

高等学校教学用书

金属压力加工原理

東北工學院鋼鐵压力加工教研組等編著



中国工业出版社

本书是根据冶金类型高等学校钢铁压力加工专业的教学大纲，以东北工学院的金属压力加工原理讲义为主，综合了北京钢铁学院和西安冶金学院金属压力加工原理讲义，并在现有的有关金属压力加工最近报导资料的基础上编写的。

本书着重研究了金属压力加工过程的基本理论问题；其中阐述了塑性变形的力学、物理学及物理—化学过程有关的基本理论知识，以及它们在金属塑性变形原理中的运用。同时，进一步阐述了金属压力加工生产实践所概括出来的一些问题。这些问题是：金属压力加工中的摩擦，应力与变形的不均匀分布及其后果，金属的塑性变形条件和变形抗力，变形力及变形功的确定，金属的塑性和金属压力加工工艺制度的确定等。

本书可作为钢铁压力加工专业教学用书；也可作为其他专业（有色金属压力加工、冶金、机械、电机、动力等）学生及研究金属塑性变形问题有关人员的参考用书。

本书由东北工学院钢铁压力加工教研组敖运亨、西安冶金学院轧钢教研组田文林、唐文林、单光玉、钟维淳和北京钢铁学院压力加工教研组编写。全书由敖运亨统一校阅。

金属压力加工原理

东北工学院钢铁压力加工教研组等编著

*

冶金工业部工业教育司编辑（北京市大街78号）

中国工业出版社出版（北京佛刹胡同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·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $10^{3/4}$ · 字数 270,000

1961年8月北京第一版·1962年5月北京第三次印刷

印号 628—7,727 · 定价 (10-6) 1.50元

*

统一书号：K15165·207（冶金-79）

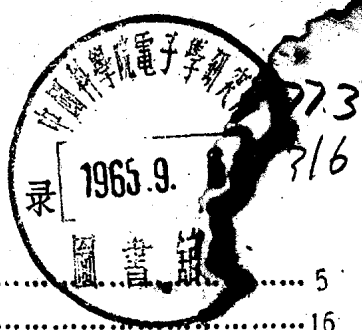
目



緒論.....	5
第一章 应力和变形.....	16
§1 力和应力	16
§2 应力状态	24
§3 可能的应力状态图示	37
§4 变形状态及体积不变条件	45
§5 变形力学图示及其实例	57
第二章 塑性变形时的物理及物理-化学过程	63
§1 塑性变形的机构及其所发生的现象	63
§2 冷热变形及其所呈现之现象	75
§3 塑性变形时的相转变	93
§4 塑性变形时的热效应	96
§5 有液相存在时的塑性变形	101
§6 塑性变形条件对金属性质变化的影响	103
§7 金属的松弛, 蠕变及疲劳现象	112
第三章 金属压力加工时的摩擦	122
§1 摩擦过程的概念及其在金属压力加工中的意义	122
§2 发生于摩擦的机构	125
§3 润滑及其对摩擦力的影响	129
§4 摩擦定律及其应用范围	139
§5 影响摩擦条件和摩擦系数的主要因素	146
§6 确定摩擦系数的方法及其有关资料	155
第四章 应力与变形的不均匀分布及其后果	164
§1 应力及变形的不均匀分布	164
§2 物体的外端对其应力状态及变形的影响	182
§3 最小阻力定律	189
§4 不均匀变形时所呈现的主要现象	195

§ 5 残余应力.....	211
§ 6 研究应力及变形分布的方法.....	218
第五章 金属塑性变形的条件及变形抗力	224
§ 1 极限应力状态及塑性方程式.....	224
§ 2 影响真实变形抗力的因素.....	230
§ 3 应力状态对变形抗力的影响.....	242
第六章 变形力及变形功的确定	252
§ 1 压力加工时变形力的确定.....	252
§ 2 金属压力加工时变形功的确定.....	266
§ 3 金属压力加工时的模拟法 (变形的相似定律) 及其评论	270
第七章 金属的塑性	277
§ 1 变形金属的塑性及影响塑性的主要因素.....	277
§ 2 塑性指数及塑性图.....	289
§ 3 提高塑性的途径.....	304
第八章 确定金属压力加工过程制度的方法	312
§ 1 金属压力加工过程的分类.....	312
§ 2 加热时变形制度的确定.....	324
§ 3 不加热时的变形制度的确定.....	340
主要参考书及辅助参考书目录	345

目



緒論.....	5
第一章 应力和变形.....	16
§1 力和应力	16
§2 应力状态	24
§3 可能的应力状态图示	37
§4 变形状态及体积不变条件	45
§5 变形力学图示及其实例	57
第二章 塑性变形时的物理及物理-化学过程	63
§1 塑性变形的机构及其所发生的现象	63
§2 冷热变形及其所呈现之现象	75
§3 塑性变形时的相转变	93
§4 塑性变形时的热效应	96
§5 有液相存在时的塑性变形	101
§6 塑性变形条件对金属性质变化的影响	103
§7 金属的松弛, 蠕变及疲劳现象	112
第三章 金属压力加工时的摩擦	122
§1 摩擦过程的概念及其在金属压力加工中的意义	122
§2 发生于摩擦的机构	125
§3 润滑及其对摩擦力的影响	129
§4 摩擦定律及其应用范围	139
§5 影响摩擦条件和摩擦系数的主要因素	146
§6 确定摩擦系数的方法及其有关资料	155
第四章 应力与变形的不均匀分布及其后果	164
§1 应力及变形的不均匀分布	164
§2 物体的外端对其应力状态及变形的影响	182
§3 最小阻力定律	189
§4 不均匀变形时所呈现的主要现象	195

2136-47

§ 5 残余应力	211
§ 6 研究应力及变形分布的方法	218
第五章 金属塑性变形的条件及变形抗力	224
§ 1 极限应力状态及塑性方程式	224
§ 2 影响真实变形抗力的因素	230
§ 3 应力状态对变形抗力的影响	242
第六章 变形力及变形功的确定	252
§ 1 压力加工时变形力的确定	252
§ 2 金属压力加工时变形功的确定	266
§ 3 金属压力加工时的模拟法 (变形的相似定律)	
及其评论	270
第七章 金属的塑性	277
§ 1 变形金属的塑性及影响塑性的主要因素	277
§ 2 塑性指数及塑性图	289
§ 3 提高塑性的途径	304
第八章 确定金属压力加工过程制度的方法	312
§ 1 金属压力加工过程的分类	312
§ 2 加热时变形制度的确定	324
§ 3 不加热时的变形制度的确定	340
主要参考书及辅助参考书目录	345

緒 論

金属压力加工原理是一門比較年輕但发展又很迅速的科学，它是金属的一切压力加工方法的理論基础。各种金属压力加工的产品在国民經济的各个部門，如冶金、机械、建筑、航空、火箭等各个部門，得到越来越广泛的应用，这就給压力加工工作者提出了越来越艰巨的任务。

根据国民經济各个部門的需要，人們可以根据不同的方法来获得各种形状、尺寸及要求的工件，以滿足各个部門的需要。例如我們要想获得一个齒輪，一根棒材，一块板材；則可采取数种不同的加工方法。

§1 压力加工与其他几种成型方法的比較

1. 减少质量法：即由大质量的物体上面去除一部分质量而获得一定形状及尺寸的工件。属于这类方法的有金属切削加工（車、鉋、銑、钻、磨等），冲裁与剪切，气切与电切（把金属局部地熔去），蚀刻（把金属制品放在酸或硷的溶液中蚀刻成花紋），等等。

这类方法的特点是：第一从一定质量的毛坯上去除一部分质量而成成品，第二是主要改变物体的几何形状及尺寸，而金属的性能（机械性质、物理化学性质，組織等）几乎不变，但有时对金属的性质及組織的影响，仅限于表面层，例如用火切切割的表面。

这类方法的优点是：可得尺寸精确表面光洁的产品，缺点是原料消耗多，能量消耗大，成本高，生产率較低。

2. 增加质量法：即由小质量的物体逐渐积累成大质量的产品，属于这类方法的有鑄造，电解沉积，焊接与鉚接，燒結与胶結等。

这类方法的优点是可以获得形状复杂的产品，在成型过程中除技术因素外沒有产生废品的条件，故較为經濟，但是质量一般

6

不高，在零件中有組織及化学成份的不均匀性，如縮孔、砂眼、偏析及柱狀結晶等缺陷，但是如果能够恰当地选择原材料及工艺規程，則可以减少此种方法的缺点，而获得較为优质的产品。

沉积法，有电解沉积法和化学沉积法。这是制造金属产品的一种新方法，它有很多优点，如：沒有金属的消耗和鑄造的缺陷，能获得薄而寬的板材，易于获得双金属，可制造薄壁管。但其主要的缺点是不能沉积合金，故在目前限制了它在工业上的广泛应用。

3. 质量保持不变的成型方法：属于这类方法的有金属压力加工的各种方法，如鍛造，軋制、挤压及拉拔等。这类方法是通过机械外力的作用，使金属产生塑性变形，而获得我們所需要的成品尺寸和形状。这种方法只能用于具有塑性的金属，在塑性变形过程中，金属的内部組織以及与之相关联的物理机械性质均发生了一定的变化，一般說加工后的金属性质均較加工前为好，此外这种方法在压力加工过程的本身是不会造成废料的，除了因工艺原因所造成的废料以外（如切头切尾，氧化鉄皮等）。随着科学技术的发展，如无头軋制，連續浇鑄等新技术的采用以及操作技术的不断提高，上述废料可以大大的减少。这种方法与第一种方法比較是产量高，金属消耗少，成本低，但在形状要求很复杂，尺寸很精确，表面十分光洁的情况下尚不及切削加工的方法，但对于断面形状不是特別复杂，光洁度不是要求特別高的工件，則由于压力加工方法之产量高，质量好及成本低，故对这些工件有取而代之的趋势。如齒輪和簡單周期断面工件的軋制、冲压挤压等。

与第二种方法比較，虽然产量高，质量好，但在成本及形状的复杂方面不及鑄造的方法。至于說到我們常用的鋼材、鋼軌、鋼梁、螺紋鋼筋、滾珠軸承、飞机机翼外壳、大炮炮筒等則必須用压力加工的方法来大量生产。

关于上述几种成型的方法，可以单独使用，亦可以联合起来使用。如无錠軋制則为第二与第三种方法的联合。

§2 金属压力加工主要过程的特点及

其发展国民经济的作用

金属压力加工的主要方法有鍛造、軋制、挤压及拉拔等。

一、鍛造与冲压过程：它們是用鍛錘的往复冲击力或压力机的压力使坯料改变成我們所需要形状的一种加工方法。

鍛造可分为自由鍛和模鍛两种，自由鍛是在上下往复运动的平錘头或曲面錘头的冲击下使金属产生塑性变形，而下錘头（鉄钻）通常是固定不动的。热模鍛是将金属放在与成品形状一样的鍛模中使金属产生塑性变形而获得与模膛一样的形状。在模鍛时模壁阻碍金属的自由流动，当金属充满模子后，即得到了所需的制品，多余的金屬在模鍛过程中則流向模子間的空隙，而造成翅边，将翅边切断后，則获得尺寸相当精确的产品。当采用精密模鍛时，可以得到无翅边而不需剪切的零件，同时成品的精确度及其表面质量可以很高，而金属的无用的消耗可以縮減至最小。

自由鍛造和模鍛的主要操作方法有鍛粗、延伸、穿孔、在垫环中及鍛模中鍛粗、在开式或閉式鍛模中鍛造等等，如图1所示。

鍛造生产广泛的应用于各工业部門，尤其在造船工业、发动机制造工业、机床制造工业、国防及农业机械工业中占着很重要的地位。鍛造所用的原料可为金属錠或軋制品。目前所用最大鋼錠在200吨以上，鍛造成品包括各种各样的零件，供制造机器、机床、仪表及金属結構件之用，如曲軸，連杆，飞机的螺旋桨，高压鍋炉的圓筒，枪身，炮筒，透平机的零件，等等。

冲压，即冷冲压，是用厚度及断面很小的板材，冲压成我們所需形状的零件。用这种方法可以生产带底的薄壁空心制品，其主要操作方法有不变薄的冲压延伸、变薄的冲压延伸、弯曲、动力冲挤等，如图2所示。

薄板的冲压生产，应用在生产金属制品的各种不同企业中，

如机器制造业、国防工业及生产日用品的工业等。薄板冲压的产品有飞机零件、子弹壳、汽车零件、各种仪器的零件及日常生活用品，如锅、碗、勺、盆等。

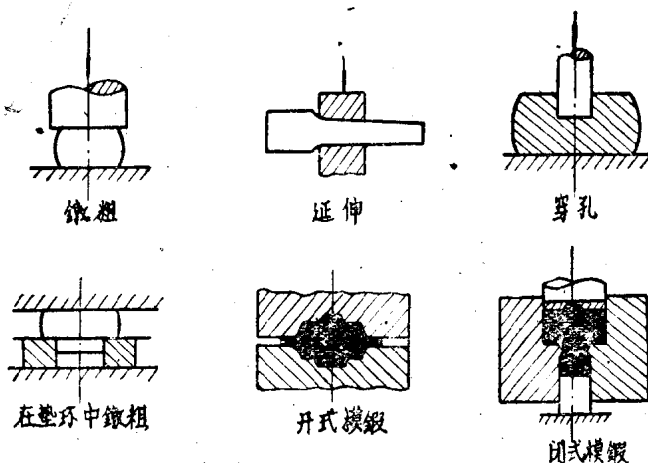


图 1 锻造的几种主要过程

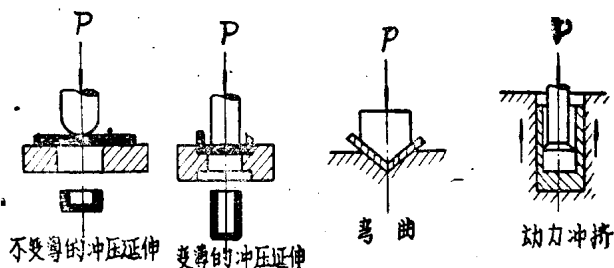


图 2 冷冲压的几种主要过程

二、轧制过程：即金属在旋转的轧辊之间进行塑性变形，而轧制的目的不仅是改变金属的形状，而且也使金属获得一定的性能。

轧制的方式目前大致分三种，即纵轧，斜轧和横轧。

1. 纵轧：就是轧件在相互平行且旋转方向相反的轧辊之间

进行塑性变形，而金属的行进方向与轧辊的轴綫垂直（如图3）。轧制后一般轧件的厚度减小，而长度和宽度增加，其中以长度的增加为主。

金属不論在冷态和热态之下均可进行轧制，这种方法在鋼材的生产中应用的最为广泛，如各种型材、板材及极薄带材的生产。

2. 斜軋：即軋件在两个中心綫互相成一定角度且旋轉方向相同的軋輥之間进行塑性变形（图4）。軋件沿軋輥交角的中心綫方向进入軋輥，軋件在变形中除了有繞其軸綫旋轉的运动外还有前进的运动。斜軋应用很广，常用以軋管材及变断面型材。

3. 横軋：軋件在向同一方向旋轉的軋輥之間进行塑性变形（图5）。在横軋中軋件只有繞其自身中心綫旋轉的运动，因而仅在横向受到加工。这种方法用于齒輪及車輪等产品的生产。

三、拉拔：包括拉絲及拔管过程。拉絲是使外力作用于被变形金属的前端，使其通过一定的模孔，而使金属断面縮小及长度增加的方法（图6，a）。拔管过程是将中空管坯通过模孔（用心棒或不用心棒），使管径减小、管壁变薄（或加厚）的过程（图6，b）。

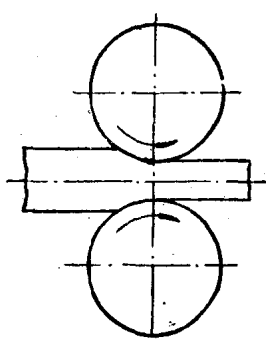


图3 縱軋簡图

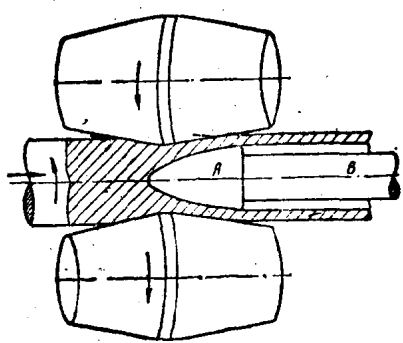


图4 斜軋簡图

拉拔一般在冷状态下进行，可以拔制断面尺寸甚小的产品（如直径为0.015毫米之金属絲，直径0.3毫米的金属管），且产

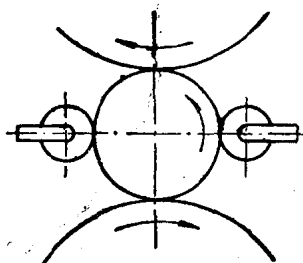


图 5 横軋簡圖

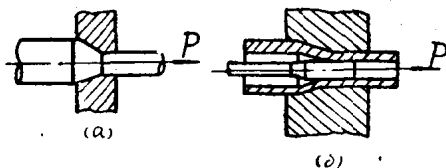


图 6 拉拔簡圖

a—拉絲簡圖；b—拔管簡圖

品的表面很光洁，尺寸很精确。拉拔时由于产生加工硬化，金属的强度及硬度均有所增高。

拉拔的产品种类很多，如金属丝，金属管、異型断面的产品等，用作电缆、电线、金属筛以及各种仪器上的零件等。

四、挤压：挤压的实质是将金属放在密闭的圆筒内，一端施加压力（如借水压机）使金属从规定的模孔中挤出，而得到不同形状的成品（如棒材、线材、型材及管子等）的加工方法，如图 7 所示。

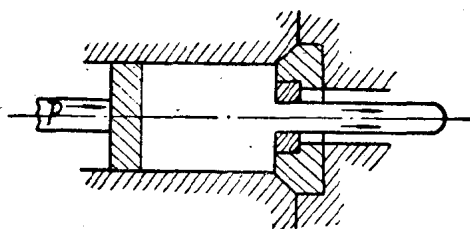


图 7 挤压簡圖

挤压生产多应用于有色金属的加工，以及国防工业部门，近年来亦应用于黑色金属加工厂，特别是对于耐热合金及低塑性金属的加工方面。

通常，冶炼出来的钢要有百分之九十以上经过压力加工制成国防工业、冶金工业、机器制造工业、建筑工业以及国民经济其

他部門所需的各種產品。因此，不难看出，金屬壓力加工工業在整個國民經濟中具有何等重要的地位。

§3 金屬壓力加工的發展簡史

我國是具有五千餘年文化的古國，在長期的生產和生活實踐中，我們祖先在自然科學及社會科學方面都作出了很多重大的貢獻，例如指南針、火藥、造紙及印刷術的發明，證明我國在古代手工業已有很大的發展。

從一系列的文獻中完全可以證明我國古代在金屬壓力加工方面已得到了很大的發展。

說文上說：“鍛小治也”。段工裁注“小治，為小作爐鑪以冶金，治之則錘之，故曰鍛鉄”。由此可知，鍛工工藝在我國起源極早。遠在春秋戰國時代，即2800年前，我們的祖先即已開始了寶劍的製作，當時楚國干將莫邪曾為楚王製作寶劍兩把，一把名干將，另一把名莫邪。同時有表示其質量良好的鍛鉄如泥的記載。

南北朝（公元318~537年）御覽一書曾有嵇康鍛造的記載。根據南齊（公元479~500年）書齋僧靜傳的記載說：“世祖以鍛劍襟用鉄多，不如鑄作，東冶令張侯伯以鑄襟鈍不合用，事不行”。當時的詩人劉琨，在自己的詩歌中讚誦鍛造說：“何意百煉鋼，化為繞指柔”。由此可知當時冶金事業已得到了發展，煉鋼過程和金屬壓力加工過程已經連系起來，並且金屬壓力加工可使金屬改善質量。同時亦反映了當時鍛工技巧的熟練和成品質量的優良。

宋沈括在距今八百多年前所著“夢溪筆談”（1089~1093）中記載：“青堂羌善鍛甲，鉄色青黑，瑩徹可鑒毛髮，以麕皮為酒旅之，柔軟而韌，……曾取試之，去之50步強弩射之不能入。……鉄皆反卷，其堅如此。凡鍛甲之法，其始甚厚，不用火，冷鍛之比元厚三分減二乃成，其末留筋頭，許不鍛，隱然如癰子，……謂之癰子甲……”。這段記載說明，我國少數民族“羌”族所冶鍛的癰子甲，不僅柔軟堅固，質量極高，而且冶鍛

技术十分精湛。記載中也說明了当时鍛造癩子甲所采用的压下比为66%；而根据现在的科学观点认为，为了保证成品的高质量，压下量取为75~90%，这足以证明，当时癩子甲的制造技术已接近现代科学技术水平。

在距今三百多年前，在明朝宋应星著“天工开物”第十卷中，专门叙述了冶铁，斤斧……造针等的鍛造方法。如在描写造针的方法中说：“凡针，先锤铁为细条，用铁尺一根，錐成线眼，抽过铁条成线，逐寸剪断为针，先錐其末成颖，用以槌搞扁本，钢錐穿鼻，复錐其外，然后入釜，慢火炒熬，炒后以土末入松末，火炙，豆豉三物掩盖，下用火蒸，留针二三口插于其外，以试火候，其外针入手搓成粉碎，则其下针火候皆足，然后开封，入水健之，凡引线成衣与刺繡者，其质皆刚，惟马尾刺工为冠者，则用柳条软针，分别之妙，在于水火健法云”。从这段記載中，不但说明我国劳动人民在三百年前已经发明了冷拉丝的技术，而且知道金属压力加工与热处理的结合应用，知道加热温度与加热时间对成品质量的影响，并掌握了封門加热、渗炭及淬火等重要热处理技术。

由上述可知，我国的金属压力加工事业（鍛造和拉丝）在很早就达到了高度的技术水平，但是由于过去长期遭受封建制度的统治，因而束缚了生产的发展，尤其是近百年来，除受封建主义的统治压迫外，还受帝国主义和官僚资本主义的掠夺和摧残，所以使技术水平一直得不到发展。

1949年中华人民共和国成立后，在党和毛主席的英明领导下，我国冶金事业获得了惊人的发展。在短短的三年恢复时期内，钢铁生产已恢复并超过了解放前的最高水平。在第一个五年计划期间，我国钢产量逐年上升，特别是在1958年，全国人民在党的鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义的总路线的鼓舞下，在以钢为纲、全面跃进的方针指导下，坚持了一整套两条腿走路的方针，发挥了冲天的革命干劲、掀起了轰轰烈烈的全民性大炼钢铁的群众运动，使我国钢产量猛增至1108万吨。

在持續跃进的1959年，全国人民在党的领导下破除了迷信，掀起了大鬧技术革命、技术革新的运动，使鋼产量达到1335万吨，由原世界第十六位上升到第七位。到1960年則鋼产量已达1845万吨。这个速度是惊人的，是資本主义国家所望尘莫及的。

过去半封建半殖民地性质的旧中国在冶金生产方面的特点是，炼鉄的能力大于炼鋼的能力，而炼鋼的能力又大于压力加工的能力。在解放后的短短几年內，無論在黑色及有色金属的生产方面，都在数量及质量方面取得了巨大的发展。尤其在大跃进以来，通过技术革命和技术革新运动，我国劳动人民在压力加工技术的各个方面均取得了巨大的成就。如小机軋大材，高速大压下，多条快軋，无飞边鍛造，轉模拉拔以及特种合金的压力加工等等。目前我們除了繼續保持跃进的高速度外，正在向多品种，高质量的方向发展。因此为了滿足国民經济各部門的需要，摆在我們压力加工工作者面前的任务是非常艰巨而又光荣的。

至于其他国家的金属压力加工发展历史，則由于篇幅及資料的关系，只大略介紹如下。

最早的压力加工是鍛造，經過鍛造的坯料用手工加工后，即成为家常用品。

关于軋制用作錢币的金銀和用作手风琴的鉛皮的最初記載是在1553年。16世紀俄国建造了第一座軋机；1724年納尔托夫应用了水車来传动軋机和安裝了齿輪机架；1764年果尔庫茨涅佐夫发明了連續軋制，而連續軋制在英国到1862年才出現。

1800年俄国出現了著名的烏拉尔屋面鋼板的生产法，烏拉尔屋面鋼板具有很强的防銹能力，而不用鍍鋅，但欧洲各国的屋面板則必須鍍鋅。

1843年在摩罗姆附近維克松斯基工厂，軋制了第一批鋼軌。

1857年貝色麦尔发明了无錠軋制法。

1857年建立了第一座三輓式軋机。

1880年建立了第一座带反行程蒸汽机的可逆式軋机，同年还制成了第一座四輓式軋机。到1904年建立了第一座六輓式軋机。