

# 冷摆辗 精密成形

伍太宾 胡亚民 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 冷摆辗精密成形

伍太宾 胡亚民 编著

任广升 主审



机械工业出版社

本书较系统地阐述了冷摆辗成形工艺及模具设计的基本原理和应用方法。全书内容包含冷摆辗成形技术在国内外的的发展情况、成形原理、工艺方案与工艺参数、可冷摆辗的材料及坯料的制备、模具材料的选择与热处理、模具的结构设计,并对冷摆辗成形工艺和应用实例作了全面的介绍与分析。

本书主要目的是给在生产现场和科研、教学实践第一线进行摆动辗压工艺试验和实际应用的工程技术人员提供具体、可靠的参考和指导。为此,在讲清基本概念和原理的前提下,力求深入浅出、切实可行,使所介绍的工艺设计及模具设计的方法具有较强的可操作性。

本书可作为从事摆动辗压工作的工程技术人员、科研人员的参考书,也可作为大专院校机械制造、金属压力加工及模具设计等相关专业的选修课教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

冷摆辗精密成形/伍太宾, 胡亚民编著. —北京: 机械工业出版社, 2010.10

ISBN 978-7-111-32119-4

I. ①冷… II. ①伍…②胡… III. ①辗压 IV. ①TG316.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 193654 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: 孔 劲 责任编辑: 张淑杰

版式设计: 张世琴 责任校对: 闫玥红

封面设计: 姚 毅 责任印制: 杨 曦

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.5 印张 · 282 千字

0001-2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32119-4

定价: 46.00 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: 88379772

社服务中心: (010) 88361066

网络服务

销售一部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

摆辗成形技术是在 20 世纪 60 年代以后发展起来的一种金属连续局部塑性成形加工方法。这种成形技术具有材料利用率高、生产效率高、锻件尺寸一致性好、变形力小、振动噪声小等优点。它已经在各先进工业国家的工业部门中显示出其先进性、实用性和经济性。尤其是在汽车、摩托车、拖拉机、轴承、仪表和五金等民用工业以及国防工业系统中的应用日益广泛。

目前,国外冷摆辗成形技术已经日趋成熟,不论在工艺研究、设备设计和制造,还是理论研究和应用等方面都有很大的发展。我国卓有成效的冷摆辗成形技术的试验研究与产品开发始于 20 世纪 80 年代初,经过近 30 年的发展,可摆辗材料的范围不断扩大,可冷摆辗零件的品种越来越多,形状越来越复杂,从简单形状的扬声器导磁体,到复杂形状的直齿锥齿轮、端面齿轮,都已成批生产,但仍不能适应我国国民经济发展的需要,与国外相比尚存有一定差距,因此有待我们进一步研究和推广。

冷摆辗成形技术在我国作为一种新工艺,仍处于发展阶段。目前国内尚缺少较全面和系统地介绍冷摆辗成形技术的书籍,我们较详细地收集了国内外有关冷摆辗成形技术的资料,结合作者长期积累的实践经验和见解,编写了这本《冷摆辗精密成形》。此书若能为广大从事锻压加工的工程技术人员借鉴和引用,将使我们深感欣慰。

在编写过程中,我们本着理论与实际相结合的原则,通过典型生产实例,着重讨论并阐述了冷摆辗成形过程的基础知识、冷摆辗成形工艺设计、冷摆辗模具设计和冷摆辗成形加工实例等,介绍了低碳钢、低碳低合金结构钢、中碳钢、中碳低合金结构钢的冷摆辗成形工艺及模具设计,提供了冷摆辗工艺和模具设计的必要技术知识。

本书分为九章:第 1 章,概论;第 2 章,摆辗成形的理论基础;第 3 章,冷摆辗成形设备;第 4 章,坯料的制备方法;第 5 章,冷摆辗成形工艺方案与工艺参数;第 6 章,冷摆辗模具的结构设计;第 7 章,冷摆辗模具材料及热处理工艺方法;第 8 章,低碳钢及低碳低合金结构钢零件的冷摆辗成形;第 9 章,中碳钢及中碳低合金结构钢零件的冷摆辗成形。

本书的编写分工为:伍太宾编写第 1 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章和第 9 章,胡亚民编写第 2 章、第 5 章和第 6 章,唐全波和张勇共同编写第 3 章。

本书的编写得到了有关单位的大力协助，并承蒙我国著名的特种锻造成形专家、机械科学研究总院所屬北京机电研究所的任广升教授认真审阅。

由于我们水平有限、经验不足，在书中一定存在不少错误或不妥之处，恳请读者朋友批评指正。

伍太宾 胡亚民

# 目 录

## 前言

|                         |    |                               |     |
|-------------------------|----|-------------------------------|-----|
| 第1章 概论.....             | 1  | 5.3 成形工艺参数的选择.....            | 97  |
| 1.1 摆辗的成形过程.....        | 2  | 第6章 冷摆辗模具的结构设计.....           | 103 |
| 1.2 摆辗工艺的特点.....        | 3  | 6.1 冷摆辗模具的结构组成.....           | 103 |
| 1.3 冷摆辗成形工艺的应用.....     | 5  | 6.2 冷摆辗模具的结构设计.....           | 106 |
| 1.4 国内外摆辗技术的发展概况.....   | 15 | 6.3 凸模的设计.....                | 112 |
| 第2章 摆辗成形的理论基础.....      | 22 | 6.4 冷摆辗组合凹模的结构设计.....         | 115 |
| 2.1 圆柱体的摆辗镦粗成形.....     | 22 | 6.5 冷摆辗组合凹模的设计计算.....         | 119 |
| 2.2 环形坯料的摆辗镦粗成形.....    | 35 | 6.6 冷摆辗组合凹模的压合工艺.....         | 126 |
| 2.3 圆柱体的摆辗镦挤成形.....     | 45 | 第7章 冷摆辗模具材料及热处理工艺方法.....      | 129 |
| 第3章 冷摆辗成形设备.....        | 49 | 7.1 冷摆辗模具材料的合理选择.....         | 129 |
| 3.1 摆辗机的结构.....         | 49 | 7.2 模具的常规热处理方法.....           | 134 |
| 3.2 常用的摆辗机.....         | 53 | 7.3 常用冷摆辗模具材料的热处理规范.....      | 140 |
| 第4章 坯料的制备方法.....        | 59 | 第8章 低碳钢及低碳低合金结构钢零件的冷摆辗成形..... | 150 |
| 4.1 坯料形状和尺寸的确定.....     | 59 | 8.1 轻型载货汽车 VE 泵端面凸轮的冷摆辗.....  | 150 |
| 4.2 坯料的下料方法.....        | 62 |                               |     |
| 4.3 坯料的软化处理.....        | 67 |                               |     |
| 4.4 坯料的表面处理.....        | 75 |                               |     |
| 4.5 坯料的润滑处理.....        | 80 |                               |     |
| 第5章 冷摆辗成形工艺方案与工艺参数..... | 86 |                               |     |
| 5.1 成形工艺方案的选择.....      | 86 |                               |     |
| 5.2 冷摆辗件图的设计.....       | 89 |                               |     |

8.2 摩托车磁电机轮套的  
冷摆辗 ..... 162

8.3 汽车差速器行星齿轮的  
冷摆辗 ..... 175

8.4 芯壳的冷摆辗 ..... 180

8.5 大功率轴传动摩托车  
差速轮的冷摆辗 ..... 184

第 9 章 中碳钢及中碳低合金结构  
钢零件的冷摆辗成形 ..... 194

9.1 汽车离合器盘毂的  
冷摆辗 ..... 194

9.2 汽车方向机联结环的  
冷摆辗 ..... 206

参考文献 ..... 217

# 第 1 章 概 论

金属材料在自由锻造或模锻成形时，工件的成形力均取决于平均单位压力和接触投影面积的大小；工件尺寸越大，成形力越大，需要的锻造设备的吨位也越大。在普通锻造成形时其成形力与工件的高径比(高度  $h$  与直径  $D$  之比)成反比例关系<sup>[1]</sup>。现以圆柱体简单镦粗成形为例，设镦粗成形件的高度为  $h$ 、直径为  $D$ ，并考虑接触表面的摩擦系数为  $m$ ，则其接触表面上的轴向应力  $\sigma_z$  分布如图 1-1 所示。接触面上平均压力  $p$  与屈服强度  $\sigma_s$  的关系如下式所示：

$$p/\sigma_s = 1 + mD/3h$$

由上式可知，在简单的圆柱体镦粗成形过程中，若工件的高度  $h$  越小，则镦粗时接触表面上的平均压力  $p$  越大。因此，在普通锻造中工件越薄则成形力越大；当工件的高径比达到一定的限度时，即使有大型的锻造设备，也难以成形。

然而，如果将工件的一次或几次变形分成许多次小的变形，并使之累积起来；同时限制模具与工件之间的接触面积，这样，不但可以使工件整体成形，而且也能减小工件的成形力。摆辗成形技术就是根据以上设想而研究成功的一种新型塑性成形工艺。

摆辗成形技术是在 20 世纪 60 年代以后发展起来的一种金属连续局部塑性成形加工方法，属于金属回转成形加工工艺范畴，图 1-2 所示

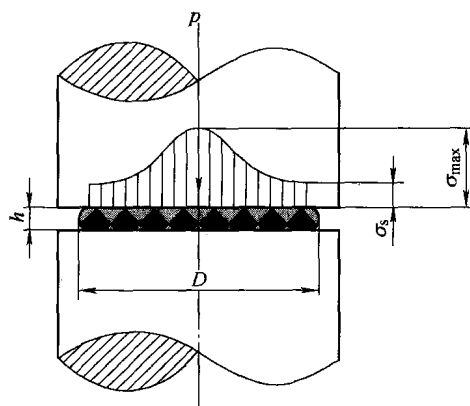


图 1-1 圆柱体镦粗成形时接触面上的轴向应力分布

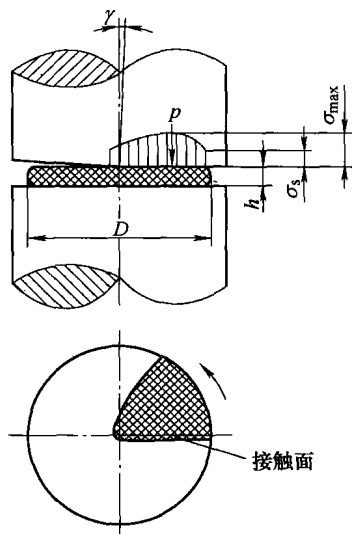


图 1-2 摆辗镦粗成形时接触面上的轴向应力分布

为摆辗镦粗成形时接触面上的轴向应力分布<sup>[2]</sup>。它是将金属坯料放入模具型腔内，在强大的压力和一定的速度作用下，迫使金属在模具型腔内流动，从而获得所需形状、尺寸，以及具有一定力学性能的零件的一种工艺技术。显然，摆辗成形加工是靠模具来控制金属流动，靠金属体积的大量转移来形成零件的。它不仅具有模锻成形工艺的材料利用率高、生产效率高、锻件尺寸一致性好等优点，又具有回转成形加工工艺的成形变形力小、振动噪声小等特点。因此，它是一种先进的金属成形加工方法。

## 1.1 摆辗的成形过程

摆辗是一种利用安装在球头上的凸模对金属坯料局部加压，并绕机器主轴线连续摆动的加工方法；图 1-3 简要地说明了摆辗的成形原理及过程<sup>[3]</sup>。图中 1 为半球形的球头，凸模 2 安装在球头模座内；凸模的中心线  $OZ'$  与机床的中心线  $OZ$  之间有一夹角  $\gamma$ ，即摆角（通常  $\gamma$  为  $1^\circ \sim 3^\circ$ ）。球头在电动机所传送的动力驱动下，以半球中心  $O$  点为顶点作摆动运动，于是  $OZ'$  轴线就绕  $OZ$  轴线转动（球头相对  $OZ'$  轴线不作自转）；同时被辗压的坯料 3 在摆辗凹模 4 里被送进液压缸推动作垂直向上进给，凸模母线即在坯料上连续不断地滚动，局部、顺次地对坯料施加压力，使其产生塑性变形。随着液压缸的不断轴向进给，以及凸模的旋转，最终使坯料整体成形。

摆辗时球头上的凸模沿着坯料表面连续滚动，并且局部施压，因而凸模与坯料的接触面积仅为一个小扇形部分（图 1-3 中下图的阴影部分），凸模压入坯料的深度  $h$  也很小，坯料的成形是逐步累积起来的。此外，与普通锻造相比，凸模与坯料之间的摩擦力性质也不同，摆辗成形时的摩擦近似于滚动摩擦，而普通锻造成形时的摩擦却是滑动摩擦。正是由于上述原因，坯料的摆辗变形力比普通锻造时要小得多。

由摆辗的成形原理可知，坯料在成形过程中，表面呈螺旋形，螺距为凸模每摆动一周后摆辗凹模的送进量  $S$ 。要获得表面平整的摆辗件，应在成形结束后停止进给，凸模继续滚辗，以消除坯料表面的螺旋形状。

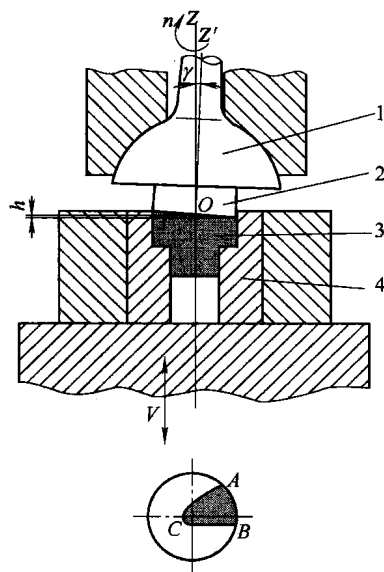


图 1-3 摆辗原理图

1—球头 2—凸模 3—坯料 4—摆辗凹模

## 1.2 摆辗工艺的特点

### 1. 摆辗工艺的优点

摆辗是一种综合了锻造、挤压和滚压等工艺特点的少无切削加工的先进工艺，作为一种连续局部的塑性变形工艺，摆辗工艺有如下优点：

1) 省力。在摆辗过程中，随着坯料的不断轴向进给，摆动的凸模对坯料逐渐压下，近似线接触，因此接触面积小，单位压力可达  $2500\sim 3500\text{MPa}$ ，适于加工高强度难变形材料，而且所需总变形力较小，从而使功率消耗也大大降低。摆辗成形所需的变形力小，仅为普通锻造变形力的  $1/20\sim 1/5$ ，如图 1-4 所示<sup>[3]</sup>。因此，成形相同形状尺寸的零件，摆辗所需的设备吨位和体积均小，制造容易。图 1-4 所示曲线为普通模锻与摆辗成形时成形力的比较，该曲线是在凸模摆动速度为  $50\text{次/min}$ 、凸模摆角  $\gamma=2^\circ$  和成形材料屈服强度  $\sigma_s=400\text{kN/mm}^2$  的条件下冷摆辗成形时得到的。图中  $P$  为摆辗变形力， $P_1$  为普通模锻力， $P_0$  为理论压力。由图 1-4 可清楚地看到，摆辗成形力比普通模锻力降低了许多。但必须指出，摆辗与普通模锻比较，只是所需要的变形力减小，而不是变形功减小，金属变形所需要的能量，即变形功仍然不变。

2) 能够成形高径比  $H/D$  很小的扁、薄类锻件。对于扁、薄类锻件，由于普通锻造时成形力与高径比  $H/D$  成反比，因而锻件越薄，成形力就越大，也就越不容易成形；甚至有时变形所需的单位压力等于或大于模具材料的屈服强度，因而变得无法成形加工。而摆辗成形在高径比  $H/D$  很小的情况下，比普通锻造要有利得多，如图 1-5 所示<sup>[3]</sup>。

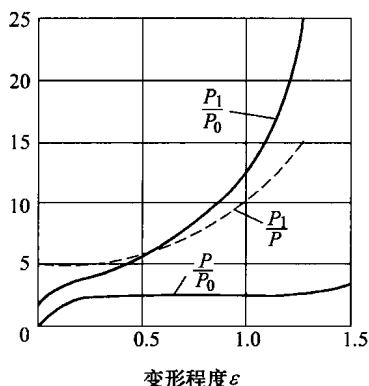


图 1-4 普通模锻与摆辗成形力的比较

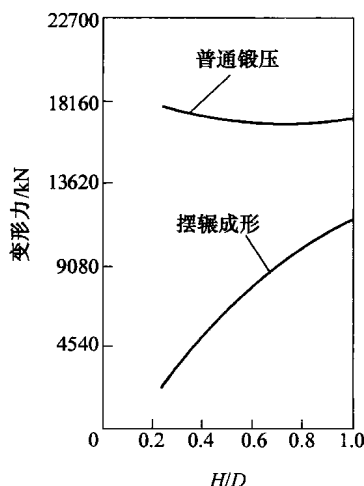


图 1-5 工件高度  $H$  和直径  $D$  的比值对普通锻压和摆辗成形时变形力的影响

3) 变形均匀, 制品的强度、硬度大大提高。摆辗成形的特点使坯料的变形均匀, 侧表面上不容易产生裂纹。摆辗成形时坯料的变形程度同普通锻造相比, 可提高 10%~15%<sup>[3]</sup>。

坯料的金属晶粒在三向变形力(切向变形力、径向变形力和轴向变形力)的作用下, 沿变形区滑移面错移, 晶粒的伸长随着变形量的增加而增加。由于金属晶格结构中的应变, 摆辗制品的强度提高, 即制品的硬度、抗拉强度 $\sigma_b$ 和屈服强度 $\sigma_s$ 增加。

4) 摆辗件的表面质量好、尺寸精度高。在摆辗过程中, 摆动的凸模不仅对被摆辗的金属有压延的作用, 而且还有整平的作用, 因此摆辗件表面粗糙度低, 一般可以达到  $Ra1.6 \sim Ra0.8\mu\text{m}$ , 最好的可达到  $Ra0.4\mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。

5) 制品范围广。摆辗工艺能够摆辗其他工艺难以成形的零件, 如汽车的 VE 泵端面凸轮、差速器锥齿轮、离合器盘毂、汽车半轴、摩托车的端面齿轮、起动棘轮、磁电动机轴套、单向器飞块、差速轮、扬声器的导磁体、枪械的调节塞、转向齿圈, 以及高压电器的静触头、动触头、动触头片等形状复杂、精度要求高的零部件(见图 1-6)。

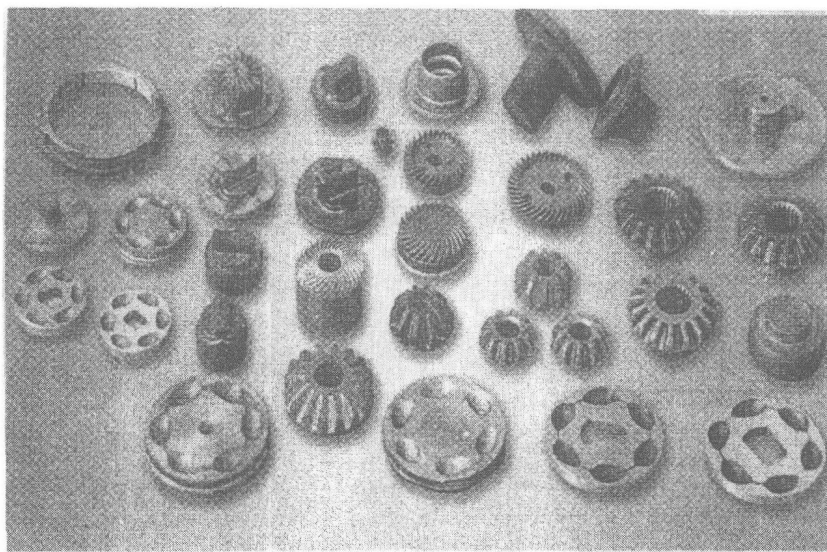


图 1-6 冷摆辗成形的零件

6) 同一台摆辗机可以进行压印、镦粗、挤压及扩孔等加工, 因而可生产多种产品。同时产品的规格范围大, 如一台瑞士 T-200 型摆辗机能生产直径为 10~120mm 的冷摆辗件。

7) 坯料来源广。可以采用空心的机加工的锻件和轧制件以及圆柱体作坯料。

8) 在摆辗过程中, 由于被摆辗的坯料是逐渐变形, 因此坯料内的任何夹杂、裂纹、砂眼等缺陷都很容易暴露出来。这样, 摆辗过程也附带起到了对摆辗件的

自动检验作用。

- 9) 节省材料, 可实现少无切削加工。
- 10) 振动和噪声小, 工人劳动条件好。
- 11) 便于实现机械化与自动化。

## 2. 摆辗成形工艺的局限性

- 1) 由于机床床身在摆辗成形过程中承受周期性偏心载荷的作用, 因此对机床的床身刚度要求很高。
- 2) 工艺参数选择不当, 摆辗件会出现中心拉薄、外形出现蘑菇形状等缺陷。
- 3) 摆辗过程中, 易实现径向尺寸的增大, 不利于高度方向上的充填, 因而对于型腔复杂且较深的工件较难于成形, 往往需要预先制坯。

## 1.3 冷摆辗成形工艺的应用

### 1.3.1 可摆辗的材料<sup>[4]</sup>

摆辗材料的组织、性能与质量是摆辗过程中的重要问题之一。它不仅关系到摆辗件的质量和性能, 也直接影响到摆辗模具的使用寿命, 在某种程度上决定着摆辗成形的难易程度。

摆辗成形工艺的主要特点就是适合于盘状类零件的生产。为了使坯料容易变形和减少模具受力, 要求在摆辗成形过程中材料应具有足够的塑性、最小的变形抗力、最高的不产生破裂的变形性能; 同时它还必须具有极好的切削加工性能。为了达到这些基本的性能要求, 对坯料的力学性能、化学成分与表面质量等方面, 都将提出严格的要求。

#### 1. 适宜于冷摆辗的材料性能

冷摆辗的材料主要根据工件的规定或要求的强度性能来决定, 另外还应考虑到材料所能达到的最大变形程度和模具的使用寿命, 以及是否需要多道次摆辗成形和使用特殊设备等。因此, 适合于摆辗的材料, 应当具有较高的塑性, 不但冷态塑性要好, 而且变形时的硬化程度也不要太强烈。随着冷作硬化程度的增加, 变形抗力上升较慢, 这样的变形条件是最有利的。

通常认为, 当材料同时具有低加工硬化速度和低硬度时, 就具有最佳的冷摆辗性能。材料的这种性质, 是由其化学成分所决定的, 而材料的化学成分则又是根据对零件的要求而选用的。因此, 必须使材料的成分合适, 并采用适当的热处理软化工艺, 以使经济效果最好。

目前, 很多材料是可以冷摆辗的。适于冷摆辗的材料主要是有色金属、低碳钢、中碳钢、低合金结构钢和某些不锈钢。

在确定冷摆辗的坯料时，应着重考虑以下几点：

(1) 金属的塑性 冷摆辗成形同冷挤压、冷镦和锻造等塑性加工工艺一样，都是利用金属的可塑性。金属的可塑性是衡量材料在经受压力加工时获得优质零件难易程度的一个工艺性能。金属的可塑性好，表明该材料适合于经受压力加工成形；金属的可塑性差，说明该材料不宜于选用压力加工方法成形。

金属的可塑性常用金属的塑性和变形抗力来综合衡量。塑性越大，变形抗力越小，则可认为金属的可塑性好；反之则差。

金属的塑性用金属的断面收缩率 $\psi$ 、伸长率 $\delta$ 和冲击韧度 $\alpha_k$ 等来表示；凡是 $\psi$ 、 $\delta$ 、 $\alpha_k$ 值越大或镦粗时在不产生裂纹的情况下变形程度越大的，其塑性越高。变形抗力是指在变形过程中金属材料抵抗模具作用的力；变形抗力越小，则变形中所消耗的能量也越少。

金属的塑性决定于变形过程中金属的综合性能、温度及应力状态等特性。许多研究表明，只要有适当的变形条件，包括合金钢在内的难变形材料的塑性可以得到很大的提高，就能使低塑性及形状复杂的零件冷成形加工。因此，为了提高材料的塑性，要尽可能在较明显的各向压应力作用下进行冷成形加工，而且要尽量避免在成形件的个别部位产生显著的拉应力。当拉应力所起的作用越大，压应力所起的作用越小时，材料在变形时表现出的塑性越低。引起成形件开裂的主要原因之一就是在材料变形过程中个别部位出现了拉应力。拉应力多数是在材料不与模具进行直接接触，或在具有一定的悬空情况下进行自由成形时产生的。因此，使变形工件与模具最大限度地接触，借助于接触压力所产生的附加压应力，可以大大提高变形材料的塑性。

一般情况下，纯金属的可塑性比合金为好。例如，纯铁的塑性就比含碳量高的钢好，变形抗力也较小；纯铜（又叫紫铜）的塑性和变形抗力均比铜合金要好。在碳钢和合金结构钢中，随着含碳量的上升和合金元素成分的增加，其塑性降低而强度增高。其中钢中碳含量（质量分数）每增加 0.10%，它的强度就要提高 60~80MPa。所以， $w_c$  在 0.30% 以上的碳钢、合金结构钢，以及轴承钢、不锈钢等材料的塑性较低。

对纯铝（如 1070A）、硬铝（如 2A11）和低碳钢（如 15 钢）三种材料的性能进行比较就可以看出（见表 1-1），纯铝是一种塑性很好的材料，它的伸长率（ $\delta$ ）达到 35%~40%，断面收缩率（ $\psi$ ）达到 70%~90%，强度极限也较低，只有 80~100MPa，它可以进行各种冷成形加工。但是，当纯铝与铜、镁等元素组成多组元的铝合金时，其组织和性能就完全变化了，如硬铝 2A11 的伸长率（ $\delta$ ）与断面收缩率（ $\psi$ ）就很低，甚至不如低碳钢。由于硬铝的伸长率（ $\delta$ ）小于 20%，故称为低塑性材料。实践证明，硬铝合金冷成形时虽然所需变形力不大，变形也不困难，但是在冷成形过程中极易产生开裂现象，这是由于硬铝合金的塑性较差的缘故。

金属的晶粒大小和分布情况对冷成形性能也有影响。一般情况下,金属与合金的晶粒尺寸增加时,它的强度降低,塑性和冷成形性能提高。材料的晶粒很小时,其塑性较高,强度也高;过大的晶粒易使冷成形零件的表面粗糙和裂纹产生。对于碳钢和合金结构钢,其合理的晶粒平均直径为  $0.02\sim 0.06\text{mm}$ 。对于所有的冷成形材料都要求有尽可能均匀的晶粒结构。

表 1-1 材料性能对比

| 力学性能<br>材料牌号 | 抗拉强度 $\sigma_b$<br>/MPa | 屈服强度 $\sigma_s$<br>/MPa | 伸长率 $\delta$<br>(%) | 断面收缩率<br>$\psi$ (%) | 硬度 HBW | 备 注   |
|--------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------|-------|
| 纯铝 (1070A)   | 80~100                  | 30                      | 35~40               | 70~90               | 25~30  | 退火    |
| 硬铝 (2A11)    | 380~420                 | 240                     | 15                  | 30                  | 100    | 淬火+时效 |
| 硬铝 (2A11)    | 210                     | 110                     | 18                  | 38                  | 60~70  | 退火    |
| 15 钢         | 360~380                 |                         | 28                  | 55                  | 110    | 退火    |

(2) 金属的变形抗力 金属的变形抗力就是金属材料塑性变形所需要的应力。冷成形时金属材料的变形抗力越小,成形加工时所需的压力也就越小;随着变形抗力的增加,金属材料的断面收缩率和伸长率都下降。

通常,变形抗力随着变形程度的增加而变大。不同材料的变形抗力截然不同,有色金属及其合金冷成形时的变形抗力比较小;对于碳钢和合金结构钢来说,随着含碳量和合金元素含量的增加,变形抗力明显增大。随着变形程度的提高,有色金属及其合金的变形抗力上升的幅度较小,而碳钢和合金结构钢都有明显上升。

因此,冷成形材料的变形抗力越小越好。通过改进模具结构,提高金属软化处理的效果,选用塑性较好、具有低硬化速率的材料,都可以达到冷成形时变形抗力低的目的。

(3) 加工硬化 冷成形后,所有阻止金属变形的各项性能指标都有不同程度的提高:弹性极限增加  $100\%\sim 300\%$ ,强度极限增加  $30\%\sim 120\%$ ,硬度增加  $60\%\sim 150\%$ ,即金属产生了加工硬化现象。相反,塑性指标都有所下降:伸长率减小  $20\%\sim 90\%$ ,断面收缩率减小  $20\%\sim 60\%$ 。变形程度不同的冷成形过程,其硬化程度也是不同的。加工硬化后的材料变得硬而脆,塑性变形的能力减低,也就是说加工硬化会阻碍金属继续塑性变形。

但是,如果这一变化比较缓慢,即随着冷作硬化程度的增加,变形抗力上升较慢,强度、硬度上升和断面收缩率、伸长率下降的幅度都不大,就是说,冷成形时显示出不大的应变硬化性,这样继续塑性变形又将成为可能,而使金属达到较高的变形程度。这一点在选择金属材料时是很重要的。

因此,选择时效硬化敏感性较小和具有低加工硬化速度的金属材料,对冷成形加工十分有利。低的加工硬化指数,被认为是良好的可成形性的指标。

(4) 表面质量 为了避免冷成形时成形件表面开裂,提高冷成形件的表面质

量, 良好的材料表面是十分重要的。普通热轧棒料的表面大多数不能满足冷成形工艺要求。冷成形一般用尺寸精度高、表面质量好的车加工或磨光的材料。

材料的表面缺陷如杂质、夹砂、擦伤、裂纹等, 一般都零星地分布在材料表面上, 即使是合格的材料, 加工时也难免产生缺陷。因此, 应加强对原材料的检查和验收。

为了查明材料表面有无缺陷, 以及确定金属的冷变形性能, 通常采用冷镦粗试验方法进行鉴别。表面有深痕, 内部有叠层、裂纹和夹砂的材料, 冷镦粗时就会充分地暴露出来。

冷成形工艺对材料表面的基本要求是: 表面洁净、光滑, 不应有发裂、气泡、划伤及氧化皮等缺陷, 并且材料的断口和酸洗试片的组织不应有分层、缩孔、非金属夹杂物和白点等。

(5) 使用性能 上述几点, 主要基于改善材料变形性能方面的考虑。至于那些主要从切削加工性能方面考虑选择的易切削钢 Y12 钢以及 HPb59-1 铅黄铜等易切削材料, 完全可以用低碳钢 (如 20 钢) 和含铜量 (质量分数) 大于 60% 的黄铜 (如 H68 黄铜) 等来代替。但是, 不论选择何种材料, 冷变形后的强度和硬度都必须达到产品图要求的指标, 同时还要满足装配和使用要求。这一点, 在确定或选择适合于冷成形加工的材料时, 应该首先考虑。

试验证实, 低碳钢经过 75% 以上变形程度的冷成形加工后, 强度可以提高一倍左右, 即低碳钢 15 钢、20 钢冷成形后的强度能够超过中碳钢 35 钢, 而与中碳钢 50 钢的性能相接近。说明采用低碳钢冷成形后可以代替中碳钢或高碳钢。产品图上规定的中碳钢材料, 如 35 钢、40 钢、45 钢和 50 钢, 可以用低碳钢 20 钢代替。合金结构钢 20Cr 和 40Cr, 若用低碳钢 20 钢代替时, 通常在冷成形后要对表面进行强化热处理。

如果靠加工硬化还不足以提高到要求的性能指标, 或满足不了装配及使用时, 则必须考虑改进工艺, 重新选择材料, 或采用强化处理工艺等。

例如, 硬铝合金冷成形时, 强化效果不显著, 冷成形后的硬度和强度都达不到技术要求上规定的性能指标。因此, 对于有性能要求的铝合金冷成形件, 通常需要进行淬火和时效处理。从改善铝合金冷成形件的后续切削加工方面进行考虑, 这种处理也十分必要。对于表面耐磨性、表面硬度要求较高的零件, 在冷成形工艺无法达到时, 通常要采用表面强化热处理工艺, 如渗碳、淬火、氮化处理等。

### 2. 冷摆辗的常用材料

20 世纪 70 年代以后, 可用冷成形加工的材料品种不断扩大, 不但有色金属及其合金, 如纯铝、防锈铝、纯铜及含铜量在 60% 以上的黄铜能冷成形, 强度较高、塑性较差的硬铝合金 2A11、2A12、2A13, 以及锻铝 2A14、6063 等, 也都可以用冷成形进行加工。可以冷成形的钢材已经从低碳钢发展到合金结构钢和不

锈钢，甚至一些强度很高的材料如 30CrMnSi 等，也可以在一定的变形程度内进行冷成形加工。

为了获得综合的技术经济效果，从目前冷成形生产的实际出发，可供冷成形用的材料还是有限的，主要有以下几种：

- 1) 纯铝（1070A、1060、1050A、1035、1200 等）。
- 2) 铝合金（5A02、5A05、3A21、2A11、2A12、2A13、2A14、6061、6063 等）。
- 3) 纯铜（T1、T2、T3）与无氧铜（TU1、TU2 等）。
- 4) 黄铜（H80、H68、H62、HPb59-1 等）。
- 5) 锡磷青铜（QSn6.5~0.15 等）。
- 6) 镍（Ni-1、Ni-2 等）。
- 7) 锌与锌镉合金。
- 8) 纯铁（DT1、DT2、DT3、DT4 等）。
- 9) 低碳钢（A1、A2、B1、B2、08、10、15、20、25 等）。
- 10) 深冲钢（S10A、S15A、S20A）。
- 11) 中碳钢（30、40、45、50 等）。
- 12) 低合金结构钢（15Cr、20Cr、20CrMo、20CrMnTi、16Mn、20MnB、16MnCr5、40Cr、42CrMo、30CrMnSiA、35CrMnSi、30CrMnSiNi2 等）。
- 13) 不锈钢（1Cr13、0Cr13、2Cr13、0Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Ti 等）。

（1）工业纯铝及铝合金 工业纯铝是很理想的冷成形材料，不仅变形抗力小、塑性好，而且冷作硬化不强烈，是一种冷成形性能良好的材料。常用于冷成形的工业纯铝的主要化学成分及力学性能见表 1-2。

表 1-2 常用冷成形的工业纯铝的化学成分及力学性能

| 牌 号 | 主要化学成分(质量分数, %) |      | 状 态  | 力 学 性 能         |                 |              |            |       |
|-----|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|--------------|------------|-------|
|     | Al              | 杂质总量 |      | $\sigma_s$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa | $\delta$ (%) | $\psi$ (%) | HBW   |
| L1  | 99.7            | 0.3  | 退火   | 70~110          | 50~80           | 35           | 80         | 15~25 |
| L2  | 99.6            | 0.4  |      |                 |                 |              |            |       |
| L3  | 99.5            | 0.5  |      |                 |                 |              |            |       |
| L4  | 99.3            | 0.7  | 冷作硬化 | 150             | 100             | 6            | 60         | 32    |
| L5  | 99.0            | 1.0  |      |                 |                 |              |            |       |
| L6  | 98.8            | 1.2  |      |                 |                 |              |            |       |

Al-Mg 系防锈铝合金如 5A02、5A05 和 Al-Mn 系防锈铝合金 3A21，也是一种较为理想的冷成形材料。其强度低、塑性高，压力加工性能良好。但是这些材料具有较高的硬化趋向，且不能进行热处理，主要靠冷作硬化来强化。常用于冷成形的防锈铝合金有 5A02 和 3A21，其化学成分及力学性能见表 1-3。

表 1-3 5A02 和 3A21 防锈铝的化学成分及力学性能

| 牌 号  | 主要化学成分（质量分数，%） |         |          | 状 态 | 力 学 性 能         |                 |              |            |     |
|------|----------------|---------|----------|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------|-----|
|      | Al             | Mg      | Mn       |     | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_s$ /MPa | $\delta$ (%) | $\psi$ (%) | HBW |
| 5A02 | 97.85~96.8     | 2.0~2.8 | 0.15~0.4 | 退火  | 190             | 80              | 23           | 64         | 45  |
|      |                |         |          | 半硬  | 250             | 210             | 6            |            | 60  |
| 3A21 | 99.0~98.4      | —       | 1.0~1.6  | 硬化  | 220             | 180             | 5            | 50         | 55  |
|      |                |         |          | 退火  | 130             | 50              | 23           | 70         | 30  |

Al-Cu-Mg 系合金即硬铝型合金如 2A11、2A12 等，其中 2A11 为标准硬铝、2A12 为高强度硬铝。目前应用较多的就是这两种硬铝。与纯铝、低碳钢比较，硬铝的塑性较差、冷成形后的强化效果不甚显著，且极易产生裂纹。因此，必须进行良好的软化和润滑处理，制订不产生拉应力的最合理的变形条件和工艺方案。硬铝合金的化学成分和力学性能见表 1-4。

表 1-4 2A11 和 2A12 硬铝的化学成分及力学性能

| 牌 号  | 主要化学成分（质量分数，%） |         |         |      |    | 状 态 | 力学性能（室温）        |              |         |
|------|----------------|---------|---------|------|----|-----|-----------------|--------------|---------|
|      | Cu             | Mg      | Mn      | 杂质总和 | Al |     | $\sigma_b$ /MPa | $\delta$ (%) | HBW     |
| 2A11 | 3.8~4.8        | 0.4~0.8 | 0.4~0.8 | 1.80 | 余量 | 退火  | <240            | 12           | 55~65   |
|      |                |         |         |      |    | 淬火  | 380~420         | 8~12         | 95~110  |
| 2A12 | 3.8~4.9        | 1.2~1.6 | 0.3~0.9 | 1.50 | 余量 | 退火  | <240            | 12~14        | 55~65   |
|      |                |         |         |      |    | 淬火  | 440~470         | 8~12         | 110~120 |

Al-Mg-Si-Cu 系合金即锻铝合金如 2A14、6061、6063 等，它们亦为高强度铝合金。与硬铝比较，含硅量较高，为  $w_{si}=0.60\% \sim 1.20\%$ ，硅可使 2A14 合金在热处理状态下的强度增加，淬火和人工时效后强度可达到 470MPa，比 2A11 高出 50MPa 以上。但是塑性却不及 2A11，尤其是冷态下的塑性较差，容易形成裂纹。因此，在冷成形加工锻铝合金如 2A14 等时，要特别注意软化效果及工艺变形条件。锻铝合金 2A14 的化学成分和力学性能见表 1-5。

表 1-5 锻铝合金 2A14 的化学成分及力学性能

| 牌 号  | 主要化学成分（质量分数，%） |         |         |         |    | 状 态 | 力学性能（室温）         |            |              |       |
|------|----------------|---------|---------|---------|----|-----|------------------|------------|--------------|-------|
|      | Cu             | Mg      | Mn      | Si      | Al |     | $\sigma_b$ (MPa) | $\psi$ (%) | $\delta$ (%) | HBW   |
| 2A14 | 3.9~4.8        | 0.4~0.8 | 0.4~1.0 | 0.6~1.2 | 余量 | 退火  | 190~215          | 43.5       | 10~15        | 62~65 |
|      |                |         |         |         |    | 淬火  | >460             | 25         | >10          | >130  |

(2) 工业纯铜及铜合金 纯铜又称紫铜，是人类最早使用的金属之一。纯铜具有优良的冷成形加工性能，其强度不高， $\sigma_b$  只有 200~240MPa， $\sigma_s$  只有 60~70MPa，而塑性极好，伸长率可达 50%，断面收缩率达到 70%；而且冷作硬化不强烈，是一种冷成形性能良好的材料。常用于冷成形的工业纯铜的主要化学