

回转成形 实用技术

HUIZHUAN CHENGXING SHIYONG JISHU

洪慎章 编著

- ▶ 结构体系新颖
- ▶ 技术内容全面
- ▶ 应用实例丰富

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



· 013032889

TG306
08

回转成形实用技术

洪慎章 编著



机械工业出版社



北航

C1640682

TG306

08

98898810 .

本书全面系统地介绍了各种回转成形技术的成形方法、工艺制订及计算、模具设计、设备类型及主要技术参数、应用实例。其主要内容包括辊锻、楔横轧、辗压扩孔、摆动辗压、径向锻造,以及其他回转成形技术。本书突出了金属精密塑性成形工艺与模具设计两大关键内容,从实用角度出发,围绕工艺制订、计算和模具设计,介绍了各种回转成形技术中的最基本问题。本书结构体系新颖,技术内容全面;书中配有丰富的应用实例,实用性强,能开拓思路,概念清晰易懂,便于自学。

本书可供从事金属精密塑性成形加工的工程技术人员、工人使用,也可作为相关专业在校师生的参考书和模具培训班的教材。

图书在版编目(CIP)数据

回转成形实用技术/洪慎章编著. —北京:机械工业出版社,
2013.3

ISBN 978-7-111-41490-2

I. ①回… II. ①洪… III. ①金属压力加工-塑性变形
IV. ①TG306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 030094 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华

版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

封面设计:路恩中 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·18.5 印张·381 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-41490-2

定价:42.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑(010) 88379734

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术不断进步及创新速度加快,材料加工技术越来越朝着高产量、低成本、短流程、近净成形的方向发展,金属塑性加工新工艺不断涌现,如辊锻、楔横轧、辗压扩孔、摆动辗压、径向锻造、螺旋横轧和三辊横轧、齿轮轧制及周期轧制等。这些工艺采用回转成形方式代替了使用锻锤及压力机上往复上下运动的模具来进行生产的方式,不仅显示出了高效、节能节材、低噪声的优点,还符合低成本及低碳环保要求。作者在搜集和分析了国内外相关参考文献的基础上,结合自己多年来从事金属精密塑性成形工艺教学、研究及实际生产的技术经验,编写了这本《回转成形实用技术》。

本书全面系统地介绍了各种回转成形技术的成形方法、工艺制订及计算、模具设计、设备类型及主要技术参数、应用实例。其主要内容包括辊锻、楔横轧、辗压扩孔、摆动辗压、径向锻造,以及其他回转成形技术。本书突出了金属精密塑性成形工艺与模具设计两大关键内容,从实用角度出发,围绕工艺制订、计算和模具设计,介绍了各种回转成形技术中的最基本问题。本书结构体系新颖,技术内容全面;书中配有丰富的应用实例,实用性强,能开拓思路,概念清晰易懂,便于自学。本书可供从事金属精密塑性成形生产的工程技术人员、工人使用,也可作为相关专业在校师生及研究人员的参考和模具培训班的教材。

在编写本书的工作中,刘薇、洪永刚、丁惠珍等几位工程师们参加了部分书稿的整理工作,作者在此表示衷心的感谢。

本书涉及到较多的专业知识,尽管作者进行了精心的编写,但因水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者不吝赐教,以便得以修正,以臻完善。

洪慎章

于上海交通大学

目 录

前言

第 1 章 辊锻	1
1.1 概述	1
1.1.1 辊锻工艺的实质	1
1.1.2 辊锻工艺的特点	1
1.1.3 辊锻工艺的分类和应用	2
1.1.4 国内外辊锻工艺的发展状况	3
1.2 辊锻变形的工艺参数	5
1.2.1 辊锻变形的几何参数	5
1.2.2 咬入条件	6
1.2.3 延伸系数	9
1.2.4 前滑	11
1.2.5 宽展 (展宽)	13
1.3 辊锻模具	17
1.3.1 辊锻模具的结构与固定方式	17
1.3.2 型槽	19
1.4 制坯辊锻模具设计	20
1.4.1 辊锻毛坯图设计	20
1.4.2 辊锻型槽系的选择	22
1.4.3 辊锻道次的确定	25
1.4.4 辊锻毛坯各道截面尺寸的计算	26
1.4.5 型槽几何尺寸、相应矩形和型槽尺寸的变换方法	29
1.4.6 型槽纵向尺寸的设计	33
1.5 成形辊锻模具的设计	36
1.5.1 成形辊锻件的分类	36
1.5.2 长轴类锻件成形辊锻模具的设计	37
1.5.3 板片类锻件成形辊锻模具的设计	45
1.6 辊锻力、辊锻力矩及单位压力的计算	53
1.6.1 辊锻力的计算	53
1.6.2 辊锻力矩的计算	54
1.6.3 单位压力的计算	56
1.7 辊锻机	58
1.7.1 辊锻机的分类	58
1.7.2 辊锻机的技术参数	61

1.8 辊锻模设计实例	64
1.8.1 转向直拉杆臂制坯辊锻	64
1.8.2 操纵杆制坯辊锻	65
1.8.3 推力杆制坯辊锻	67
1.8.4 变截面板簧叶片成形辊锻	67
1.8.5 汽车前梁制坯辊锻	69
1.8.6 柴油机连杆连续制坯—成形辊锻	69
1.8.7 门铰链制坯—成形辊锻	72
1.8.8 耙齿制坯—成形辊锻	75
1.8.9 钢丝钳连续制坯—成形辊锻	78
1.8.10 梅花扳手制坯辊锻	80
1.8.11 双头呆扳手连续制坯—成形辊锻	82
1.8.12 电锤钻头制坯—成形辊锻	84
1.8.13 宝剑连续制坯—成形辊锻	87
1.8.14 医用镊子冷成形辊锻	90
第2章 楔横轧	92
2.1 概述	92
2.1.1 楔横轧工艺的实质	92
2.1.2 楔横轧工艺的优缺点	93
2.1.3 楔横轧工艺的应用	93
2.2 楔横轧工艺	94
2.2.1 模具特点与成形原理	94
2.2.2 楔横轧的工艺参数	95
2.2.3 楔横轧模具设计	98
2.2.4 轧制力与轧制力矩的计算	103
2.3 楔横轧机	104
2.3.1 楔横轧机的分类	104
2.3.2 楔横轧机的技术参数	106
2.4 楔横轧模具设计实例	107
2.4.1 汽车起动机轴楔横轧模	107
2.4.2 汽车吊耳轴楔横轧模	113
2.4.3 喷油嘴楔横轧模	116
2.4.4 羊角锤楔横轧模	120
2.4.5 鲤鱼钳楔横轧模	123
2.4.6 挡圈钳楔横轧模	127
第3章 辗压扩孔	130
3.1 概述	130
3.1.1 辗压扩孔工艺的实质	130
3.1.2 环件轧制的应用	131

3.1.3 环件轧制的特点	132
3.2 环件轧制的工艺设计	133
3.2.1 环件轧制的分类	133
3.2.2 金属的变形流动和工艺参数	133
3.2.3 环件锻件及毛坯的设计	134
3.2.4 环件轧制力、轧制力矩的计算	138
3.3 环件轧制模具设计	140
3.3.1 轧制孔型的分类	140
3.3.2 轧制孔型的设计	142
3.4 辗压扩孔机	144
3.4.1 辗环机的分类	144
3.4.2 辗环机的主要技术参数	146
3.5 轧制孔型的安装调试	150
3.6 环件辗轧件缺陷的产生及防止措施	151
3.7 环件轧制工艺的应用	154
3.7.1 环件轧制生产线	154
3.7.2 典型环件轧制工艺流程	155
第4章 摆动辗压	157
4.1 概述	157
4.1.1 摆动辗压的实质及成形方式	157
4.1.2 摆动辗压的优点	159
4.1.3 摆动辗压的应用	160
4.2 摆动辗压的金属流动及变形	161
4.2.1 摆动辗压运动轨迹的分类	161
4.2.2 摆动辗压的金属变形	162
4.3 摆动辗压工艺	165
4.3.1 摆动辗压成形件图的设计	165
4.3.2 摆动辗压工艺的力能参数	168
4.3.3 模具的预热和冷却	169
4.3.4 摆动辗压成形过程中的润滑	170
4.4 摆动辗压模具设计	171
4.4.1 摆动辗压模具设计考虑的因素及设计要点	171
4.4.2 摆动辗压模的结构设计	172
4.4.3 摆动辗压模具材料	175
4.5 摆动辗压机	177
4.5.1 摆动辗压机的分类	177
4.5.2 摆动辗压机的主要技术参数	179
4.6 摆辗件质量分析	184
4.6.1 摆辗件充填不满	184

4.6.2 冷摆辗开裂	185
4.6.3 摆辗件厚薄差大或上下底面不平	186
4.7 摆辗工艺的应用实例	187
4.7.1 冷摆辗成形件	187
4.7.2 温摆辗、热摆辗成形件	204
4.8 摆辗铆接	213
第5章 径向锻造	215
5.1 概述	215
5.1.1 径向锻造的工艺实质	215
5.1.2 径向锻造的工艺特点	215
5.1.3 径向锻造的主要用途	216
5.2 径向锻造的变形及应力	217
5.2.1 径向锻造的变形分析	217
5.2.2 径向锻造时的应力、应变状态	218
5.3 径向锻造的工艺设计	220
5.3.1 锻件设计	220
5.3.2 毛坯的选用	223
5.3.3 变形工艺程序的确定	223
5.4 工艺参数的确定	224
5.5 变形力计算	227
5.6 模具设计	228
5.6.1 锻模设计	228
5.6.2 夹头设计	233
5.6.3 芯棒设计	233
5.7 径向锻造机	234
5.7.1 径向锻造机的工作原理	235
5.7.2 径向锻造机的分类	235
5.7.3 径向锻造机的主要技术参数	236
5.7.4 径向锻造机的组成	239
5.7.5 径向锻造机的主要结构	241
5.8 径向锻造件的缺陷分析及预防措施	243
5.9 径向锻造工艺的应用实例	245
5.9.1 实心台阶轴的径向锻造	245
5.9.2 带锥度和台阶实心轴的径向锻造	245
5.9.3 调头锻台阶轴的径向锻造	245
5.9.4 空心转轴的径向锻造	247
5.9.5 厚壁管缩口的径向锻造	248
5.9.6 转向直拉杆(管)的径向锻造	248
5.9.7 中间轴的径向锻造	248

5.9.8 白口铸铁用轧辊的径向锻造	249
5.9.9 粉末烧结体的径向锻造	249
5.9.10 常规武器零件的径向锻造	250
第6章 其他回转成形技术	257
6.1 螺旋横轧(孔型斜轧)	257
6.1.1 螺旋横轧的实质及应用	257
6.1.2 螺旋横轧的咬入条件与最大压下量	258
6.1.3 螺旋横轧的变形区和变形特性	259
6.1.4 螺旋横轧的模具设计	260
6.1.5 螺旋横轧工艺参数的确定	264
6.1.6 毛坯尺寸的确定	266
6.1.7 孔型斜轧模具设计实例	267
6.2 三辊横轧(仿形斜轧)	273
6.2.1 三辊横轧工艺的实质、优缺点及应用实例	273
6.2.2 轧辊及仿形尺的设计	277
6.2.3 轧制工艺参数的选择	280
6.2.4 轧制力、轧制力矩及功率的计算	281
6.3 齿轮轧制	282
6.3.1 齿轮热轧的原理及特点	282
6.3.2 齿轮轧机	283
6.3.3 轧轮设计要点	283
6.3.4 齿轮轧制工艺参数	284
6.4 周期轧制	285
参考文献	287

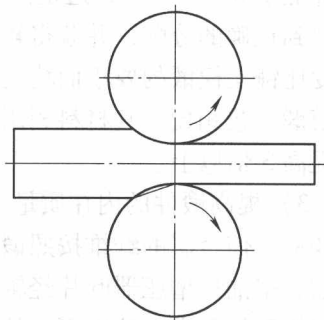
第 1 章 辗 锻

1.1 概述

1.1.1 辗锻工艺的实质

辗锻是使金属坯料在一对旋转的辗锻模中通过，借助型槽对坯料施加的压力使其产生塑性变形，从而获得所需要的锻件或锻坯的工艺过程。

坯料在高度方向经辗锻模压缩后，除一小部分金属横向流动而使坯料宽度略有增加外，大部分被压缩的金属沿着坯料的长度方向流动（见图 1-1）。被辗锻的毛坯横截面积减小，长度增加。由辗锻变形特点可见，它适用于减小坯料截面、杆件的拔长、板坯的辗片，以及沿杆件轴向分配金属体积等变形过程。



1.1.2 辗锻工艺的特点

目前国内许多工厂广泛采用的锻造方法，主要是自由锻、锤上胎膜锻或锤上模锻。这些方法有很多难以克服的缺点，如生产率低，设备庞大，制造困难，振动大，劳动生产条件差，对厂房和地基要求高，难以实现机械化和自动化等，因而不能适应国内生产大力发展的要求。而辗锻工艺与之相比，却有着极其显著的特点。

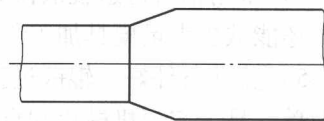


图 1-1 辗锻变形过程

1) 生产率高。据统计，成形辗锻的生产率为锤上模锻的 5 ~ 10 倍。这主要是由于辗锻工艺基本上是连续生产，而锤上模锻工艺中，锤与压力机的空行程占有较长的时间。例如，柴油机增压器动叶片经辗锻成形后，除榫头部分仍需机械加工外，其叶身形线部分只需电解加工，与方料电解旧工艺相比，其生产率提高 2.5 倍以上。又如，锻造坦克走动部分的履带节，采用锤上模锻工艺每班可生产 600 件，而采用辗锻成形工艺的班产可达 1300 件。再如辗锻飞机发动机的涡轮叶片，用矩形截面的长条料，每辗一次能成形 10 只叶片（见图 1-2），以 30r/min 计算，则每小时可生产 18000 只叶片，这是压力机上模锻所无法与之相比的。

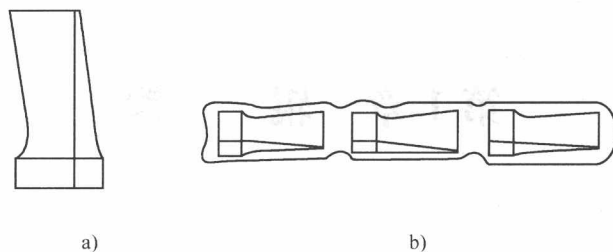


图 1-2 动叶片辊锻工艺

a) 动叶片锻件 b) 动叶片辊锻后在长条料上的简图

2) 节约金属材料。据统计,多型槽辊锻成型坯料的金属耗量比锤上多型槽模锻降低了6%~10%,这是由于辊锻的坯料是顺序定位翻转,以使坯料的整个体积能得到正确的分配,并获得较大拔长的条件。因此,在辊锻机上模锻所产生的飞边宽度比锤上模锻的要小而均匀。例如,增压器叶片的闭式辊锻工艺与压力机上的开式模锻工艺相比,其材料利用率可提高30%左右;若与方钢铣削叶片旧工艺比较,约提高3倍以上。

3) 提高锻件的内在质量。在两个扇形模块转动的影响下,金属发生局部的连续变形,使金属的纤维按照锻件的外形分布,金相组织均匀、致密,力学性能高。例如,柴油机增压器叶片经辊锻后,金属流线完全符合叶片外形要求,材料中心层的偏析不暴露在叶片表面,从而提高了叶片的质量。

4) 采用精密铸造辊锻模具或电脉冲加工辊锻模,不仅可以节约大量合金模具钢,还能减少大量模具加工工时和模具加工专用设备(如仿型铣床等)。

5) 劳动条件好。辊锻过程是一个连续的静压变形过程,没有冲击和振动,操作简单,易于实现机械化和自动化。该工艺与锤上模锻相比,工人劳动条件得到显著改善。

6) 辊锻机的结构简单、制造方便,对厂房、地基条件要求低,并且设备造价较低,节约国家基建投资。

7) 设备动力不像模锻锤那样需有锅炉蒸汽装置或压缩空气装置,而仅有电力就能启动设备。

1.1.3 辊锻工艺的分类和应用

辊锻工艺的分类和应用见表1-1。

表 1-1 辊锻工艺的分类和应用

分类方法	类 别	变 形 特 点	应 用
按用途分类	制坯辊锻	沿坯料长度方向分配金属体积	为锻压机或其他设备模锻提供毛坯,效率高,节省材料

(续)

分类方法	类 别	变 形 特 点	应 用
按用途分类	成形辗锻	直接成形锻件或锻件的某一部分	适合辗锻长轴类、板片类等锻件,效率高,节省材料与能源
按型槽形式分类	开式型槽辗锻	上下型槽间有水平缝隙,宽展较自由	常用于制坯辗锻
	闭式型槽辗锻	宽展受限制,可强化延伸、限制锻件水平弯曲	既可用于制坯辗锻,也可用于成形辗锻
按辗锻温度分类	热辗锻	加热至再结晶温度以上	用得最多
	冷辗锻	通常在常温条件下	多用于锻件精整或有色金属
按送进方式分类	顺向辗锻	毛坯送进方向与辗锻方向一致	不需夹钳料头,常用于成形辗锻
	逆向辗锻	毛坯送进方向与辗锻方向相反	操作方便,常用于制坯辗锻

1.1.4 国内外辗锻工艺的发展状况

由于辗锻工艺具有一系列的优点,所以在国内外都得到普遍推广和应用。在国外制坯辗锻已得到广泛采用。如美国辗锻作为制坯与热模锻压力机配套已达 60%~70%;德国、俄罗斯用辗锻机与压力机联成各种产品的自动线也为数不少。在军工生产中,用辗锻工艺生产航空发动机的涡轮叶片、飞机的大梁、直升飞机的螺旋桨叶、坦克的履带节、穿甲弹尾翼及步枪刺刀等。

国外在叶片辗锻工艺及设备方面,尤其是在冷辗锻方面做了很多工作。

大约在 1960 年俄罗斯采用挤压-热辗锻工艺辗锻汽轮机和压气机动叶片毛坯,虽然叶型留有少许余量,但与原有叶片模锻工艺相比,节约材料 30%~40%,减少叶片加工工时 20%~30%,降低成本 30% 左右。如对于长度 500mm 以下的汽轮机叶片采用挤压-热辗锻工艺,叶型部分单面余量 0.4~0.6mm。对于长度 500mm 以上的汽轮机叶片,也采用挤压-热辗锻工艺,但叶型部分单面余量加大至 2~5mm。

俄罗斯最近已设计制造了 10 多种规格的压气机叶片冷辗锻机,能辗锻长度 250mm,宽 100mm 的叶片。这种设备的所有部件都具有很好的刚性,机架也具有较大的强度,这样才能保证叶型所需的精度。扇形辗锻模的转动靠液压缸和杠杆系统来实现。辗锻过程全部自动化,辗锻前毛坯经无氧化加热,叶型需辗锻两次,在两对轧辊中,自上而下自动连续完成,辗锻后叶片需校正。模具寿命 3000~4000 件。

1955 年,在英国曾采用了精密辗锻发动机涡轮叶片及压气机动叶片工艺,材料为尼莫尼克 80A 或尼莫尼克 90 合金及不锈钢等。叶片尺寸由 38mm 涡轮叶片至

356mm 长的压气机动叶片。

1957 年, 美国通用动力公司采用冷辊锻工艺生产压气机叶片, 材料为 403 不锈钢。其主要工艺过程是: 第一道冷辊锻、第二道冷辊锻、切飞边、镦粗根部、切除根部飞边、第一次冷精压、第二次冷精压、切边及叶型扭角。

美国的叶片冷辊锻工艺为矩形截面坯料热挤压-冷挤压-冷辊锻联合工艺。采用冷辊锻方法生产, 成本降低一半, 机械加工工时减少 40% 左右。

1960 年, 美国 and 英国共同研制的喷气发动机压气机动叶片, 采用热挤压叶身与冷辊锻叶型的联合工艺。叶片材料为铝合金、铝铜合金、不锈钢、镍合金和钛合金。采用这种工艺比机械加工经济得多, 且精度高, 可与精密锻件相比较。

1952 年, 德国设计制造了三种冷辊锻机, 能辊锻 50mm、150mm 及 400mm 三种长度的叶片。1957 年, 德国采用热辊锻方法生产 2.5kW 汽轮机末级动叶片, 材料为 20Cr13, 经七道次辊锻成形, 然后校正, 叶形部分单面余量为 0.5mm。

1976 年末, 德国哈森克勒弗尔有限公司制成了一台最大的立式辊锻机, 并生产了直升机铝合金螺旋桨叶, 其尺寸为 3m 长、0.4m 宽及 20 ~ 90mm 厚, 重达 220kg。螺旋桨叶分七道工序辊轧而成, 见图 1-3。

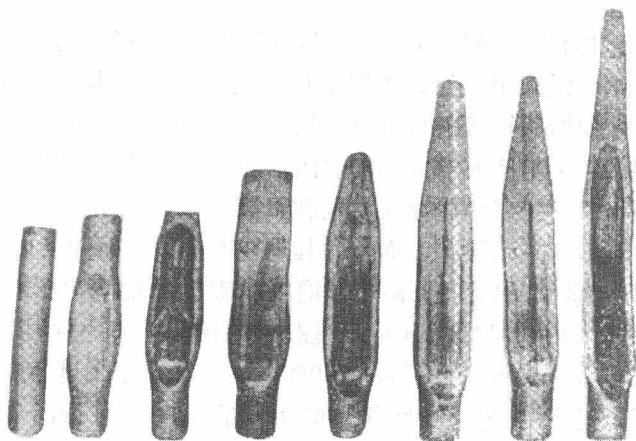


图 1-3 直升机螺旋桨叶经不同辊锻工序后的形状

辊锻工艺在我国的发展也是较快的。解放后, 上海工具厂的麻花钻制坯辊锻在生产上得到应用; 1958 年, 上海汽轮机厂首先对汽轮机叶片辊锻工艺进行了研制工作。随后, 如锄头、履带节、活络扳手、链条侧环、连杆、铁路道岔等产品的成形辊锻在全国各地陆续投产。近几年来, 柴油机增压器动叶片的成形辊锻和发动机动叶片的冷成形辊锻都已投入生产; 飞机大梁 (长约 2m 多) 采用了成形辊锻, 从而代替了 3 万吨模锻水压机; 还有直升飞机的螺旋桨叶、穿甲弹尾翼及步枪刺刀等锻件都在进行成形辊锻试制及生产。

1.2 辗锻变形的工艺参数

1.2.1 辗锻变形的几何参数

1. 辗锻变形区

在辗锻时, 坯料上承受压缩的部位在变化着。直接承受辗锻模压缩作用而产生变形的这部分金属所占有的空间称为变形区, 见图 1-4。

2. 主要几何参数

在变形过程中, 坯料高度方向受到压缩, 随之其宽度和长度尺寸也发生了变化。常用绝对变形和相对变形表示辗锻时的变形程度。绝对变形量为压下量 Δh , 宽展量 Δb 和延伸量 Δl , 它们分别表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= h_0 - h_1 \\ \Delta b &= b_1 - b_0 \\ \Delta l &= l_1 - l_0 \end{aligned} \right\}$$

式中 h_0 、 b_0 、 l_0 ——变形前坯料的高度、宽度和长度;

h_1 、 b_1 、 l_1 ——变形后毛坯的高度、宽度和长度。

绝对变形量与相应坯料原始尺寸的比值称为相对变形量, 通常用百分数表示。

$$\left. \begin{aligned} \text{相对压下量} \quad \frac{\Delta h}{h_0} \times 100\% &= \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\% \\ \text{相对宽展量} \quad \frac{\Delta b}{b_0} \times 100\% &= \frac{b_1 - b_0}{b_0} \times 100\% \\ \text{相对延伸量} \quad \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% &= \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \end{aligned} \right\}$$

变形后的坯料尺寸与变形前相应的坯料尺寸之比称为变形系数。

$$\left. \begin{aligned} \text{压下系数} \quad \eta &= h_1/h_0 \\ \text{宽展系数} \quad \beta &= b_1/b_0 \\ \text{延伸系数} \quad \lambda &= l_1/l_0 \end{aligned} \right\}$$

咬入角: 变形区所对应的锻辊圆心角 α 称为咬入角 (见图 1-4)。

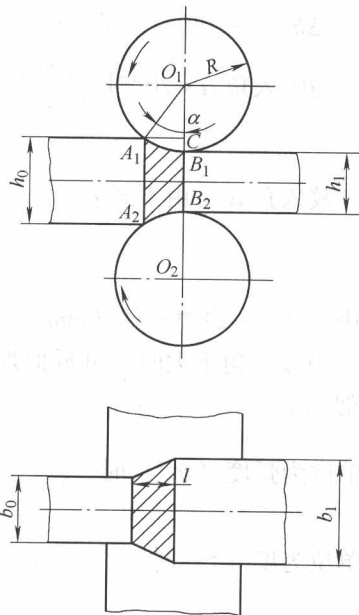


图 1-4 辗锻变形区

咬入弧：坯料与锻辊接触的弧 A_1B_1 称为咬入弧（见图 1-4）。

咬入弧的弦长：咬入弧所对应的弦长 A_1B_1 为咬入弧的弦长（见图 1-4）。

变形区长度：咬入弧的水平投影 l 为变形区长度（见图 1-4）。

根据图 1-4 中的几何关系，可得

$$l = \overline{A_1C} = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R\Delta h - \frac{1}{4}\Delta h^2} \quad (1-1)$$

式中 R ——锻辊半径（mm）；

Δh ——绝对压下量（mm）。

当咬入角 $\alpha < 20^\circ$ 时， $\frac{\Delta h^2}{4}$ 与 Δh 相比，其值很小，可忽略不计。

$$\text{则} \quad l = \sqrt{R\Delta h} \quad (1-2)$$

咬入角 α 可由下式表示

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D} \quad (1-3)$$

式中 D ——锻辊直径（mm）。

当咬入角不大时，可近似地认为咬入弧与变形区长度相等，于是 α 可由下式近似确定。

$$\alpha \text{ 单位为弧度 (rad) 时} \quad \alpha \approx \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-4)$$

$$\alpha \text{ 单位为度 } (^\circ) \text{ 时} \quad \alpha = 57.3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

1.2.2 咬入条件

在辊锻过程中，坯料被锻辊咬入，分为两种典型形式：在坯料的端部实现自然咬入；在坯料中间实现中间咬入。

1. 端部自然咬入

当坯料紧靠旋转的锻辊因受摩擦力而被咬入时称为端部自然咬入。

(1) 实现开始咬入的条件 图 1-5 所示为自然咬入时的开始咬入阶段。在坯料紧靠锻辊时，受到锻辊径向力 P 和摩擦力 T 的作用。 P 和 T 在水平方向的分力 P_x 和 T_x 分别为

$$P_x = P \sin \alpha$$

$$T_x = T \cos \alpha$$

显然， T_x 是力图将坯料拽入锻辊，而 P_x 则力图将坯料推出锻辊，要能实现咬入，必须

$$T_x > P_x$$

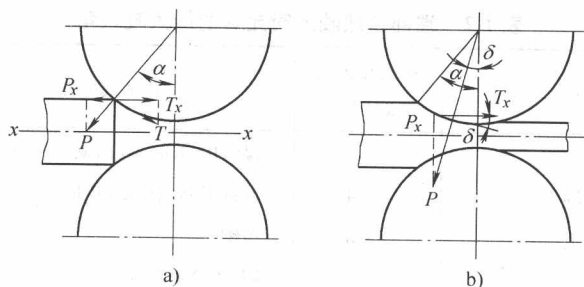


图 1-5 坯料咬入受力分析

a) 开始咬入 b) 已经咬入

由于

$$T = \mu P$$

因而可以得出自然咬入的条件为

$$\mu > \tan \alpha$$

或

$$\tan \beta > \tan \alpha$$

即

$$\beta > \alpha$$

式中 μ ——咬入时坯料与锻辊间的摩擦因数；

α ——咬入角 (°)；

β ——咬入时的摩擦角，又称为极限咬入角 (°)。

于是得知自然咬入的条件是咬入角必须小于锻辊与坯料间的摩擦角。

(2) 稳定咬入过程的条件 坯料被锻辊咬入后，随着辊锻过程的进行，坯料向锻辊中心线方向移动，合力作用点发生变化。它所对应的中心角即咬入角也随之变化，即对咬入变得有利，当坯料到达锻辊中心线时，则咬入角降为 $\alpha/2$ (见图 1-5b)。由此可见，在端部自然咬入的情况下，开始咬入坯料是较为困难的，必须符合咬入条件。但一经咬入后，便能维持辊锻过程的继续进行，即维持辊锻过程的条件已大为降低。

当为强化轧制过程而增大压下量时，其咬入角有可能大于摩擦角，如采用中间咬入或强制送进的办法均可使咬入角增大，但不能无限增大，它要受到咬入后维持辊锻过程继续进行条件的限制，即辊锻过程中打滑条件的限制，即极限咬入角

$$\alpha_{\max} \leq 2\beta$$

但生产实践表明，由于轧入后摩擦因数有所降低，故当为采用强制咬入或中间咬入而增大咬入角时，其稳定辊锻过程的极限咬入角也有所降低，约等于 1.3 ~ 1.5 倍轧入阶段的咬入角。

即

$$\alpha_{\max} = (1.3 \sim 1.5)\beta \quad (1-5)$$

此处的 β 角为开始瞬时的摩擦角。

表 1-2 给出了生产实践中得到的各种不同情况下在端部自然咬入时允许的最大咬入角。

表 1-2 端部自然咬入时允许的最大咬入角

轧制条件	极限咬入角 $\alpha/(^{\circ})$	轧制条件	极限咬入角 $\alpha/(^{\circ})$
冷轧钢和其他金属时:		镍(1100℃时)和白铜(在950℃时)	22
在有润滑剂的光滑辊上	3~4	黄铜 H68(在800℃时)	21~24
无润滑剂的粗糙辊上	5~8	型钢	22~24
热轧时:		铜(在900℃时)	27
钢板	18~22	型钢在表面有刻痕(或焊纹)的辊子上	27~34
铝(在350℃时)	20~22		

2. 中间咬入

前面所述的咬入形式为在坯料的端部实现的自然咬入, 图 1-6a 所示为轧制过程中的典型咬入方式。其送料方向为顺向送料, 即坯料从轧机的一侧轧入, 另一侧轧出。此种咬入及送料方式在辊锻中应用不多, 辊锻中多采用中间咬入、逆向送料的方式进行, 如图 1-6b 所示。所谓逆向送料, 是指坯料在辊锻机的一侧送进并在同一侧轧出。

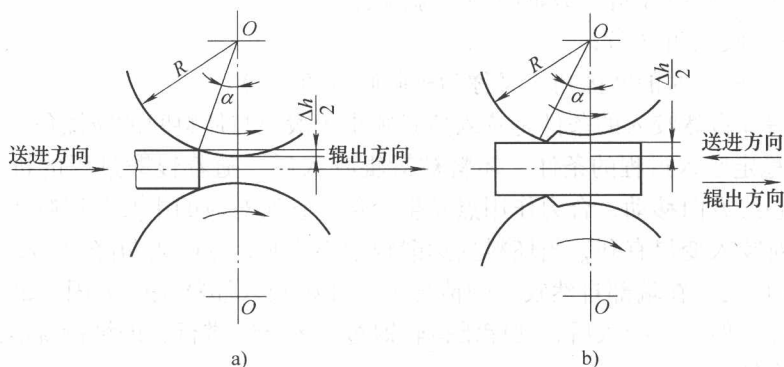


图 1-6 辊锻的两种送料方式

a) 顺向送料 b) 逆向送料

辊锻时, 在坯料的中部实现咬入的方式称为中间咬入。

在中间咬入时, 是由辊锻模的突出部位直接压入坯料中间而实现咬入, 相当于机械式钳入。因此在咬入瞬时, 并不受摩擦条件的影响, 其咬入角可以很大。但咬入后要继续进行辊锻, 必须防止打滑现象发生。这就要受到稳定咬入条件, 即摩擦条件的限制。即有

$$\alpha_z = (1.3 \sim 1.5) \alpha_d \quad (1-6)$$

式中 α_z ——中间咬入时的咬入角 ($^{\circ}$);

α_d ——端部自然咬入时的咬入角 ($^{\circ}$)。

在坯料端部自然咬入时, 通常其最大咬入角 α_d 不超过 25° , 而中间咬入时,