

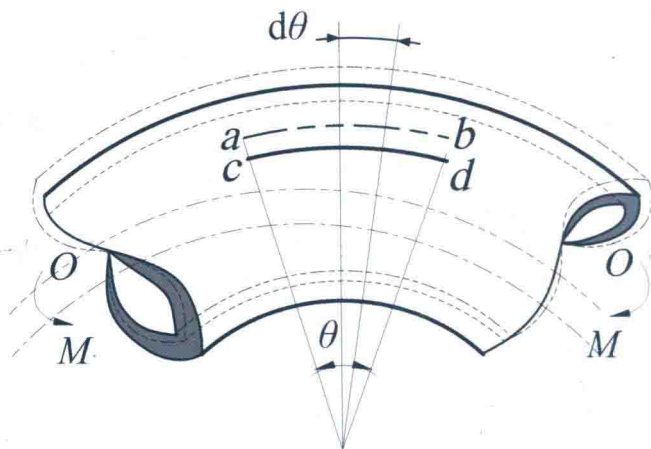
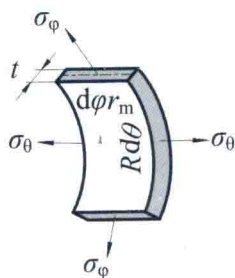


北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Metal Tube Bending: Theory and Forming Defects Analysis

金属管材弯曲理论 及成形缺陷分析

鄂大辛 (E Daxin) 著
[美] 周大军 (Zhou Dajun)



北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

金属管材弯曲理论及 成形缺陷分析

鄂大辛 (E Daxin)

著

[美] 周大军 (Zhou Dajun)

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

金属管材弯曲理论及成形缺陷分析/鄂大辛, (美) 周大军著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5682-1657-9

I. ① 金… II. ① 鄂… ② 周… III. ① 金属管-弯曲-研究 IV. ① TG376.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 001772 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 33.25

彩 插 / 4

字 数 / 628 千字

版 次 / 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前言

管材素有工业血管、发动机动脉之誉，其应用遍及工业、农业、军事、建筑及生活的各个领域，几乎在所有管线工程或结构工程中，管材弯曲构件都占有举足轻重的地位。管材弯曲是以管材为毛坯来制造管形零件的塑性成形方法，是金属塑性加工及先进制造技术的重要组成。由于弯管构件具有中空结构及良好的力学性能，适应于运动机械轻量化、强韧化，满足低耗高效、提高吸收冲击能力和输送压力流体的发展需求，不仅用于任意布局形式的流体输送工程，也越来越多地作为强化构件、抗碰撞缓冲构件等用于航空航天、汽车、船舶等工业。

相比于其他金属塑性加工，管材弯曲变形机理的研究还比较落后，精确弯曲技术还不成熟，阻碍了管材数字化弯曲技术的发展，已经成为金属塑性成形领域中的研究热点和难点之一。目前国内外还没有系统研究管材弯曲理论的专著，关于介绍管材弯曲技术的专业书籍也甚少，这种状况严重桎梏了管材弯曲技术的发展和管形构件的加工及应用。著者在长期从事航空航天导管弯曲理论及试验研究的基础之上，总结了大量试验、有限元分析及理论研究成果，撰写了《金属管材弯曲理论及成形缺陷分析》一书。本书以管材弯曲的工程理论为主，结合弯管生产实践系统地介绍了当前管材弯曲技术的发展与应用。同时，汇集了著者在国家自然科学基金和国防基础研究中的大量管材弯曲试验、有限元分析结果，整理了著者本人在国内外发表的 50 余篇管材弯曲研究论文（其中，EI、SCI 检索近 40 篇），引入滞后回弹的探讨，并参考国内外相关科技资料，较为系统地研究了管材弯曲变形机理、弯曲过程中的应力应变分布，以及成形过程中各种类型缺陷的产生原因及预测、补偿和控制方法。书中论述的部分研究结果和结论经过航空航天企业生产现场的初步验证，修正后的结果具有相应的可实践性。另外，书中还包括与另一位美籍华人学者 Dr. Dajun Zhou 长期协作探讨的共识，并且 Dr. Zhou 在管材弯曲有限元分析方面提出了许多颇有新意的见解并提供了一些具有参考意义的资料，使得本书具有较强的国际交流色彩，可与该领域的国际领先技术接轨。本著作不仅可作为科研机构、理工科高等院校及大专院校师生的研究及教学参考资料，亦可作为工程实践技术人员参考使用之典籍。

本书撰写的初衷意在抛砖引玉，也是一种探讨，希望得到诸位同行的共鸣，目的是与各位同仁共同推动金属管材弯曲理论及精确弯曲技术向前发展，书中错

误和不足在所难免。在管材弯曲研究和本书撰写过程中，受到著者的导师吉林大学宋玉泉教授（科学院院士）的悉心指教和大力支持，并提出许多具有建设性的意见和建议，对此深表谢意！另外，书中参考了许多国内外相关技术研究文献，在此对作者表示感谢。借此机会也感谢著者的博士研究生和硕士研究生，他们在弯曲试验及有限元分析方面对本书的撰写完稿做了大量工作。同时，对北京理工大学出版社编辑张海丽老师和原编辑刘小亦老师的帮助深表谢意！另外，本书的出版得到了北京理工大学“985 工程”国际交流与合作专项资金的资助和国家外国专家局“外国文教专家项目”的大力支持，在此表示衷心的感谢。


由于时间仓促和著者水平有限，书中如有不当之处敬请同行和读者不吝指正。

书中的理论推导及其试验和有限元模拟结果，可能会因理论的近似性、材料批次及测试精度等的影响，而产生某种偏差甚至错误，因此，建议读者只能作为相应参考，而不宜直接引用，以免产生不良误导。为了方便读者阅读，文中个别基础公式可能重复（编号也重复）。另外，滞后回弹部分仅为探索性研究，部分理论和试验研究内容在本书撰写及印刷过程中成稿，来不及引入，敬请读者原谅。

本书第 1~3 章及第 5~7 章由鄂大辛撰写，第 4 章由 Dr. Dajun Zhou、博士研究生李翀及中国汽车工程研究院张敬文工程师协助完成，全书由鄂大辛统稿。

著者：鄂大辛

2015 年 12 月 于北京理工大学



目 录

第1章 金属管材制造及其力学性能	1
1.1 管材的用途及其制造工艺	1
1.1.1 无缝金属管的特点、分类及其用途	1
1.1.2 金属管材制造工艺简介	4
1.2 管材拉伸类力学性能及研究	9
1.2.1 小直径管材轴向拉伸试验	10
1.2.2 管材轴向拉伸的应力应变分析及其通解	13
1.2.3 管内侧壁无径向位移的拉伸应力应变解析	49
1.2.4 管内、外侧壁均向心移动的拉伸失稳应力解析	55
1.2.5 管内、外侧壁相向移动的拉伸颈缩应力解析	59
1.2.6 管材拉伸平面应力解	61
1.2.7 管段环向拉伸试验及有限元分析	73
1.3 管材压缩类力学性能测试及研究	91
1.3.1 管材轴向压缩试验	91
1.3.2 管段径向压缩试验	100
第2章 管材弯曲工艺、模具及设备	127
2.1 管材弯曲概述	127
2.1.1 弯管形构件的用途及其未来的应用前景	127
2.1.2 管材弯曲工艺及其特点	132
2.2 管材弯曲成形方法及分类	135
2.2.1 管材常规无芯弯曲	135
2.2.2 管材填充弯曲	139
2.2.3 加热弯曲	147
2.2.4 管材数控弯曲成形	152
2.2.5 特种弯管工艺简介	157
2.3 异形截面管及其弯曲	164
2.3.1 异形截面管的分类、特点及用途	164
2.3.2 矩形截面管弯曲简介	166

2.3.3 异形截面管弯曲简介	168
2.4 弯曲模具及弯管机简介	171
2.4.1 回转牵引弯曲模具简介	172
2.4.2 普通弯管机简介	174
2.4.3 数控弯管机简介	178
2.4.4 管形测量机及其应用现状	181
第3章 管材弯曲成形原理及其力学分析	184
3.1 管材弯曲成形原理	184
3.1.1 管材弯曲变形规律	184
3.1.2 管材的材料模型讨论	187
3.1.3 管材弯曲力矩的近似解	191
3.2 管材弯曲应力应变分析	199
3.2.1 管材弯曲的简单应力解(初等理论)	199
3.2.2 刚塑性管材弯曲平面应变解	203
3.2.3 线性强化管材弯曲平面应变解	211
3.2.4 幂强化管材弯曲的平面应变解	214
3.3 管材回转牵引弯曲刚塑性平面应变分析	217
3.3.1 考虑弯模反力及附加拉力的应力解析	217
3.3.2 弯曲变形分析	221
3.4 数控弯管附加拉力的分析	223
3.4.1 具有附加拉力管材弯曲的应力解析	223
3.4.2 弯曲应力分布的有限元分析	227
3.4.3 附加拉力对管材弯曲变形的影响	228
3.4.4 弯管附加拉力的控制	233
3.5 管材弯曲中性层分析	235
3.5.1 管材弯曲中性层的分类及特点	235
3.5.2 弯管壁厚变化对应变中性层位移的影响	241
3.6 矩形截面管塑性弯曲的近似分析	244
3.6.1 矩形截面管塑性弯曲应力分析	244
3.6.2 矩形截面管弯曲变形分析	247
3.6.3 矩形截面管弯曲的有限元分析	252
3.7 管材弯曲成形性及影响因素	259
3.7.1 管材力学性能对弯曲成形性的影响	260
3.7.2 管材相对壁厚对弯曲成形性的影响	263
3.7.3 弯模间隙对弯曲成形性的影响	265
3.7.4 弯曲速度对弯曲成形性的影响	268

3.7.5 助推方式对弯曲成形性的影响	273
3.7.6 摩擦对弯曲成形性的影响	279
第4章 管材弯曲有限元模拟	283
4.1 有限元技术简要概述	283
4.1.1 有限元理论的发展	283
4.1.2 有限元模拟的基本思想和实施步骤	285
4.1.3 有限元模拟在管材弯曲中的应用	286
4.2 管材弯曲有限元仿真前处理	287
4.2.1 管材弯曲 CAD 简化模型	287
4.2.2 网格划分与单元技术	288
4.2.3 材料模型	293
4.2.4 接触与摩擦	297
4.2.5 边界条件及求解参数设置	299
4.3 管材弯曲有限元模型提交、运算及后处理	300
4.3.1 管材弯曲求解描述及其算法	300
4.3.2 管材弯曲有限元仿真后处理	302
4.3.3 异形截面管弯曲的有限元模拟应用实例	306
4.4 管材弯曲有限元仿真的现存问题及发展趋势	308
第5章 管材弯曲成形缺陷的产生及预测和控制	310
5.1 弯曲成形质量、缺陷及分类	310
5.1.1 管材弯曲成形质量	310
5.1.2 管材弯曲质量缺陷及分类	312
5.2 弯管壁厚变化及其预测	316
5.2.1 弯管壁厚变化的形成机制	317
5.2.2 弯管壁厚变薄及拉裂	322
5.2.3 弯管壁厚增厚及起皱	329
5.3 弯管横截面扁平化畸变及其预测	346
5.3.1 弯管横截面扁平化畸变及其形成	347
5.3.2 弯管横截面扁平化畸变分析	350
5.3.3 弯管横截面扁平化畸变的理论分析	355
5.3.4 变形条件对弯管横截面畸变的影响	361
5.4 弯管回弹及其预测	367
5.4.1 管材弯曲回弹及其形成	367
5.4.2 线性强化管材弯曲回弹的简化解析	371
5.4.3 幂强化管材弯曲回弹的数值解	380
5.4.4 幂强化管材弯曲回弹的工程解	389

5.4.5	弯管横截面畸变干涉的弯曲回弹解析	394
5.4.6	数控弯管中附加拉力及应变中性层位移对弯曲回弹的影响	408
5.4.7	材料性能及变形条件对弯管回弹的影响	419
5.4.8	浅析滞后回弹现象及其起因	426
5.5	弯管成形缺陷的控制	441
5.5.1	弯管壁厚变化的控制	442
5.5.2	弯管横截面畸变的控制	446
5.5.3	弯管回弹的预测及补偿控制	449
第6章	管材弯曲成形性及成形极限	452
6.1	管材塑性弯曲成形极限分析	452
6.1.1	变形的塑性极限与塑性成形极限	452
6.1.2	管材弯曲成形性及成形极限	455
6.1.3	管材弯曲质量对成形极限的约束	459
6.2	管材力学性能与弯曲成形极限	461
6.2.1	伸长率与最小相对弯曲半径	461
6.2.2	应变强化系数与最小相对弯曲半径	464
6.2.3	抗拉强度与最小相对弯曲半径	469
6.3	弯管变形缺陷限制的工程弯曲成形极限	474
6.3.1	弯管壁厚变形对工程弯曲成形极限的制约	474
6.3.2	弯管横截面扁化对工程弯曲成形极限的制约	477
6.3.3	弯管横截面内、外形畸变对工程弯曲成形极限的制约	480
6.3.4	弯管缺陷的关联性与弯曲成形极限	483
第7章	管材弯曲研究的简单回顾、现状及发展	489
7.1	管材弯曲理论及成形缺陷的研究	489
7.1.1	管材弯曲变形机理及有限元模拟的研究	490
7.1.2	弯管壁厚变化的研究	493
7.1.3	弯管横截面扁化畸变的研究	496
7.1.4	弯管回弹的研究	497
7.2	管材弯曲工艺的研究	502
7.2.1	管材弯曲工艺方法的研究	502
7.2.2	管材弯曲工艺条件的研究	504
7.3	管材弯曲技术研究的发展	507
7.3.1	管材弯曲技术的发展方向	507
7.3.2	管材弯曲理论研究的发展方向	510
结束语		514
参考文献		516
作者发表的与管材弯曲相关的论文及著作		521

第 1 章

金属管材制造及其力学性能

1.1 管材的用途及其制造工艺

管材因具有特殊的空心结构，使其在国民经济建设中有着广泛的应用，几乎遍及工业、农业、建筑及人们日常生活的各个领域。可以说在人们生存的环境中，各种管材无所不在地发挥着巨大的作用。由于各个领域对管材的使用要求不同，就使得管材的材质、结构及规格等有很大区别；同时，每种类型管材的制造方法也不相同。

1.1.1 无缝金属管的特点、分类及其用途

管材是指横截面中空形状贯通轴向及两端开口的型材，并且其横截面中空结构可以有各种封闭式形状。管材是一种经济性型材，其中钢管的用量较大。因此，钢管已经成为钢铁工业中最重要的产品之一，其生产量约占全部钢铁型材生产总量的 10%，并且具有逐年上升的发展态势。

1. 管材的特点

无缝金属管产品如图 1-1 所示，其最主要的结构特征是横截面具有中空的封闭几何形状，通常可利用管壁厚度 t_0 与管外径 d_0 之比 t_0/d_0 来表示它的几何特征，根据 t_0/d_0 可将管材分为薄壁管和厚壁管， t_0/d_0 可以表征管材的横截面刚度及其沿管径方向的强度。具有空心截面且圆周方向封闭结构的管材，被认为是目前连续输送各种流体或散装物料的唯一选择，利用各种连接方法还可实现远距离及水下输送管线。因此，通常被称为工业“血管”。

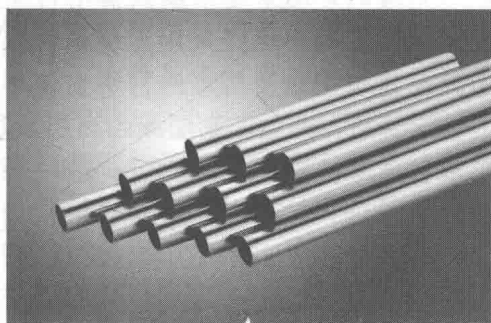


图 1-1 无缝金属管产品

与相同重量的实心材料相比，管材的各种截面系数较大，特别当横截面积相同时，管材因中空结构而具有更大的截面惯性矩，因而其抗弯和抗扭强度均较大。而在相同结构强度和刚度的条件下，

管材又具有重量轻且可吸收冲击能量的特点。因此,管材与实心材料相比,具有较高比强度和高比模量的特点。

常用钢管(包括焊管)在外径 $d_0=0.1\sim 4\,500\text{ mm}$ 及壁厚 $t_0=0.01\sim 250\text{ mm}$ 范围内变化,其规格因使用要求和使用场合而不同。

2. 管材的用途

管材的用途非常广泛,主要被用于各种工业或日常生活中的流体输送、机械结构、建筑及工艺装饰等方面。

(1) 流体输送的载体

管材是目前在一定距离和范围内连续输送流体或散装物料的唯一载体,在石油钻采及输送、化工、机械、航空航天、汽车、船舶、军工、锅炉、压力容器、医疗器械及居家生活中几乎无所不在,在各个不同领域中承担着流体动脉血管的作用。通常按其所输送流体的状态,常将由管材组成的载体分为高、低压流体输送管路,并且根据输送流体的压力,对管材有着不同的要求。

(2) 结构零件

金属管材作为经济性结构型材,在承受轴向轻载荷的情况下可以取代实心结构件,进而节省大量金属材料。近年来,基于节省能源、净化环境的运动机械轻量化技术的发展,管材发挥了巨大作用,如用来制作飞机起落架和机身零部件、汽车底盘和前、后副车架等。同时,又由于管材的空心结构有利于耗散冲击动能,非常适合汽车车身局部结构的设计新理念,目前多数乘用车的前、后保险杠及车门防撞梁等均采用各种横截面的管材制造,而且在不远的将来,一定会被更大量地引入汽车车身结构件设计和制造领域。

(3) 武器、建筑及其他

无缝钢管历来是常规武器不可缺少的重要型材,目前的各种枪管、炮筒及发射装置等,已经采用无缝钢管或棒材有芯径向锻造、拉拔等工艺方法制造。在建筑工地及房屋结构中也使用了大量管材,以组成各种进、排气或水的输送管路,并且在高层或超高层建筑中用来构建钢-混凝土支柱。另外,为了节省金属材料,很多广告牌支架、公路护栏及隔离墩标识杆等都使用了管材构件。

由于管材自身结构的特征和优点,其在未来现代化建设中的应用将会更加广泛。

3. 管材分类

金属管材种类繁多,从结构的完整性或横截面连续状态来看,主要可以分为无缝管和焊管两大类。如果按其使用场合、生产方式、材质、外径尺寸及横截面形状等,还可分成很多种类。

(1) 按使用场合分类

按照使用场合,可将金属管材分为管线管、锅炉管、机械结构管、液压及气

动系统用管、油井用管、石油及天然气输送用管、化工用管、枪管、炮管以及各种特殊用途管等。由于使用场合和使用目的不同，通常对管材材质、制造方法和制造质量及其横截面结构形状、强度、刚度，乃至耐蚀、耐冷及耐热等都有不同的要求。

(2) 按管材生产方式分类

按管材生产方式不同主要分为无缝管和焊接管两大类。无缝管是指其横截面圆周方向没有接缝的整体封闭管，因生产工艺不同而分为热轧管、冷轧管、冷拔管和挤压管等；焊接管通常是由金属板材卷曲成形后焊接而成，因焊缝走向不同又可分为直缝焊管和螺旋焊管两种。螺旋焊管的强度通常要比直缝焊管强度高，但在相同长度上的焊缝长度要增加30%~100%，即生产效率低、成本高。一般情况下，大口径焊管多采用螺旋焊接方式。

(3) 按管材材质分类

由于使用目的和场合不同，需要管材具有相应的力学性能。因此，可分为普通碳素钢管、合金钢管、不锈钢管、轴承钢管、耐候钢管、耐腐蚀钢管以及各种有色金属管。此外，还有一些特殊用途的金属复合管及涂层管等。

(4) 按管材外径尺寸分类

按管材外径尺寸可分为大、中、小直径管。根据相对壁厚 t_0/d_0 或其倒数 d_0/t_0 不同，又可分为特厚壁管 ($d_0/t_0 < 10$)、厚壁管 ($d_0/t_0 = 10 \sim 20$)、薄壁管 ($d_0/t_0 = 20 \sim 40$) 和极薄壁管 ($d_0/t_0 > 40$) 等。

(5) 按管材截面形状分类

根据管材横截面形状不同可以分为圆形截面管及异形截面管。由于在湿周相等的条件下，圆的通流截面积最大，即用圆截面管输送流体可以获得最大输送流量。另外，圆形截面管受到内外径向压力时，受力相对均匀。但圆形截面管也有一些局限性，如处于平面弯曲变形状态时，方形或矩形等异形截面管的抗弯强度大于圆形截面管。因此，作为骨架类结构件时，异形截面管有其相应的优势。按横截面几何形状不同，还可将异形截面管分为菱形管、六方管、八方管、椭圆管以及各种非对称横截面管等；按壁厚可分为等壁厚异形截面管和变壁厚异形截面管；如果按管材纵截面形状，又可将异形截面管分为等截面管和变截面管。其中，变截面管包括锥形管、阶梯管及周期变化纵截面管等。

(6) 其他分类方法

按管材端头状态还可分为光管和带螺纹管。其中，带螺纹管又可分为普通螺纹管、特殊螺纹管等。按使用压力场合不同，又可分为高压管、中压管及低压管等。总之，由于管材使用目的、场合及领域非常广泛，因此其分类方法也非常多。

1.1.2 金属管材制造工艺简介

在高压流体输送和机械结构中使用的管形构件绝大多数为无缝金属管，这类管材的制造主要有热轧、冷轧、拉拔或挤压方法等。

1. 热轧管材

目前使用的无缝管中有 80%~90%是采用热轧工艺制造的。除去下料、加热及矫直精整等工序外，热轧无缝管制造的主要变形是由轧坯穿孔、轧管和定减径三种基本工序来实现的。

(1) 轧坯穿孔

轧坯穿孔是在穿孔机上将实心坯料轧制成空心环状厚壁毛管的过程。由于经穿孔后的管坯壁厚较大、长度较短，顶头尖部的前端直径大，尾端直径小，而且内外表面质量较差，因而通常称为毛管。

1) 穿孔变形过程

待穿孔轧坯需清除表面缺陷，在穿孔侧端面定心后加热到变形温度。穿孔时，坯料在一对倾斜的轧辊辗轧作用下，一边旋转一边不断向顶头工作端的反方向进给，逐渐形成空腔毛管。二辊斜轧穿孔时，轧坯与顶头接触前容易产生中心破裂，大量裂纹发展并相互连接、扩大成片后，金属连续性破坏而形成中心孔洞。但穿孔时的顶头前过早产生孔洞，会形成大量内折缺陷。因此，必须严格控制孔腔的生成时刻。

通常要求穿孔后的毛管壁厚尽可能均匀，横截面椭圆度要小，内外表面不得有结疤、折叠和裂纹等缺陷。一旦在毛管上形成缺陷，即便在后续轧管和定减径工序中也很难消除，所以穿孔在钢管生产中是一个很重要的工序环节。在毛管连轧工艺中，要求穿孔速度不仅保证毛管终轧温度，还应满足后续轧管温度的要求，以适应连轧的生产周期。

2) 穿孔方法

轧坯穿孔通常有压力穿孔、推轧穿孔和斜轧穿孔三种工艺方法。

① 压力穿孔：是指在压力机上实现冲压穿孔。穿孔前，将方形或多边形轧坯置入带有很小锥度的圆形凹模中，压力机滑块带动圆形冲头压入轧坯中心，冲出一个圆孔。穿孔冲头压入轧坯时，冲头下金属产生径向挤压流动，使外围材料充填轧坯与圆形凹模的空隙中，即可获得圆形毛管。压力穿孔时，金属主要产生径向流动变形，而轧坯的轴向延伸非常小。

② 推轧穿孔：是冲孔与纵轧相结合的穿孔工艺。利用带圆孔型的一对轧辊反向旋转将轧坯咬入孔型内，由固定在孔型中的冲头在轧坯中心冲出一个圆孔。由于轧坯后端作用有一定推力，因而称为推轧穿孔。一般使用的轧坯为方形，推轧出的毛管较短，轴向延伸变形量也很小。推轧穿孔制成的毛管内表面质量较好，外表面不易产生裂纹，轧坯中心区金属组织获得良好改善，其生产效率也比压力

穿孔高。

③ 斜轧穿孔：也称曼内斯曼穿孔，工作原理如图1-2所示。斜轧穿孔克服了上述两种穿孔变形量小、毛管短而厚的缺点，在热轧无缝管机组中增设了斜轧延伸机，用于减小穿孔后的毛管外径和壁厚，并使轧坯沿穿孔方向轴向伸长，是目前无缝管生产中应用最为广泛的穿孔工艺。

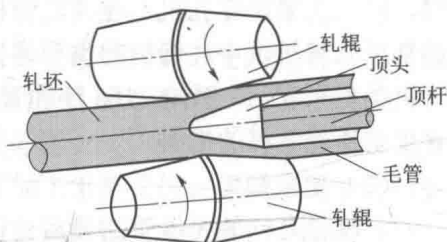


图1-2 二辊斜轧穿孔机穿孔工作原理

斜轧穿孔机按轧辊数量可分为二辊穿孔机和三辊穿孔机，如果按照轧辊形状，还可分为锥形穿孔机、盘式穿孔机和筒形穿孔机三种。其中，锥形穿孔机和筒形穿孔机是目前广泛使用的主要机组。锥形穿孔机的轴向延伸系数较大，适合于穿轧薄壁毛管，并且可减少轧管机组的机架数量。二辊斜轧穿孔机的两个轧辊的轴线与轧制线呈 $6^{\circ} \sim 17^{\circ}$ 倾斜角，使穿孔速度加快，生产直径250 mm以上钢管。三辊穿孔机穿孔的毛管内表面质量好，几何尺寸精度较高，适合于穿孔轧制中、厚壁毛管。

(2) 轧管

热轧管材的第二道主变形工序是轧管，即将毛管在延伸轧机上延伸并轧制成厚度接近于成品管壁厚的荒管。轧管时要在毛管内插入相应的芯棒，然后由轧辊辗轧使管坯壁厚减小，挤出的材料沿轴向流动增加管坯长度。一般情况下，将厚壁毛管轧制成荒管常需2~3道次轧管工艺过程。

根据轧管机结构不同，通常有二辊式轧管机和三辊式轧管机。早期的连轧管机都是二辊式结构，即由两个轧辊组成荒管孔型。而近些年开发出的三辊式连轧管机则由三个轧辊组成一组孔型，轧管时，孔型顶部材料在轧辊和芯棒对向挤压作用下轴向延伸并向圆周横向展宽，孔型侧材料与芯棒并不接触，但受到顶部轴向流动材料的附加拉应力作用，同时产生周向延伸和拉缩。轧管所用设备，通常根据芯棒的控制方法，分为浮动（或全浮动）芯棒连轧管机、半浮动（或半限动）芯棒连轧管机及限动芯棒连轧管机等。其中，限动芯棒连轧管机轧管生产效率高、连续性好，目前在无缝钢管生产中占据主导地位。

管坯被轧制成合格的荒管后，还需利用脱管机或脱棒机使荒管与芯棒分离。所谓脱管，是指轧制结束后，由脱管机将芯棒从在线的荒管内脱出。而脱棒是将荒管连同其内的芯棒一同移出轧制线，然后利用脱棒机将芯棒抽出。实际上，脱管工艺环节的设置，不仅仅在于使芯棒与荒管分离，同时还具有定径校正及微量延伸的作用。

一般情况下，被轧管件的运动学条件、应力应变状态、变形量及生产效率等，主要因轧管机类型而有所区别，生产中必须配置能够与这些参数相匹配的穿孔机及其他相应设备。因此，不同轧管机与这些相匹配的设备就构成了不同的轧管机

组，机组主要由穿孔机、连续轧管机、张力减径机组组成。在热轧无缝管生产中，通常以轧管机组中轧管机的类型进行分类，并以该机组生产轧件的品种规格和轧管机类型来表示。例如，168 连轧管机组表示产品最大外径为 168 mm 左右，而轧管机是连轧管机的机组。

(3) 定减径

定减径是热轧无缝管的最后一道主变形工序，目的是将荒管空轧成具有产品要求的管径、尺寸精度和圆度的成品管，是一个空心体小变形量连轧的过程。管坯定径后在输送辊道上完成壁厚、温度、外径及长度的连续测量，然后进入精整线时必须进行水冷，以便于切割。此外，为了消除轧管内外表面、横截面椭圆度，轴向弯曲度及壁厚不均匀等轧制缺陷，还要利用均整机对荒管进行适当均整、矫直等。

通常在热轧管材工艺中没有设置专门的热处理工序，但实际上，芯棒光亮退火及管坯在线常化（正火）等都属于热处理工艺。特别是近年来提出的控轧控冷新工艺，通过控制轧制温度和冷却速度来提高管坯强韧性的工艺方法得到了推广应用，并获得了较好的辅助热处理效果。

2. 冷轧管材

冷轧是高精度、高表面质量小直径薄壁管及异形截面管的主要制造方法。一般有色金管及部分钢管都可以在冷态下轧制成形，而常温下变形抗力大、塑性差且加工硬化严重的无缝管，则需热轧制成形，以降低轧制力并增大延伸量。因此，冷轧管在管材生产总量中所占的比例较小。

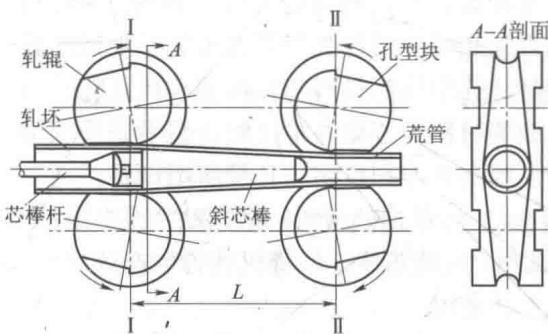


图 1-3 二辊周期式冷轧管材工作原理

冷轧管材通常采用周期式冷轧工艺，根据轧机配置的轧辊和轧槽结构形式不同，可以分为二辊式冷轧管和多辊式冷轧管两种工艺。二辊式周期冷轧管法，由两个对向旋转的轧辊在管坯定长段实施周期性往复轧制，其工作原理如图 1-3 所示。两个轧辊中均装有带变截面轧槽的孔型块，它的最大截面尺寸与管坯外径相当，而最小截面尺寸等于轧制后的成品

管外径，在管坯中插入带杆的锥形芯棒后进行轧制。初始轧辊位于孔型开口最大的极限位置 I，进给机构将管坯送进一段距离。轧制开始时，机床连杆带动装有辊轮的工作机架向前移动，使两轧辊随机架平移的同时对向滚动辗轧管坯，轧辊向前滚动行程 L 即到达孔型开口最小的极限位置 II 时，完成部分轧制成形。之后，使管坯沿轴向转动 $60^\circ \sim 90^\circ$ 角，两轧辊反向滚动对管坯进行均整定型，直至返回到极限位置 I，完成一个轧制周期。如此重复这一过程，即实现管材周期轧制

成形。

多辊冷轧则是指在工作机架上配置三个或多个截面形状不变的轧辊，它们组合起来后可构成一个完整的圆孔型，轧制时使用的是圆形芯棒。

冷轧成形时，管坯在一套孔型中的变形量可达 90%，壁厚压下量和减径率可分别达 70% 和 40% 左右，比工序间退火的冷拔加工率高几倍。因此，用于轧制低塑性较难变形金属薄壁管，可节省多次工序间退火并缩短工艺流程。冷轧管材的表面质量和精度较高，通常无须再经过拉拔即可作为成品管使用。但由于轧制过程的周期特性使得轧制塑性较好、管壁较厚的合金管材时，生产率低于冷拔工艺。另外，冷轧设备结构复杂且成本高，孔型模具加工困难，产品规格变换不灵活。由此可见，周期式冷轧工艺主要适合于强度高、塑性差的高精度、高表面质量小直径薄壁管轧制成形。有时，也可先由大变形冷轧使管坯减小壁厚，再由冷拔改制多种规格，即采用冷轧、冷拔联合工艺生产小直径薄壁管材。

3. 拉拔管材

管材拉拔也称为空心拉拔，空拉时的应力应变已经脱离轴对称变形状态，是与实心棒材拉拔的最主要区别，即空心拉拔时的变形非均匀性引发了附加剪切变形和剪切应力的产生。如图 1-4 所示，根据使用芯棒不同，管材空心拉拔有多种不同的制造工艺。

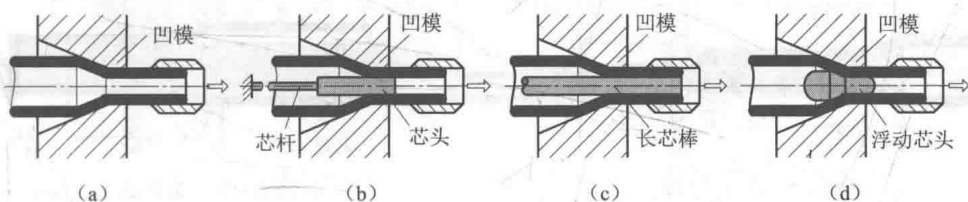


图 1-4 空心拉拔

(a) 空拉；(b) 固定芯头拉拔；(c) 长芯棒拉拔；(d) 浮动芯头拉拔

(1) 空拉

空拉时管坯内部不放芯头，仅靠凹模口约束使管坯外径减小，如图 1-4 (a) 所示。空拉时管坯外径减小，根据不同工艺可使管壁减薄、增厚或保持不变。空拉管内表面粗糙，有时会产生裂纹，适于制造小直径管及盘管等，通常用于减径量小或外轮廓整形管材的制造。

(2) 固定芯头拉拔

固定芯头拉拔是利用带芯杆的短芯头进行的拉拔，如图 1-4 (b) 所示。拉拔时，芯杆一端固定，管坯在外加拉力作用下通过模口时减径并减薄。拉制的管材内表面质量较好，应用广泛，但受芯杆长度限制，拉拔细长管相对困难。

(3) 长芯棒拉拔

长芯棒拉拔实际上是一种浮动芯头拉拔，如图 1-4 (c) 所示。将芯棒与管

坯一同拉出凹模口，可以获得较大的减径和减薄率，而且管内外径尺寸相对精确。但由于芯棒长度须大于拉管长度，因而不适于拉制长管。另外，每道次拉拔后，需采用脱管法或滚轧法使管材扩径后才能取出芯棒，工艺比较繁杂。一般情况下，适用于拉制薄壁管或塑性较差的钨、钼管等。

(4) 浮动芯头拉拔

如图 1-4 (d) 所示，浮动芯头拉拔时，利用芯头外轮廓形状与管内壁的摩擦而稳定在凹模口处实现管坯减径变形。适用于拉制长管和盘管，生产效率及质量都较高，是一种先进的金属拉拔工艺。但由于要求的工艺技术条件较高，难度也较大，因此普及相对困难。

(5) 扩径拉拔

将连接有扩径芯头的芯杆从固定小直径管坯后端插入，然后向前方拉动芯杆，利用扩径芯头外轮廓使被挡板固定的管坯直径增大，壁厚和长度减小，如图 1-5 所示。当受到设备能力限制时，常采用扩径拉拔来改制大直径管材。

(6) 顶管法

如图 1-6 所示，顶管法是指将小直径芯棒插入大直径带底管坯中，利用芯棒将管坯从凹模口一侧顶出实现减径变形，常用于改制小直径管。

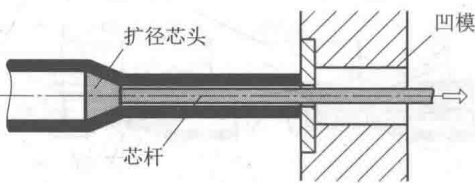


图 1-5 扩径拉拔

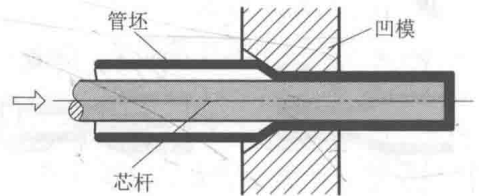


图 1-6 顶管法

管材空心拉拔成形时，变形区金属基本处于两压一拉应力状态，而变形区则处于两压、一拉或一压、两拉状态。也就是说，管材冷拉时的应力应变状态不如冷轧时有利于发挥金属塑性，因此不易获得大变形量，使得冷拔生产率降低，但冷拔管材的精度和表面质量非常好。因此，一部分小直径薄壁管的最终成形通常采用冷拔工艺来完成。

4. 挤压管材

挤压制造无缝金属管受模具强度、润滑技术及挤压速度等多因素影响，占无缝金属管总生产量的很小一部分，主要用于生产低塑性的高温合金管、异形截面管、有色金属管及部分复合管。实心坯料挤压管材需要经过穿孔和挤压成形两种主变形工序，所用的穿孔工具通常称为穿孔针，而在空心坯料挤压管材时则称为芯棒。

实心坯料穿孔前，通常需要将经车削剥皮的圆坯料进行感应加热或盐浴加热（少、无氧化），表面涂敷润滑剂后置于挤压设备上带有独立穿孔装置的挤压筒内，