

线 材 生 产

XI
AN
CAI
S
HEN
G
CH
AN

内 容 提 要

本书基本总结了建国三十年来我国线材生产的经验和反映线材轧机挖潜、革新、改造方面的技术成果，同时也适当介绍了国外线材生产现状及发展趋势和国内线材生产的展望。

本书共分十二章：概论，原料，钢坯加热，线材轧制原理，线材孔型设计，导卫装置及围盘，线材轧机的调整，线材的冷却与精整，线材的质量检验，线材车间的机械设备，线材车间的电气设备及工艺过程自动化，线材车间设计。

本书可供从事线材生产、设计、科研的工程技术人员参考，也可供高等及中等专业学校师生参考。

线 材 生 产

《线材生产》编写组 编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口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 32 字数 765 千字

1983年1月第一版 1983年1月第一次印刷

印数00,001~2,800册

统一书号：15062·3892 定价3.25元

前 言

为了适应我国线材生产发展的需要和满足从事线材生产设计、科研和教学人员学习技术的迫切要求，我们编写了《线材生产》一书。本书基本总结了建国三十年来我国线材生产的经验和反映线材轧机挖潜、革新、改造方面的技术成果，同时也适当介绍了国外线材生产现状及发展趋势和国内线材生产的展望。

本书内容包括线材轧制理论、工艺、设备、线材轧机的发展、线材车间设计和生产组织等各个方面。

本书共分十二章。第一章由北京钢铁学院钟廷珍编写；第二章由西安钢铁厂李冬暖和包头钢铁设计研究院强十涌编写；第三章由强十涌编写；第四、五、六、七章由沈阳线材厂武迪生、湘潭钢铁厂聂庆信、天津轧钢三厂王兆泉、吴自昌、遵义金属制品厂朱胜泉等编写；第八章由北京第一轧钢厂乔德庸编写；第九章由朱胜泉编写；第十章由乔德庸、钟廷珍编写；第十一章由湘潭钢铁厂罗帆顺编写；第十二章由强十涌编写。

全书由钟廷珍、乔德庸、强十涌、武迪生审阅，钟廷珍整理定稿。

由于编者水平和时间所限，书中不足和错误之处请广大读者批评指正。

《线材生产》编写组

目 录

第一章 概论	1
第一节 线材生产的基本知识.....	1
一、线材的概念和用途.....	1
二、线材的质量标准和技术条件.....	3
第二节 线材轧机的轧制工艺特点.....	5
一、横列式线材轧机的轧制工艺特点.....	5
二、连续式线材轧机的轧制工艺特点.....	9
三、半连续式线材轧机的轧制工艺特点.....	10
第三节 线材轧机的发展.....	11
一、国外线材轧机的发展.....	13
二、我国线材轧机的发展.....	34
三、线材轧机的发展前景.....	45
第二章 原料	47
第一节 原料的选择.....	47
一、原料种类、断面形状、尺寸及单重的选择.....	47
二、原料材质的选择.....	48
第二节 原料缺陷及其对轧制的影响.....	48
一、外部缺陷.....	48
二、内部缺陷.....	50
第三节 原料准备.....	53
一、原料缺陷的清理.....	53
二、原料的堆放及其设备.....	54
第三章 钢坯加热	55
第一节 钢坯加热工艺.....	55
一、钢坯加热时的传热方式.....	55
二、钢坯加热时的氧化、脱碳、过热和过烧.....	57
三、钢坯的加热温度.....	59
四、钢坯的加热速度.....	60
五、钢坯的加热时间.....	60
六、钢坯的加热制度.....	61
第二节 加热炉.....	63
一、加热炉的种类.....	63
二、连续式加热炉的加热制度与供热方式.....	64
三、连续式加热炉的炉型.....	64
四、燃料.....	65

第三节 节约燃料,提高热能利用率	66
一、燃料充分燃烧.....	66
二、减少炉内水冷构件及炉体热损失.....	66
三、回收烟气带走的热量.....	69
第四节 加热炉热工检测和自动控制	70
一、炉温检测及自动调节系统.....	70
二、炉膛压力检测及自动调节.....	72
三、燃料—风量比例调节系统.....	72
四、燃油温度检测及自动调节.....	73
五、燃油压力检测及自动定值调节.....	74
六、热风温度检测及预热器自动保护.....	75
第四章 线材轧制原理	76
第一节 概述.....	76
第二节 摩擦系数.....	77
一、摩擦系数在轧制过程中的作用.....	77
二、常用的摩擦系数计算公式.....	84
第三节 宽展.....	84
一、影响轧件宽展的因素.....	85
二、宽展的计算公式.....	92
第四节 连轧与张力.....	93
一、连轧的基本概念.....	93
二、连续式线材轧机的传动方式.....	94
三、线材连轧设计观点的分析.....	95
四、连轧与连轧状态.....	96
五、张力公式在线材连轧时的应用.....	98
六、多机架连轧及其影响系数.....	101
七、连轧机的调整与控制.....	102
第五节 轧制力与轧制功.....	104
一、单位压力分布.....	104
二、平均单位压力和总压力.....	107
第六节 轧制过程中轧件温度的计算.....	121
一、轧制过程中温度变化的影响因素.....	121
二、轧制过程中温度变化的计算.....	123
第五章 线材孔型设计	133
第一节 概述.....	133
第二节 线材孔型分析.....	133
一、箱形孔型系统.....	134
二、菱一方孔型系统.....	135

三、椭圆一方孔型系统.....	137	第七章 线材轧机的调整	227
四、六角一方孔型系统.....	140	第一节 横列式轧机的调整.....	228
五、椭圆一圆孔型系统.....	142	一、轧辊的准备与加工.....	229
第三节 孔型系统的选择.....	145	二、轧辊的安装.....	229
一、粗轧机组的孔型系统.....	145	三、孔型的调整.....	230
二、中轧机组的孔型系统.....	145	四、导卫装置的调整.....	233
三、精轧机组的孔型系统.....	145	五、轧机的调整.....	239
第四节 轧制道次的确定和延伸系数		第二节 半连续和连续式轧机的调整.....	240
的分配.....	156	一、半连续式轧机的调整.....	240
一、确定轧制道次的一般方法.....	156	二、连续式轧机的调整.....	242
二、确定轧制道次的简便方法.....	157	第八章 线材的冷却与精整	248
第五节 孔型尺寸的计算方法.....	158	第一节 线材冷却的金属学原理.....	248
一、变形量关系算法.....	158	一、热轧与晶粒度.....	248
二、经验算法.....	162	二、线材冷却过程中的固态相变.....	249
第六节 孔型的配置与修正.....	179	三、线材冷却过程中氧化铁皮的生成.....	251
一、孔型的配置.....	179	第二节 线材的冷却与精整工艺.....	252
二、孔型的修正.....	179	一、线材冷却的工艺要求.....	252
第七节 连续式线材轧机的孔型设计步骤		二、普碳钢线材的冷却与精整工艺.....	252
及设计实例.....	180	三、精整工段的工艺布置.....	254
一、延伸系数的选定和分配.....	180	第三节 线材的控制冷却.....	266
二、孔型系统的选择.....	181	一、斯太尔摩控制冷却法.....	266
三、堆拉系数的选择.....	182	二、施罗曼控制冷却法.....	270
四、成品轧机连轧常数的计算.....	182	三、其他控制冷却方法.....	274
五、各方孔型和圆孔型尺寸的计算.....	182	第九章 线材的质量检验	278
六、中间扁孔型尺寸的计算.....	183	第一节 对线材的质量要求.....	278
七、某厂250毫米连续式线材轧机孔型		第二节 成品检验方法.....	279
设计实例.....	185	第三节 线材成品缺陷产生的原因与判断.....	280
第八节 复二重式线材轧机孔型设计特点		一、裂缝(裂纹).....	280
和设计步骤.....	195	二、折叠.....	281
第六章 导卫装置及围盘	198	三、结疤.....	282
第一节 概述.....	198	四、耳子.....	282
一、对导卫装置的设计要求.....	198	五、分层.....	287
二、导卫装置的组装和固定.....	198	六、凸块.....	287
第二节 入口导卫装置.....	201	七、凹坑.....	288
一、不同孔型系统的入口导板.....	203	八、麻面.....	288
二、导板的材质.....	204	九、夹杂.....	289
三、入口导板的设计.....	205	十、划痕.....	290
第三节 出口导卫装置.....	206	十一、尺寸超差.....	290
第四节 围盘.....	211	第十章 线材车间的机械设备	295
一、围盘的设计原则和工作要点.....	211	第一节 线材轧机的主机列.....	295
二、围盘设计中应注意的几个问题.....	214	一、机组的布置形式与传动特点.....	295
三、围盘的结构和制造.....	225	二、齿轮座.....	304
四、侧围盘及其他.....	226	三、减速机.....	306

四、联接轴与联轴器.....	310	二、连续式线材轧机的电气传动系统.....	423
第二节 轧钢机的工作机座.....	322	第三节 辅助设备的供电.....	430
一、普通类型的机座.....	322	一、飞剪的供电系统.....	430
二、线材轧机的刚性及其合理结构.....	325	二、卷线机的供电系统.....	432
三、轧辊调整装置.....	350	三、其他附属设备的传动.....	433
第三节 轧辊与轴承.....	359	第四节 线材生产工艺过程自动化.....	434
一、轧辊的类型及选用.....	359	一、活套的自动调节.....	434
二、轧辊的使用与维护.....	362	二、自动切头飞剪和自动事故剪.....	438
三、轧辊轴承.....	365	三、导向器的自动操作.....	439
第四节 剪切机.....	377	四、盘卷推出机的自动操作.....	439
一、线材飞剪的特点.....	377	五、线径自动测量仪.....	439
二、几种常用的线材飞剪.....	378	第五节 电子计算机在线材轧机上的应用...	442
第五节 卷线机.....	386	一、电子计算机概述.....	442
一、钟罩式卷线机.....	386	二、电子计算机在线材轧机上的应用.....	443
二、钩式卷线机.....	390	第十二章 线材车间设计	449
三、多柱地下式卷线机.....	390	第一节 概述.....	449
四、双钟式卷线机.....	394	第二节 线材车间工艺设计.....	451
五、联合式卷线机.....	396	一、拟订车间产品方案.....	451
六、成圈器.....	399	二、制订生产工艺流程.....	451
第六节 线材的输送冷却设备.....	399	三、拟订金属平衡.....	453
一、运输机.....	402	四、拟订基本工艺参数.....	453
二、挂卷机.....	407	五、轧机生产能力的计算.....	460
三、卸卷机与集卷机.....	411	六、车间设备的确定.....	465
第十一章 线材车间的电气设备及工艺过程自动化	418	七、车间平面布置.....	485
第一节 横列式和半连续式线材轧机的电气设备.....	418	八、原料、燃料、材料、动力等消耗及车间货运量.....	490
第二节 连续式线材轧机的电气设备.....	419	九、车间劳动定员及劳动生产率.....	500
一、线材连轧工艺对电气系统的要求.....	419	十、投资估算.....	500

第一章 概 论

第一节 线材生产的基本知识

一、线材的概念和用途

什么是线材？我国现行有关标准规定，直径为5~9毫米呈盘卷状态的热轧圆钢称为线材，它是热轧型钢中断面尺寸最小的一种。线材因以盘卷交货，故又称为盘条。

国外对线材的定义和国内略有不同。国外所称线材其断面形状一般呈圆形，也有其他形状；其直径随着线材用途的扩大和加工技术的发展，有的国家已扩大到5~42毫米，其中 $\phi 10$ 毫米以上的品种已与圆钢相搭接。图1-1所示为历年来线材直径的扩大趋势。

各国的线材直径范围由于需要情况和生产技术水平不同而有所不同。例如，美国的线材按有关标准规定，其直径范围为5.5~18.7毫米，每隔0.4毫米为一规格，共34种规格。直径大于18.7（有时为20）~38.9毫米的称为成卷圆钢。有些国家在特殊钢中不用成卷圆钢或成卷棒材的名称，仍称其为线材。又如，英国的线材直径范围为5.38~25毫米。

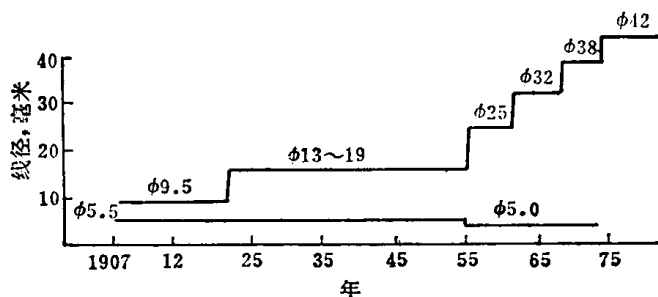


图 1-1 历年来线材直径的扩大趋势

线材产品的品种、规格、性能以及盘重等和相应的轧机设备之间有着密切的依赖关系。轧机的设备组成不同，形式不同，性能不同，其所能生产的线材产品也就不同。

一般来说，生产直径在5.5~20毫米范围内的线材所使用的线材轧机是相似的，产量也差不多。这样一套定型的线材轧机既能生产上述规格范围内的单一产品或多规格产品而又不需要任何附加投资。但当规格上限超过20毫米时，就要采用小型一线材联合轧机，在这种轧机上能够轧制直径在40毫米以上的卷材或棒材。但是，这种方式因设备利用率低，投资多，故仅在特定条件下采用。因此，通常认为，线材轧机的直径上限不宜超过20毫米。大于该规格的线材在专用的小型轧机上生产为宜。

线材的用途很广，在国民经济各个部门中线材占有重要的地位。有的线材轧制以后可直接使用，主要作钢筋混凝土的配筋和焊接结构件用；有的则作为再加工原料，经过再加工后使用。例如，经过拉拔成为各种钢丝，再经捻制成为钢丝绳，或再经编织成钢丝网；经过热锻或冷锻成铆钉；经过冷锻及滚压成螺栓，以及经过各种切削加工及热处理制成机器零件或工具；经过缠绕成型及热处理制成弹簧；等等。

表1-1所列是由线材制成的各种制品及其用途。

线材的应用范围不仅相当广泛，而且用量也很大。据有关资料统计，各国线材产量占全部热轧材总量的5.3~15.3%。例如，美国约占5%，日本约占8%，英国和苏联约占9%，

西德约占11%，法国约占14%，我国约占10%左右。

表 1-1 线材制品种类

线材种类	钢丝种类	制 品 名 称 及 用 途
普通低碳钢线材	普通低碳钢丝	钢筋水泥管、混凝土桩、水泥船、螺丝、镀锌低碳钢丝、包装低碳钢丝、金属网
	镀锌低碳钢丝	焊接金属网、刺线、钢绞线
优质碳素钢线材	高碳钢丝	硬线制螺丝、镀锌钢硬线、钢丝绳、发条、弹簧、轮胎挡圈钢丝、胶管钢丝、针布钢丝、预应力钢丝、乐器阀门弹簧、缝纫机针
	低碳钢丝	焊条、海底电缆、通讯线
合金钢线材	结构钢丝	高强度螺钉、高级铆钉、铆螺栓
	工具钢丝	丝锥以及钻孔机、钟表、照相机、通讯机零件
	轴承钢丝	滚珠、滚柱、内外圈
	弹簧钢丝	压弹簧圈、阀门弹簧、耐热弹簧
	耐热钢丝	发动机阀门等耐热零件
	不锈钢丝	高级铆钉、防腐金属网、耐热及非磁弹簧、钢索、不锈钢焊条
	快速切削钢丝	钟表、通讯机械及其他精密机械零件

美国所占的比重较小，主要原因之一是统计数不够准确。如美国线材轧机中约有三分之一是线材和棒材或带钢的联合轧机，其部分产量未算在线材产量之内。

线材虽然是热轧型钢中尺寸最小的圆钢，断面形状简单，但是，由于线材的尺寸精度和机械性能要求高，轧制速度又十分快，它的生产工艺和设备相对于普通圆钢要复杂得多。

从生产工艺方面来讲，合乎尺寸精度要求的线材，不是轻易地就能轧出来的。其原因是线材比圆钢细而长，表面积大，温降非常快，在轧制到最后几道次的时候，能保持轧件在热加工温度范围的时间很短，这就很容易造成由于温度急剧下降而超出了允许的轧制温度下限，使整根线材成为废品。此外，虽然钢还在加热时各部分温度基本是均匀一致的，但由于各部分从出炉到轧制所经历的时间不同，在轧制过程中温降大小也就不同，从而造成各部分的温度差异。据测定，在普通横列式轧机上，最后道次线材头尾温差可达 200°C 以上。线材各部分温度的差异，导致了线材各部分在轧制时的变形情况不同和冷却到常温时的收缩量不同，而形成各部分断面尺寸不同，这不但会造成线材沿长度方向上的断面尺寸的不均匀性，而且往往导致线材前半部分尺寸合乎精度要求而后半部分超出允许公差范围，或中部合乎尺寸要求而头尾超出允许的尺寸公差。所有这些都给调整和操作造成困难，并对调整和操作提出了较高的要求。这种工艺特点在其他热轧型钢生产中不这样明显。

另外，要保证线材达到所要求金相组织和性能以及沿全长组织性能均匀一致也是不容易的。线材轧制过程中各部分的温度差异，以及卷取成盘卷后冷却过程中各部分冷却速度的不同，都会使线材沿全长的金相组织和性能不均匀，这就造成了线材生产工艺的复杂性。

从设备上来讲，线材轧机是热轧型钢中轧机架数最多的机组，并且可以说线材轧机是当今结构和工艺改革最活跃的轧机之一。之所以如此，也是由线材的工艺特点所决定的。

上面提到过，温度降给调整和操作带来很大的困难。解决的办法一是使盘重减少，二是使轧制速度增大，减少活套。前者不符合用户要求，后者是解决矛盾的合理途径。但速度提高到一定程度时，传统结构的轧机就不能适应高速下轧制的工作条件，于是导致了新一代轧机的出现，并且为保证线材具有所要求的金相组织与性能，轧制后的冷却精整设备也日趋复杂。

既然线材生产有如上所述的重要意义，因此近年来得到了许多国家的重视，尤其是自1968年世界上第一套摩根45°轧机以及相应的控制冷却等设备正式投产以来，出现了线材生产的崭新局面。目前，高速无扭精轧机组的出口速度已达102米/秒，相应的自动化程度也随之更为提高，并开始采用电子计算机控制和进行生产管理。高速线材轧机是近年来钢铁工业的惊人成就之一。

二、线材的质量标准和技术条件

线材质量的优劣对使用及下一工序的生产影响甚大，但目前在国内线材的质量却又往往被忽视。我们以两盘质量不同的线材进行对比，用以说明质量的重要性。一盘是在横列式机组上生产出来的，重量为几十公斤，热轧后堆冷造成盘卷内外线材性能不均，氧化铁皮很厚，生成量高达2%，含有大量不溶于酸的 Fe_3O_4 ，酸洗时不易去除，尺寸精度低，表面带有耳子、折叠，或局部带有耳子。另一盘是在现代高速无扭机组，如45°轧机上用先进工艺生产出来的线材，盘重约2吨左右，尺寸精度高，达到 ± 0.1 毫米，表面质量好，经过控制冷却后金相组织为索氏体，而且性能均匀，氧化铁皮薄且疏松，其生成量仅为0.3%左右，多为 FeO ，易溶于酸。若把这两盘线材进行拉拔，即会产生两种不同的经济效益。大盘重的线材拔丝的生产率比小盘重的提高一倍以上。由于进行了控制冷却，不经预先处理，即可进行拉拔，单拔程减面率可达90%以上；由于表面质量好，尺寸精度高，拔丝模寿命显著提高，同时提高了拔丝效率和质量。因此，这种线材受到了用户的欢迎。

通过上面的对比，我们清楚地看到线材的质量对下一工序有着很大的影响，也看到了新式线材轧机在提高线材质量方面所起的作用，因而这种新式线材轧机具有很大的生命力，近年来得到了很快的发展。

对线材的质量要求，总括起来说有六个方面：尺寸公差，表面质量，化学成分，金相组织，机械性能和盘重。随着生产技术的发展，用户对这几方面提出越来越高的要求。正是这些日益增长着的要求，促进了线材轧制技术及装备的新的的发展。其中，尤其是盘重对线材轧机的发展起了很大的促进作用。新一代的高速线材轧机（如45°轧机）就是为满足上述的质量和产量要求而产生的。

（一）对外形及尺寸公差的要求

缩小轧制线材的尺寸公差有重大的经济意义。一方面能减少公差废品，提高线材收得率，同时为拉拔工序提供优良的原料，提高拉丝质量和拉模寿命，减少拉拔动力消耗；另一方面，高尺寸精度的热轧线材能够达到一些经过拉拔的产品尺寸精度，如无性能要求，可以以轧代拔，省去拉拔工序。例如， $\phi 6.5 \sim 10$ 的焊条钢丝的普通精度公差要求为 $-0.20 \sim -0.24$ 毫米，较高精度公差要求则为 -0.08 毫米。目前，高刚性的现代化线材轧机，如摩根45°精轧机组（组合式），瑞典摩加兹哈马（Morgardshamar）公司研制的F式短应力线轧机（非组合式的）以及其他类型的轧机所轧出的线材直径公差可达 ± 0.1 毫米，完全

能满足上述钢丝公差要求。

（二）对表面缺陷及脱碳层的要求

线材表面不得有裂缝、折叠、结疤等缺陷，允许有轻微的划痕。对用于冷锻的线材表面质量要求严格，线材要进行酸洗检查，端部取样酸洗后检查时，其表面缺陷不得大于0.15毫米（对于 $\phi 5.5 \sim 9.5$ 的线材）。不锈钢、耐热钢、弹簧钢、轴承线材也不得大于0.15毫米。其他，如结构钢、工具钢、易切钢、铆钉钢等线材应不大于0.25毫米。低碳钢线材、焊条线材原则上不要求酸洗检查。

含碳量在0.3%以上的线材，要严格控制其表面脱碳，因脱碳后线材表面变软，疲劳强度降低。有关标准对线材表面脱碳层的深度作了相应的规定。

热轧线材表面生成一定量的氧化铁皮，拔丝前应去除。为了易于去除氧化铁皮，希望氧化铁皮的生成量尽量少，氧化铁皮的组成中不易溶于酸的 Fe_3O_4 比例要低。

研究表明，盘条氧化铁皮的形成与轧制温度和高温下停留的时间有很大关系。线材出成品轧机后卷取前立即快速冷却是减少氧化铁皮、降低 Fe_3O_4 比例的最有效方法。

（三）对化学成分、金相组织及机械性能的要求

根据不同的需要对不同用途的线材规定了不同的化学成分，而不同的化学成分对线材的金相组织和机械性能又有不同的影响。有关标准对一定用途的线材的化学成分作了较严格的规定，要求P、S等有害元素含量低，含碳量波动值应限制在0.05%以下。钢的低倍组织应符合一定的标准。当线材的成分一定时，轧制工艺及冷却工艺对其金相组织和机械性能也有重要影响。众所周知，控制轧制就是把变形和热处理结合起来，用以达到所要求的组织与性能的新工艺。所谓控制轧制就是把钢材加热到比传统的热轧温度低些的奥氏体化温度（950~1100℃）左右，保温一定时间，然后把开轧温度、变形程度、变形速度、终轧温度、冷却制度等控制在一定范围的轧制方法。经过控制轧制的线材其内部组织是细微的晶粒，为进一步提高钢材的综合机械性能，发挥钢的潜力开辟了新的途径。

线材的控制冷却是控制轧制的一个组成部分。经过控制轧制的线材与普通轧制工艺轧出的线材相比较，在性能上差别很大。一般来说，经过控制轧制的线材，其强度和塑性比普通轧制和冷却的线材，分别提高15%和20%以上。经过普通轧制和冷却的线材从精轧机轧出后在高温下成盘进行自然冷却时，冷却慢，表面氧化严重，盘卷的内层和外层冷却速度不同，造成了线材全长的组织性能不均，其波动范围达20%左右，并且往往由于晶粒粗大，并有晶向二次析出相而使冷拉性能很差。盘重越大，这些问题越严重。

（四）对盘重的要求

盘重对拉拔工序影响很大。据统计，在相同的生产条件下，使用盘重为500公斤的线材拉丝时，较用盘重为50公斤的线材拉丝时的拔丝能力，前者较后者提高一倍以上。因此，为了提高线材厂和拉丝厂的生产率和便于实现机械化，近年来新建的现代化线材厂都将线材盘重由历来的100~500公斤增大到2500公斤，并且还有增大的趋势（如图1-2所示）。

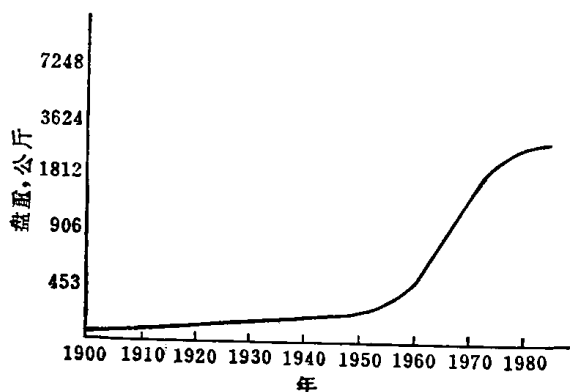


图 1-2 线材盘重增大的趋势

增大盘重对线材轧机的发展起了重大的推动作用，导致了新工艺和新机组的出现。显

而易见，大盘重对线材轧机本身的收得率、生产率都有很大影响。但是，盘重的增大不是无限制的。对于一定生产条件下的线材轧机应有一个最佳盘重，最佳盘重是由线材轧机的综合经济效果来确定的。

综上所述，为了确保线材质量，国家制订了相应的质量标准。标准是线材厂组织生产的技术依据，也是用户进行选用及验收的依据。质量标准反映了一个国家某个阶段的生产技术水平。但国外线材的实际质量往往高于标准。

第二节 线材轧机的轧制工艺特点

为了研究线材生产过程和各类线材轧机的特点，有必要从各类线材轧机的轧制工艺特点讲起。

一、横列式线材轧机的轧制工艺特点

横列式线材轧机是最老的一种线材轧机。开始时是单列，数架轧机横向单列由一个电动机传动。后来又发展成多列，每列由一个电机传动。同一机列各架转数相同，各机架间用人工或围盘送钢进行活套轧制。因此，限制了速度的提高，活套不能调节，造成轧制周期长，温降严重，盘重小，成品精度和性能差，生产率低。目前，这种轧机成品速度一般在8米/秒以下，盘重不超过100公斤。

为了深入探讨老式横列式线材轧机的本质，必须分析它的轧制工艺特点。

如上所述，线材细而长，老式横列式线材轧机的速度低，活套不能控制，越近成品轧机越大，造成散热快，温降严重，以致于超过允许温度下限而造成废品。这就是老式横列式线材轧机的基本特点。温度降包含两个涵义：一个是指整根线材的温度降；另一个是指整根线材上的头尾温度差。两种情况都不应超出允许的规定范围。

为了保证线材在轧制过程中全长温度降不超过所允许的范围，由热坯料到成品全过程的轧制时间是有限制的。显然，对总长度一定的线材，这个时间愈短则温降愈小。所能允许的最长时间称为轧制过程的极限时间。此外，成品的头尾温度差集中体现在成品道次上。线材在成品道次上轧制的时间越短，则线材成品的头尾温差也越小；在相同的轧制速度下，成品道次的轧制时间越长，则所轧之成品也越长，盘重就越大，头尾温差也越严重。头尾温差大到一定程度就会造成尾部尺寸超差，盘条性能严重不匀。这个成品道次所允许的轧制时间称为成品道次极限时间。

无论是轧制过程的极限时间还是成品道次的极限时间都是从不同角度反映线材的温度降的。

为了进一步阐明线材温度降的实际意义，我们引用了某老式横列式线材轧机上轧制直径5毫米线材时的温度降曲线，如图1-3所示。由温度降曲线可看出，轧制直径为5~6毫米的线材时，线材在其全长的各部分有不同的终轧温度。如同一条线材当其长度在300米时温度为800℃，其长度为400米时温度则为720℃，降低了80℃。

显然，各处温度不同则其尺寸公差和机械性能也不相同。因此，在老式横列式线材轧机上随着轧件长度的增加，其断面的垂直直径（或厚度）增大。因为温度较低处轧件变形抗力增大，使辊跳增大。此外，温度降也影响到展宽，同样影响到尺寸精度。图1-4所示是

这种变化的定量关系。从图中看出，直径7.8毫米的线材其垂直直径增量和轧件长度的关系。线材在100米处垂直直径为7.67毫米，在200米处，则增加到7.71毫米，即增加了0.04毫米。随着轧件增长，垂直直径增长趋势加大。应该指出，这种定量关系只适于某一特定的轧制条件。

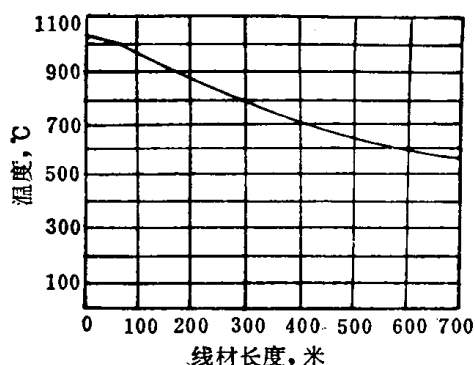


图 1-3 直径5毫米的线材终轧温度与其长度的关系

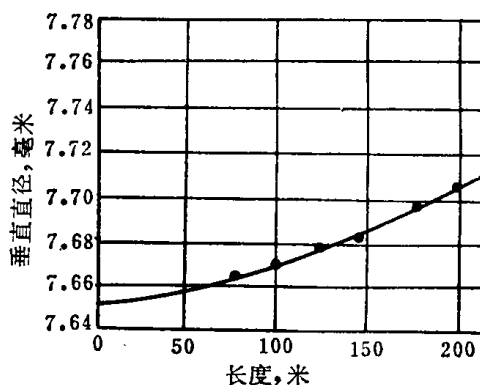


图 1-4 直径7.8毫米的线材垂直直径随轧件长度变化曲线

由上面的分析可见，轧件越长，则所需要的成品道次轧制时间越长，线材头尾温度降也就越严重，线材尺寸和性能波动就越大，以致造成尾部尺寸超出公差范围。如盘重为100公斤、直径为5毫米的线材，其总长度达670米。如以成品线速度为9米/秒计算，则尾部要比头部滞后74.4秒。显然，这样长的终轧时间所引起的线材温度降是很大的，超出了允许范围，亦即超出了成品道次的极限时间。如轧制速度提高一倍，则同样的极限时间就能轧出多一倍长的轧件，即使盘重增加一倍。

研究线材轧机的极限时间对于分析、制订和改进工艺都有着重要的意义。在进行新的线材轧机设计时，即可参考同类型的线材轧机的极限时间来确定和审核轧制周期，使之在允许的极限时间内；极限时间可以用来选择轧制的坯料、轧制速度。但极限时间不是一个绝对数值。不同的轧机、不同的钢种、不同的轧制速度和机械化程度都有不同的极限时间。即使是同一轧机，轧制同一规格的线材也因钢质不同而有不同的极限时间，如轧制低碳线材时头尾温差达250°C，其精度可达到要求，但轧合金钢材时，同样的温差就有可能达不到精度上的要求。

横列式线材轧机产生过长的活套，越接近精轧成品越长，是造成温降的重要原因。细小的断面和过长的活套长时间与铁地板接触，必然造成大量的热量被带走。

活套的形成是由于相邻道次金属秒流量差积累的结果。横列式线材轧机同一机列中各架轧机转数相同，轧辊直径又不能相差很多，所以相邻轧机之轧制速度 v_1 、 v_2 非常接近。而轧机的延伸系数 μ 又波动在1.22~1.55之间，因此延伸系数大于两架之速比 v_2/v_1 。我们知道，如果相邻两架轧机单位时间内之轧出体积，即金属秒流量相等，则不会发生金属积累，亦即不会产生活套。此时 $F_1 v_1 = F_2 v_2$ （式中 F_1 、 F_2 分别为相邻两架轧机上轧制的断面面积， Fv 表示秒流量）亦可写成 $F_1/F_2 = v_2/v_1$ 。而 F_1/F_2 即为延伸系数 μ 。因 $\mu > v_2/v_1$ ，故两架轧机之秒流量不等； $F_1 v_1 > F_2 v_2$ 时，造成金属积累，产生活套。活套计算公式有几种表示方法，常用的公式如下：

$$L = L_1 + L_2 = v_1 t_1 + (v_1 - v_2/\mu) t_2$$

式中 v_1 ——轧件在第一架轧机上的出口速度；

v_2 ——轧件在第二架轧机上的出口速度；

L_1 ——轧件由第一架往第二架传送时在围盘内形成之活套，称为一次活套；

L_2 ——轧件在第二架轧机同时轧制时因速度差的积累所生成的活套，称为二次活套；

t_1 ——轧件在第一架中单独轧制的时间，秒；

t_2 ——轧件同时在两架中轧制的时间，秒；

μ ——轧件在第二架的延伸系数。

公式推导（见图1-5）如下

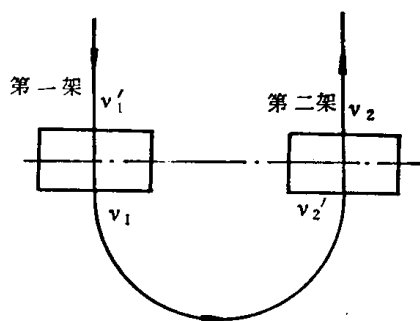


图 1-5 活套公式推导简图

设轧件在第一架轧机入口速度为 v_1' ，在第二架轧机入口速度为 v_2' ，则轧件由第一架轧出经 t_1 秒后到第二架，故此时在围盘内之长度

$$L_1 = v_1 t_1$$

假设两架转数相同，辊径相同，故二辊之线速度 v 相同。今 v_1 除轧辊本身之线速度 v 之外又有前滑，故 $v_1 > v$ ；又 v_2' （因后滑关系） $< v$ ，故 $v_1 > v_2'$ 。在实际生产中两架转数相同，辊径相差很小（名义尺寸是相同的），因此， $v_1 > v_2'$ 。正是这个速度差 $v_1 - v_2'$ 的积累产生了活套。我们知道， $v_2' = v_2 / \mu$ ，故 $v_1 - v_2' = v_1 - v_2 / \mu$ ，在 t_2 秒内的积累所产生的活套 L_2 为：

$$L_2 = (v_1 - v_2 / \mu) t_2$$

将 L_1 、 L_2 代入 L 表达式，即得上述活套计算公式。

减少活套的根本办法就是减少两架间金属秒流量的积累，使相邻架的金属秒流量接近，在极限的情况下两相邻机架的秒流量相等，即 $F_1 v_1 = F_2 v_2$ 。这就是连轧机的工艺条件。

在横列式轧机上减少活套的办法就是实现多阶化，即减少每机列之机架数，增大机列数，增大次一架轧辊直径及次一机列的速度。其目的是使各道速度的递增而接近于该道次的延伸系数 μ ，即保持 $F_1 v_1 \approx F_2 v_2$ 的关系。

表1-2列出横列式线材轧机精轧前与精轧机列的8种布置方式。每后一种布置方式中，由于机列中机架数目的减少和相邻机架辊径差值的增加，使活套变得更小。因此，横列式线材轧机从发展上来看，机列数愈来愈多，而同一机列中之机架数则相应减少。这就是横列式线材轧机的多阶化。

横列式线材轧机多阶化的进一步发展就是连续化，以使活套长度控制在最小程度。每列轧机通常由二架组成，用直流调速电机传动，并装有活套控制器。这样，既能使活套长度控制在最小限度，又保证机架间不拉钢，实现了无张力轧制。轧件头尾温差不超过 20°C 。

因此，实际上其工艺特点已经不属于横列式线材轧机的范畴，而具备了连续式线材轧机的工艺特点。这种轧机和串列的连续式线材轧机相比，实质上没有差别，只是布置形式上有所变异。这里，用围盘代替了连续式线材轧机的直的导槽。好处是避免了有害的张力，缺点是围盘调整较麻烦且高速时甩尾严重。横列式线材轧机连续化的典型例子是瑞典法格斯塔（Fagersta）轧机和摩加兹哈马轧机。为了区别，习惯上称这种轧机为活套连续式线材轧机，而称串列连续式轧机为连续式线材轧机。

表 1-2 横列式线材轧机精轧前和精轧机列布置形式与辊径变化

轧 钢 机 类 别	各架轧辊直径的平均值 $C_{均}$	
	毫 米	%
	$\frac{299-251}{8} = 6$	$\frac{6 \times 100}{275} = 2.2$
	$\frac{303-247}{7} = 8$	$\frac{8 \times 100}{275} = 2.9$
	$\frac{305-245}{6} = 10$	$\frac{10 \times 100}{275} = 3.6$
	$\frac{305-245}{5} = 12$	$\frac{12 \times 100}{275} = 4.4$
	$\frac{307-243}{4} = 16$	$\frac{16 \times 100}{275} = 5.8$
	$\frac{305-245}{3} = 20$	$\frac{20 \times 100}{275} = 7.3$
	$\frac{299-251}{2} = 24$	$\frac{24 \times 100}{275} = 8.7$
	$\frac{291-259}{1} = 32$	$\frac{32 \times 100}{275} = 11.6$

综上所述，我们可以看出以下几点：

- 1) 老式横列式线材轧机的根本特点是温降和头尾温差严重。为了保证尺寸精度和性能符合质量要求，规定了轧制极限时间。成品道次的极限时间包含在轧制过程极限时间之中。在一定的轧制过程极限时间内，如缩短精轧成品前各道次的轧制时间，即能延长成品道次极限时间，从而提高精度和加大盘重。如粗轧机连续化（半连续式线材轧机）就是这一原则的应用。
- 2) 尽量减少温度降和头尾温度差是老式横列式线材轧机改进和发展的中心环节。提高轧制速度，减少活套长度则是减少温度降和头尾温度差的主要途径。

在老式横列式线材轧机诞生后的一百多年发展历史阶段中，线材工作者的基本工作都是围绕着这两方面进行的。就提高轧制速度来说，由低速横列式线材轧机一直发展到今天的高速无扭精轧机组；就减少活套长度来说，由单列横列式发展到多阶横列式乃至活套连续式线材轧机。有关这两方面的详细内容将在本章第三节叙述。

3) 温度、轧制速度和轧制时间三者互相紧密联系，互相影响，是确定轧制工艺的基本三要素。但中心环节是温度，这三个基本要素是确定线材坯料尺寸、压下量分配、热工制度、盘重、产品精度和性能等方面的主要依据。

横列式线材轧机的这三个互相影响、互相矛盾的基本要素只能在高一级的连轧基础上得到统一，而在横列式轧机中的任何改进只能使其得到改善，最终的解决就是轧机的连续化。

二、连续式线材轧机的轧制工艺特点

所谓连续式线材轧机是指轧件同时在几架（机组）或在全部轧机上轧制，金属秒流量相等，即 $F_1 v_1 = F_2 v_2 \cdots \cdots = F_n v_n = \text{常数}$ ，实现了连轧关系的线材轧机。

它与横列式线材轧机相比较有两个主要特点。其一是避免了不能调节的活套，实现了连轧关系，从根本上解决了长活套轧制时大量散热问题。在有些精轧机上，不但温度不降低，反而由于变形功转化的热量，使轧件温度升高。这可由图 1-6 看出，中轧机组轧件温度升高，精轧机组轧件温度基本不变化。中轧机组轧件温度的升高，是由于轧件变形热大于轧件散失的热量。精轧机由于轧件断面较小，散热较大，故两者基本平衡。在高速线材轧机的精轧机组上，由于轧件变形热较大，故轧制温度略有升高，随着轧制速度不同，升高幅度也不同，如图 1-7 所示。第二个特点是设备布置十分紧凑，在使用长钢坯（一般在

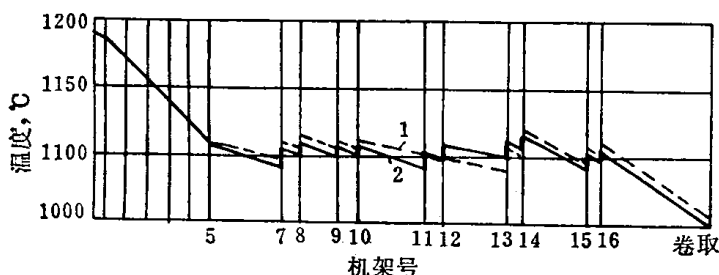


图 1-6 某连续式线材轧机各机架的温度变化曲线

1— $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 毫米；2— $\phi 6.5$ 、 $\phi 7$ 毫米

9~21 米左右）时，将出现轧件前端已进入卷线机而轧件尾部仍在炉内的情况。这就保证了轧件在轧制过程中各道次的轧制温度保持近于相等。W. 阿斯拜克（Asbeck）等人的研究也证明，在连续式线材轧机上线材终轧温度均在 A_{c_3} 以上，而线材头、尾温度差很小可忽略不计。由此可见，轧件在连轧过程中，轧制温度基本不变并保持秒流量相等，这就是连续式线材轧机的工艺特点。正是这种工艺特点使相互制约、相互矛盾的横列式线材轧机工艺的三个基本要素——温度、速度和时间——统一在高一级的连轧工艺基础上。在连续式线材轧机上极限时间的概念失去了意义。因此，温度因素对线材盘重无影响。五十年代的连续式线材轧机盘重由 200 公斤左右增到 340 公斤以上。六十年代初期，美国连续式线材轧机的盘重增至 544 公斤。这时线材的盘重不是受头尾温差所限，而主要是成品轧制速度、钢坯长度及盘条精整运输设备所限。

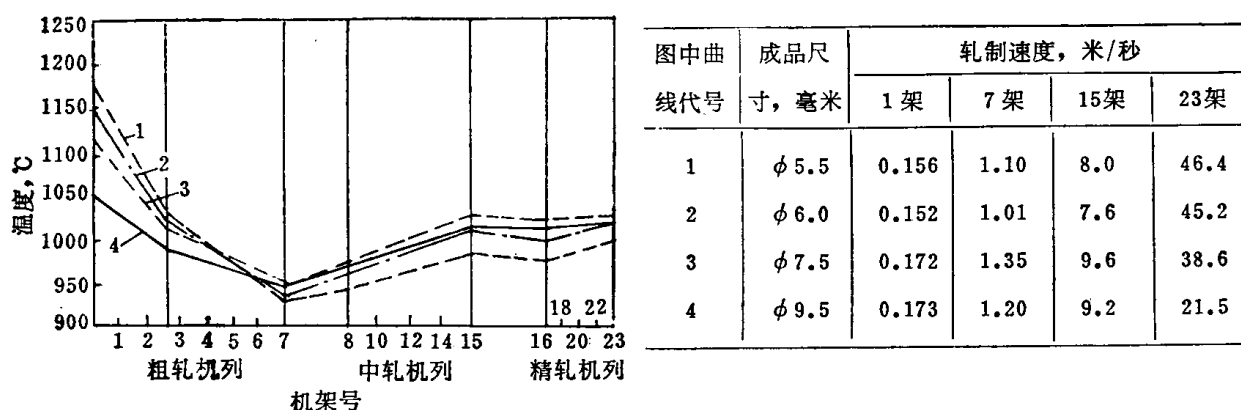


图 1-7 线材轧机各机组的轧制温度变化曲线

我们知道，盘条重量取决于钢坯重量，钢坯重量又取决于钢坯断面和长度，而断面和重量是平方关系，长度和重量是线性关系，钢坯长度因受运输及加热设备所限，目前最长的达21米，一般的为12米。因此，增加盘重主要是加大断面。而加大断面的关键在于提高轧制速度。因为在连轧过程中金属的秒体积流量应保持相等，即断面和速度的乘积应保持相等，而连轧第一机座的轧制速度不应小于0.10米/秒，否则会损坏轧辊。因此，只有提高成品轧制速度才能增大坯料断面。如精轧成品速度为50.8米/秒时，所使用之钢坯最大尺寸为101.6×101.6毫米；当速度为61米/秒时，最大钢坯尺寸为114×114毫米。

三、半连续式线材轧机的轧制工艺特点

最初的半连续式线材轧机是指横列式和连续式混合组成的线材轧机。粗轧机列为水平连轧机，由1~2台电动机传动，中轧机列及精轧机列为单阶或多阶横列式轧机。这种线材轧机是横列式线材轧机的一种改良形式。它比横列式线材轧机改进的地方在于粗轧机是连续式的，因而提高了效率，缩短了轧制周期，温度降比横列式线材轧机小。另外，由于精轧机列可进行多条轧制，而老式横列式的粗轧机列往往是生产能力上的薄弱环节，因此粗轧机列连续化可使产量得到不同程度的提高。但由于中轧机列和精轧机列仍然是横列式线材轧机，因此它的工艺特点基本上仍然是横列式的，即横列式线材轧机的几个问题它都存在，如温降大，因此盘重不可能大，一般为150公斤左右；轧制速度不可能提高；尺寸精度差；生产能力低，粗轧能力得不到充分发挥；操作人员多，劳动强度大；等等。图1-8所示为这类轧机的温降曲线。

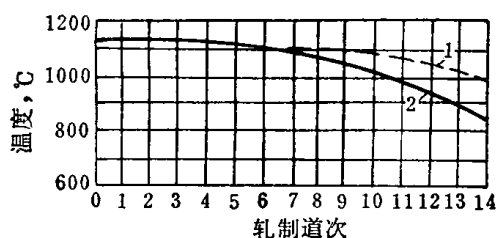


图 1-8 不同类型线材轧机各道次的温度降 (φ6.5毫米)

1—连续式线材轧机；2—半连续式线材轧机

后来，半连续式线材轧机又有其他形式，如粗轧机列为横列式（或跟踪式），中轧机列

及精轧机列为复二重式。复二重式轧机按其工艺特性属于半连续式，因为这种机列既有连轧关系又有活套的积累，但活套不长，因此温降不大。在这类半连续式线材轧机中有的由于变形功所产生的热量大于轧件散发的热量，温度不会降低反而有所升高(如表1-3所示)。

表 1-3 复二重式线材轧机轧件温度 (°C) 测定表

钢 种	出 炉	粗轧出口	中轧入口	中轧出口	精轧入口	精轧出口
低 碳	1220	1050	头1000 尾950	头950 尾900	头920 尾875	头1000 尾960
高 碳	1150	1050	头1000 尾950	头950 尾900	头920 尾875	头1000 尾960

注：原料75×75×1600毫米，盘重90公斤；轧制速度12.7米/秒；成品 ϕ 6.5毫米线材。

因此，复二重式机列从本身的工艺特点来看，实际上接近于连续式线材轧机。这样的线材轧机称为半连续式更确切些。由于复二重式机列通常只作中轧机列和精轧机列，而对于老式横列式轧机来说，轧件的温降又主要是在这两个机列上，尤其是精轧机列上，因此在整个线材生产线上无论复二重式轧机是一列还是二列，是在精轧还是在中轧，其综合温度降都不会低于那种原始型的半连续式线材轧机。

以上两类线材轧机的工艺特点都应属于半连续式线材轧机，它们都应称为半连续式线材轧机。

通过线材轧机工艺特点的分析，可以看出，由于线材本身细而长，其头尾温度降和全部温降十分突出，因而，温度是线材生产工艺过程中的基本因素，它贯穿在线材生产的整个过程中。在加热和轧制阶段，要求钢坯加热温度在允许范围内，并加热均匀，希望终轧温度不低于 A_{c3} ；而在轧后为了保证得到所要求的金相组织和机械性能，减少氧化铁皮生成且使之易于剥离，又要进行轧后的急冷，进行所谓控制冷却；在轧制过程中，为了将温降减至最小，采取了不同的措施。例如，先进的工艺和设备，加热炉靠近轧机，采用连轧机实现生产过程连续化。在老式横列式轧机上采用小型机械化，交叉轧制，多阶化，连续化，等等。这些措施的基本出发点就是提高轧制速度，减少活套长度，保证轧件温度。

第三节 线材轧机的发展

从第一套线材轧机产生到现在已有一百多年的历史。社会的需要促进了生产技术的发展。用户对加大线材盘重、提高尺寸精度、改善线材表面质量、改善金相组织和机械性能等日益增长的要求，不断促进线材生产技术及装备的发展。其中，盘重对线材轧机的发展起到了更大的促进作用。但是，决定其发展方向的正是线材轧机本身的工艺特点。以线材盘重为例，老式横列式线材轧机限制线材盘重的根本原因在于温度降。解决的办法，一是提高轧制速度，二是减少活套，实现连续化。减少活套长度、间隙时间和提高轧制速度导致了连续化，而连续化为高速创造了条件。只有轧机实现了连续化才能从根本上解决线材温度降问题，使盘重达到了500公斤。但是，继续增大盘重必须进一步提高轧制速度，因为线材坯料的断面是线材成品线速度的函数。此外，正是高速度导致了新一代线材轧机——45°轧机——的出现。