1 研究单位压力分布之意义	68		
§ 2 咬入弧上单位压力分布的旧理論	68		
§ 3 关于单位压力的微分方程式—— 卡尔曼方程式	70		
干燥摩擦滑动时咬入弧上单			

§ 2	軋機各部分摩擦力功率消耗.....	170	§ 3	連接軸及軸套之平衡裝置(托	
§ 3	由實驗曲線來決定軋制能力及轉矩.....	172	§ 4	主連接器.....	
第一篇	參考文獻.....	179	§ 5	連接裝置之計算舉例.....	
	第二篇 軋制車間設備		第七章	軋機機列之齒輪機及減速機.....	
引言.....		183	§ 1	齒輪機及減速機之作用及其配置形式.....	313
§ 1	軋制車間設備之任務及其組成.....	183	§ 2	齒輪機之構造—齒輪機架.....	315
§ 2	軋機的發展.....	185	§ 3	齒輪機之齒輪及其軸承.....	318
§ 3	學習軋制車間設備這門課程之目的.....	187	§ 4	齒輪機傾復力矩之計算.....	320
第一章	板帶材軋機之分類及其選擇.....	188	§ 5	齒輪減速器.....	322
§ 1	按用途分類.....	188	第八章	軋制車間之輸送設備.....	325
§ 2	按軋機結構分類.....	188	§ 1	輓道.....	325
§ 3	按軋機的布置分類.....	198	§ 2	升降台.....	332
§ 4	按軋機之作業方式分類.....	201	§ 3	其他運輸設備.....	335
第二章	軋機軋輥.....	203	第九章	帶材之卷取設備.....	339
§ 1	軋輥之結構.....	203	§ 1	卷取設備之用途及其分類.....	339
§ 2	軋輥尺寸.....	204	§ 2	普通卷取機.....	339
§ 3	軋輥強度驗算.....	207	§ 3	拉力卷取機.....	339
§ 4	軋輥撓度計算.....	210	§ 4	輥式卷取機.....	345
§ 5	軋輥材料.....	213	§ 5	解卷機.....	345
§ 6	軋機軋輥選擇及驗算之實例.....	218	§ 6	卷取機之計算.....	348
§ 7	換輥裝置.....	221	§ 7	卷取設備計算之舉例.....	352
第三章	軋機軋輥之軸承.....	227	第十章	矯正機.....	355
§ 1	軋輥軸承之作用、要求及式樣.....	227	§ 1	輥式矯正機.....	355
§ 2	滑動式軋輥軸承.....	227	§ 2	輥式矯正機之計算.....	359
§ 3	滾動式軋輥軸承.....	237	§ 3	拉力矯正機.....	360
§ 4	液膜式軋輥軸承.....	240	§ 4	拉力矯正機之計算.....	367
§ 5	開式軸承中軸承座的構造及計算.....	240	§ 5	矯直機計算之舉例.....	369
第四章	軋機之壓下及調整裝置.....	246	第十一章	剪切及鋸斷設備.....	372
§ 1	壓下及調整裝置之作用.....	246	§ 1	剪切設備之分類.....	372
§ 2	軋輥之壓下裝置.....	247	§ 2	平刃剪切機.....	373
§ 3	軋輥之平衡裝置.....	250	§ 3	斜刃剪切機.....	375
§ 4	軋輥上之安全裝置.....	254	§ 4	圓盤剪切機.....	378
§ 5	壓下一調整裝置之轉動系統.....	257	§ 5	圓盤鋸.....	382
§ 6	軋輥之壓下一平衡裝置之計算舉例.....	263	§ 6	表面加工設備.....	387
第五章	軋機機架牌坊及地基.....	267	§ 7	計算舉例.....	387
§ 1	軋機牌坊之分類.....	267	第十二章	熱處理及酸洗設備.....	389
§ 2	軋機牌坊之材料及許可應力.....	268	§ 1	熱處理設備之應用及要求.....	389
§ 3	軋機牌坊的構造及基本尺寸.....	269	§ 2	加熱爐之分類.....	389
§ 4	軋機牌坊的固着零件及基礎.....	273	§ 3	錠料之加熱爐.....	390
§ 5	軋機機架牌坊之傾復力矩.....	276	§ 4	退火爐.....	
§ 6	牌坊強度之驗算.....	280	§ 5	淬火爐.....	
§ 7	牌坊在彈性變形時之撓度驗算.....	286	§ 6	各種加熱爐所用燃料之選擇.....	
§ 8	簡易軋機之牌坊.....	287	§ 7	加熱爐之搬運設備.....	
§ 9	軋機牌坊之預選及驗算舉例.....	290	§ 8	酸洗設備.....	
第六章	連接軸及連接器.....	294		廢屑之收集及打包設備.....	
§ 1	梅花形連接裝置.....			參考文獻.....	
§ 2	齒輪式連接裝置.....				

緒 論

[有色金屬及合金板帶材生產]是專門研究一切以有色金屬及合金為原料，通過以平輥軋制法為主的壓力加工方法，制成板材、帶材、條材、及箔材等成品之生產技術的理論及實踐之科學。它是有色金屬及合金壓力加工專業課程內容之一。

有色金屬及合金板帶材在國民經濟中之作用

有色金屬及合金板帶材的生產與社會主義建設中的各個工業部門都有密切的關係。由於有色金屬具有各種各樣的特殊性能——譬如：導電性、導熱性、抗腐性，以及色澤美觀等等，都是許多工業品所要求的性能，再加上板、帶材的生產又是壓力加工方法中比較最廣泛採用的生產方式，所以許多工業制品愈來愈多地使用板、帶材來加工製造。特別是近年來隨着國民經濟的發展，有色金屬及合金的品種日益增多，加工技術也日益進步，金屬及合金產品之機械性能及物理性能也日漸提高，這就使有色金屬及合金的板帶材生產，在國民經濟的各個部門和國防工業中，以及在最新技術的發展中，所起的作用都在日益增大。

有色金屬及合金的板帶材制品，與電器工業、機器工業、交通運輸工業、化學工業、輕工業、食品工業、以至國防工業及各種新技術都有密切的關係，是整個國民經濟發展中不可缺少的材料。隨着我國各工業部門的飛躍發展，有色金屬及合金的板帶材之消費量日益增長，品種要求也日漸增加。根據粗略統計，製造一萬瓩的發電設備，如果包括一切變電及輸電設備器材在內，共約需800噸的銅及鋁。製造一部拖拉機需要31公斤銅，一輛解放牌汽車也需21公斤銅[●]，一架飛機上三分之一以上的材料是鋁。另外，一般精密的或有特殊要求的器具或機械零件之製造，更离不开有色金屬及合金材料。因此有色金屬及合金消費量及制品品種的多寡，常可衡量一個國家的技術水平及工業生產水平。就過去一般工業發達的一些國家的統計，有色金屬的生產消費與鋼鐵的生產消費常保持一定的比例，通常每消費100萬噸鋼，就必須消費1.3萬噸的銅，1.2萬噸的鋁，0.9萬噸的鋅，及0.6萬噸的鉛。這些有色金屬及合金的材料中，有一大部分是以板、帶形狀的材料來供應的。

我國有色金屬板帶材生產工業之發展

我國使用有色金屬的歷史是很悠久的，例如大約在商朝時代，是用銅的鼎盛時期，被稱為銅器時代，迄今已有數千年。但是古代的銅器大都是用鑄造法或錘鍛法制出的，用近代軋制法來製造有色金屬器具材料，不過只有幾十年的歷史。

● 1958年9月25日人民日報社論：全民煉銅。

在过去長时期的封建及官僚資產階級統治时期，有色金屬的加工工业是不可能得到發展的。和鋼鐵工业一样，帝国主义者除了掠夺有色金屬資源外，对于半殖民地的金屬加工工业是不允許有所發展的。

解放以后，在党和政政的正确领导下，在很短的时期内，不但完全恢复了过去所仅有的一些有色金屬矿山及冶煉厂，并且开始建立了有色金屬加工厂。在第一个五年計劃中，在有色金屬加工工业方面，新建了大規模的鋁及鋁合金加工厂，开始筹建新式的銅及銅合金加工厂，并且逐步扩建了原有的有色金屬加工厂。与此同时，更改造了那些分散在各大城市中的小型加工厂，使之為社会主义建設事业服务，以适当地滿足第一个五年計劃期間机器制造及其他工业之需要。

由于党的正确领导，苏联專家的无私帮助，及全国人民的積極努力，胜利地完成了第一个五年計劃，我国的有色金屬工业的面貌也基本改变。从1952年到1957年，我国銅的生产增加270%，鋁增加243%，鉛增加334%，鋅增加252%^①。有色金屬生产的急速增加，必然促使有色金屬加工能力的相应增長。在产品品种方面，到第一个五年計劃末期，我国不但已能生产过去所不能制造的絕大多数有色金屬及合金板带材及其他产品，并且已能供应飞机、汽車、及各种精密仪表制造等所需的大部分有色金屬及合金材料。

在第一个五年計劃的光輝胜利的基础上，党的第八届全国代表大会第二次會議上，又提出了建設社会主义的总路綫。貫徹执行党的社会主义建設总路綫，将使我国社会生产力得到極大的發展，将要大大地提高劳动生产率，使我国工业在十五年或者更短的时间內，在鋼鐵和其他主要工业产品的产量方面赶上和超过英国。根据党的总路綫，我們在优先發展重工业，重工业和輕工业同时并举的方針下，实行了以鋼为綱、全面跃进。同时还实行了中央工业和地方工业同时并举、大型企业和中小型企业同时并举、洋法生产和土法生产同时并举等一整套两条腿走路的方針，同时在工业管理中实行集中领导同大搞群众运动相結合的工作方法，这就为多快好省地發展工业找到了具体的道路。

在这条总路綫的指引下，1958年出現了一个我国历史上前所未有的国民經济的大跃进。鋼的产量由1957年的535万吨增加到1100万吨^②。有色金屬中的銅增加了235%，鋁增加了173%，并且生产出过去所不能生产的大量品种的稀有金屬^③。

在有色金屬压力加工工业方面，單就某厂而言，产量增加到解放前的60倍，产品品种增加到解放前的34倍。

但是，在全国工农业生产的大跃进中，銅和鋁的生产仍然是一个薄弱环节，远远地不能滿足机械制造工业和电器电力工业的需要，如果这个問題不能得到很好的解决，必将影响到我国社会主义建設的發展速度。

正像鋼鐵工业一样，党的总路綫对我国的有色金屬工业提出了三方面的任务：（1）

① 1958年全国工业交通展覽会資料。

② 中国共产党第八届中央委员会第六次全体會議公报(1958年12月)。

扩建并發揮現有企业的力量,(2) 新建大規模的、生产能力巨大的現代化工厂,(3) 根据党的全民办企业遍地开花的方針, 广泛地發展中、小型或洋土結合的有色金屬厂矿企业。

扩建及改建原有的有色金屬加工厂, 提高其劳动生产率及設備利用率, 加紧建設新的現代化的加工厂, 以及广泛地建設小型加工厂, 对于有色金屬加工工业來說, 意义同样是非常重要的。在大跃进中, 由于职工群众在党的领导下發揮了冲天干劲, 解放了思想, 統一了認識, 献出了无穷的智慧和力量, 通过技术革命及技术革新, 不但提前完成了扩建改建計劃, 并且大大地提高了劳动生产率及設備利用率, 使原有的生产能力提高了好几倍。我国第二个五年計劃中的有色金屬加工厂新建工程也正在加紧努力提前完成。这些近代化工厂的建成, 将大大地改变我国有色金屬加工工业的面貌。另外, 許多小型加工厂也将广泛地建設起来。这些工厂所用的原料, 不但是从各地矿石中所提炼出来的有色金屬, 而且也包括从消费者手中所回收的再生金屬。它們所生产的各种半成品——板、带、管、棒、綫材等有色金屬材料, 将供应各个地区的各个工业部門的需要。

在金屬加工工业的全面大跃进中, 一个比較重大的思想障碍就是: 人們总認為金屬压力加工需要重型机器, 認為只有近代化設備, 才能大量生产, 也只有大型机器厂才能制出金屬压力加工所需的各种設備。但是大跃进以后的事实証明, 由于全国人民破除迷信, 解放了思想、發揮了敢想、敢干的冲天干劲, 即使在極簡陋的小型机修車間, 也能制造出压力加工用的大型軋机。譬如: “螞蟻啃骨头”的先进經驗証明小机器可做大活, “茶壺煮猪头”的先进經驗証明小鋼爐可鑄大件。此外, 像“电焊代鑄鋼”, “以鑄代鍛”, 等等革新創造, 已为各地突破軋制这一难关鋪平了道路, 小型的簡易軋机紛紛制造出来。这些情况将同样适合于有色金屬压力加工企业的发展。

因此, 在党的总路綫的光輝照耀下, 我国的有色金屬加工工业的生产, 不論在数量质量或产品品种方面, 都将有更大的跃进。

学习这门課程的目的和要求及这门課程的基本內容

党的社会主义建設事业的飞跃前进, 国家的有色金屬加工工业之日益蓬勃的發展, 就必定要求有更多的、既有社会主义觉悟、又有文化的劳动者, 来担負起这一任务。而培养及教育的責任, 又必須由学校及工矿企业共同来分担, 特别是高等学校更必須負担起提高的任务。

党的教育方針是: 教育必須为无产阶级的政治服务、教育和生产劳动相結合, 为了实现这个方針, 教育工作必須由党来領導[●]。遵循及貫徹了这一方針, 就能够培养出国家所需要的共产主义的全面發展的新人。有色金屬工业是社会主义重工业建設中重要的一环, 在社会主义陣营与資本主义陣营的竞赛中, 有色金屬更将是具有重大意义的因素。因此, 党对从事有色金屬工业学习的人, 無論在政治上及业务上, 都提出了很高及很严格

● 中共中央与国务院关于教育工作的指示。

的要求。

和其他專業一樣，學習這門專業課程的目的，一方面要求能夠在本專業範圍內，在企业生產車間從事基本的勞動操作，成為與本專業有關的各工種的多面手。另一方面，要在計劃生產、組織生產及解決生產中的問題上，以及在理論上，以及發展和創造有色金屬及合金加工的新技术、新产品的能力上，受到鍛煉。為了達到上述目的和要求，就必須在學習過程的每一環節中，無論在理論上或是在生產知識方面，奠定必要的基礎。

因此，[有色金屬及合金板帶材生產]這門課程的基本內容，應該包括從理論到實踐及從實踐到理論的生產知識，亦即包括：既有根據金屬壓力加工實踐歸納出的基本規律的理論總結，又有通過理論指導的實踐性總結。在全部學習過程中，必須密切地與認識實踐、實驗室實踐及生產性的勞動實踐相結合，從而使感性認識與理性認識密切地貫穿起來。因此，全部課程的內容包括了三個組成部分：

(1) 在學習金屬壓力加工原理的基礎上，結合實踐，研究平軋軋制時金屬變形區所產生的各種現象及規律，以及軋制時確定所需要的力之各種方法的探討，從而為進一步發展及解決生產問題服務。

(2) 熟悉了軋制原理以後，就可以結合感性認識進一步了解生產車間的各種設備——主要是軋機設備。要求做到能夠正確地選擇、運用及校驗所使用的設備及工具。

(3) 第三部分是關於有色金屬及合金板、帶材等材料之標準的（或典型的），及特殊的生產工藝過程之研究。金屬從原料到加工成為成品的生產過程的知識，基本上是屬於綜合性的知識——它將壓力加工原理、軋制原理、金屬學、熱處理學等的理論性科學，及關於生產車間的設備及工具的知識組織起來，運用到金屬及合金的壓力加工的生產過程中去。因此，學習的過程，必然應當是理性知識及感性知識結合的過程。

另外，在基本的生產知識的基礎上，還必須了解有色金屬及合金的軋制技術的新發展方向——例如，新的軋制理論，現有工藝過程之改進，新產品之製造及生產方法合理化之研究，新的軋制設備及工具之研究，新型金屬及合金加工工藝過程之研究等等，都屬於[有色金屬及合金板帶材生產]這門課程的內容。

第一篇 軋制原理

引言

§1. 研究軋制原理之意义及其基本內容

虽然压力加工的历史已經很久，人們在很久以前就熟悉用軋制法来加工，但是关于軋制原理的研究，却只是最近几十年所总结的一門科学〔0-1〕。軋制法最初是从热轧开始的，人們經過摸索，知道如何利用金屬在高温下良好的塑性去軋制金屬，但多不知其所以然。也就是說，在当时实际經驗方面的知識远远超过了理論知識。关于軋制机械設備的設計及制造知識之發展，也循着同样的途徑——即实践經驗先于理論知識之發展。在最初，人們在生产过程中不断遭遇到困难，譬如，軋机的力量不足以克服被軋金屬之变形抗力，或在軋制后發現軋件的种种缺陷，如不均匀变形等，这些困难都可使軋制过程遭到失敗。于是人們就針對軋机力量不足的部件进行加强，針對所發現的缺陷进行改善。以后，在生产中又要求去軋制新的材料——新的合金或新的品种，此时軋机操作者在第一次往往会遭到失敗。于是不得不重复，如此所积累起来的經驗，使人們逐漸注意到軋制时之一切規律——金屬通过軋軋間时之現象，变形所必需的力，軋軋直徑等因素对变形之影响，軋制时所必需之功率，等等。同时，軋制者也漸漸了解如何才能产出最經濟最有效的产品。軋机制造者也逐漸明白如何去計算机械上所承受的力，以及軋制所要求的功率等。

以后，当冷轧方法被推广应用时，又面对着新的問題。因为在冷轧后所获得的产品必需要求平整均匀，無論在厚度、寬度及長度方面都要求均匀一致。于是，人們又逐漸明白要达到此目的，必須使軋軋状态良好正确，压下机械之調整必須准确，使每一道次之厚度均匀一致。此外，軋制者又为爭取較高的生产率，就必須提高軋制速度。但軋制速度提高后，又遭到另一系列的困难，譬如，軋筒由于高速摩擦而产生热变形，于是就必須研究如何去控制軋型及溫度。

在軋制帶材时，由于軋件太長，就必須將帶的末端卷起来。于是又产生了前后拉力作用的問題。而前后拉力之存在，又会影响到軋制力之变动。同样，潤滑問題也引起了必要的注意及研究，因为發現軋軋与軋件間之摩擦問題对于金屬的变形及軋制力都有極大的关系，改善了軋軋与軋件間之摩擦状态，就可以改善軋制过程。但摩擦問題对于軋制所产生之影响極為复杂，因此在軋制时的潤滑問題，就不得不做深入的研究。

事情就是这样逐渐發展的。要求在日益提高，新的产品、新的材料，更精确的厚度，更高的生产率，更低的生产成本，所有这一切要求，都意味着需要更多更丰富的軋制理論知識，从而要求做更多的科学研究，来充实这些知識，解釋及糾正实践中的問題，指出以后發展的道路。

在所有已經被应用到的金屬压力加工方法中，平軋之軋制原理是理論研究中比較完整的一个部分。平軋軋制就是使金屬从两个旋轉方向相反的平型軋輥間隙通过的变形过程。本书内所涉及的軋制原理之主要部分，就是指簡單的軋制过程而言。所有其他不同的軋制条件之軋制过程，都将在簡單軋制过程之研究基础上进一步加以討論。

到现在为止，軋制过程所总结的規律，大致可归納为两大部分，即：关于在軋制时金屬变形区域内所产生的一切現象及其規律之研究，以及在軋制时所需之一切力之分析及其計算之研究。

因此軋制原理之基本內容也大致包括下列問題之研究：

金屬被軋輥咬入及建立軋制过程之理論；金屬被軋制时沿高向变形之理論——金屬被壓縮时之流动現象的理論；金屬被軋制时沿橫向变形之理論——寬展的理論；沿縱向变形之理論——前滑的理論；关于金屬被軋制时在軋輥上所承受的單位面积压力之分布，及关于軋制力計算之理論及实验；軋制力之各种主要因素对軋制力之影响，軋制时軋輥上各种作用力之状态，及軋制轉矩及功率之計算方法等。

关于軋制原理之研究方法，不外从下列三方面着手，即：数学分析法，經驗統計法及实验法。特别是数学分析法及实验法是目前所采用的主要方法。但是無論采用何种方法，所获得的結果都还不可能是全面的，因为在軋制过程中要遇到許多極复杂的因素，譬如，在热轧时温度变化之影响，在冷轧时金屬硬化之影响，軋件之厚度、性質、軋輥表面状态、直徑、軋制速度等之影响，都使数学分析法十分复杂。为此，在数学分析中，必然要以一系列之假定为基础，来簡化过于繁复的数学分析工作，而这些假定与实际又往往是有出入的，因此从数学分析法所获得的結果，就难于十分正确。

用实验法或实测法求軋制規律也同样是一件复杂而艰难的事。譬如，在軋制过程中的軋輥及金屬間之摩擦力問題，就难于直接測定，在这种情况下，要获得一个比較全面的規律当然是比較困难的。通过实验来測定軋制負荷及軋制功率都是可能的，但測量結果也只能适合于一定的軋机，对于其他及特殊的軋机条件，就不完全能适合。

以上說明了軋制原理研究的領域是十分廣泛的。

世界各国科学家对于軋制理論的研究，近世紀以来已逐漸增多。如瑞典的爱克朗达 (S. Ekelund)，英国的納代 (A. Naidai)，奥洛文 (E. Orowan)，德国的謝別尔 (S. Siebel)，及美国的屈林克斯 (Trinks) 等，都曾做过很多的貢獻。但特别要提到的是苏联科学家在这方面的杰出的成就，許多杰出的苏联科学家在軋制原理的發展过程中所起之作用，将是不可磨滅的。这些科学家包括：И. М. 巴甫洛夫 (Павлов)，А. И. 采利柯夫 (Целиков)，А. Ф. 高洛文 (Головин)，Н. А. 苏波里伏斯基 (Соболевский)，А. А.

科洛列夫 (Королев), В. Е. 葛魯姆-格路日馬 依 罗 (Грум-Гржимайло), А. Ф. 路达西維尔-比列維尔 (Родзевия-Белевич), И. Я. 塔尔諾夫斯基 (Тарновский), 及 А. И. 科尔巴什尼柯夫 (Колпашников) 等, 其中采利柯夫及巴甫洛夫的貢獻, 使軋制原理這門科學獲得了鞏固的基礎。

我國對這門科學的研究還比較年青, 有許多部門已在開始對某些理論問題展開了研究。

§2. 簡單軋制過程及非簡單軋制過程

所謂簡單軋制過程——是比較理想的軋制過程, 通常把具有下列條件的軋制過程, 作為簡單軋制過程:

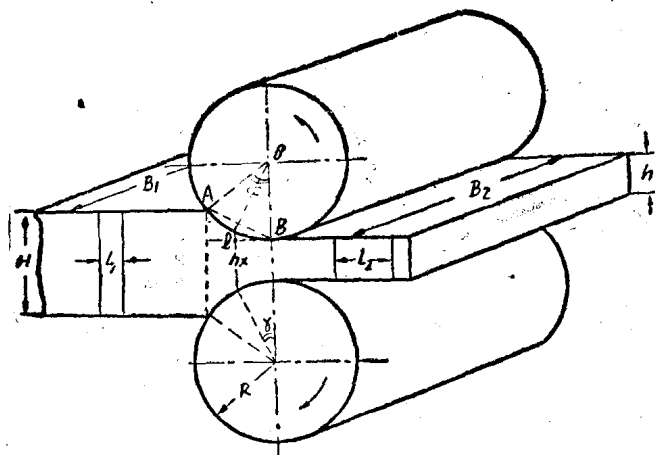
- 1) 兩個軋輥都被原動力所帶動;
- 2) 兩個軋輥直徑都相等;
- 3) 兩個軋輥轉速都相同;
- 4) 被軋制的金屬做等速運動;
- 5) 在被軋制的金屬上只有軋輥所加的压力——即不存在前後拉力及推力;
- 6) 被軋制的金屬性質完全均勻一致——即溫度一致, 變形抗力一致。

所謂非簡單軋制過程, 是指下列條件下的軋制過程:

- 1) 一個軋輥被帶動, 另一個軋輥空轉 (或被軋輥與軋件間之摩擦力所帶動) 的軋制過程, ——例如, 應用於某些二輥式薄板軋機之軋制過程;
- 2) 軋輥直徑不相等之軋制過程——例如在勞特式三輥軋機上之軋制過程;
- 3) 軋制時圓周速度不相等之軋制過程——這種軋制過程可能應用於下列情形, 例如目的在於防止金屬貼輥現象而有意使上輥之綫速大於下輥之綫速的軋制過程;
- 4) 軋制時軋件做不等速運動 (加速或減速運動) 之軋制過程——例如在可逆式軋機上軋輥在開始咬入時調整速度之過程;
- 5) 在軋件上, 除軋輥之作用力外, 還有其他作用力之軋制過程——例如在冷軋帶材時之前後拉力, 或初軋機上推料機之推力等;
- 6) 被軋制之金屬性質不均勻一致之軋制過程——例如由於在加熱爐中加熱溫度不均或時間不足, 致使軋件溫度不均, 從而造成軋件之上下或前後之塑性不一致。

在實際生產中, 即使是具有簡單軋制過程條件的軋制過程, 事實上也具有非簡單軋制過程之因素, 例如由於上下軋輥在軋制時磨損程度不同而使其直徑不會絕對相等。因此, 絕對的簡單的軋制過程並不是常常存在的, 但是為了簡化關於軋制原理的研究工作, 有必要從簡單的軋制過程出發, 然後在簡單軋制過程研究的基礎上, 再進一步研究一般非簡單的軋制過程。

簡單軋制過程中, 研究軋制原理時所涉及的一些基本符號如下:



第0-1圖 軋制符号說明

D —軋輥直徑，毫米； R —軋輥半徑，毫米； H —軋制前軋件之高度（或厚度），毫米； h —軋制後軋件之高度（或厚度），毫米； h_{cp} —軋制時軋件之平均高（厚）度，毫米； Δh —压下量或稱絕對压下量 $=H-h$ ，毫米； B_1 —軋件在軋制前之寬度，毫米； B_2 —軋件在軋制後之寬度，毫米； ΔB —寬展量，或稱絕對寬展量 $=B_2-B_1$ ，毫米； L_1 —軋件在軋制前之長度，毫米； L_2 —軋件在軋制後之長度，毫米； α —咬入角； AB —咬入弧或接觸弧； l —咬入弧（接觸弧）水平投影長度，毫米； γ —臨界角，或稱中性角

§3. 軋制变形指数

軋制变形之結果，沿立体的三个方向上，軋件之尺寸都發生了变化。即：

軋件之高度被减小，由 H 减到 h ——称为高向变形，又称压缩。

軋件之寬度略被增加，由 B_1 增加到 B_2 ——称为橫向变形，又称寬展。

軋件之長度被增加，由 L_1 增加到 L_2 ——称为縱向变形，又称延伸。

在軋制原理之研究中，通常用各种指数来表示这三个方向上的变形程度，这些指数称为軋制变形指数。

高向变形指数

如以 ε 符号来表示高向变形指数，則通常有三种方式被用来表示，即：

第一种方式 $\varepsilon = -\frac{H-h}{H} \cdot \% \text{ 或 } -\frac{\Delta h}{H} \cdot \%$

第二种方式 $\varepsilon = -\frac{H-h}{h} \cdot \% \text{ 或 } -\frac{\Delta h}{h} \cdot \%$

第三种方式 $\varepsilon = \ln \frac{H}{h}$

可以看出，無論是第一种方式或第二种方式，都只能表示变形程度之近似值。因为，無論是絕對压下量 Δh 与軋制前厚度 H 之比例，或是与軋制后厚度之比例，都不能代表变形过程之真实变形程度，它們都只考虑到軋制开始时期或是終了时期的变形比例。正确的变形程度之表示，应当取軋件尺寸相对变化之微分形式，并在一定的極限範圍內加以积分，这才能表示出全部变形过程之真实变形程度。如以 h_x 表示在变形过程中一定的厚度，在此瞬間的厚度上，厚度之減縮量为 dh_x ，則在此时之相对压下量应为：

$$\frac{dh_x}{h_x}$$

倘若厚度之变化極限是由 H 变到 h ，則將上式在此極限範圍加以积分后，即可得到

全部变形过程之相对变形程度的表示方式:

$$\int_h^H \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{H}{h}$$

可知, 第三种表示方式——即轧前厚度及轧后厚度比例之自然对数, 可以表示出真实的变形程度。

巴甫洛夫曾經指出 [0-2], 在較小的变形程度下, 第二种方式所表示的变形程度与第三种方式所表示之变形程度是比較近似的。如果把 $\ln(1+x)$ 展开成級数, 得

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots\dots\dots,$$

如以 $(\frac{H}{h} - 1)$ 代替式中之 x , 則可得

$$\ln \frac{H}{h} = \left(\frac{H}{h} - 1\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{H}{h} - 1\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{H}{h} - 1\right)^3 - \frac{1}{4}\left(\frac{H}{h} - 1\right)^4 + \dots\dots\dots$$

其中除第一項外, 其余均为 $(\frac{H}{h} - 1)$ 之高次項, 是可以忽略不計的, 因此

$$\ln \frac{H}{h} \approx \frac{\Delta h}{h}。$$

如果將上述三種方式之表示方法計算所得之值繪成曲綫加以比較, 則可得如第 0-2 圖之形式, 即假定軋件絕對压下量为一常数, 以橫座标表示每次軋后之厚度 h , 以縱座标表示用每种方式所計算得之变形量。由圖可以看出, 当变形程度愈大时, 此三種方式所得之結果差誤也愈大。当 h 接近于零时, 則

$$\frac{H-h}{H} \rightarrow 100\%,$$

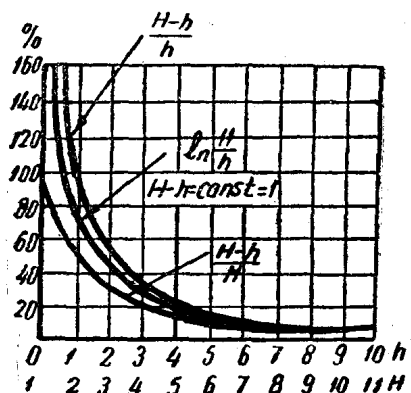
$$\frac{H-h}{h} \rightarrow \infty,$$

$$\ln \frac{H}{h} \rightarrow \infty。$$

$$\textcircled{1} \frac{H-h}{h}, \quad \textcircled{2} \ln \frac{H}{h}, \quad \textcircled{3} \frac{H-h}{H}$$

高向变形指数 ε 通常被称为軋制率, 或加工率, 也称为相对压下量, 都以 % 表示其單位。

上述三種变形指数形式中, 虽然以 $\ln \frac{H}{h}$ 之表示方式为最正确, 但在实际生产中使用不甚方便, 因此通常仍多用 $\frac{H-h}{H}$ % 的表示方式来代表高向变形指数。



第0-2圖 相对压下量計算
比值比較

橫向变形指数

橫向变形指数, 通常都用絕對寬展量来表示, 即

$$\Delta B = B_2 - B_1$$

相对寬展量之形式, 如

$$\frac{\Delta B}{B_1} \text{ 或 } \frac{\Delta B}{B_2}。$$

在生产中都不常应用，但在轧制原理之研究中，有它一定的意义。此外，绝对宽展量及绝对压下量之比例：

$$\frac{\Delta B}{\Delta h}$$

亦曾被用为代表横向变形程度之一指数。

纵向变形指数

纵向变形将轧件之长度由 L_1 变到 L_2 ，其变形之程度通常可有两种方法表示，即

$$\frac{L_2 - L_1}{L_1} \text{ 及 } \frac{L_2}{L_1}$$

前者在一般拉力试验中称为延伸率，通常以符号 δ 表示之；后者为大于 1 之系数，称为延伸系数，通常以符号 λ 表示之。在轧制生产及轧制原理之研究中，延伸系数之使用颇为广泛。

各变形指数间之关系

根据轧制前后体积不变的规律，很容易了解各种变形指数间之关系。设以 V_1 及 V_2 为变形前后之体积，则

$$V_1 = HB_1L_1, \text{ 及 } V_2 = hB_2L_2$$

由于 $V_1 = V_2$ ，因而

$$HB_1L_1 = hB_2L_2$$

可得

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{H}{h} \cdot \frac{B_1}{B_2} \text{ 或 } \frac{H}{h} = \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{L_2}{L_1}$$

如以 F_1 及 F_2 表示轧制前后轧件之横断面积，即：

$$F_1 = HB_1, \quad F_2 = hB_2$$

则

$$\lambda = \frac{F_1}{F_2} \text{ 或 } \lambda = \frac{1}{1 - \epsilon} \cdot \frac{B_1}{B_2}$$

如令 $B_2 \approx B_1$ ，则

$$\lambda = \frac{H}{h} = \frac{1}{1 - \epsilon}。$$

总的变形指数与各道次变形指数间之关系

如轧制之次数不止一次，即经过几个轧制道次才将金属轧到一定的厚度，则总的变形指数与各道次之变形指数间之关系，可阐明如下：

如令轧件在第一道次轧制前之断面积为 F_0 ，

轧件在第一道次轧制后之断面积为 F_1 ，

軋件在最后道次軋制前之斷面積為 F_{n-1} ，

軋件在最后道次軋制后之斷面積為 F_n 。

如此，各道次之軋件長度及斷面積等數據為：

長度： $L_0, L_1, L_2, L_3, \dots, L_{n-1}, L_n$

斷面積： $F_0, F_1, F_2, F_3, \dots, F_{n-1}, F_n$

延伸係數： $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$

則：

$$F_0 = F_1 \lambda_1$$

$$F_1 = F_2 \lambda_2$$

$$F_2 = F_3 \lambda_3$$

$$\dots\dots\dots$$

$$F_{n-1} = F_n \lambda_n$$

$$F_0 = (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n) F_n$$

因此，

$$\frac{F_0}{F_n} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n = \lambda_{cp}^n$$

式中 λ_{cp} ——所有道次之平均延伸係數； n ——軋制道次數目。

其中 $\frac{F_0}{F_n}$ 為總延伸係數 $\lambda_{\text{общ}}$ ，即：

$$\ln \lambda_{\text{общ}} = \ln \lambda_1 + \ln \lambda_2 + \ln \lambda_3 + \dots + \ln \lambda_n$$

$$\lambda_{cp} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{\frac{F_0}{F_n}}$$

$$\ln \lambda_{cp} = \frac{1}{n} \ln \lambda_{\text{общ}}$$

$$\therefore n = \frac{\ln \lambda_{\text{общ}}}{\ln \lambda_{cp}}$$

由此可知，各道次延伸係數之總和，並不等於總延伸係數，而為其對數之總和。

第一章 軋制过程之建立——咬着

§1. 咬着时之作用力及其必要条件

为了实现軋制过程，首先必須使軋輥能咬着軋件，然后才能使金屬填充于軋輥之間隙。为此，就有必要首先来分析在金屬开始被咬着时之作用力。

茲先就最簡單的情况来分析軋制时軋輥与軋件間所作用之力。

今試假定为了要使軋件被咬入于軋輥之間，必先有一外力 Q 将此軋件推向軋輥。于是在 A 及 B 两点与軋輥相接触（第1-1圖）。軋輥即在 A 及 B 两点承受了此推力。换言之，此水平力 Q 被分解成为两个力 P ，各通过接触点 A 及 B ，及穿过两軋輥之中心。 P 之量与 Q 之关系为：

$$P = \frac{Q}{2\sin \alpha} \quad (1-1)$$

可是，在軋輥及軋件之接触面之間，在 P 力之作用下，产生了摩擦力 T_0 。这摩擦力的方向垂直于 P 力，即在 A 及 B 点与軋輥之圓周相切。这摩擦力 T_0 对軋輥而言，将阻止軋輥之旋轉，如第1-2圖所示。

在另一方面，根据力学定律，在咬入时，軋輥必有一反作用力 R 加于軋件，其方向与 P 相反且同在一直綫上，如第1-3圖所示。同样，可知此反力 R 所产生之摩擦力 T ，趋于将軋件拖入輥間。

因此，軋輥对軋件在咬入时之作用力，为力 R （徑向力）及力 T （切向力）（見第1-3圖）。在軋輥咬入的問題上，应当研究軋輥对軋件之作用力 R 及 T ，而在金屬对軋輥压力的問題上，应当研究力 P 及 T_0 。

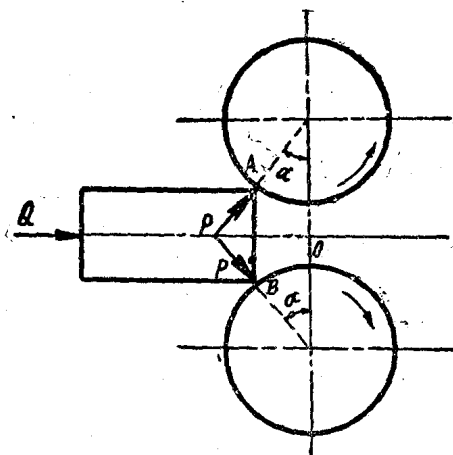
很显明的，摩擦力 T 与力 R 两者之間应为正比例关系，即：

$$T = \mu R \quad (1-2a)$$

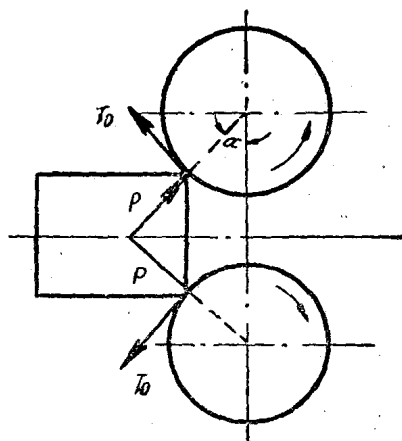
式中 μ 为干摩擦系数， R 既等于 P （方向相反），因此：

$$T = \mu P \quad (1-2b) \text{ 即:}$$

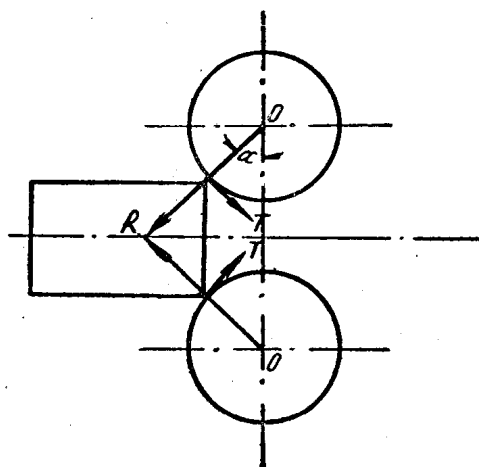
$$T = \mu \frac{Q}{2\sin \alpha} \quad (1-3)$$



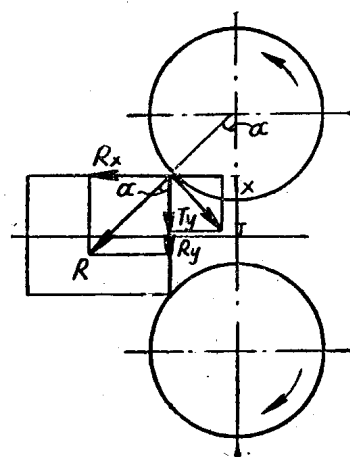
第1-1圖 Q 力分解为两个徑向力 P



第1-2圖 咬着时軋件作用于軋輥之力



第 1-3 圖 咬著時軋輥對軋件之作用力



第 1-4 圖 軋輥作用于軋件之力分解為水平分力及垂直分力

为了弄清楚咬著之力，还应当把 R 及 T 两个力分解出他們的垂直分力及水平分力。如第 1-4 圖所示，这两个力共可分解为以下的四个分力，即：

力 R 之水平分力 R_x ，

力 R 之垂直分力 R_y ，

力 T 之水平分力 T_x ，

力 T 之垂直分力 T_y 。

其中一切垂直分力（ R_y 力及 T_y 力）并不影响于咬著，他們的作用是压缩軋件。与咬著有关者應該是水平分力 R_x 及 T_x 。

可以看出， R_x 力阻止金屬进入軋間，而 T_x 力趋于将軋件拖入軋間。因此：

如果 $R_x > T_x$ ，則不可能将軋件咬著。

如果 $R_x = T_x$ ，則达到力的均衡状态，自然咬著仍是不可能的。

如果 $R_x < T_x$ ，則可能将軋件咬著。

現在可以去求出这水平分力之量：

$$T_x = T \cos \alpha \text{ 而 } T = \frac{\mu Q}{2 \sin \alpha} \quad (\text{見公式 1-3})$$

因此

$$T_x = \mu \frac{Q}{2 \sin \alpha} \cos \alpha = \mu \frac{Q}{2 \tan \alpha}。$$

对于两个軋輥而言，則为：

$$2T_x = \frac{\mu Q}{\tan \alpha} \quad (1-4)$$

从第 1-4 公式看来，似乎将軋件拖入軋間之力 T_x ，不但与摩擦系数 μ 成正比，与咬入角 α 成反比，还与外力 Q 成正比，即 T_x 力似乎有賴于 Q 力之压紧方能产生。但事实并不如此。可再研究另一水平分力，即与 T_x 方向相反之力 R_x 。由于 $R = P$ ，因此：

$$R_x = R \sin \alpha = \frac{Q}{2 \sin \alpha} \sin \alpha = \frac{Q}{2}$$