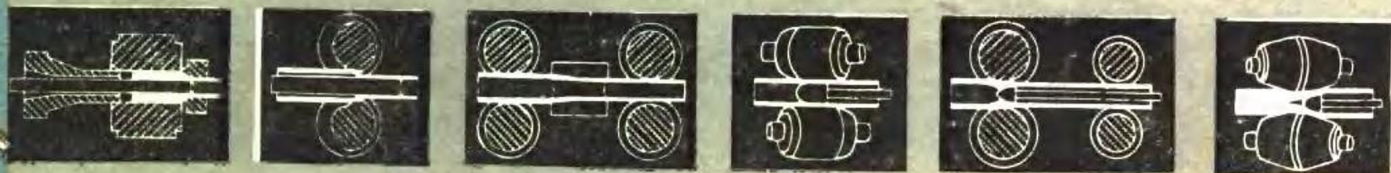


钢管塑性变形原理

上册



冶金工业出版社

内 容 提 要

《钢管塑性变形原理》是在总结国内外有关技术资料的基础上编成的。书中较系统地介绍无缝钢管的塑性变形原理,并结合我国生产实际重点阐明生产发展和技术改造所应遵循的科学规律,力求理论为生产实践服务。

本书分上下两册出版。上册内容为无缝钢管生产的一般工艺部分和热轧钢管的塑性变形理论。下册内容为钢管挤压、冷拔、冷轧以及旋压的塑性变形理论。

本书供从事无缝钢管生产的工程技术人员学习和参考之用,也可做为大学金属压力加工专业研究生和高年级大学生的参考书。

钢 管 塑 性 变 形 原 理

上 册

李连诗 编著

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 24 1/2 字数586千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数00,001~3,200册

统一书号: 15062·4209 定价6.50元

前 言

近年来世界各国无缝钢管的生产发展很快。为了不断地满足国民经济各部门的需要,我国无缝钢管生产也有了迅速的发展。除了生产量不断增长外,发展的主要标志在于新工艺、新设备和新技术的采用,新产品的开发,产品质量的不断提高以及各种消耗的降低,以求得最大的经济效益。

随着钢管生产的发展,国内外对钢管塑性变形理论也进行了广泛的研究和实验。但到目前为止,钢管塑性变形理论还未形成一个较系统的独立体系,理论的发展落后于生产实践。同时,也缺乏全面介绍钢管塑性变形理论的著作。在教学用书中虽有关于轧制理论的书籍出版,但内容涉及的大都是轧板理论,很少或者根本未涉及钢管塑性变形理论。

钢管的生产技术越发展则对有关钢管生产理论的需求也越迫切,因此我们认为编写钢管生产工艺理论的著作很有必要。为此,我们在收集国内外资料的基础上经过几年的准备编写了《钢管塑性变形原理》一书,力求为我国无缝钢管生产发展竭尽绵薄之力,也为从事钢管生产的工程技术人员在研究变形理论和分析一些生产技术问题提供参阅资料。

无缝钢管生产技术中所涉及的理论是多方面的,而本书内容仅限于金属压力加工范畴,而且着重于成型理论。

书中介绍的内容除了包括钢管的基本变形理论外,还介绍了同钢管生产新工艺、新技术有关的理论;后一部分内容由于受到资料来源的限制很难系统全面。

在编写本书的过程中我们注意到理论和实践的统一。为了便于实际工程应用,书中除理论分析外还叙述了大量实验规律和数据。对于一些同纯数学力学推导有关的理论或者简化或者省略了。

本书内容共十章,分上、下两册出版,上册包括前六章,下册包括后四章。第一章为现代钢管车间介绍以及辅助工序所涉及的理论和实验分析。第二至第六章为热轧钢管变形理论。第七章为挤压钢管变形理论。第八章为冷拔钢管变形理论。第九章为冷轧钢管变形理论。第十章为旋压钢管变形理论。

应当指出,虽然钢管塑性变形方面已积有相当数量的实验资料,但由于无缝钢管生产工艺繁多、加工方式多样、变形过程复杂以及随机因素多等原因,编写一本能用于指导生产实践的理论著作是相当困难的。加上我们业务水平的限制,本书仅是初步尝试,望读者给予批评指正。

在编写本书过程中,上册原稿的整理工作得到了北京重型机器厂张力行同志的帮助,在此表示深切的谢意。

1983年12月

目 录

第一章 现代轧管车间	1
第一节 热轧钢管的生产方法	1
第二节 热轧钢管的生产工艺及主要设备性能	9
一、坯料的准备	9
二、金属加热及加热炉	18
三、管坯穿孔（冲孔）	29
四、毛管轧制	35
五、荒管精轧	46
第三节 挤压钢管生产	51
第四节 钢管冷加工生产	55
一、冷轧（温轧）	57
二、冷拔	62
第五节 钢管的热处理及精整	66
一、钢管的热处理	66
二、钢管的精整及检查	71
第二章 毛管的斜轧穿孔理论	77
第一节 斜轧穿孔的变形过程	77
第二节 斜轧穿孔过程的运动学	80
一、一般两辊穿孔机的运动学	80
二、加后推力对穿孔过程的改善	89
三、带导盘穿孔机的运动学	91
四、三辊穿孔机的运动学参数	102
五、其他改善斜轧穿孔速度效率的措施	102
六、毛管和顶头的运动学关系	103
七、斜轧穿孔的螺距值计算	105
第三节 斜轧穿孔时的咬入条件	106
一、一次咬入条件	106
二、二次咬入条件	109
三、其他形式穿孔机的二次咬入条件	111
第四节 斜轧穿孔时的金属变形和流动	111
一、基本变形	112
二、附加变形	113
三、穿孔机的变形参数、尺寸控制和产品精度	119
第五节 斜轧实心圆坯的应力及变形状态——孔腔形成机理	132

一、斜轧实心圆坯时的变形状态	134
二、斜轧实心圆坯时的应力状态	135
三、斜轧实心圆坯时中心破裂的机理	137
四、顶头对孔腔形成的作用	137
五、三辊穿孔机上斜轧实心管坯的变形和应力状态分析	138
六、带导盘穿孔机上斜轧实心管坯的变形和应力状态分析	139
七、影响孔腔形成的因素	142
八、二辊穿孔机新工艺对产生内折缺陷的影响	147
第六节 斜轧穿孔作用力及力矩计算	147
一、轧制压力	148
二、金属同轧辊接触面上单位压力的分布	155
三、轴向力	157
四、导板上的作用力	160
五、轧制力矩	160
六、功率计算	162
七、三辊穿孔时的轧制压力、轴向力、扭矩和功率	163
八、斜轧穿孔新技术的应用对力能参数的影响	166
第七节 推轧穿孔原理	172
一、推轧穿孔时的变形过程	172
二、推轧穿孔运动学	173
三、推轧穿孔时的力参数确定	173
四、推轧穿孔时的金属流动	174
五、顶头上的压力和顶头的耐磨性	174
六、推轧穿孔时的毛管壁厚精度	175
第三章 钢管斜轧延伸、定减径和均整理论	177
第一节 二辊斜轧延伸机的变形理论	177
一、二辊斜轧延伸机的变形区和变形过程	178
二、二辊斜轧延伸机的金属变形和流动	179
三、钢管的几何尺寸精度及表面质量	187
四、二辊斜轧延伸机的运动学	191
五、二辊斜轧延伸机的咬入条件	203
六、二辊斜轧延伸机的力能参数计算	205
第二节 三辊斜轧延伸机的变形理论	211
一、三辊斜轧延伸机的轧制过程	211
二、三辊斜轧延伸机的变形过程及变形参数	212
三、三辊斜轧延伸机的运动学特点	213
四、三辊斜轧延伸机的力能参数	215
五、钢管尺寸精度和影响因素	216
第三节 二辊均整机的变形理论	217
一、均整机的变形过程	217
二、均整机的变形参数	218
三、均整的钢管质量	219
四、均整机的运动学参数	220

五、均整机的力能参数	220
第四节 斜轧定减径的变形理论	220
一、无张力定减径变形	221
二、微张力减径变形	227
三、斜轧减径钢管的尺寸精度	229
第四章 钢管在圆孔型中的纵轧理论	231
第一节 圆孔型中轧管的分类和变形过程	231
第二节 圆孔型轧管的变形区和孔型的几何参数	234
一、变形区的几何参数	234
二、孔型的几何参数	236
第三节 变形区的后边界方程式	239
第四节 管子的最小压扁条件	242
第五节 在圆孔型中轧管时的咬入条件	246
第六节 圆孔型中轧管的运动学	250
一、速度分析	250
二、前滑	253
三、连轧机的运动学特征	257
四、无心棒连轧机的速度确定	258
五、带心棒连轧机的速度确定	267
第七节 在圆孔型中轧管时金属的变形和流动	276
一、圆孔型中轧管时外作用力的分析	276
二、在外力作用下圆孔型中金属的变形和流动（无心棒）	278
三、在短顶头上轧管时的变形分析	295
四、在长心棒连轧机上轧管时的变形分析	299
五、连轧管机的孔型设计	303
六、M.P.M连轧管机的变形特点	317
七、六角孔型的变形特点	317
第八节 圆孔型轧管时作用力和力矩的计算	322
一、连轧管时轧制压力的理论解	322
二、圆孔型轧管时作用力和力矩的工程计算	327
附：本章一些公式的推导	342
第五章 钢管的周期轧制理论	348
第一节 周期轧管的变形过程和变形参数	349
第二节 周期轧管时的咬入条件	353
第三节 周期轧管时的前滑	355
第四节 周期轧管的轧制压力和力矩	358
第六章 顶管原理	365
第一节 顶管的变形过程	365
第二节 顶管机的力能参数的确定	367
一、辊子作用力的分析	367
二、实测的力参数	369
三、顶推力的计算	370

第三节 顶管时金属流动的几个问题	375
一、管壁的成型	375
二、管壁包心棒所产生的摩擦力	377
三、管子同时通过几个机架对变形的影响	377
四、杯底部分的金属变形	378
五、钢管的尺寸精度	379
参考文献	379

第一章 现代轧管车间

现代轧管车间是一个复杂的工业综合体，建设一个现代化的轧管车间会涉及到许多工业部门。

现代轧管车间应体现完善的工艺和技术，它应具有高的机组生产效率，能满足不断提高的质量要求，建立新的工艺和设备以及具有先进的技术经济指标。而决定的因素是选择合理的制管工艺。

钢管的形状、尺寸和材料的不同以及对它们的要求不同，则生产工艺和设备也不尽相同，这主要决定于如何从原料变成毛管-荒管，毛管-荒管如何变成成品管以及成品管的精整和检查方法。

目前在大生产中所应用的无缝钢管生产方法有热轧、冷轧和冷拔（包括温加工）以及挤压等。

第一节 热轧钢管的生产方法

用热轧方法可以生产直径16~1600毫米的碳钢、合金钢、高合金钢以及多层金属管。

热轧钢管的生产方法根据制管金属的工艺性能以及对热轧钢管的尺寸和质量要求来选择。各种生产方法都有其特点及优缺点，但不管哪种生产方法都包括有如下的基本工序：坯料准备，坯料加热，获得空心毛管，毛管加热（有的没有），获得中间尺寸钢管（毛管展轧成荒管），荒管加热（有的没有），获得最终尺寸和性能符合要求的成品钢管。

热轧钢管的生产方式可按下列三点区别来分类：

1）按获得毛管的方法分：在斜轧穿孔机上（二辊斜轧和三辊斜轧穿孔机）穿孔，在压力机上冲孔以及在推轧穿孔机（P.P.M轧机）上穿孔；

2）按获得荒管的方法（毛管展轧成荒管）分：在短顶头上纵轧（自动轧管机）、在锥形长心棒上周期轧制（皮尔格轧管机），在全浮动或半浮动圆柱形心棒上多机架纵轧（连续轧管机），在浮动长心棒上和固定短心棒（顶头）上斜轧（包括两辊斜轧和三辊斜轧延伸机）以及顶管和挤压等；

3）按最终获得成品管的方法分：在定径机上轧制（包括冷热定径、纵轧式和斜轧式），在斜轧均整机上展轧和定减径机上轧制，在均整机上和张力减径机上轧制以及在扩径机上轧制。

各热轧钢管机组主要根据第二点区别来命名。如有自动轧管机的，称自动轧管机组；有多机架连续轧管机的，称连续轧管机组等。

各热轧无缝钢管机组的特征、品种范围及优缺点如表1-1所示。

各典型机组的工艺流程及平面布置如图1-1~14所示^[1,2]。

表 1-1 热轧钢管机组的比较

机组名称	特 征	产品尺寸, 毫米		适 合 钢 种				备 注
		外 径	壁 厚	碳钢	低合金钢	Cr9% 钢	不锈钢	
自动轧管机组	1. 产品范围广; 2. 生产效率中等; 3. 可制造低合金和部分 不锈钢管; 4. 使用原料为圆坯, 采 用P.P.M轧机可使用 方坯及连铸坯; 5. 为国际上大量使用的 机组	25~660 (斜轧穿孔) 165~440 (P.P.M 穿孔)	2~60 5.5~40.5	大量 生产	大量 生产	可以 生产	不易 生产	小口径管设减径机; 大口径管设二次穿孔机 及扩径机
连续轧管机组	1. 生产效率很高; 2. 管子内表面质量好; 3. 壁厚不均较小; 4. 实现自动化较容易; 5. 使用原料为圆坯, 采 用P.P.M轧机可用 方坯和连铸坯; 6. 为近年来大量发展的 机组	34~168 (斜轧穿孔) 48~339.7 (P.P.M 穿孔)	2~25 3~25	大量 生产	大量 生产	可以 生产	很少 生产	配备斜轧穿孔机的连续 轧管机组得到了大量 发展
三辊斜轧机组	1. 适合制造高精度钢 管; 生产效率较低; 2. 内外表面质量好; 3. 壁厚不均小, 可达5~ 7%; 4. 采用特朗斯瓦尔轧机 可生产薄壁管, 但一 般生产品种范围窄 (多为厚壁管); 5. 为生产高精度管专用 机组	21~240	10(3)~50	大量 生产	大量 生产	可以 生产	很少 生产	多设置斜轧定径机, 有 的为了提高产量设置 两台轧管机
二辊斜轧机组	1. 适合生产小口径薄壁 管, 生产效率较低; 2. 内外表面质量较好; 3. 壁厚不均小; 4. 使用圆坯	34~108	2~8	大量 生产	大量 生产	可以 生产	很少 生产	目前未获得大量发展
周期式轧管机组	1. 适合制造大口径管, 生产效率较低; 2. 能生产异型管和长 管; 3. 内表面较好; 4. 对管坯要求低, 多使 用钢锭	165~457 (700)	5.6~80	大量 生产	大量 生产	可以 生产	很少 生产	近年来很少建设这种机 组

机组名称	特 征	产品尺寸, 毫米		适 合 钢 种				备 注
		外 径	壁 厚	碳钢	低合金钢	Cr9% 钢	不锈钢	
顶管机组	1.一般用于制造中小直径管, 但有的国家用于制造大直径管; 2.生产效率低; 3.使用方坯; 4.新机组使用圆坯, 斜轧穿孔	17~219 210~1070	2.5~11, 27~198	大量生产	大量生产	可以生产	很少生产	近年来有发展
挤压机组	1.适于生产高合金和低塑性管; 2.能制造异型管和型钢; 3.适合小批量生产, 机动性大	25~284	—	很少生产	很少生产	部分生产	大量生产	

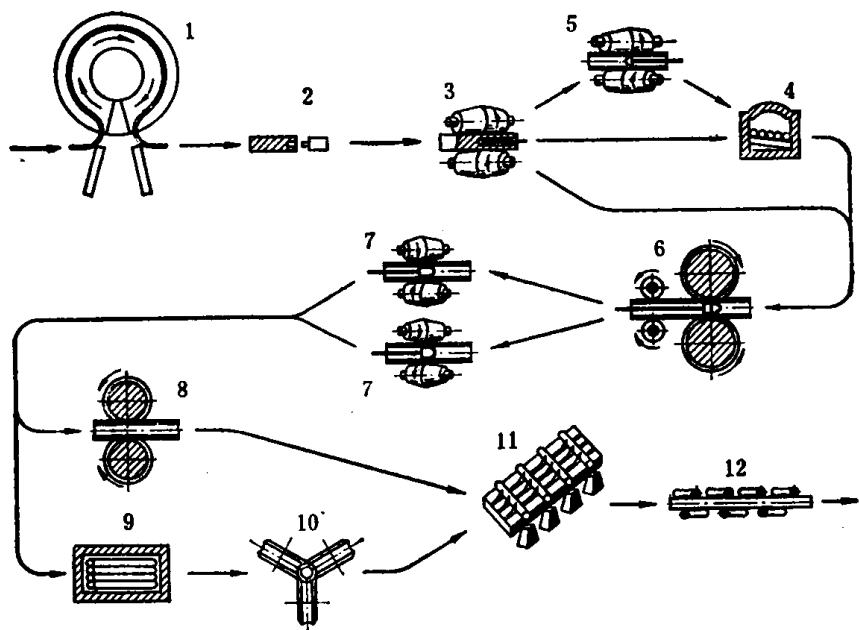


图 1-1 自动轧管机组的工艺流程

1—坯料加热; 2—定心; 3—斜轧穿孔; 4—毛管预热; 5—毛管二次穿孔; 6—毛管轧制; 7—荒管均整; 8—一定径; 9—中间荒管加热; 10—钢管减径; 11—冷却; 12—钢管矫直

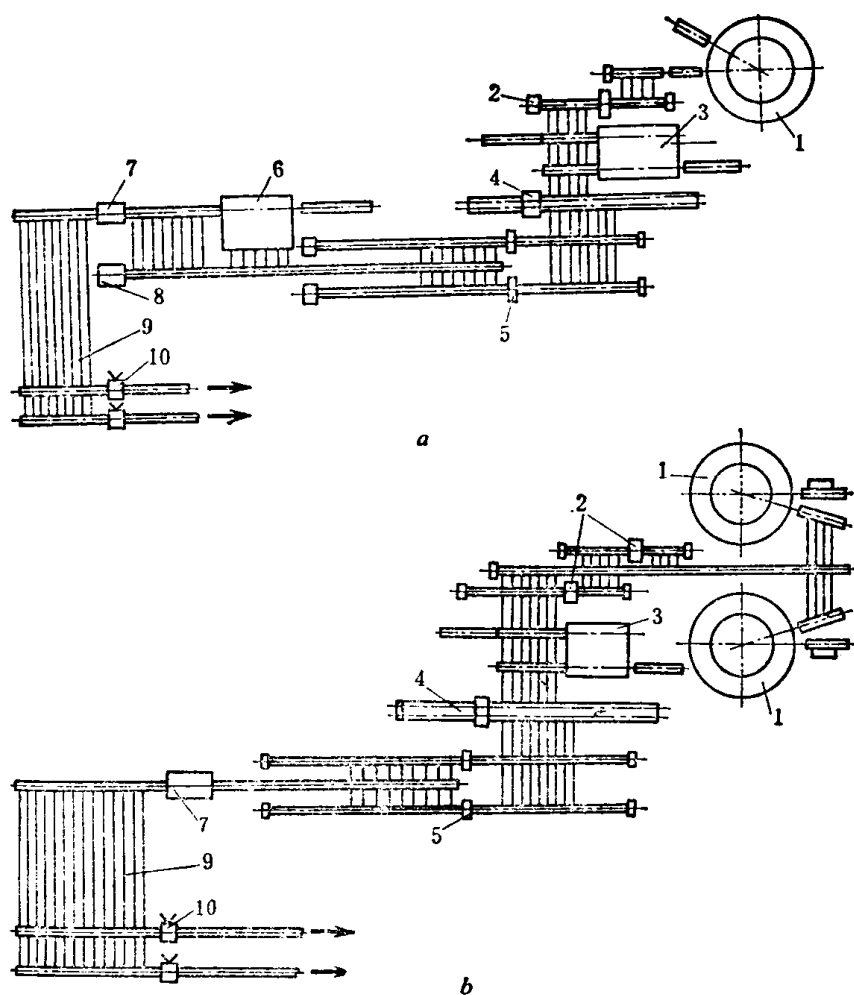


图 1-2 自动轧管机组的平面布置

a—一架穿孔机；*b*—两架穿孔机

1—环形炉；2—穿孔机；3—预热炉；4—自动轧管机；5—均整机；6—再加热炉；7—减径机；8—定径机；9—冷床；10—矫直机

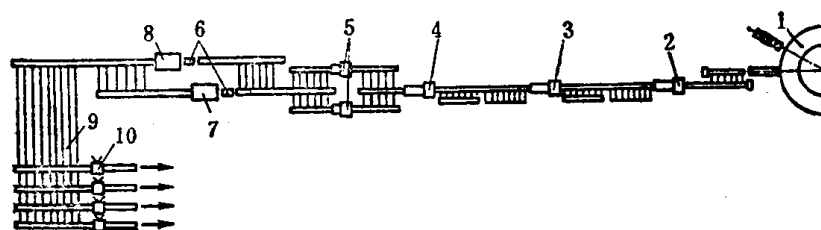


图 1-3 双机架纵列布置的自动轧管机组

1—环形加热炉；2—蘑菇式轧辊穿孔机；3—第一架自动轧管机；4—第二架自动轧管机；5—三辊式斜轧均整机；6—感应加热炉；7—定径机；8—减径机；9—冷床；10—矫直机

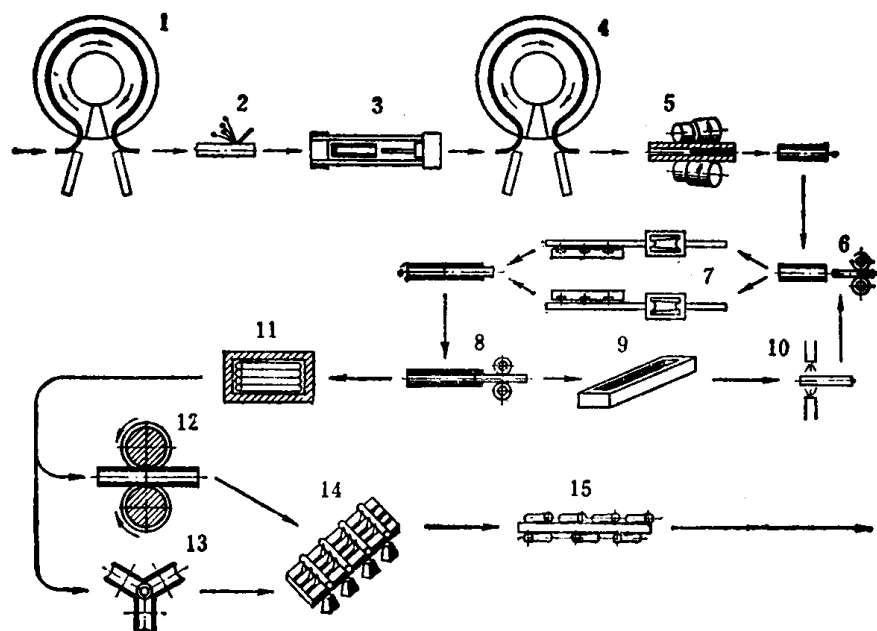


图 1-4 周期式轧管机组的工艺流程

1—钢锭加热；2—高压水冲铁皮；3—钢锭冲孔；4—杯形坯预热；5—杯底穿孔及斜轧延伸；6—插心棒机；7—周期式轧机；8—抽心棒机；9—心棒冷却；10—心棒涂润滑剂；11—一定减径机前荒管预热；12—钢管定径；13—钢管减径；14—钢管冷却；15—钢管矫直

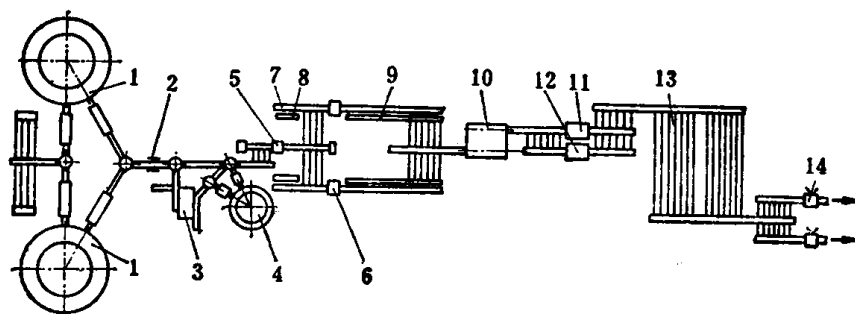


图 1-5 周期式轧管机组的平面布置

1—环形炉；2—高压水冲铁皮；3—水压冲孔机；4—杯形坯预热炉；5—延伸机；6—周期式轧管机；7—喂入机；8—插心棒机；9—切管机；10—再加热炉；11—多架定径机；12—减径机；13—冷床；14—矫直机

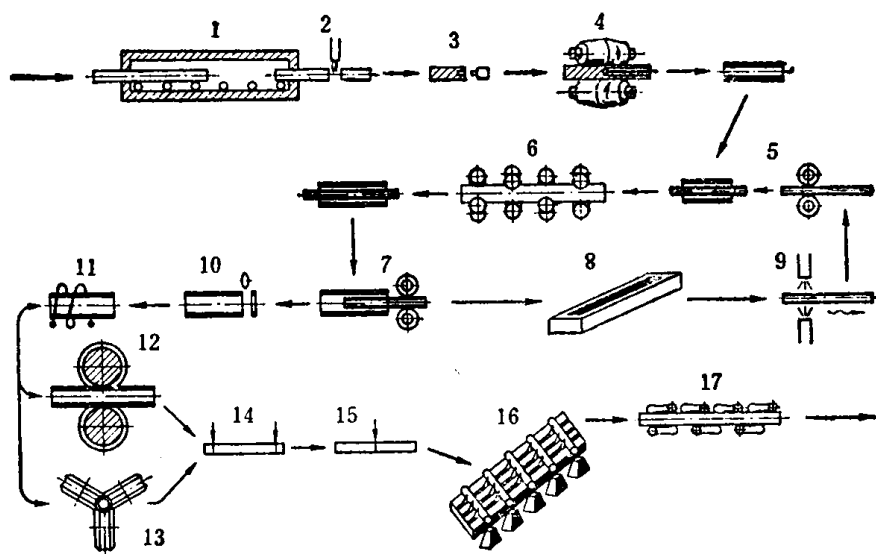


图 1-6 连续轧管机组的工艺流程

1—管坯加热；2—管坯热截断；3—管坯定心；4—斜轧穿孔；5—插心棒；6—连续轧管机；7—由管中抽出心棒；8—心棒冷却；9—心棒润滑；10—切掉管子后端；11—荒管感应加热；12—钢管定径；13—钢管减径；14—切管端；15—将管子切成定尺；16—钢管冷却；17—钢管矫直

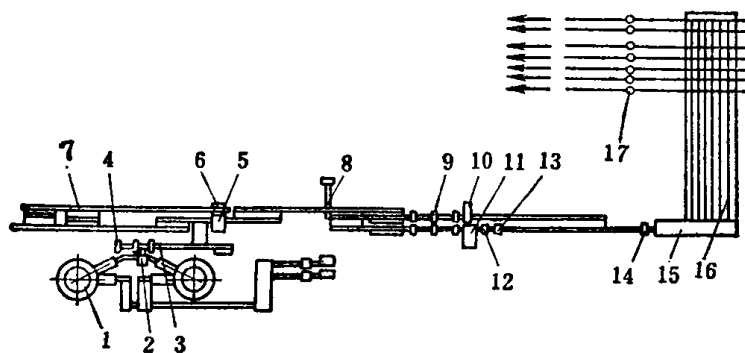


图 1-7 30~102连续轧管机组的平面布置

1—加热炉；2—热剪；3—穿孔机；4—毛管和心棒推料机；5—连续轧管机；6—抽心棒机；7—心棒冷却槽；8—切管锯；9—感应再加热炉；10—定径机；11—减径机；12—飞剪；13—飞锯；14—热锯；15—转鼓式抛出机；16—冷床；17—矫直机

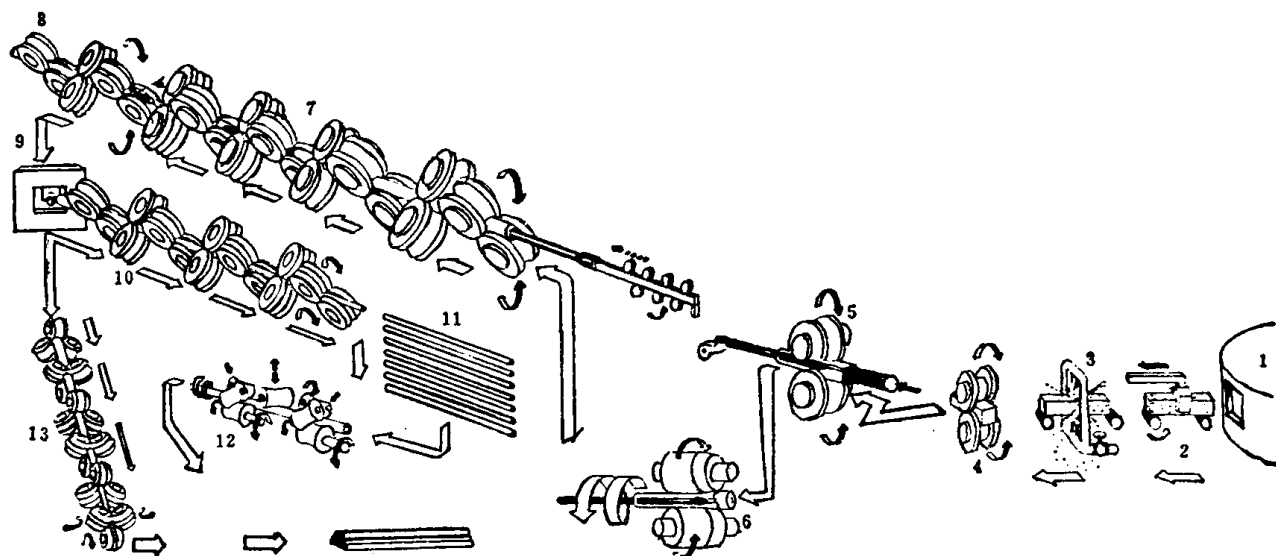


图 1-8 P.P.M穿孔机、M.P.M连续轧管机组的工艺流程

1—环形炉；2—出料机；3—水冲铁皮；4—定型机；5—推轧穿孔机；6—延伸机；7—限动心棒连续轧管机；8—脱管机；9—步进加热炉；10—定径机；11—冷床；12—矫直机；13—张力减径机

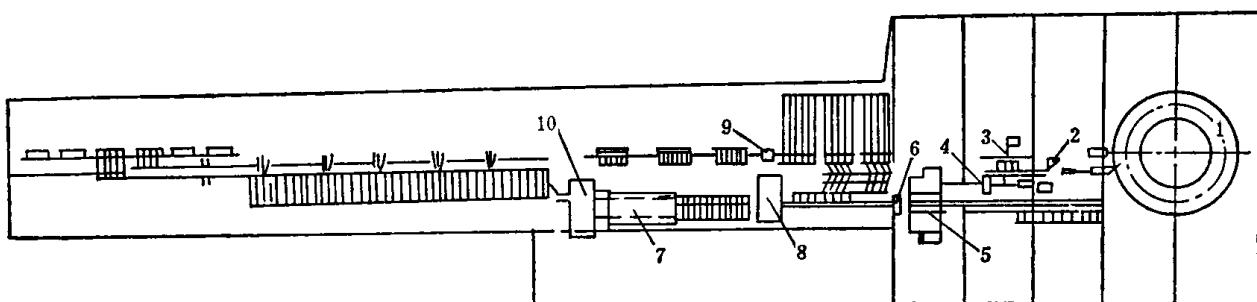


图 1-9 P.P.M穿孔机、M.P.M连续轧管机组的平面布置
1—环形炉；2—定型机；3—推轧穿孔机 (P.P.M)；4—延伸机；5—限动心棒连续轧管机；6—脱管机；7—步进炉；8—定径机；9—辊式矫直机；10—张力减径机

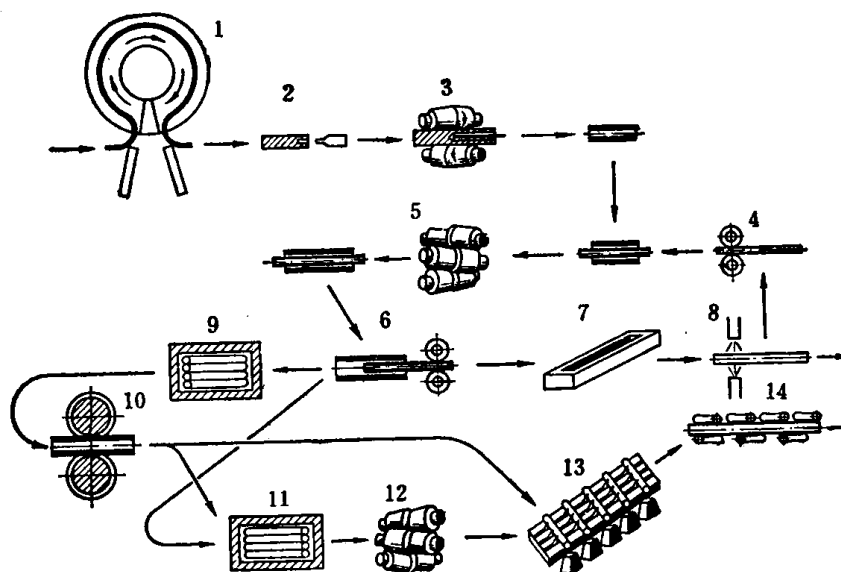


图 1-10 三辊斜轧钢管机组的工艺流程
1—管坯加热；2—管坯定心；3—斜轧穿孔；4—插心棒；5—毛管展轧；6—由管中抽出心棒；7—心棒冷却；8—心棒涂润滑剂；9—荒管再加热；10—二辊式定径机；11—荒管再加热；12—斜轧定径机；13—钢管冷却；14—钢管矫直

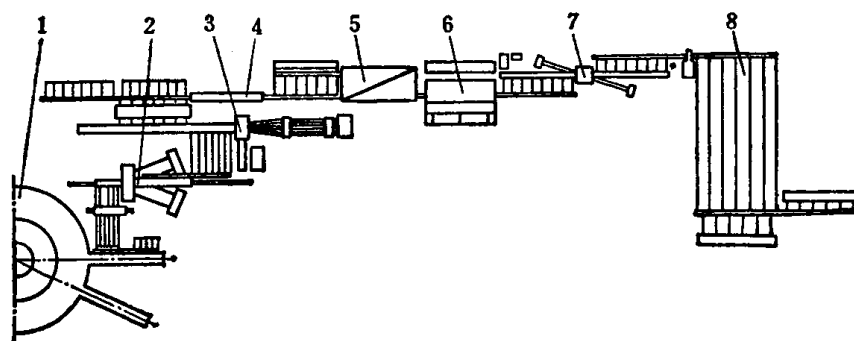


图 1-11 三辊斜轧钢管机组的平面布置
1—环形加热炉；2—穿孔机；3—三辊斜轧轧管机；4—抽心棒机；5—再加热炉；6—定径机；7—斜轧定径机；8—冷床

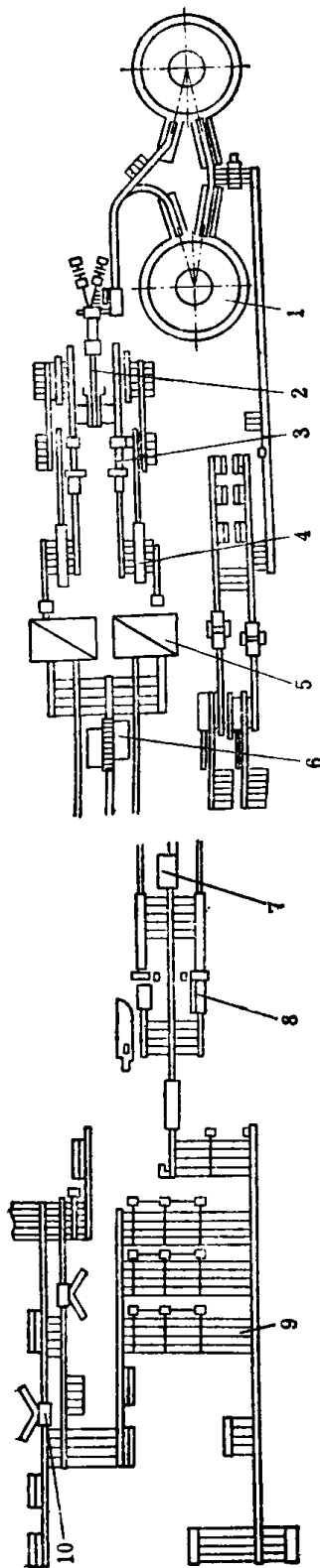


图 1-12 新三辊斜轧钢管机组的平面布置

1—环形加热炉, 2—穿孔机, 3—平行布置的两架三辊斜轧钢管机, 4—两架抽心棒机, 5—两个再加热炉, 6—定减径机, 7—感应加热炉, 8—两架斜轧定径机, 9—冷床, 10—矫直机

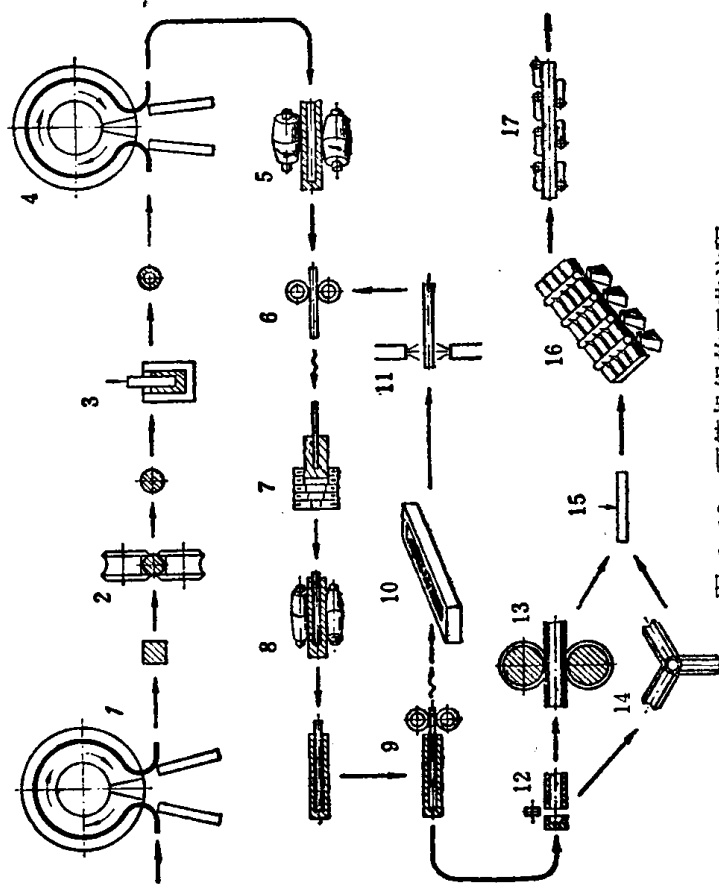


图 1-13 顶管机组的工艺流程

1—坯料加热, 2—方坯四角定型, 3—方坯冲孔, 4—冲孔杯预热, 5—斜轧延伸, 6—插入心棒, 7—顶管, 8—松棒, 9—由管中抽出心棒, 10—心棒冷却, 11—心棒涂润滑油, 12—切掉杯底, 13—钢管定径, 14—钢管减径, 15—将钢管切成定尺, 16—钢管冷却, 17—钢管矫直

二辊斜轧钢管机组的工艺流程及平面布置和三辊斜轧钢管机组的基本相同。

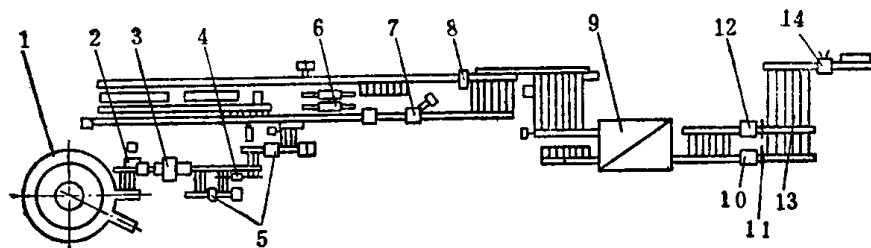


图 1-14 顶管机组的平面布置

1—环形炉；2—辊式定径机；3—冲孔机；4—预热炉；5—延伸机；6—顶管机；
7—松棒机；8—抽心棒机；9—再加热炉；10—减径机；11—切管锯；12—定径机；
13—冷床；14—矫直机

最近西德德马克公司提出用斜轧穿孔加毛管收口代替冲孔和延伸，使管坯单重大大增加，产量显著提高。与此同时，由于减少了杯底金属损失和增加了钢管长度，成材率有显著提高，钢管壁厚不均也有所降低。

第二节 热轧钢管的生产工艺及设备性能

一、坯料的准备

1. 坯料的选择

原料的选择及轧前准备对于提高产品质量、改善技术经济指标、降低成本以及最大限度地发挥机组生产能力都有十分重要的意义。这是因为坯料质量不好，很难于生产出高质量的钢管；原料尺寸选择不当，往往会限制机组生产能力的发挥。

根据制管的生产方法、金属的工艺性能和物理机械性能以及对成品管要求技术的不同，热轧钢管生产使用的原料可以有钢锭、连铸坯、轧坯、锻坯以及空心铸坯等。

用钢锭和连铸坯的成本比较低。锻坯常是一些特殊合金钢坯以及用轧制方法难于得到的或者经济上不合算的，如尺寸过大不能在轧钢机上轧制的钢坯。一般大于 $\phi 300$ 毫米的圆管坯多为锻坯。采用方坯的优点是比圆坯便宜。近年来离心浇注的空心坯的使用有了发展。这种方法主要用于高合金钢和难穿孔的金属。离心浇注空心坯的优点是：

- 1) 可以用难变形的金属（不锈钢、耐热钢等）来生产无缝管；
- 2) 这种方法能获得高光洁度的毛管，并有良好的机械性能和金属组织，因为在离心浇铸时在离心力作用下非金属夹杂物被挤在内表面上，同时可获得晶粒细小的组织；
- 3) 减少了金属消耗并简化了工艺。省去了一系列轧制工艺（钢锭加热和轧制，管坯轧制及相应的加热，穿孔前加热和穿孔）；同时显著降低了切头、加热氧化等金属消耗。

此外，近年来转炉钢和连铸管坯也得到了广泛的发展。

工厂生产实践证明，顶吹（或底吹）氧气转炉钢在工艺性能和机械性能方面同平炉钢没有区别，在很多情况下有时甚至超过了平炉钢，然而氧气转炉钢却要比平炉钢便宜得多。

实际生产中发现用转炉钢生产的管坯主要是外表面质量存在问题。

资料[4]对顶吹氧转炉钢管坯进行了研究，同样证明主要是外表面质量存在问题。表1-2为实际的生产统计资料。

表 1-2 转炉钢管坯的质量

钢 种	管坯直径 毫米	管坯数量 吨	一级品率 吨/%	二级品率 吨/%	废品形式, 吨/%		
					裂 纹	龟裂(裂缝)	夹 砂
10	90	106.5	100.7/94.25	—	2.75/2.54	1.65/1.55	1.25/1.52
20	90	147.75	138.6/95.07	3.5/2.4	1.2/0.84	1.1/0.76	0.25/0.17
10	100	32.86	31.4/95.56	0.9/2.73	0.35/1.1	—	—

对于10、20号钢在不酸洗情况下表面质量合格率为93.2%，缺陷埋藏深度一般不深，个别达5毫米。

一般认为外表面缺陷是非金属夹杂物聚集，主要是由于冶炼因素造成的。

在内部组织方面中心疏松一般不超过1.5级， Π 号钢不超过2级，偏析带不超过1级，这样转炉钢的低倍组织完全合格。通过两辊穿孔机穿孔没有发现任何内表面缺陷。

转炉钢的穿孔性能（由热扭转试验得出）是良好的，如图1-15所示。

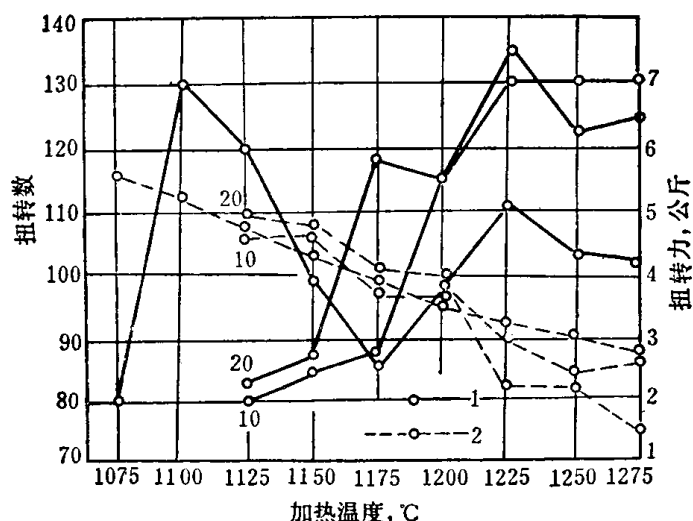


图 1-15 转炉钢管坯穿孔性能
1—扭转数；2—扭转力

穿孔温度一般在1175~1275℃范围内，为了避免形成孔隙，相对压缩量不超过10~11%。

通过轧管（ $\phi 89 \times 4$ 和 $\phi 102 \times 4$ 毫米）发现有较多的外折，缺陷形式按螺旋线分布，说明主要是管坯表面上存在着裂纹、发裂和折叠造成的。外折叠缺陷深度一般不超过0.7毫米。通过冷拔，管子质量也是良好的。

用连铸坯生产无缝钢管，近年来发展很快^[5~1]，采用连铸坯不但比轧坯成本低，而且质量好。有的资料^[5]指出，采用轧坯时铸造组织的缺陷常常保持在管坯中，而轧成钢管时常易暴露在钢管表面上，根据统计钢管上出现的内外折缺陷，70~80%是这种原因造成的。

管子内外表面折叠缺陷的生成和锭型及浇注也有着密切的联系。采用连铸坯可以改善成品钢管的质量，是因为连铸坯有单一的（沿坯料长度和断面）致密的低倍组织，没有明显的缩孔痕迹。另外有的资料指出，采取连注法可以减少有害的氧化物非金属夹杂物并减少化学成分的偏析。