

高等工科院校试用教材

金属压力加工特殊方法

主编 杨守山



西安冶金建筑学院

一九八三年十二月

前 言

本书是根据1981年冶金部沈阳教材会议制定的教学计划自拟大纲编写的,是金属压力加工专业大学生选修课试用教材。暂定30学时。在学完专业课之基础上,进一步扩大专业知识面,开发智力,理论联系实际地为未来的创造性工作奠定基础。

本书主要讲述了国内外加工新技术,新方法及特殊方法。内容力求贯彻理论联系实际,少而精的原则。系统地论述了各种方法的理论基础,实用价值及其特点。本书除供金属压力加工专业教学使用之外,也可供工程技术人员生产和科研选题之参考。

本书由西安冶金建筑学院杨守山主编,许其亮,郎锡君参加编写。

由于水平及时间所限,书中疏漏谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1983年7月

目 录

第一章 金属加工新方法	(1)
1—1 电子束加工法	(1)
1—2 放电微细加工法	(2)
1—3 电解加工法	(4)
1—4 电解沉积法	(5)
1—5 化学加工法	(6)
1—6 超声波加工法	(6)
1—7 连续加工法	(7)
1—8 亨特法	(7)
1—9 普罗佩尔奇连铸法	(8)
1—10 钢锭连铸连轧	(9)
1—11 浸涂加工法 (G.E)	(10)
1—12 静液挤压法	(10)
1—13 爆炸成型	(12)
1—14 放电冲击波加工法	(13)
1—15 电磁成型	(14)
1—16 高速高能锻造	(14)
1—17 旋压加工	(15)
1—18 喷射成丝法 (FFMS法)	(17)
1—19 急冷辊液体成丝法 (CBMS法)	(17)
1—20 无模拉丝法 (Taylor)	(18)
1—21 熔体抽丝工艺	(18)
1—22 喷涂轧制生产带材法	(19)
1—23 铸轧焊接三层复合带	(19)
1—24 金属粉与金属带的轧焊	(20)
1—25 喷液轧焊法	(20)
1—26 电热轧焊法	(20)
1—27 利用火箭在空间制造镍合金材料	(21)
第二章 轧制加工特殊方法	(22)
绪 言	(22)
2—1 异步轧制 (PV轧制法)	(23)
2—2 无头轧制	(24)

2—3	行星轧制	(24)
2—4	大同式行星轧制	(25)
2—5	改进的大同式行星轧机	(25)
2—6	双重式行星轧机	(25)
2—7	摆式轧机	(26)
2—8	万能连轧机	(26)
2—9	楔横轧	(27)
2—10	C、B、S 轧机	(28)
2—11	洛德式轧机	(29)
2—12	大压下行星式横向—纵向轧制轧机	(29)
2—13	往复式轧机	(29)
2—14	挤边轧机	(30)
2—15	使用凸度可变的低硬度轧辊的平整轧制	(30)
2—16	异形断面板材轧制	(30)
2—17	钨棒的轧制	(31)
2—18	钢环轧制	(31)
2—19	穿孔—延伸联合法	(32)
2—20	行星式穿孔延伸联合法	(33)
2—21	二次穿孔法	(33)
2—22	三辊穿孔—热轧管法	(34)
2—23	压力穿孔法	(34)
2—24	三辊斜轧轴法	(35)
2—25	多排辊轧制 (一)	(36)
2—26	行星式冷轧管机	(36)
2—27	固定机架式三线冷轧管机	(37)
2—28	多排辊轧制 (二)	(37)
第三章 挤压加工特殊方法		(39)
绪 言		(39)
3—1	阶段变断面管材挤压法	(44)
3—2	逐渐变断面管材挤压法	(45)
3—3	润滑挤压法	(46)
3—4	水冷模挤压	(46)
3—5	无残料连续挤压	(46)
3—6	有效摩擦挤压法	(47)
3—7	水封挤压 (挤压—淬火—矫直自动线)	(47)
3—8	背向挤压	(48)
3—9	等温挤压	(48)

3—10	高速冷挤压	(49)
3—11	超高速挤压	(49)
3—12	双金属管挤压法	(49)
3—13	铝合金管穿孔挤压法	(50)
3—14	扩展模挤压法(径向挤压法)	(50)
3—15	爆炸挤压法	(51)
3—16	前张力挤压	(51)
3—17	连续挤压制线法	(52)
3—18	“Conform”铝合金挤压法	(53)
3—19	冲击挤压	(55)
3—20	超塑性材料的挤压	(56)
3—21	反向挤压	(57)
第四章 拉伸加工特殊方法		(58)
绪 言		(58)
4—1	交互弯曲辊拉伸	(59)
4—2	回转模拉伸	(60)
4—3	强制润滑拉伸	(60)
4—4	超声波拉伸	(61)
4—5	热拉伸	(61)
4—6	辊式模拉伸	(61)
4—7	多股线材拉伸	(62)
4—8	带反拉其拉伸	(62)
4—9	倍模拉伸	(63)
4—10	扩 管	(64)
4—11	联合拉伸	(64)
4—12	热水中拉伸	(65)
4—13	大断面管、棒拉伸机	(65)
4—14	游动芯头盘管拉伸	(65)
第五章 锻造加工的特殊方法		(67)
绪 言		(67)
5—1	旋锻	(70)
5—2	辊锻	(70)
5—3	螺纹滚轧	(71)
5—4	万能式轧锻	(71)
5—5	多向模锻	(72)
5—6	液态模锻	(72)

5—7	粉末模锻	(73)
第六章 冲压加工的特殊方法		(74)
绪 言		(74)
6—1	爆炸成形与爆炸胀形	(75)
6—2	电水成形和电爆成形	(75)
6—3	电磁成形	(77)
6—4	超塑性材料的低压吹鼓成形	(78)
6—5	压力润滑深冲法	(78)
6—6	液压橡皮模成形法	(79)
6—7	用橡皮成形法	(79)
6—8	无模杆深冲	(79)
6—9	加热—退火法	(80)
6—10	冷轧冲孔法	(80)
第七章 塑性加工技术之开发		(81)
绪 言		(81)
7—1	在研究塑性加工技术开发时必须考虑的要点	(81)
7—2	减少能量消耗	(82)
7—3	减少外摩擦	(82)
7—4	废金属的活用和缺陷的利用	(83)
7—5	各向异性的控制和应用	(85)
7—6	利用残余应力提高性能	(89)
7—7	采用加工热处理(温加工)提高材料性能	(90)
7—8	成品率的提高	(95)
7—9	电解金属的直接加工	(97)
7—10	通过改变外观形状提高产品性能	(99)
7—11	材料性能的复合	(102)
7—12	小时平均产量的提高	(103)
7—13	思路要善变	(105)
7—14	研究方法的技术开发	(108)
7—15	情报搜集与技术开发	(110)

第一章 金属加工新方法

近代科学技术的发展要求开发新的机器,寻找新型材料,革新现行的生产方法。特别是电子工业的飞跃发展使各种能源的开拓和控制成为现实,电子技术已经成功地应用于金属加工领域之中。新的加工方法不仅用于研制新材料,而且提高了过去工业生产效率,同时也开辟了新的学科领域。

本章着重介绍业已付诸实际应用的新的加工方法。

1—1 电子束加工法

由电子枪发射而产生的具有极大动能的电子集团,也就是电子束。用它来轰击固体,则动能转换为热能。电子束细细地集中并在固体表面上聚焦、而使材料熔融、蒸发,进而对材料进行加工。电子加速电压为 V (伏特);电子电流为 I (安培);加工点电子束作用的横断面积为 A (厘米²),则能量密度 W 为

$$W = \frac{VI}{A} \text{ (瓦/厘米}^2\text{)} \quad (1-1)$$

要精密加工就必须使断面 A 缩小,然而电子相互间的静电斥力和电流吸引的影响, A 的最小值是有限度的。大体上是 10^{-7} 厘米²,此时的最大能量密度为 10^9 瓦/厘米²。而在其他热源情况下,如在弧光下其值为 10^{-3} 厘米²和 10^6 瓦/厘米²;在光焰下其值为 10^{-2} 厘米²和 10^4 瓦/厘米²。

如果电子的穿透深度为 d ,材料的密度为 ρ (克/厘米³),则

$$d = \frac{2.1 \times 10^{-2} V^2}{\rho} \text{ (厘米)} \quad (1-2)$$

例如,加速电压为100千伏时,对铝的穿透深度为77.5微米;对钨则为11微米,这是相当深的。

电子在没有能耗的情况下容易穿透数百 $\text{\AA}$ 的表面层,达到内层时动能将转化为热能。电子束的加工机理可以认为由内层传出来的热使表面层加热而蒸发,而内面层的急剧膨胀使表面层飞溅。由于热传导的影响加工可在高效率下进行。电子束在一定的部位连续地照射,不如以脉冲式断续进行,而边移动加工面边照射的方法更好。一般使用的脉冲振幅为1~10微秒,脉冲周波数为1~10千周。

当考虑电子束从上方照射时,其力的分配如图1—1所示。使熔融面向下的压力有:电子轰击压力 F_e ,蒸发分子的反作用力 F_v ,飞溅熔滴的反作用力 F_d ,向上方作用的力有:由熔融物质重量产生的静压力 F_g ,以及表面张力 F_s ,这些力的平衡就保持着熔融面的存在。诸力的理论分析与计算表明:熔融面得以保持主要是蒸发分子的反作用力与表面张力相平衡。

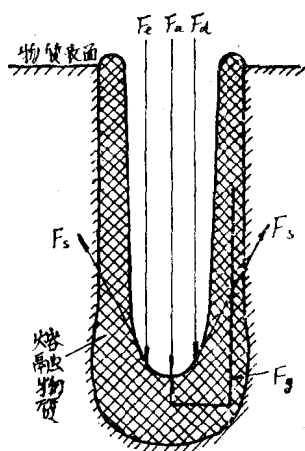


图 1-1 电子束照射点上的力的分配 F_e —电子压力； F_a —蒸发分子的反作用力； F_d —飞溅熔滴的反作用力； F_s —表面张力； F_g —熔融物质重量的静压力。

毫米。加工时间大约为几秒或几十秒。

如上所述，本加工方法的特点是：不仅对金属和非金属能够进行极微细的加工，而且还能加工高熔点材料。由于在真空中加工，因而具有污染很少，工具消耗少等许多优点。缺点是加工部位周围由于受热而会产生加工变质现象；必须在真空中操作；操作过程中会产生X射线必须采用防护措施。电子束加工法适用于不准污染的加工和采用过去的机械，放电，超声波等加工方法不能满足高精度的微细加工。半导体材料的加工也很适用。

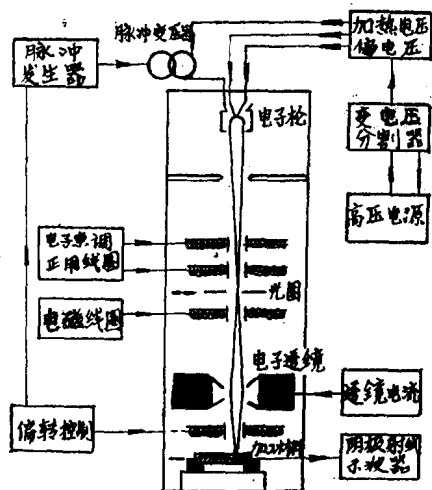


图 1-2 电子束加工装置

1-2 放电微细加工法

放电微细加工法是苏联在1940年开发的，1960年开始火花放电机械加工在实用化方面取得了急剧地发展。目前在锻造模，拉伸模，塑料模的制造，机械，电器另件的精密加工以及特殊材料的加工等方面得到了广泛的应用。然而放电时的现象，特别是每个应用实例中的现象是极其复杂的，还有很多问题没有解决。

放电加工原理可以简单地被看作是利用置于液体之中的电极间的放电而引起的电极消

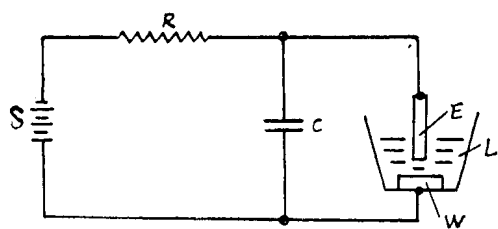


图 1—3 RC 回路

引起极间绝缘的破坏，于是两极间重新放电。由于这一过程的反复进行，电极将有少许的消耗，从而进行加工。在同样材质情况下，一般阳极的消耗比阴极的消耗大。放电时间长电极会熔化，短则会蒸发，这是电极消耗的主要原因。另外，如果一次放电量、则加工量大但

加工表面粗糙。反之，放电量小，加工量就小然而加工表面细密。若避免加工表面粗糙，则应提高加工速度，为此应有足够的放电次数。RC回路是由电源S通过电阻R对电容C充电，这样就限制了引起脉冲放电的条件。通常充电的时间约为放电时间的30倍，而因极间残留离子的消失造成的休止时间约等于放电时间的60倍。放电—充电—休止的时间之和是一个周期的时间，由于它的效率不佳、现在RC回路几乎不再使用。图1—4是经改造后形成的RLC回路。

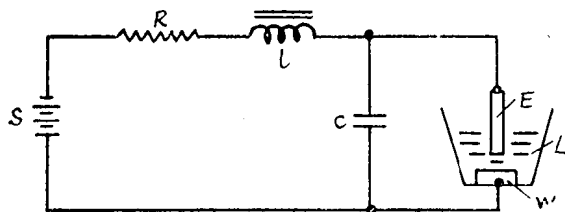


图 1—4 RLC 回路

在直流充电回路中加入电感后，可缩短充电时间，同时减小了电容器的容量。加工速度能提高两倍。RLC回路以自由放电的方式释放电容器里的能量，因之放电脉冲振幅随电压而变化。通常高压下为1~10微秒，低压下为100微秒到1毫秒左右。而脉冲与脉冲之间需有休止时间。如果利用这一时间能够充电，则有效电率会更高，那么就应设法改进并建立更为完善的独立回路。也就是说，将某种其他波形的脉冲电流分段给入之后、放电

时的压力，热都能最有效地保持下陡式的放电时间特性，同时降低了电极消耗，在提高加工量和防止缺陷等方面也有改善。这类回路有如图1—5所示的真空管式 and 图1—6所示的机械式（感应型）等装置，前者用于输出小而频率高的情况，后者应用在输出大而频率低的情况。

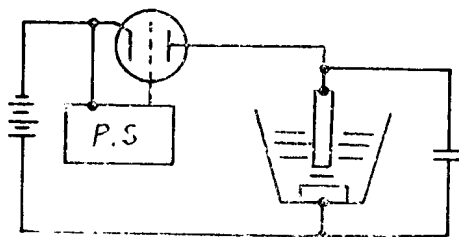


图 1—5 真空管式脉冲发生装置

所以微小的接触或溅射很容易发生短路。另外，由于R、C值选定不当或休止时间及加工液不充分均会引起电弧放电，因此要细心控制。作为节约电极材料消耗的措施选用电极材料

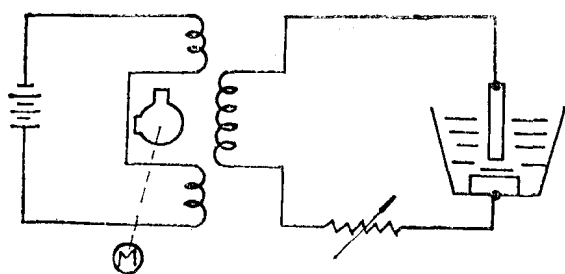


图 1-6 机械式脉冲发生装置

和加工液是目前重要的研究课题。

图 1-7 是利用放电加工法无变形切割金属装置。放电加工在实际应用方面已走在前列，但未解决的问题还很多，有待于今后的研究和发展。近年来为改进放电加工法，将超声波振动通过振动子—喇叭加强振动，对工具或材料进行加工，试图提高加工效率。

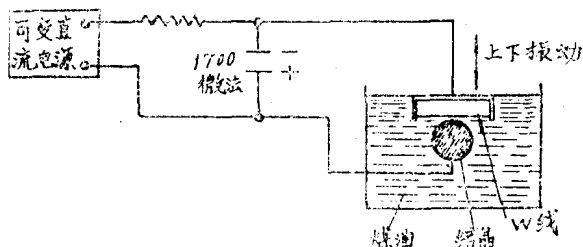


图 1-7 放电无变形切断法

1-3 电 解 加 工 法

采用机械方法进行磨削加工，工具和被加工材料都会受到限制。前述列举的放电加工法存在电极消耗的严重缺点。电解加工法可加工形状复杂的材料，被加工材料的硬度不受限制，而且没有工具消耗，这是该方法的优点。

电解加工原理是将金属极放入电解液之中，电解时利用阳极溶解成离子，在阴极上离子失去电荷而析出现象。与常见的电解研磨不同之处是电流密度很大、加工速度也快。由于阴极成了工具，因此要防止向阴极方向迁移的离子析出（电镀）现象的产生，还要防止在极面上产生气体的影响，为此电解液（多数是食盐水）必须经常保持清净并且经常使它在极间处于喷射流动状态。这样电解加工用的工具就没有消耗，如果被加工的材料导电性能良好、形状复杂也能一次加工成型。加工速度可用电流密度来控制，尤其是不必施加机械压力，故不会发生因过热或加工形变所引起的变质现象。然而为了提高加工精度，两极间距离的控制是必要的。增大电流密度、加工速度则能提高，但也必须增大电解液的流动速度。流速太大会造成加工面的粗糙，因此仍应有一定限度。另外，随时间推移电解液的成份也将发生变化，这就使电解现象复杂化。其中电解液输送装置的耐蚀性也是难题之一。

图 1-8 示出了适用于电解加工之实例。图中 A 是被加工材料；C 是工具电极，电解液是从电极的侧面带孔工具的孔端输入。把工具电极配置在材料的两侧，则可进行薄件的加工。

电解加工法的发展与大电流的直流电源的出现密切相关。电压为 20 伏，电流为 1000~10000 安培的电源就很容易获得。现在以电极雕模机为例进行研究得知：电极间电压为 5

~15伏；电流密度为110安倍/厘米²，如工具是铜或铁，被加工材料是高速钢，两极间隔为0.01~0.1毫米，加工速度为5~16厘米³/分，开孔速度为2~9厘米/分，那么加工孔直径的精度为小于±0.08毫米；加工件的圆角半径小于0.25毫米。

另一方面，电解加工也能用于磨削。图1—9是电解磨削装置简图。将金刚石磨粒固定在镀镍的旋转圆盘电极上，在圆盘电极与超硬的被磨削物之间边喷射电解液边通电，则可获得电解、磨削相辅相成的效果。这样不仅提高了加工效率和精度，减少了磨料的消耗，而且由于发热少加工面几乎不产生变质现象。但是，必须根据被加工材的特性来选定电解液。另外，电解液喷射量过多会造成大面积电解时尺寸精度的下降。电流，电压过大还会造成精加工面和工具的损伤，因此要注意调整。

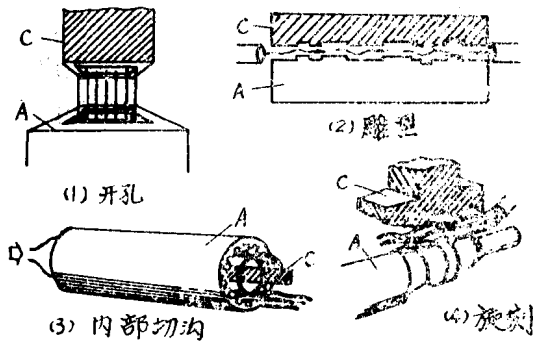


图1—8 电解加工实例

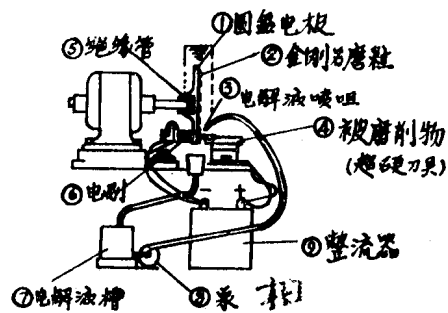


图1—9 电解磨削装置

1—4 电解沉积法

该法生产铜材时用不锈钢板做为阴极，在不锈钢板的两面都刻有螺旋形沟槽，并在其中填有非导体材料。按表1—1所列出的电解液进行电解后能获得边长12.7毫米的方坯。螺旋状的方坯，经解圈后的长度为28米，重90公斤。方坯通过流体静压力挤压，主动辊式模拉伸或用普通型材轧机冷轧，生产出线坯，最后拉伸成直径为0.16毫米的铜线。其性能可达到普通铜线标准。如果进一步拉制0.05毫米时，其断线率有所增加。此法处于试验阶段。

电解沉积制铜杆用电解液

表1—1

电解液成份	要 求
结晶硫酸铜	200克/升 (= 50克/升)
硫酸	200克/升
氯化物	30毫克/升
胶	0.25~0.75毫升
钨纤维素硫酸盐	20~100毫升
有机杂质	如污染过重，会使沉积金属变脆。

补充的速度取决于槽子的形状和电流密度，有机添加剂浓度高，使导电率稍有降低。

这个方法的优点是，可以省去再熔，铸造和加热等工序。它不仅能生产方形、矩形铜杆（或线坯），还可制造管坯，但有占地面积较大的缺点，如能提高沉积速度也可克服。

1—5 化学加工法

金属同溶液的化学反应现象也被用于金属加工。如图1—10实例所示，金属被附有腐蚀液的工具进行无变形切割的方法。就是说将氯乙稀、尼龙、不锈钢和玻璃纤维等细线附以腐蚀液，使它们与金属表面相接触，并做往复运动而进行切割的方法。随着切割的进行被加工材料向上方给进。在这种情况下应用电解腐蚀方法也很好。应该指出，采用该法时必须注意选择适应被加工材料化学性能的腐蚀液。例如：铜、铁、锡等要用 HNO_3 溶液；镍铝等采用 FeCl_3 溶液。图1—11是依靠不锈钢滚筒的旋转来供给腐蚀液的实例。被加工材料按着滚筒的形状而腐蚀成型。由于这些方法是无变形的加工，所以能较好地应用于单晶体的研究。众所周知，化学或电解加工法还可用于箔状导电材料—印刷线路配线的制作。

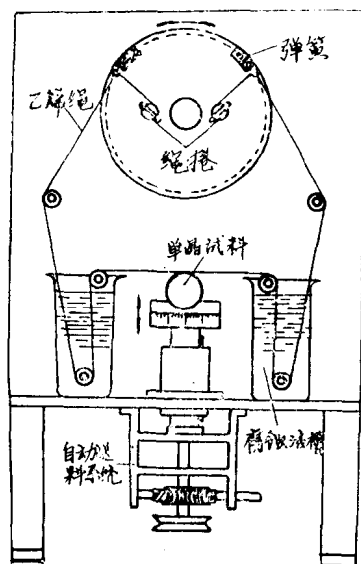


图 1—10 无变形化学切割法

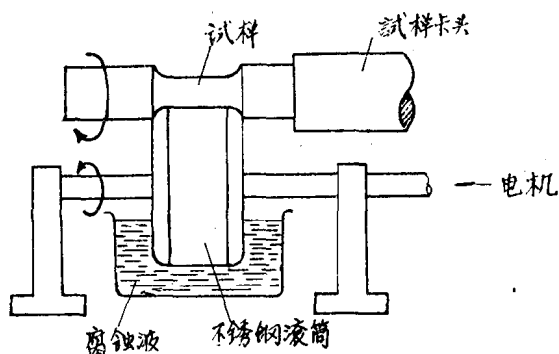


图 1—11 化学切割法

1—6 超声波加工法

超声波加工法如图1—12所示。由高频发生器激励振动子，再由连接在振动子上的触头来扩大振幅而使工具振动。对工具施加适当的静压力，同时将少量磨料微粒同水和油一道注入工具的前沿，这样被加工材料表面会依次地被磨削。如果将工具制成薄而锋利的形状则能切割材料。在工具表面刻有一定图样花纹时，则可用于雕刻。如工具表面平滑并使被加工材料在其表面平行移动，则进行研磨。振动频率为15~30千周时，触头前端的振幅在10~50微米左右。与磨料微粒一同喷出的液体除供给一定量的磨料微粒外，还兼有清除金属废屑的功能。

以相同的原理，超声波在研磨机和压力机上也得到了利用。不仅在高频范围内，而且在机械的低频范围内也进行了振动加工方法的试验。

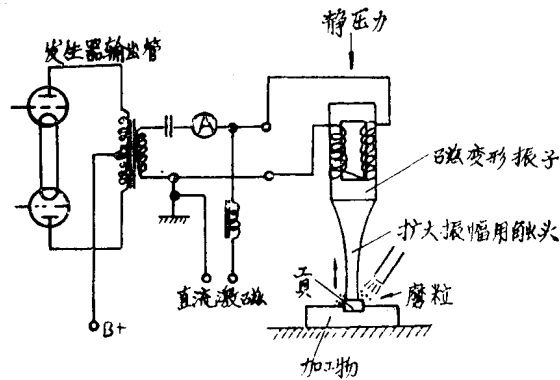


图 1—12 超声波加工法

1—7 连续加工法

一般金属材料的加工方法是首先把熔融的金属铸成锭，其次在适当的温度下加热，接着进行热变形或冷变形，同时获得具有一定尺寸和形状的成材过程。然而近年来把铸造工序和加工工序连接起来了，即所谓的连续加工法。这种方法的原理很早以前就开始研究了。由于控制技术的发展和，一部分方法已投入生产。下边介绍一些代表例。

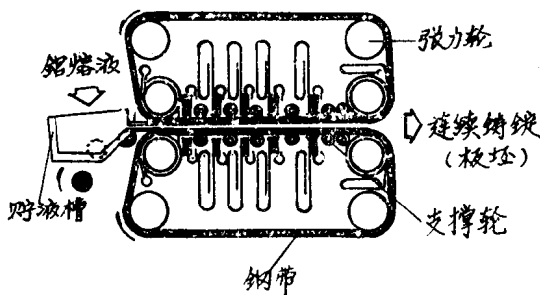


图 1—13 亥兹雷特型连续铸造机

特殊连续铸造机和压力加工机械的联合。

与轧机相连接而生产板材的连续铸造机有亥兹雷特法，亨特法，曼法等。亥兹雷特法如图 1—13 所示，双钢带式铸造机是由上下各一组的环形钢带作为铸模，其内侧用喷管水冷。

主要用于铸铝、可以连续铸造厚 10~15 毫米，宽为 200~1600 毫米断面的板坯。

为了连续铸造更薄的有为 6 毫米左右的板坯开发了亨特法。

1—8 亨特法

如图 1—14 所示，用一组内装有冷却机构的轧辊先轻轻压下，接着向上传动，这样进行连续铸造。图 1—15 所示为曼型 (Mann)，也叫 R、S、C (Rotary · Strip · Casting) 法，它是由一个内部有冷却机构的回转大轮，钢带包在辊面的一部份，两者组成一定形状的铸模。熔融金属注入之后连续凝固。该法比亨特法的铸造速度要快。这种类型的连续铸造机和轧机的联合见图 1—16。

为了提高生产率和铜材质量，现已成功地使用了铜材连铸连轧的新工艺。图 1—16

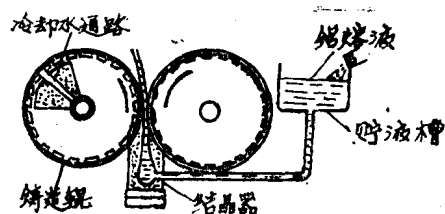


图 1—14 亨特型连续铸造机

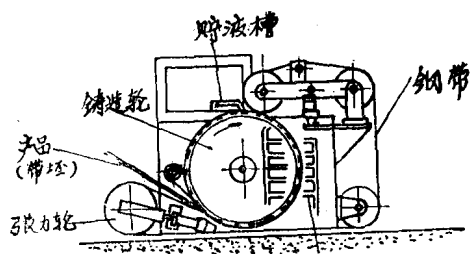


图 1—15 曼型连续铸造机 (RSC法)

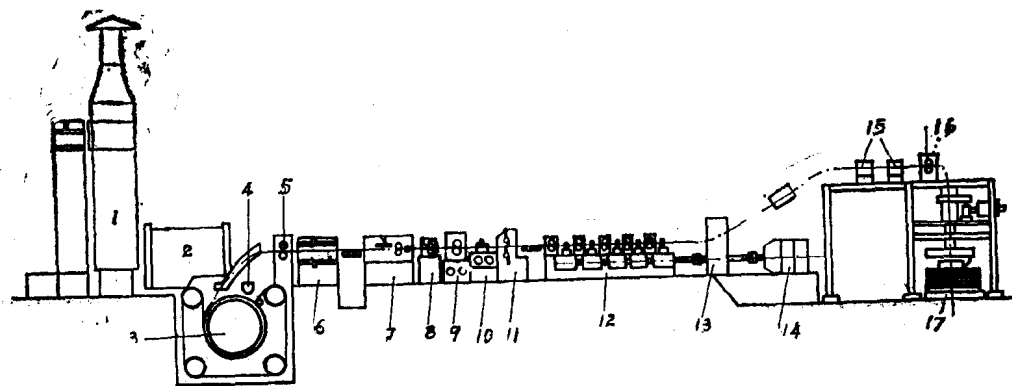


图 1—16 铜材连铸连轧生产流程示意图

为RSC法连铸连轧生产流程的示意图。竖式熔化炉1采用燃气或燃油式熔化电解铜。其优点是生产率高，节省燃料。感应式保温炉2容纳铜水，以保证连铸，调温，调质和适应铸造速度的变动。铜水通过浇包的浇咀注入直径为2.4米的五轮式铸造机的结晶器内。铸造速度为12~16米/分，铸坯离开铸模的温度约为900℃，可铸出截面积为1540~5800平方毫米梯形铸锭。当铸锭截面为4500平方毫米时，每小时可产36吨。

铸造过程中，铜水随铸造轮旋转逐渐冷却铸造成锭。通过夹送辊5送至第一剪切机6进行剪切，然后送入铸锭制备装置7下料，锭坯由轧机入口处的夹送辊8送进第一机架（一般辊径为305毫米）9和第二机架10。然后送入第二剪切机11，剪切后送入精轧机列12（辊径为200毫米的水平，立式辊交叉组成），最后轧成直径为6.5毫米的铜材。其出线速度为24米/秒，终轧制温度在600℃以上。铜材经过水平式酸洗槽15进行酸洗后，再由卷线机上的夹送辊送入卷线机17卷成线捆。一般捆重为5吨，线捆落至传送机上送至仓库。

最近，比利时和西德也建成类似的铜材连铸连轧机列。不同之处是他们采用履带式连铸机，铸出的锭坯断面为50×120毫米的矩形，轧出的线坯直径为8毫米。

用该法生产的铜锭组织比较致密，气孔少，氧化程度也很小，生产的铜线质量较高。

1—9 普罗佩尔奇连铸法

图1—17是普罗佩尔奇 (ProPerzi) 型连续铸造机。这种连铸机是由铸模的凹槽部分和用钢带围住半周长的带有沟槽的铜制铸造轮进行铸造的。由外部喷水冷却。因为铸模和

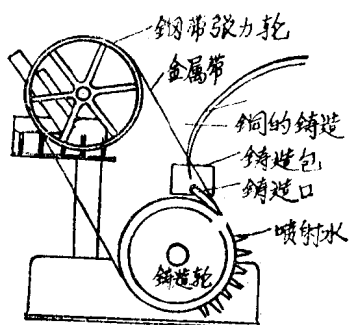


图 1—17 普罗佩尔奇型连铸机

铸坯整体动作，所以由摩擦而产生的缺陷少了。

图 1—18是同型辊轧机联合示意图，经过连续加工之线坯被卷绕起来。

与普通铜线锭轧制出来的铜线坯相比，质量较好，夹杂和氧化皮也很少，因之经简单地酸洗就可以了，车间占地面积缩小了，操作工人有可能大幅度地减少。

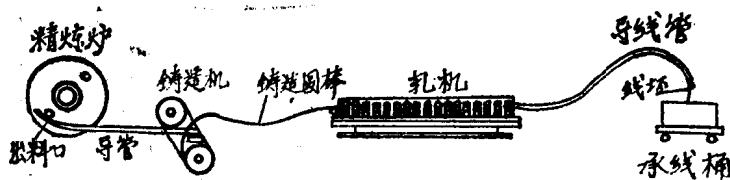


图 1—18 普罗佩尔奇连续铸造机同轧机相联合

1—10 钢锭连铸—连轧

图 1—19是钢锭的连铸—连轧的一例。从连续铸造装置（使用上下振动的铸造模）出来的钢水经二次水冷却后结成板坯，在弯曲辊和送进辊作用下直接送入连续均热炉，均热后送进行星式热轧机进行轧制。当需要锭坯时，则待其到一定长度用乙炔切断。这套连铸机可生产 $140 \times 140 \sim 250 \times 250$ 毫米或更大的铸坯。

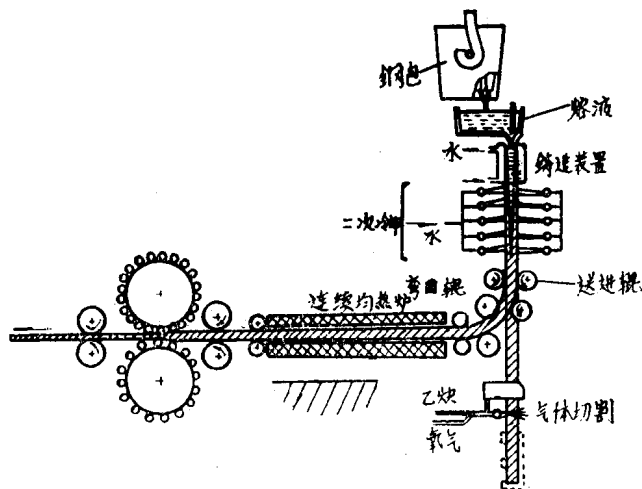


图 1—19 钢锭的连铸—连轧

连铸—连轧是轧钢生产的一个发展方向，有优点，也有其不足之处，如：铸造速度低，限制了轧机的轧制速度和产量的提高；产品规格较多时，则需要大量的结晶器；更换

产品规格时，要换连铸结晶器、二次冷却器等。不像换轧辊那样方便，费时又困难，所以它还不能完全取代初轧机。

1—11 浸涂加工法 (G、E)

该法的得名是因为它和古老的腊烛制造工艺相类似。从生产过程来看与上述连续铸造相类似，但是原理大不一样。它是把固体的铜线坯边浸入铜液中边接着向上拉，这样在线

坯表面附着一层铜而使直径增大。热量是靠固体线坯的自身来散发的，从液体金属中拉上来的粗线坯应该在适当的温度下热轧。线坯经过加工线径减小，部分细坯再次通过金属熔液，重新反复其操作过程。其原理图示于图 1—20。从理论上说，把 1 公斤的铜由室温加热到熔点所需要的热量与在熔化温度下 2 公斤铜从液体凝固成固体时所散发的热量相同，从而固体线坯通过液体金属时则在其表面可附着两倍重的铜。故此操作效率极高。

浸涂工艺过程如图 1—21 所示。首先在真空炉中熔炼，生产出无氧铜杆，如表面质量不好，可先剥掉一层皮变成直径为 9.5 毫米的线坯。把它浸入铜液中拉上来直

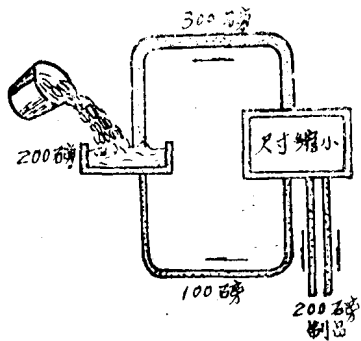


图 1—20 浸涂加工原理

径增大至 15.8 毫米，然后通过 2—4 台轧机进行热连轧，轧成直径为 12.7 毫米的铜盘条。其中 $\frac{1}{3}$ 返回留做引线坯，其余轧成直径为 3.5~14.3 毫米的铜杆。这种方法的缺点是在线坯断面发现有宏观层状组织。

该法 (G、E) 与 RSC 法相比，设备投资少，能生产无氧铜杆，但生产能力低，每小时仅生产 10 吨左右，而 RSC 法则每小时可达 20~30 吨。

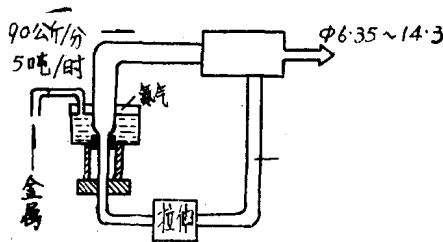


图 1—21 浸涂过程示意图

1—12 静液挤压法

过去的挤压方法是把铸锭放在挤压筒内，由挤压杆对铸锭加压，使铸锭通过模孔而挤压成材。与此相反，静液挤压是把铸锭放入充满油的挤压筒中，对油加压的一种挤压方式。由静液挤压法示意图 1—22 看出，从四面八方对铸锭施加以静水压，由于应力状态的改变，则相应的材料的变形能也变化。铸锭和工具的摩擦力显著地减少，变形也比较均匀。因而能在室温下挤压变形困难的材料，如挤压铌，钛和超导材料等。还可连续静液挤压法见 (图 1—23)，挤压直径小于 0.3 毫米的线材，它可把直径 9 毫米的铜盘条一次挤成 0.03 毫米的

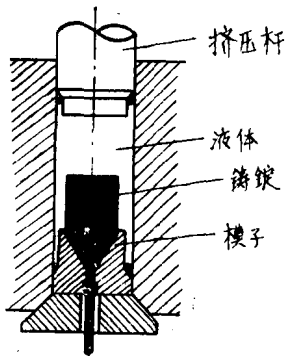


图 1—22 液液挤压法

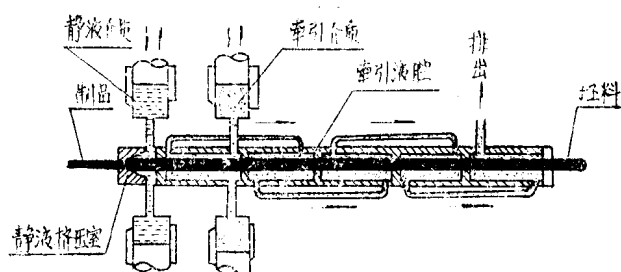


图 1—23 连续静液挤压法

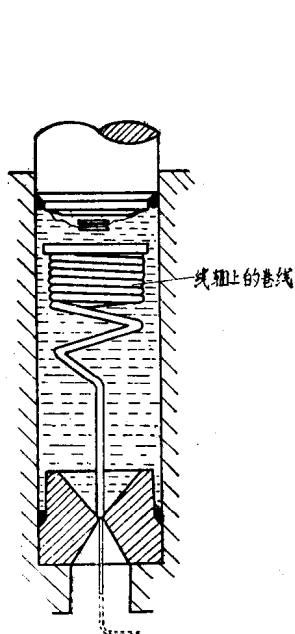


图 1—24 静液法挤压细线

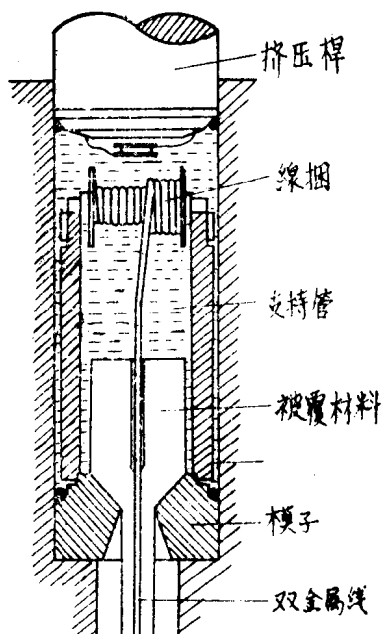


图 1—25 静液法挤压双金属线

细线。图 1—24 为静液挤压细线法示意图。静液挤压还适用于挤制低塑性双金属线，如图 1—25 所示。通过一次挤压生产出双金属线，这是普通挤压法不能做到的。

静液挤压法还可挤制各种复杂形状的部件，其挤压过程如图 1—26 所示。它是在很高的液体压力下使金属材料发生塑性变形，因此对低塑性高强合金的部件生产更具有现实意义。用此法生产的部件，其组织性能远比机械加工的制品优越，而且生产效率也高，是无屑加工中的一种很有发展前途的方法。