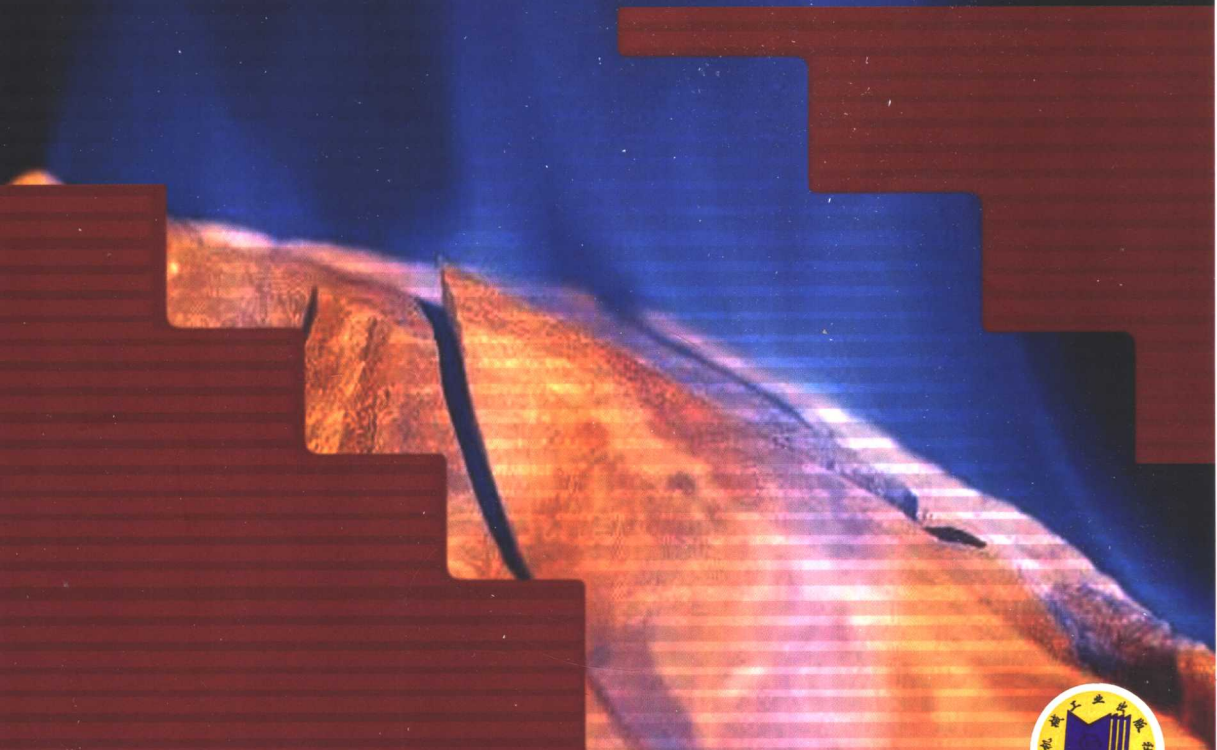




普通高等教育规划教材

金属塑性成形原理

李尧 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

金属塑性成形原理

主 编 李 尧

副主编 张利君

参 编 章争荣 廖秋慧 杨俊杰

主 审 胡礼木



机械工业出版社

本书对金属塑性成形的基本原理和共性问题作了系统论述。全书共分六章,其主要内容包括金属塑性变形的力学基础、塑性成形时金属的流动和成形规律;塑性成形的求解方法,即主应力法和滑移线法;对变形功法、上限法、塑性材料力学法、有限元法和塑性成形过程的物理模拟也作了简要介绍。为便于学生复习、自学和加深对本书内容的理解,书中列举了大量例题。同时,章末附有思考题及习题并在书后附有习题答案。

本书可作为材料成形及控制工程专业的本、专科教材,也可作为相关专业科技人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形原理/李尧主编. —北京:机械工业出版社, 2004.6
普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14330-2

I. 金… II. 李… III. 金属—塑性变形—高等学校—教材
IV. TG111.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第030818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:张祖凤

责任编辑:倪少秋 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年7月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·8印张·306千字

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会名单

主任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委员：(按姓氏笔画排序)

任淑淳 上海应用技术学院
刘向东 华北航天工业学院
苏 群 黑龙江工程学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)
童幸生 江汉大学

材料成形及控制工程专业教材编委会

主任：计伟志 上海工程技术大学

副主任：李 尧 江汉大学

王卫卫 哈尔滨工业大学（威海）

委员：（按姓氏笔画排序）

王高潮 南昌航空学院

邓 明 重庆工学院

齐晓杰 黑龙江工程学院

肖小亭 广东工业大学

李慕勤 佳木斯大学

张 旭 湖南工程学院

周述积 湖北汽车工业学院

侯英玮 大连铁道学院

胡礼木 陕西理工学院

胡成武 株洲工学院

施于庆 浙江科技学院

贾俐俐 南京工程学院

翁其金 福建工程学院

傅建军 华北航天工业学院

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化和我国加入WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于2001、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的马·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。



⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础, 确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与工程实际相结合,构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针:知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为:“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上,挑选出最基本的内容、方法及典型应用;“新”指在将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容,以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容,并将这些按新的教学系统重新组织;“广”指在保持本学科基本体系下,处理好与相邻以及交叉学科的关系;“用”指注重理论与实际融会贯通,特别是注入工程意识,包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点、合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设,并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设,力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验,又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务,以确保教材质量。

我们相信,本套系列教材的出版,对我国工程应用型人才培养质量的提高,必将产生积极作用,会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光,高瞻远瞩,及时提出并组织编写这套系列教材,他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作,并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件,在此深表衷心感谢!

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

前 言

本书是高等学校材料成形及控制工程专业全国协作组应用型本科院校教师编写的成套教材之一。本教材大纲是根据2003年1月在上海工程技术大学召开的全国应用型本科材料成形及控制工程专业教学大纲讨论会上确定的。2003年8月在湖北汽车工业学院召开的教材审稿会上又对本书大纲进行了讨论并作了进一步修改。编写者力求体现本教材的特点：①以金属塑性行为和塑性成形力学为基础；②遵循循序渐进、突出重点的原则，着重阐述基础理论，尽可能联系实际问题；③兼顾理论知识的系统性和学科间的内在联系，删去了与前置课程的重复部分。如注意与前置课程“金属学”、“金属热处理”的合理衔接，避免不必要重复，删去了晶体结构、位错理论的基本概念、回复和再结晶等内容。④为便于同学自学，加深对基本概念的理解，书中有大量例题和思考题及习题。本书可作为材料成形与控制工程、机械工程及自动化专业的本科、专科教材，也可供有关科技人员参考。

“金属塑性成形原理”是材料成形与控制工程专业的技术基础课。全书共分六章。第一章绪论，简要介绍金属塑性成形原理的特点及分类、金属塑性成形理论的发展概况及其学习本课程的目的和任务。第二章主要论述金属塑性变形时的力学基础理论，包括应力状态、应变状态、屈服准则、本构关系等，并将应力、应变、屈服准则之间的内在关系联系在一起作了系统而又深入浅出的介绍。第三章论述金属的塑性及超塑性、加工硬化、影响金属塑性变形的因素及塑性变形对金属组织和性能的影响；讨论了塑性成形时金属变形与流动的有关问题，包括最小阻力定律、变形不均匀性及影响因素、附加应力、残余应力、金属的断裂、塑性成形件中的折皱及塑性成形中的摩擦与润滑。第四章对塑性成形基本工序进行了力学分析，并利用主应力法进行求解。第五章介绍了滑移线场理论基础和实际解法。第六章简要介绍了塑性成形问题的其他解法，如变形功法、上限法、视塑性法和有限元法。

本书由江汉大学李尧主编，湖南工程学院张利君副主编，陕西理工学院胡礼木主审。编写工作分配如下：江汉大学李尧编写第一章、第二章的第一节至第三节，湖南工程学院张利君编写第二章的第四节至第六节以及第六章；广东工业大学章争荣编写第五章；上海工程技术大学廖秋慧编写第四章；江汉大学杨俊杰编写第三章。



本书在编写过程中得到了兄弟院校的支持和帮助，主审胡礼木对书稿进行了全面、认真的审查，并提出了许多宝贵意见，在此谨表示深深的谢意。

由于编写水平所限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

目 录

序 前言

第一章 绪论	1
一、金属塑性成形的特点及分类	1
二、金属塑性成形理论的发展概况	3
三、本课程的任务	6
思考题	7
第二章 金属塑性变形的力学基础	8
第一节 金属塑性成形过程的受力分析	8
第二节 变形体内一点的应力状态分析	10
一、应力分析的截面法	10
二、三维坐标系的应力分量和应力张量	11
三、任意斜面上的应力	13
四、主应力和应力不变量	14
五、主切应力和最大切应力	18
六、应力球张量和应力偏张量	20
七、八面体应力和等效应力	23
八、应力平衡微分方程	25
九、平面应力状态和轴对称应力状态	26
十、应力莫尔圆	30
第三节 变形体内质点的应变状态分析	34
一、质点的应变状态	35
二、位移分量和应变分量的关系——小变形 几何方程	42
三、应变连续方程	45
四、应变增量和应变速率张量	46



五、塑性变形程度的表达式	49
六、塑性变形体积不变条件	51
七、平面变形和轴对称变形	52
第四节 屈服准则	53
一、屈雷斯加 (H·Tresca) 屈服准则	54
二、密席斯 (Von·Mises) 屈服准则	56
三、屈服准则的几何表达——屈服表面和 屈服轨迹	58
四、中间主应力的影响——屈服准则的 简化表达式	62
五、硬化材料的屈服准则简介	63
第五节 塑性变形的应力应变关系	65
一、弹性应力应变关系	65
二、塑性应力应变关系的特点	67
三、塑性变形的增量理论	69
四、塑性变形的全量理论	73
第六节 金属材料的实际应力—应变曲线	76
一、拉伸试验曲线	76
二、压缩试验曲线	79
三、实际应力—应变曲线的简化形式	80
四、包申格效应	82
思考题及习题	82
第三章 塑性成形中金属变形与流动的相关问题	85
第一节 最小阻力定律	85
第二节 影响金属塑性、塑性变形和流动的因素	86
一、塑性、塑性指标和塑性图	86
二、变形条件对金属塑性的影响	88
三、其他因素对塑性的影响	92
四、提高金属塑性的途径	95
五、摩擦对金属塑性变形和流动的影响	96
六、工具形状对金属塑性变形和流动的影响	97
七、金属各部分之间的关系对塑性变形和 流动的影响	98



八、金属本身性质不均匀对塑性变形和流动的影响	99
第三节 金属的超塑性	99
一、超塑性的分类	99
二、结构超塑性的力学特性	100
三、影响超塑性的主要因素	101
四、超塑性的变形机制	102
五、超塑性的应用	102
第四节 加工硬化	104
一、加工硬化的现象和机理	104
二、加工硬化的后果及应用	106
第五节 不均匀变形、附加应力和残余应力	106
一、均匀变形与不均匀变形	106
二、附加应力	107
三、残余应力	109
第六节 金属的断裂	111
一、断裂的物理本质	111
二、塑性加工中金属的断裂	114
第七节 塑性成形件中的折叠	116
一、折叠特征	116
二、折叠的类型及其形成原因	117
第八节 金属塑性成形中的摩擦和润滑	119
一、塑性成形时摩擦的分类和机理	119
二、塑性成形时摩擦的特点及其影响	121
三、塑性成形时接触表面摩擦力的计算	121
四、影响摩擦系数的因素	122
五、塑性加工中摩擦系数的测定方法	124
六、塑性成形时的润滑	126
七、不同塑性加工条件下的摩擦系数	129
思考题	130

第四章 金属塑性成形基本工序的力学分析及

主应力法	132
第一节 主应力法的基本原理	132



第二节 锻粗变形 135

- 一、锻粗变形的特点 135
- 二、圆柱体锻粗变形力计算 137
- 三、锻粗时的变形功 143

第三节 开式模锻变形特点及变形力计算 146

- 一、开式模锻的变形特点 146
- 二、开式模锻变形力的计算 147

第四节 板料弯曲工序分析及变形区的应力应变分布 152

- 一、线性弹塑性弯曲 152
- 二、三维塑性弯曲时的应力应变状态 153
- 三、宽板弯曲时的应力分布 155
- 四、板料塑性弯曲时中性层的内移 157

第五节 圆筒件拉深分析和变形区的应力应变分布 159

- 一、拉深变形过程和变形特点 159
- 二、拉深过程的应力应变状态 160
- 三、凸缘变形区的应力应变分析 161
- 四、拉深力的计算 165
- 五、拉深时的起皱与拉裂 166

第六节 挤压变形分析及单位挤压力的计算 166

- 一、挤压时金属的变形特点 167
- 二、挤压变形力的计算 168

思考题及习题 173

第五章 塑性成形问题的滑移线解法 175

第一节 滑移线的基本概念 175

- 一、平面变形应力状态的特点 175
- 二、最大切应力轨迹线——滑移线的形成 177
- 三、 α 、 β 滑移线和 ω 角的规定 177
- 四、滑移线的微分方程 178

第二节 滑移线场的应力方程(汉基应力方程) 178

第三节 滑移线的基本特性 180

- 一、沿线特性 180



二、跨线性性质 (汉基第一定理)	181
第四节 应力边界条件	183
第五节 滑移线场的建立方法	185
一、常见的滑移线场	185
二、数值积分法	187
三、近似图解法	192
第六节 用滑移线法求解塑性成形问题	193
一、冲头压入半无限体	193
二、平砧压缩高坯料	199
三、粗糙平板间压缩长坯料	203
四、平面变形挤压	206
五、圆筒件拉深	211
六、盒形件合理坯料的确定	212
思考题及习题	213
第六章 塑性成形问题的其他方法	216
第一节 变形功法	216
一、变形功法的基本原理	216
二、计算举例	217
第二节 上限法	218
一、上限法的基本概念	218
二、平面变形问题的上限原理	219
三、上限法在平面变形问题中的应用	220
第三节 塑性材料力学法	222
一、求解原理	222
二、计算举例	223
第四节 刚塑性有限元法	225
一、概述	225
二、刚塑性有限元法在塑性成形 中的应用	228
第五节 塑性成形过程的物理模拟简介	230
思考题	233
习题答案	234
参考文献	239

第一章 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工件的加工方法。所以也把塑性成形称为塑性加工或压力加工。

一、金属塑性成形的特点及分类

1. 特点

与金属切削加工、铸造，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、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，不产生切屑，因而材料利用率高，可以节约大量的金属材料。

(3) 生产效率高，适于大量生产 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；在双动拉深压力机上成形一个汽车覆盖件仅需几秒钟，在12000×10kN热模锻压力机上锻造一根汽车发动机的六拐曲轴仅需40s；在弧形板行星搓丝机上加一个M5螺钉，生产率高达12000件/min。

(4) 尺寸精度高 不少成形方法已达到少、无切削的要求。例如，精密模锻的伞齿轮，其齿形部分可不经切削加工而直接使用，精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度，旋压液压缸的表面粗糙度 R_a 达0.40~0.20 μm ，可以直接使用。

由于金属塑性加工具有上述特点，因而在冶金，有色金属加工，汽车，拖拉机，宇航，船舶、军工，仪器仪表、电器和日用五金等工业部门中得到广泛应



用，在国民经济中也占有重要的地位。

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。每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。在轧制、拉拔和挤压的成形过程中，变形区是不变的，属稳定的塑性流动过程，适于连续的大量生产，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。

按照成形时工件的受力和变形方式进行分类见表 1-1。这种分类方法把金属塑性成形分基本加工变形方式和组合加工变形方式。

靠压力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，管材以及周期断面型材，变断面轴及钢球等。

锻造 锻造通常分为自由锻造和模锻。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。挤压有正挤压和反挤压。正挤压时挤压杆的运动方向与从模孔挤出的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的金属的流动方向相反。用挤压法可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。

拉拔 拉拔是用拉拔机的夹钳把金属坯料从一定形状和尺寸的模孔中拉出，从而获得各种断面的型材，线材和管材。

冲压（拉深等） 拉深等成形工序是在曲柄压力机或油压机上用凸模把板料拉



进凹模中成形，用以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凸模贴模成形，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，如板料在模具中的弯曲成形，板带材的折弯成形、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，可生产各种环形件（如轴承环，火车轮箍、齿轮坯等），冲压和轧制组合的旋压工艺，可生产各种薄壁空心回转体零件，弯曲和轧制组合的辊弯工艺，可生产各种断面的冷弯型材及焊管等。

以上说明，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。

塑性加工按成形时工件的温度还可以分为热成形，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。

二、金属塑性成形理论的发展概况

金属塑性加工是具有悠久历史的加工方法，早在两千多年前的青铜器时期，我国劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能，并掌握了锤击金属以制造兵器和技术。随着近代科学技术的发展，已经赋予塑性加工技术以崭新的内容和涵义。但是，作为这门技术的理论基础——金属塑性成形原理则发展得较晚，直到 20 世纪 40 年代才逐步形成独立的学科。

金属塑性成形理论是在塑性变形的物理、物理-化学和力学基础上发展起来的一门工程应用技术理论。金属塑性变形的物理和物理化学基础属于金属学范畴。自从 20 世纪 30 年代位错概念提出以来，人们对塑性变形的微观机理有了科学的解释。对于金属的塑性——金属产生塑性变形而不破坏其完整性的能力，人