

普通高等院校机电工程类规划教材

普通高等教育“十二五”规划教材

# 金属塑性成形工艺 及模具设计

施于庆 主编

普通高等院校机电工程类规划教材

普通高等教育“十二五”规划教材

# 金属塑性成形工艺 及模具设计

施于庆 主编

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是编者在多年的教学和工程实践经验的基础上,对金属塑性成形工艺及模具设计的基本原理和设计方法进行了系统的论述。全书共分10章,第1章绪论;第2章金属塑性变形的力学基础;第3章冲压加工概述;第4章冲裁工艺及冲裁模设计;第5章弯曲工艺及弯曲模设计;第6章拉深工艺及拉深模设计;第7章其他板料成形工艺及模具;第8章挤压工艺及挤压模具;第9章冷态模锻成形工艺及模具;第10章金属塑性成形CAE分析。每章附有思考与练习题。本书的第10章是以有限元分析软件ANSYS/LS-DYNA为平台并结合拉深和轧制成形,对ANSYS/LS-DYNA软件的模型建立、网格划分、前处理、计算求解及后处理等都进行了详尽的介绍。以引导读者快速地掌握应用CAE软件,并提高解决工程实际问题的能力。

本书适用于高校机械类各相关专业教材,也可供相关工程技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形工艺及模具设计/施于庆主编.--北京:清华大学出版社,2012.5

(普通高等院校机电工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-28288-4

I. ①金… II. ①施… III. ①金属压力加工—塑性变形—生产工艺—高等学校—教材 ②金属压力加工—模具—设计—高等学校—教材 IV. ①TG3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第039672号

责任编辑:庄红权 孙 坚

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.75

字 数:382千字

版 次:2012年6月第1版

印 次:2012年6月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.80元

产品编号:037018-01

# 前 言

金属塑性加工作为一种少无切屑的零件的生产方法,被广泛应用于汽车、航空航天、机电、军工等工业生产领域,而模具是实现金属塑性成形不可缺少的工艺装备。本书是编者在多年的教学和工程实践经验的基础上,对金属塑性成形工艺及模具设计的基本原理和设计方法进行了系统的论述。全书共 10 章,每章附有思考与练习题。

本书通过论述冲裁、弯曲、拉深及挤压等主要成形工艺的基本理论、特点及工艺计算等内容,力求说明采用这些工艺的相互间的内在联系及在模具结构和模具零件设计中带有共性的问题。在编写中尽力汲取国内外同类教材的长处,努力使课程内容的科学性、先进性、系统性与应用性相结合,注重学生学习能力、实践能力和创新能力的培养。

为了拓展学生的知识面并应对未来模具设计的要求,本书尽可能多地介绍成形技术发展的先进技术,详细介绍了金属塑性成形有限元分析(如拉深及轧制等)前处理、求解和后处理;前处理设置单元属性、构建模型、划分网格、定义接触、初始条件、载荷及约束、求解时间和输出文件等过程。通过板厚减薄或增厚以及体积成形的应力应变变化等,使学生能够准确地预测板料成形过程中的破裂、起皱,评估板料的极限成形性能,以及体积成形中的形状和尺寸变化,为金属塑性成形工艺及模具设计提供参考依据,以减少模具设计时间及试模周期,并优化模具结构。

本书适用于高校机械类各相关专业教材,也可供相关工程技术人员参考使用。

本书由浙江科技学院施于庆主编,在编写过程中得到了刘红教授的悉心指导,并提出了许多建设性意见,在此表示衷心的感谢。另外,借此机会对为本书编写完稿做了大量工作的管爱枝、郑军、王依红等以及所参考文献的作者表示深深的谢意。由于编者理论水平和经验有限,书中难免有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2012 年 2 月

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论            | 1  |
| 1.1 金属塑性成形的特点及分类    | 1  |
| 1.2 金属塑性成形技术现状与发展趋势 | 3  |
| 1.3 本课程的任务          | 4  |
| 思考与练习题              | 5  |
| 第 2 章 金属塑性变形的力学基础   | 6  |
| 2.1 金属塑性变形概述        | 6  |
| 2.2 金属塑性变形的力学基础     | 7  |
| 思考与练习题              | 19 |
| 第 3 章 冲压加工概述        | 20 |
| 3.1 冲压加工的特点及其应用     | 20 |
| 3.2 冲压加工基本工序        | 21 |
| 3.3 冲压件所用的材料        | 23 |
| 3.4 冲压常用设备          | 25 |
| 思考与练习题              | 31 |
| 第 4 章 冲裁工艺及冲裁模设计    | 32 |
| 4.1 冲裁工艺分析          | 34 |
| 4.2 冲裁间隙            | 38 |
| 4.3 冲裁模刃口尺寸的计算      | 42 |
| 4.4 冲裁力和冲裁功         | 49 |
| 4.5 排样与材料的经济利用      | 53 |
| 4.6 冲裁模的基本形式与构造     | 59 |
| 4.7 冲裁模主要部件与零件的构造   | 66 |
| 4.8 冲裁模设计要点         | 82 |
| 思考与练习题              | 89 |
| 第 5 章 弯曲工艺及弯曲模设计    | 90 |
| 5.1 弯曲变形过程及变形特点     | 90 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2 最小弯曲半径.....               | 97         |
| 5.3 弯曲卸载后的回弹 .....            | 100        |
| 5.4 弯曲件毛坯尺寸计算 .....           | 105        |
| 5.5 弯曲力计算 .....               | 107        |
| 5.6 弯曲件的工艺性 .....             | 108        |
| 5.7 弯曲件的工序安排 .....            | 110        |
| 5.8 弯曲模设计 .....               | 111        |
| 思考与练习题.....                   | 115        |
| <b>第 6 章 拉深工艺及拉深模设计.....</b>  | <b>116</b> |
| 6.1 拉深的变形过程 .....             | 117        |
| 6.2 拉深过程的力学分析 .....           | 120        |
| 6.3 圆筒形件的拉深系数和拉深次数的确定 .....   | 123        |
| 6.4 圆筒形件的拉深工艺计算 .....         | 130        |
| 6.5 其他形状零件的拉深 .....           | 139        |
| 6.6 典型拉深模结构 .....             | 149        |
| 6.7 拉深新工艺 .....               | 151        |
| 思考与练习题.....                   | 159        |
| <b>第 7 章 其他板料成形工艺及模具.....</b> | <b>161</b> |
| 7.1 胀形工艺及胀形模 .....            | 161        |
| 7.2 翻边工艺及翻边模 .....            | 164        |
| 7.3 缩口工艺及缩口模 .....            | 169        |
| 思考与练习题.....                   | 172        |
| <b>第 8 章 挤压工艺及挤压模具.....</b>   | <b>173</b> |
| 8.1 挤压的基本类型和挤压工艺的特点 .....     | 173        |
| 8.2 挤压变形分析及单位挤压力的计算 .....     | 174        |
| 8.3 挤压模具设计 .....              | 178        |
| 思考与练习题.....                   | 180        |
| <b>第 9 章 冷态模锻成形工艺及模具.....</b> | <b>181</b> |
| 9.1 冷态模锻成形的工艺特点及分类 .....      | 181        |
| 9.2 半闭式模锻变形力计算 .....          | 184        |
| 9.3 半闭式模锻设计 .....             | 186        |
| 思考与练习题.....                   | 187        |

---

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 金属塑性成形 CAE 分析</b> .....   | 188 |
| 10.1 金属塑性成形分析有限元基本思想 .....          | 188 |
| 10.2 基于 LS-DYNA3D 的金属塑性成形分析方法 ..... | 190 |
| 10.3 圆筒形件的拉深成形分析 .....              | 194 |
| 10.4 中厚板轧制分析 .....                  | 223 |
| 思考与练习题 .....                        | 243 |
| <b>参考文献</b> .....                   | 245 |

# 第 1 章 绪 论

金属塑性成形是金属加工的方法之一。它是在外力作用下使金属产生塑性变形,从而加工成所需形状和尺寸的零件的加工方法。因此也把塑性成形称为塑性加工或压力加工。

## 1.1 金属塑性成形的特点及分类

### 1. 特点

与金属切削加工、铸造及焊接等加工方法相比,金属塑性加工主要有以下特点:

(1) 组织及性能得到改善和提高 金属材料经过相应的塑性加工后,其内部组织发生显著变化,例如炼钢铸出的钢锭,其内部组织疏松多孔,晶粒粗大且不均匀,偏析也比较严重,必须经过锻造、轧制或挤压等塑性加工,才能使其结构致密、组织改善、性能提高。因此,90%以上的铸钢都要经过塑性加工成钢坯或钢材。此外,经过塑性成形后,金属的流线分布合理,从而也改善了制件的性能。

(2) 材料利用率高 金属塑性成形主要是靠金属在塑性状态下的体积转移来实现,少屑甚至是无屑加工,材料利用率高,一般无需再加工,节约了大量的金属材料 and 能量,生产成本低。

(3) 生产效率高并且适用于大量生产 这一点在金属的轧制、拉丝和挤压等工艺中尤为明显。在冲压工艺中,随着生产机械化与自动化程度的提高,生产率也相应得到提高。例如,高速冲床的行程次数已达 1500~1800 次/min,汽车车身等大型零件每分钟可生产几件到几十件,小零件的高速冲压每分钟可生产几千件以上。

(4) 尺寸精度高 如冲压件的尺寸公差与形状精度由冲模保证,所加工出的零件质量稳定,互换性好,精密模锻的伞齿轮,其齿形部分可不经切削加工直接使用。

由于金属塑性加工具有上述这些特点,因而被广泛应用于汽车、航空航天、军工、机电、仪表及家用电器等工业生产部门。

### 2. 分类

金属塑性成形的种类很多,分类方法目前还不统一。按照成形的特点,一般把塑性加工分为轧制、拉拔、挤压、锻造和冲压五大类。部分成形方式如图 1-1 所指示。每类又包括多种加工方法,形成各自的工艺领域。在轧制、拉拔和挤压的形成过程中,变形区是不变的,属稳定的塑性流动过程,适合于连续的大量生产,提供型材、板材、管材和线材等金属原材料,属于冶金工业领域;而锻造和冲压成形的变形区随变形过程而变化,属非稳定的塑性流动过程,适合于间歇生产,用于提供机器零件或坯料,属于机械制造工业领域。锻造属体积成形,而冲压属于板料成形,故也称板料冲压。

依靠压力的作用使金属产生变形的方式有轧制、锻造和挤压。

轧制 轧制是坯料通过旋转的轧辊受到压缩,使其横截面减小,形状改变,长度增加。

轧制可分为纵轧、横轧和斜轧。纵轧时,两工作轧辊旋转方向相反,轧件的纵轴线与轧



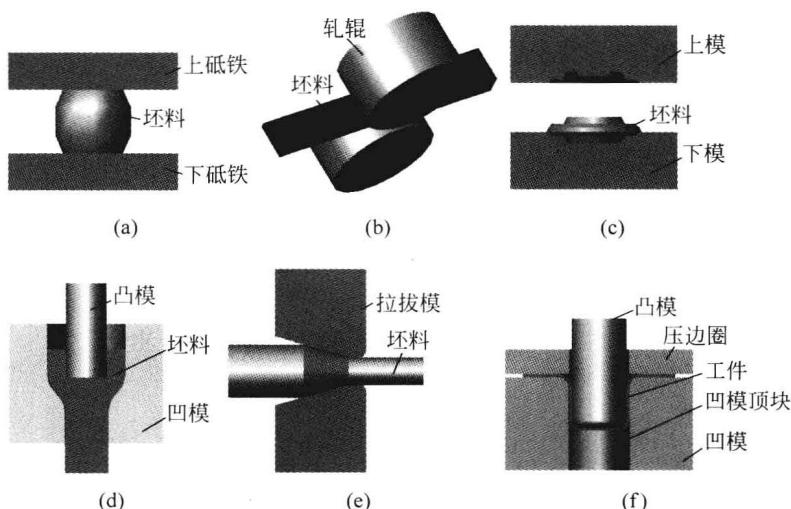


图 1-1 常用金属塑性成形方法

(a) 自由锻；(b) 轧制；(c) 模锻；(d) 挤压；(e) 拉拔；(f) 板料拉深

辊轴线垂直；横轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线平行；斜轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角。用轧制方法可生产板材、带材、型材，管材以及一定的变断面的型材，变形断面轴及钢球等。

**锻造** 锻造通常分为自由锻和模锻。自由锻一般是在锻锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭或块料锻成所需形状和尺寸的加工方法。自由锻时不使用专用模具，因而锻件的尺寸精度低，生产率也不高，主要用于单件、小批量生产、大锻件生产或冶金厂的开坯。模锻是在模锻锤或热模锻压力机上利用模具来成形。由于金属的成形受模具控制，因此模锻件具有相当精确的外形和尺寸，也有相当高的生产率，适合于大批量生产。

**挤压** 挤压是将坯料放入挤压机的挤压筒中，在挤压杆的压力作用下，使金属从一定形状和尺寸的模孔中流出。挤压有正挤压、反挤压和复合挤压等。正挤压时挤压杆的运动方向与从模孔挤出金属的流动方向一致；反挤压时挤压杆的运动方向与从模孔中挤出金属的流动方向相反；复合挤压时挤压杆的运动方向与从模孔挤出金属的流动方向一部分一致，一部分不一致。用挤压法可以生产各种断面的型材、管材以及机器零件。

主要靠拉力作用使金属产生变形的方式有拉拔、冲压(拉深等成形工序)和拉形。

**冲压(拉深等)成形工序**是在曲柄压力机或油压机上，用模具把板料拉进凹模中成形，用于生产各种薄壁空心零件，如各种空间曲面零件及覆盖件等。

**拉形** 拉形是板料两端在拉力作用下沿一定形状的模具贴模成形，如飞机蒙皮等大型曲面零件。带材的拉力矫直也属于这种方式。

主要靠弯矩和剪力作用使金属产生变形的方式有弯曲和剪切。

**弯曲** 弯曲是坯料在弯矩的作用下成形，如板料在模具中弯曲成形，板带材料的折弯成形、钢材的矫直等。

**剪切** 坯料在剪力作用下进行剪切变形，如板料在模具中的冲孔，落料，切边，板材和钢材的剪切等。

随着生产技术的发展,上述基本加工变形方式互相渗透,进而产生新的组合加工变形方式。如锻造和纵轧组合的辊锻工艺,可生产各种变断面零件(如连杆等),锻造和横轧组合的楔横轧工艺,可生产各种阶梯轴和锥形轴,锻造扩孔和横轧组合的辗环工艺,可生产各种断面的冷弯型材及焊管等。这说明,各种加工变形方式的互相渗透和适当组合,可开发出高效率的新的塑性成形工艺方法。此外,随着技术的发展,也不断形成新的塑性加工方法,例如连铸连轧、液态模锻、等温锻造和超塑性成形等。所有这些都进一步扩大了塑性成形的应用范围。

塑性加工按成形工件的温度还可分为热成形、冷成形和温成形三类。热成形是在充分进行再结晶的温度以上所完成的加工,如热轧、热锻、热挤压等;冷成形是在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工,如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等;温成形是在介于冷热成形之间的温度下进行的加工,如温锻、温挤压等。

## 1.2 金属塑性成形技术现状与发展趋势

金属塑性加工可以追溯到远古时期的造币压印,伴随着冶金术的发展,各种金属加工方法应运而生。到目前为止,金属塑性加工不但能加工很微小的零件,也能加工很大的零件,原先采用切削加工或其他加工方法的许多零件正逐步被金属塑性加工方法所取代,其占机械零件加工中的比例越来越高,甚至于达到了60%。如一辆汽车2万多个零件中的80%都采用金属塑性加工方法完成。近几年,我国在金属塑性成形领域科学技术取得了许多科研成果。主要成果如下:

(1) 大锻件成形 有限元数值模拟有明显进展,预测锻造过程中材料组织演化已在生产上得到应用;世界最大的自由锻造液压压力机已投入使用;特大型复杂锻件成形工艺取得高水平成果,第三代核电站主要锻件已试制成功。

(2) 回转成形 楔横轧成形理论研究深入发展,避免产生轧件内部缺陷的方法已在生产实际中得到应用;世界最大楔横轧机已生产出世界最大楔横轧件;辊锻、旋压等回转加工工艺在生产中发挥重要作用。

(3) 板材与管材成形 高强钢板材热冲压与淬火联合工艺已在汽车零件生产上得到应用;多点成形工艺在汽车与船舶复杂工件生产上发挥作用;内高压成形技术进步明显,400MPa内高压发生装置已开始 in 液压压力机上使用。

(4) 局部加载近净成形 基本原理与近净成形工艺开发取得进展,已应用这一新技术生产出近净成形大型钛合金结构件;复杂形状大型环件已应用于许多工业领域。

(5) 精密体积成形 基本理论与新工艺研究取得较快进展;国内企业已能生产汽车工业所需的大批量精密冷锻件与温锻件;复杂零件成形所需模具设计与制造能力增强,大部分模具不再需要进口。

展望今后一段时期国内外塑性成形技术,大约会呈现以下几个发展趋势:

(1) 提出流动方向假说。质点沿着该点处平均应力梯度最大的方向流动,通过二维和三维问题数值模拟结果观察,流动方向与平均应力梯度的一致度很好,但是,还需要实验验证或理论证明。

(2) 通过塑性理论证明轴对称变形流动分界面定理。在轴对称变形中,流动分界面与

罗德系数的零值面重合,推论:流动分界面上的应变类型为平面应变类型,流动分界面两侧的应变类型相反。

(3) 提出定量测量体积变形体内部流线和应变的新方法——嵌入螺柱法和套环螺纹。优点是变形前剖分试样,且不受温度和受力条件的限制,可以同时获得应变分布和流线。

(4) 进一步拓宽成形零件的形状复杂程度,即根据成形件的形状特征,设法运用不同的成形方法,包括运用温锻方法,以提高复杂形状零件的成形率。

(5) 着力研究更积极有效的润滑和材料软化处理方法,以期进一步改善现行金属塑性材料的成形条件,并扩大金属塑性成形材料的品种。

(6) 开发以塑性成形和塑性精整为终结工序的高附加值复合工艺技术,使塑性成形或塑性精整工序与其他(如热锻、铸造、板料冲压、粉末冶金、切削加工等)工序相结合,充分发挥各自的优势,使所成形的产品,不仅符合精度、性能方面的要求,同时可以大大降低成本,以将塑性成形的优势发挥在刀刃上。

(7) 从方便金属塑性成形并能直接满足产品使用要求相结合的角度,开发新一代的金属塑性成形材料,以谋求最理想的金属塑性成形经济效益。

(8) 进一步开发和完善快捷、有效的工业试验方法、以期针对不同的生产预期(包括锻件尺寸精度、各项性能要求、生产批量、生产率要求等),对锻件塑性成形各环节的难易、优劣等作出正确的鉴别。

(9) 全面推广应用 CAD/CAM/CAE(计算机辅助设计/计算机辅助制造/计算机辅助工程)技术,为适应零件的不同形状与尺寸的加工需要,在构建目标函数、优化设计变量和提高优化程序通用性等方面,进一步探索和完善基于有限元分析的优化设计方法在金属体积塑性成形工艺及模具设计中的合理应用。

(10) 采用逆向工程技术,可以快速、准确地把复杂的实物复制出来,同时,通过实物复制来制造模具,缩短模具制造周期。

(11) 在模具结构、高效、精密、快速、自动化、缩短模具制造周期,降低模具制造成本、模具材料、模具材料热处理等方面,寻求提高金属塑性成形及模具承载能力的新途径。

### 1.3 本课程的任务

金属塑性成形方法多种多样,特点不同,但它们有着共同的基础和规律。金属塑性成形及模具设计课程的目的就在于科学地、系统地阐明这些基础和规律,为合理制定塑性成形工艺奠定理论基础。因此,本课程的任务是:

(1) 掌握金属塑性变形的物理学和力学基础,即掌握应力、应变,应力应变关系和准则等塑性理论基础知识,能对金属产品零件的受力变形过程进行应力、应变分析,并寻找塑性变形物体的应力、应变分布规律。

(2) 了解金属的塑性变形行为以及变形条件对其塑性和变形抗力的影响,以使工件在成形时获得最佳的塑性状态、最高的变形效率和优质的性能。塑性成形时的金属流动规律和变形特点,分析影响金属塑性流动的各种因素,以便合理地确定坯料尺寸和成形工序,使工件顺利成形。

(3) 掌握设计一般复杂程度成形零件的工艺过程和一般复杂程度模具的设计方法,能

够运用金属塑性成形力学问题的各种解法及其在具体工艺中的应用,分析解决成形零件生产中常见的产品质量、工艺及模具技术方面的问题,并能够合理地选择成形设备。

### 思考与练习题

1. 什么是金属的塑性? 什么是塑性成形? 与金属的切削加工相比,塑性成形有何特点?
2. 金属塑性成形一般按什么方法分类,试举例说明常用金属塑性成形方法。
3. 本课程的任务有哪些?

## 第2章 金属塑性变形的力学基础

### 2.1 金属塑性变形概述

塑性是指金属在外力的作用下,能稳定地发生永久变形而不破坏的能力。金属在外力作用下由弹性状态进入塑性状态,研究金属在塑性状态下的力学行为称为塑性理论或塑性力学,它是连续介质力学的一个分支。为了简化研究过程,塑性理论通常采用以下假设:

(1) 变形体是连续的,即整个变形体内不存在任何空隙。这样,应力、应变、位移等物理量也都是连续的,并可用坐标的连续函数来表示。

(2) 变形体是均质的和各向同性的。这样,从变形体上切取的任一微元体都能保持原变形体所具有的物理性质,且不随坐标的改变而变化。

(3) 在变形的任意瞬间,力的作用是平衡的。

(4) 在一般情况下,忽略体积力的影响。

(5) 在变形的任意瞬间,体积不变。

在塑性理论中,分析问题需要从静力学、几何学和物理学等角度来考虑。静力学角度是从变形体中质点的应力分析出发,根据静力学平衡条件导出该点附近各应力分量之间的关系式,即平衡微分方程。几何学角度是根据变形体的连续性和均匀性,用几何的方法导出应变分量与位移分量之间的关系式,即几何方程。物理学角度是根据实验与假设导出应变分量与应力分量之间的关系式。此外,还要建立变形体从弹性状态进入塑性状态并使塑性变形继续进行时,其应力分量与材料性能之间的关系,即屈服准则或塑性条件。

塑性成形是利用金属的塑性,在外力作用下使金属成形的一种加工方法。作用于金属的外力可以分为两类:第一类是作用在金属表面上的力,称为面力或接触力,它可以是集中力,但更一般的是分布力;第二类是作用在金属每个质点上的力,称为体积力。

#### 1. 接触力

接触力包括作用力、反作用力和摩擦力。

作用力是由塑性加工设备提供的,用于使金属坯料产生塑性变形。在不同的塑性加工工序中,作用力可以是压力、拉力或剪切力,但在多数情况下是用压力来成形的,因此塑性加工又称为压力加工。

反作用力是工具反作用于金属坯料的力。一般情况下,反作用于金属的力与施加的作用力互相平行,并组成平衡力系,图 2-1 是镦粗时的受力分析,图 2-1(a)中, $P=P'$  ( $P$  为作用力、 $P'$  为反作用力)。而在图 2-1(b)、(c)中,反作用力  $P'$  自相平衡。

金属在外力作用下产生塑性变形时,在金属与工具的接触面上产生阻止金属流动的摩擦力。摩擦力的方向通常与金属质点移动的方向相反,其最大值不应超过金属材料的抗剪强度。在图 2-1(a)中的摩擦力  $P_\mu$  自相平衡,而图 2-1(b)中的摩擦力  $P'_\mu$  对金属底部变形起阻碍作用,不利于底部金属的充满,此时, $P=P'+P'_\mu$ ,在图 2-1(c)中摩擦力  $P'_\mu$  有利于底部

金属的充满,起到作用力的效果,此时,  $P + P'_\mu = P'$ 。

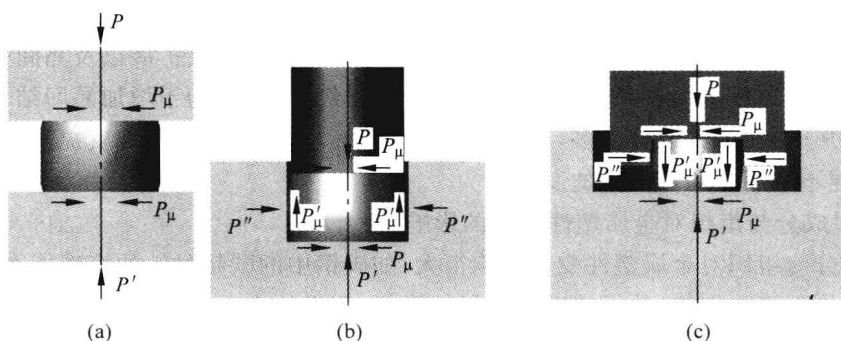


图 2-1 镦粗时的受力分析

(a) 在平模具间镦粗; (b) 在凹模内镦粗; (c) 在凸模内镦粗

## 2. 体积力

体积力是与变形体内各质点的质量成正比的力,如重力、磁力和惯性力等。对一般的塑性成形过程,由于体积力与接触力相比要小得多,可以忽略不计。因此,一般都假定是在接触力作用下的静力平衡力系。

但是在高速成形时,如高速锤锻造、爆炸成形等,惯性力不能忽略。在锤上模锻时,坯料受到由静到动的惯性力作用,惯性力向上,有利于金属填充上模,故锤上模锻通常将形状复杂的部位设置在上模。

在高速锤上挤压时,工件在出口部分的速度  $v_1$  远远大于工具运动速度  $v_0$  (图 2-2)。

根据体积不变条件,  $v_1 = v_0 A_0 / A_1$ , 当挤压比  $A_0 / A_1 = 5$  ( $A_0$ 、 $A_1$  分别为挤压前和挤压后坯料的横截面积) 时,  $v_1 \approx 100 \text{ m/s}$ 。当挤压结束时,在如此高的速度下突然停止,工件受到由动到静的惯性力作用,且惯性力的方向向下。这时,有可能使工件产生缩颈,甚至拉断。

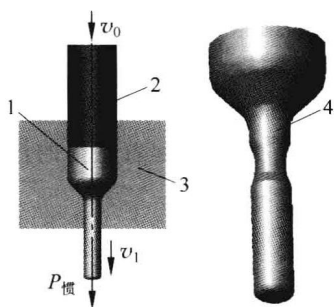


图 2-2 高速锤上挤压时的惯性力  
1—坯料; 2—冲头; 3—凹模; 4—缩颈

## 2.2 金属塑性变形的力学基础

金属塑性的变形性质表现为屈服和应变强化及破坏三个方面,影响金属塑性不外乎机械因素(或变形方式)、物理因素(或变形条件),前者是金属塑性变形的应力与应变状态,后者是指如金属塑性变形的变形温度和变形速度等状态。

### 1. 影响金属塑性及变形抗力的主要因素

#### 1) 变形方式对金属塑性变形的影响

金属塑性成形时的受力和变形情况是很复杂的,但不外乎是在拉和压的综合作用下,产生了一定拉应变与压应变,以达到成形的目的。在一定的加载条件和一定的变形温度及应变速度条件下,引起塑性变形的单位变形力称为变形抗力。一般来说,变形方式对金属的屈

服与应变强化或变形抗力影响不大,而对金属的破坏则有比较显著的影响。影响金属塑性变形主要依靠晶内的滑移作用,而滑移阻力主要取决于金属的性质与晶格的构造,及金属原子间的物理化学力。金属塑性的破坏是由于晶内滑移面上的裂纹扩展以及晶间变位时结合面的破坏造成的。压应力有利于封闭裂纹,阻止其继续扩展,有利于增加晶间结合力,因此,金属塑性成形时,压力的成分越多,金属越不容易破坏,金属塑性的性能就提高,而拉应力的成分越多,越不利于金属可塑性的发挥。

## 2) 金属成分与组织对金属塑性变形的影响

金属成分与组织对金属塑性变形影响很大,如碳钢中的碳超过铁的溶碳能力,多余的碳便于铁形成硬而脆渗碳体,从而使碳钢的塑性降低,变形抗力提高。合金元素加入钢中的碳形成硬而脆的碳化物,使钢的强度提高,塑性降低。

组成固态金属组织的晶体结构常见的有面心立方结构和体心立方结构及密排六方晶格(图 2-3)。单晶体的塑性变形主要通过滑移和孪生两种方法进行。滑移是指晶体一部分沿一定的晶面(晶体中由原子组成的平面)和晶向(晶体中由原子组成的直线)相对于另一部分产生滑移。孪生是指晶体一部分相对于另一部分,对应于一定的晶面沿一定方向发生转动。金属获得较大塑性变形的主要形式是滑移。在其他条件相同的情况下,晶体的滑移系多,金属的塑性好。面心立方结构(滑移面数 6、滑移方向数 2、滑移系总数 12)和体心立方结构(滑移面数 4、滑移方向数 3、滑移系总数 12)的滑移系比密排六方晶格(滑移面数 1、滑移方向数 3、滑移系总数 3)的金属滑移系多,金属的塑性好。组成金属的化学成分越复杂,金属的塑性越差,变形抗力也越大。金属的组织 and 性能是随着塑性变形过程变化的,随着塑性变形程度的增加,变形阻力增加,强度和硬度升高,塑性和韧性下降,这就是所谓的加工硬化,对金属塑性变形起着重要的作用。

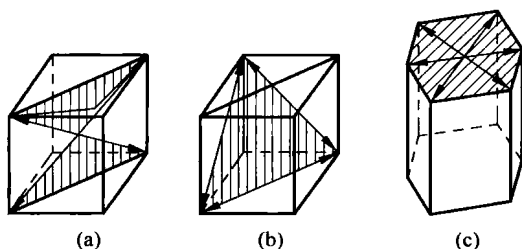


图 2-3 常见晶体结构

(a) 体心立方结构; (b) 面心立方结构; (c) 密排六方晶格

图中说明: 影线表示晶面; 箭头表示结晶方向

## 3) 变形温度

变形温度对金属的塑性有很大的影响。例如,在金属挤压成形时,有时采用加热成形的方式。加热的目的是:(1)增加金属在成形中所能达到的变形程度;(2)降低金属的变形抗力;(3)提高工件的成形准确度,一般来说,对于大多数金属,总的影响趋势是:随着温度的升高,金属软化,塑性增加,变抗力下降。

温度的升高变化包括:(1)回复与再结晶,即使变形得到了一定程度的软化,回复的结果导致金属内部各种物理化学状态的变化,使得金属的塑性和变形抗力发生改变,再结晶,

从而完全消除了加工硬化的效应；(2)原子间的距离的改变和原子动能的增加；(3)晶间滑移系增多。

由于金属和合金的种类繁多,温度变化引起的物理化学状态的变化各不相同,所以温度对各种金属和合金塑性及变形抗力的影响规律也各不相同。金属加热软化的趋势并不是绝对的。在加热过程的某些温度区间,往往由于过剩相析出或相变等原因出现的脆性区,反而使金属的塑性降低而变形抗力增加。图 2-4(a)、(b)、(c)分别表示碳钢的加热温度——塑性指标曲线、钛合金的加热温度——塑性指标曲线和镁合金的加热温度——塑性指标曲线。(1)对碳钢而言,在随温度升高塑性增加的总趋势下有几处相反的情况(图 2-4(a)),在 200~400℃时,因为时效作用,又由于夹杂物以沉淀的形式在晶界、滑移面析出,产生沉淀硬化,使塑性降低,变形抗力增加,这个温度范围称为冷脆区(或蓝脆区)。而在 800~950℃的范围内,又会出现热脆区,使塑性降低。原因是铁与硫形成的化合物 FeS 几乎不溶于固体铁中,形成低熔点(910℃)的共晶体(Fe+FeS+FeO)。当温度超过 1250℃后,由于发生过热、过烧,塑性又会急剧下降,这个区称为高温脆区(图 2-4(a))。(2)钛合金在 300~500℃时,塑性指标降低,温度增高至 500℃以上,塑性指标才有显著增加,但在 800~850℃的高温下,钛合金会出现容易氧化和晶粒长大及合金组织变化等有害现象。因此,钛合金的合理加热温度一般在 320~350℃(图 2-4(b))。(3)镁合金的加热温度超过 250℃后,塑性指标有显著增加,超过 430~450℃后会出现热脆现象,所以成形的合理温度应选 320~350℃(图 2-4(c))。在金属加热成形时,必须根据不同材料的温度——力学性能曲线以及加热对材料可能产生的不利影响(如氧化、吸氢、脱碳等)以及材料的变形性质作出合理的选择。

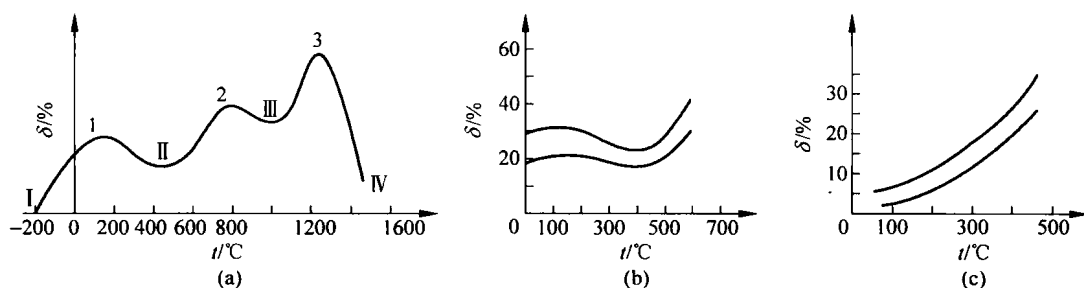


图 2-4 金属塑性随温度变化曲线

(a) 碳钢的加热温度——塑性指标曲线；(b) 钛合金的加热温度——塑性指标曲线；

(c) 镁合金的加热温度——塑性指标曲线

#### 4) 变形速度

变形速度是指单位时间内应变的变化量。在塑性加工生产中很难控制和计量,一般以压力机的滑块的移动速度来近似地表示金属的变形速度。变形速度对金属塑性的影响是比较复杂的。从大量的实验资料分析,几乎所有的材料都存在着一种临界变形速度,超过这一速度后,塑性变形来不及传播,材料的塑性急剧下降。如图 2-5 所示,高速下的极限变形程度  $\delta_1$  显然小于低速时的  $\delta_2$ 。不同的材料具有不同的临界变形速度,一般在 15~150m/s 的范围内,而在临界变形速度以内,变形速度增加,材料的变形抗力增加,塑性都有不同程度的提高或保持不变。一般来说分三种情况:第一种情况是低速变形时塑性好,高速变形时塑



性更好,如奥氏体不锈钢;第二种情况是低速变形时塑性一般,高速变形时塑性相同或略有提高,如铝合金;第三种情况是低速变形时塑性低,高速变形时塑性相同或提高很少,如钛合金。因此,奥氏体不锈钢比较适合高速成形,铝合金则采用高速或常规成形方法均可,而钛合金材料对变形速度影响不大,一般采用加热成形,利用温度提高其塑性。

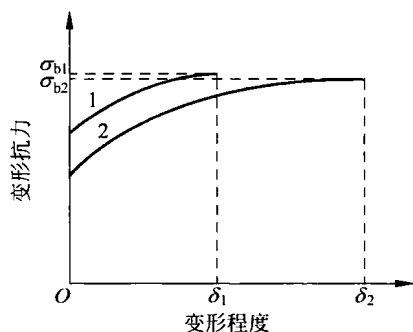


图 2-5 不同应变速率对变形抗力和塑性的影响示意图

1—高速; 2—低速

目前在金属成形中,压力机的运动速度都不大,对金属塑性成形的影响不大。如对冲压生产来说,考虑变形速度,主要是基于冲压件的尺寸和形状及复杂程度。对于大型复杂零件(如汽车覆盖件)的冲压成形,由于坯料各部分的变形程度极不均匀,材料的流动情况比较复杂,容易发生局部拉裂和起皱,宜用低速压力机(如液压压力机或低速机械式压力机)。对于加热成形工序,如加热拉深等,为了使坯料中已变形区域能及时冷却强化,宜用低速压力机。对于钛合金和铝合金一类的材料,也宜采用低速成形。对于挤压件生产,同样也宜采用低速压力机成形。

### 5) 应力和应变状态

应力状态对金属的塑性有很大的影响。施加不同形式的力,在变形体中就有不同的应力和应变状态,从而表现出不同的塑性变形行为。但金属的塑性变形主要取决于主应力状态下静水压力的大小,静水压力越大,即压力的个数越多、数值越大时,金属表现出的塑性越好。相反,如拉应力的个数越多、数值越大,即静水压力越小,则金属的塑性越差。

在主应力状态下,静水应力 $\left(\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}\right)$ 的绝对值越大,则变形体的变形抗力越大。应变状态对金属的塑性也有一定的影响。在主应变状态中,压应变的部分越多,拉应变的成分越少,越有利于材料塑性的发挥;反之,越不利于材料塑性的发挥。这是因为材料的裂纹与缺陷在拉应变的方向易于暴露和扩展,沿着压应变的方向则不易于暴露和扩展。

### 6) 尺寸因素

金属塑性成形时,在其他条件相同的情况下,同一种材料,尺寸越大,塑性越差,变形抗力越大。由于材料尺寸越大,各处的组织和化学成分或杂质分布越不均匀,造成其内部缺陷也越多,导致金属内部的应力、应变分布也不均匀。例如,复杂零件拉深,结构形状类似如圆角部位可能产生拉裂和起皱的程度并不相同。

## 2. 金属塑性变形的力学基础

塑性成形加工时,压力机通过模具作用于金属毛坯,使毛坯产生塑性变形,同时在毛坯