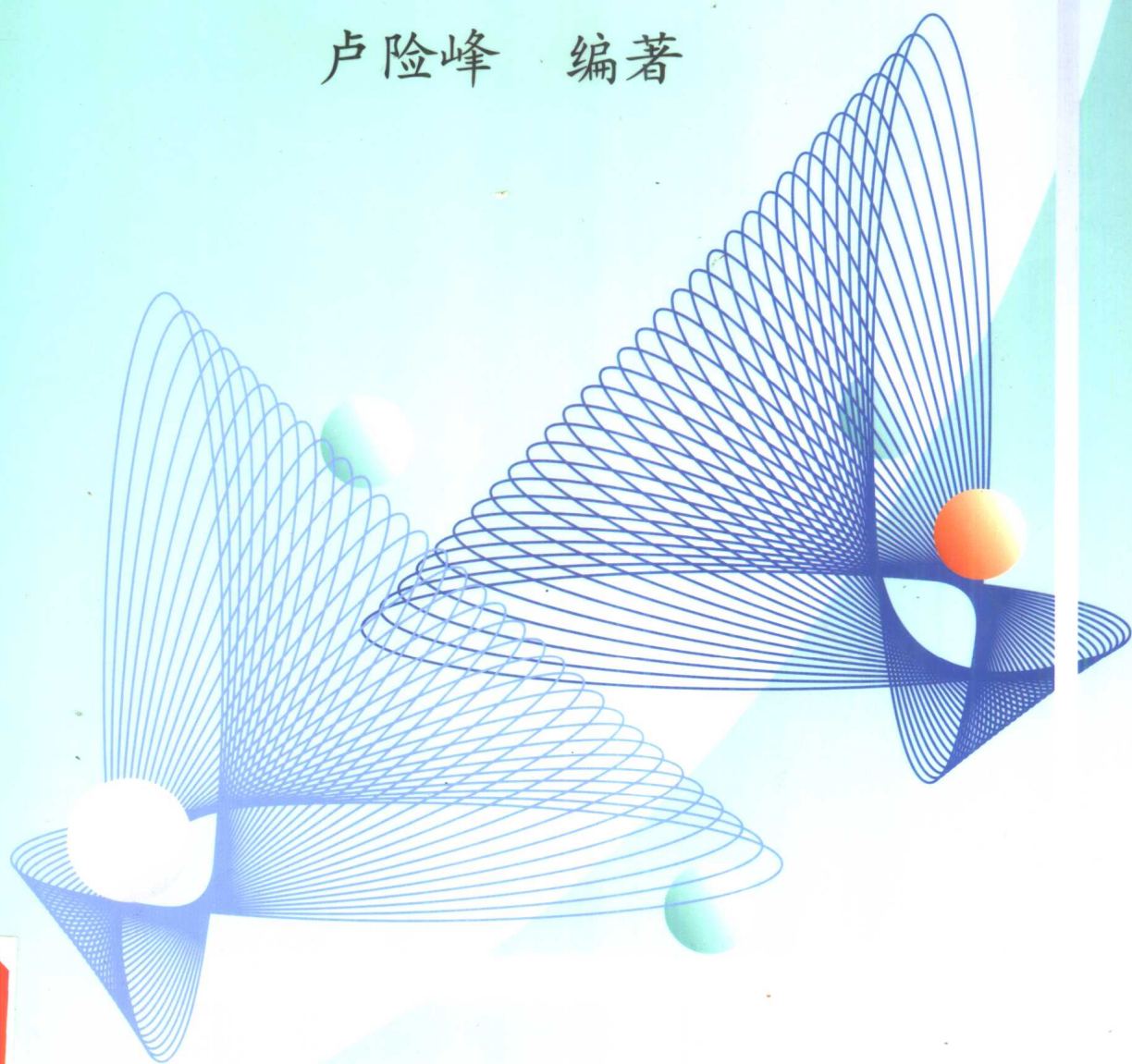


冷锻工艺与模具

卢险峰 编著



16



机械工业出版社

冷锻工艺与模具

卢险峰 编 著



机械工业出版社

本书是“冲压工艺模具学”的姐妹篇。它系统地讲述了冷锻工艺及模具技术的基本原理、基本方法和最新成果。全书分为4篇(12章):冷锻加工基本工序、冷锻工艺设计、冷锻模具结构设计和冷锻实例;具有结构体系新颖、技术内容全面等特点;且每章有习题及思考题,第4篇专门介绍各种实际例子,实用性强,能开拓思路。

本书主要作为大专院校相关专业及模具培训班教材;也可供工厂企业的工程技术人员与研究单位的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冷锻工艺与模具/卢险峰编著. —北京:机械工业出版社, 1999. 8

ISBN 7-111-07331-2

I. 冷… II. 卢… III. ①冷锻-工艺 ②磨具-结构设计 N. ①TG316
②TG74

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第23936号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张亚秋 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:姚学峰 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·10印张·232千字

0 001—3000册

定价:18.00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、68326677-2527

前 言

《冲压工艺模具学》一书前言中指出“人类最早的生产制造技术是冷压”，而“冷压”也泛指冷锻和冲压。生产制造技术发展到大约 30 年前，冷锻与冲压才从冷压中独立出来，开始形成具有各自研究范畴和特点的应用技术。

普遍认为，一个国家的冲压、冷锻加工技术水平，是这个国家汽车工业水平、工业化水平乃至现代化水平的一种重要标志和反映。

本书作者长期从事冲压、冷锻的专业技术工作和教学工作。在《冲压工艺模具学》正式出版之后，为适应形势发展和教学需要，通过总结自己的工作和经验和国内外先进成果，在不断更新的原讲稿的基础上编写了本书，以期大专院校相关专业及模具培训班提供一本新教材。

由于国内外出版的有关冷锻加工技术的书籍较少，作者编写本书实属一种新的尝试。尽管作者精心编写，但因水平有限，书中错误和问题在所难免，欢迎广大读者赐教。

籍本书正式出版之际，向为本书的编写、出版给予关心和支持的有关单位和各方人士表示衷心感谢，向 20 年来对我在生产、教学和科研工作方面一直给予鼓励、关心和教诲的工程院院士、全国冷锻学术委员会主任、上海交大模具技术研究所所长——阮雪榆先生致以诚笃的敬意。

作 者
于南昌大学
1999 年 3 月

目 录

前言	0.2 冷锻的特点	2
绪论	0.3 冷锻的发展	2
0.1 冷锻的定义		1

第1篇 冷锻加工基本工序

第1章 墩锻	6	3.2 正挤压	17
1.1 基本概念	6	3.3 反挤压	20
1.2 墩粗	6	3.4 复合挤压	21
1.2.1 变形特点分析	6	3.5 钢的许用变形程度及其影响	23
1.2.2 质量问题及其预防	9	3.6 挤压件的质量问题	25
1.3 顶墩	11	习题及思考题三	28
1.4 中间墩粗	12	第4章 模锻	29
习题及思考题一	12	4.1 开式模锻	29
第2章 型锻与压印	13	4.2 半闭式模锻	30
2.1 型锻	13	4.3 闭式模锻	30
2.1.1 端部拔长	13	习题及思考题四	31
2.1.2 中间压扁	13	第5章 整径	32
2.2 压印	14	5.1 扩径	32
2.2.1 压花打印	14	5.2 缩径	33
2.2.2 压凹	15	习题及思考题五	33
2.2.3 精压	15	第6章 变薄	34
习题及思考题二	15	6.1 变薄拉深	34
第3章 挤压	16	6.2 变薄翻边	35
3.1 基本概念	16	习题及思考题六	37

第2篇 冷锻工艺设计

第7章 冷锻工艺过程的设计	39	8.1 冷锻用原材料的性能	53
7.1 冷锻零件的设计	39	8.1.1 冷锻用原材料的型式	53
7.1.1 冷锻零件的设计要求及结构工艺性	39	8.1.2 冷锻用原材料的加工	53
7.1.2 主要类型冷锻件的设计要领	44	8.1.3 材料的冷锻性能及参数指标	55
7.2 冷锻工序的设计	47	8.2 冷锻用钢材	56
7.2.1 工序设计概述	47	8.2.1 冷锻用金属材料的类别	56
7.2.2 中间工序设计要点	48	8.2.2 冷锻用钢材的性能	56
7.2.3 冷锻工序设计举例	49	8.2.3 常用钢材的化学成分和力学性能	57
习题及思考题七	51	8.3 冷锻用非铁金属	58
第8章 冷锻用原材料及制坯	53	8.3.1 铝及其合金	58

8.3.2 铜及其合金	59	9.2.4 冷锻力计算的说明	90
8.4 冷锻坯料的制备	59	9.3 冷锻设备的选择	90
8.4.1 毛坯的计算与下料	59	9.3.1 冷锻设备与冷锻加工	90
8.4.2 坯料的软化处理	63	9.3.2 选择原则和要求	91
8.4.3 坯料的润滑与表面处理	64	9.3.3 冷锻设备参数	93
习题及思考题八	68	习题及思考题九	94
第9章 冷锻力与冷锻设备	69	第10章 冷锻变形基本规律	95
9.1 冷锻力及其影响	69	10.1 冷锻变形常用的塑性理论	95
9.1.1 冷锻力的概念	69	10.2 冷锻加工基本工序的构成	96
9.1.2 影响单位冷锻力的因素	69	10.3 冷锻零件的强化	98
9.2 冷锻力的计算	72	10.3.1 冷锻加工硬化	98
9.2.1 公式计算法	73	10.3.2 冷锻零件的强化热处理	99
9.2.2 图算法	78	习题及思考题十	100
9.2.3 查表法	88		

第3篇 冷锻模具结构设计

第11章 冷锻模具一般结构与设计	102	11.4.1 术语及一般应用形式	113
11.1 冷锻模的一般结构及特点	102	11.4.2 冷锻工艺及模具的 CAD	
11.1.1 冷锻模的分类与要求	102	系统	114
11.1.2 冷锻模的结构特点	102	习题及思考题十一	120
11.2 模具工作零件的结构设计	104	第12章 预应力组合凹模的设计	121
11.2.1 下料切刀	104	12.1 设计原理	121
11.2.2 顶锻模	105	12.1.1 厚壁圆筒的应力、变形分析	121
11.2.3 模锻模	105	12.1.2 组合凹模的应力分布	122
11.2.4 正挤凸、凹模	106	12.2 设计方法	123
11.2.5 反挤凸、凹模	108	12.2.1 组合凹模的型式	123
11.2.6 变薄拉深模	110	12.2.2 查表法	123
11.3 模具材料及热处理	111	12.2.3 图算法	125
11.3.1 对模具材料的基本性能要求	111	12.2.4 预应力组合凹模的压合工艺	127
11.3.2 常用模具材料及热处理	112	12.3 冷锻凹模的实际受力	128
11.4 计算机辅助设计的应用	113	习题及思考题十二	131

第4篇 冷锻实例

实例一 加长铆钉的冷锻工艺	133	实例十 深孔气缸冷挤压工艺	137
实例二 自行车托架冷锻坯料的革新	133	实例十一 冷挤 49Q 发动机挺杆的革新	138
实例三 螺栓锻工艺过程	133	实例十二 话机零件的复合挤及模具试验	138
实例四 螺母冷锻工艺	134	实例十三 自行车曲柄孔的扩径	139
实例五 顶杆的冷挤压工艺	134	实例十四 胶轮手推车车轴的精密冷缩径	140
实例六 缝纫机梭芯冷挤压工艺	135	实例十五 铝压力锅锅身的变薄拉深	140
实例七 电容器外壳冷挤压工艺	136		
实例八 照明灯座套冷挤压工艺	136		
实例九 轴承内圈冷挤压工艺流程	137		

实例十六	磁极铁心等的磷酸锌钙处理	140	挤	143	
实例十七	冷挤仪表旋钮帽的通用模架	142	实例二十一	铃锤的冷锻成形	144
实例十八	汽阀簧座镦挤复合成形工艺	142	实例二十二	轴套零件的温挤工艺	144
实例十九	管道零件复合挤与刚性平移工艺	143	实例二十三	轴承套圈的温锻工艺	144
实例二十	小型打字锤零件的冷镦		实例二十四	汽车大梁自动钢印机的打印	145
			实例二十五	轿车电器接电板镦铆冲头的革新	146
			参考文献		147

绪 论

冷锻，又叫冷体积成形，作为一种制造工艺和加工方法（即生产技术），它已得到广泛应用。冷锻变形理论的研究也得到重要进展，获得丰硕成果。目前，冷锻已成为一门独立的应用技术科学。冷锻工艺模具学就是一门通过模具来进行冷锻加工的专业技术课程。

与冲压加工一样，冷锻加工也是由材料、模具和设备三要素构成。只是冲压加工中的材料主要是指板料，而冷锻加工中的材料主要是用棒料与线材。

冷锻的英文名字是 Cold Forging；日文是冷間鍛造；俄文是 холодная ковка。

0.1 冷锻的定义

所谓冷锻，按照工程上的习惯说法，是指冷体积成形，是在冷态条件下的锻造加工，或者说是在室温条件下，利用安装在设备上的模具使金属材料（坯料）压缩为成形零件的一种塑性加工中二次加工的方法。

对此定义，尚需作如下几点说明：

首先，“室温”或“冷态”，只是习惯上的说法，是对应热锻（Hot Forging）必须把坯料加热后进行锻造而言的。这里的“冷态”实际上是指再结晶温度以下。因此，严格地说，冷锻是指在金属的再结晶温度以下进行的各种体积成形。表 0-1 是一些铁金属和非铁金属的最低再结晶温度。由此，可以清楚地看出，即使在室温下，对铅、锡的成形加工都不能称作冷锻，而是热锻了。

表 0-1 一些金属的再结晶温度

金 属	最低再结晶温度/℃	金 属	最低再结晶温度/℃
铁和钢	360~450	锡	0
铜	200~270	铅	0
铝	100~150		

其次，冷锻应该是一个总的名称，正如第 1 篇关于冷锻基本工序及分类中所述，它包括锻锻、挤压、压印等工序，现阶段其中研究得最为活跃的部分是冷挤压。尽管如此，冷挤压仍是冷锻加工的一部分，而不是全部。所以，在某些场合，有人把冷锻，冷挤视为同名词或并列词，这显然是不太符合冷锻定义的。同样，仅把冷锻看作是冷锻、冷模锻等也是不尽合理的。

此外，冷轧、冷拉、冷拔也是属于冷变形（加工）范畴，但因一般又把这些加工划为塑性加工中的一次加工、而不是二次加工。所以在本书内容构成中，作者并没有把它们包括进去，但由于很多工厂的冷锻车间、特别是冷锻车间附设有冷拉、冷拔工段（场），故在本书的某些章节中（例如第 8 章）对这种一次加工的某些知识也作了适当的介绍。

综上所述，冷锻应该定义为在金属最低再结晶温度以下，利用设备和模具对其坯料进行压缩变形为主而获得成形零件的一种塑性加工方法。

冷锻加工中的具体方法或技术经验可称为冷锻工艺；其使用的模具即为冷锻模。按照中国模协对模具的分类，它属于锻造模，锻造模应包括热锻模和冷锻模等。

0.2 冷锻的特点

在生产技术中，冷锻与切削、热锻、粉末冶金及铸造相比，具有以下主要优点：

- 1) 工件精度高，强度性能更好；
- 2) 材料消耗少，没有因加热而污染环境；
- 3) 生产率高，更易实现自动化；
- 4) 加工总成本较低。

如能克服下述难点，冷锻还会有更大的发展。这些难点主要是指发展对小批量生产的零件、高强度材料的零件、大型零件和异形零件等进行比较经济的冷锻，进而可以在更加广泛的工业领域里较为顺利地进行冷锻加工。温锻时，由于材料的硬化比冷锻时小、塑性变形可增大，故适宜于制造大尺寸和形状更复杂的零件。温锻零件的尺寸精度和表面状态并不亚于冷锻件。此外，实践证明，上述成为难点问题的零件，有一部分可以巧妙地利用冷锻工序的组合或冷锻与其他种类加工工序（包括温锻）的结合生产出来。

由于冷锻加工具有重要的优点，再加上对加工难点的不断克服，所以，它在国民经济的很多部门有着越来越广泛的应用。比如，国外汽车及发动机产品的性能和质量均要优于我国的产品，其中一个原因正是采用了冷锻加工。图 0-1 是汽车发动机中的一部分冷锻件的照片。

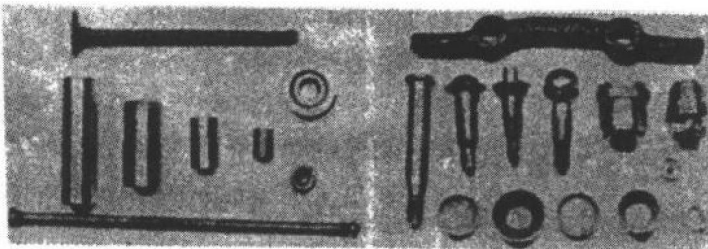


图 0-1 发动机中的冷锻件

冷锻的优点往往不能简单的方法发挥出来。因为对冷锻加工有这样一些特殊的要求（尤其是某些合金钢的冷挤或径向精整）：

1) 设备吨位较大，这是由于冷锻的变形抗力大。比如冷挤压时，单位挤压力达到毛坯材料强度极限的 4~6 倍甚至更高；变形程度更大，有的可达到 80%~90%。

2) 模具材料要求高级，模具制造复杂。这是因为单位冷锻力时常接近甚至超过现有模具材料的抗压强度极限。比如，冷挤压时的单位挤压力达 $2500 \sim 3000 \text{ N/mm}^2$ ，压印或精压时有的竟达 3500 N/mm^2 。所以，模具材料要求更高，且都要设计、制造二、三层的预应力组合凹模。

3) 毛坯往往要进行软火退火和表面磷化等润滑处理。

要满足这些特殊的要求，必须对其有充分的认识，并认真做到。显然，没有特别熟练的冷锻技术工作者也是不行的。

0.3 冷锻的发展

冷锻的发展历史较长，人类最早的加工方法就是冷作加工，是冷冲、冷锻及它们的结合。根据文献记载和考古证明，我国早在殷朝（公元前 11 世纪），就已经用冷作方法制造了

黄金箔。商周时代又用这种方法制造了铜、铁器皿。世界上最早应用板金冷接合技术与加工成形的第一个冷锻件就是我国战国时期（公元前 475—221 年）的紫铜槌胎薄铜缶（容器）。这种紫铜缶被槌成壁厚 1~2mm，分上、下两半，槌圆后再冷咬接在一起[○]。公元前 1 世纪 Kelt 人在室温下利用模型把具有足够塑性的金锭压印成货币或装饰品。世界上第一枚金币是公元前 8 世纪的罗马帝国制造的。俄罗斯于公元 14 世纪制造了银币。

线材通过拉丝模的拉丝，最晚也是从文艺复兴时代（16 世纪）开始的。把线材切断，将其头部镦粗制成铁钉的作业，大致也有几百年的历史。

现代冷锻技术是从 18 世纪末开始的。自从法国革命时代，法国人把铅从小孔中挤出制成枪弹以来，挤压成为一个新名词、新工艺。这一技术也促进了冷锻技术向前发展。

冷挤压的真正实用是在 1935 年，德国人采用了新的润滑剂，使工件表面形成磷酸盐薄膜，才使他们用挤压方法制造钢质子弹壳获得成功。从此，冷挤压技术达到了实用的地步，成为冷锻技术中应用最广泛的一种方法。

最近几十年里，冷锻技术的发展更加迅速。1968 年成立了国际冷锻协会 ICFG（International Cold Forging Group）。目前，很多国家（包括中国）都成立了相应的协会和学会。这对学术界的交流以及学术与工业界的联系起到了重要的作用。

日本冷锻技术的发展，是 50 年代初从国外进口有关论文和专利并介绍到全国而开始的。首先应用于自行车零件的冷锻，比如自行车中轴等零件。随后冷锻进入到摩托车、纺织机械及一些工具生产行业。到了 60 年代，进入汽车工业、照相器材和电器工业等部门。70 年代，日本冷锻技术在兼顾理论深度方面研究的同时，进入了向广度发展的时期。在进行模具强度分析、模具设计系统理论研究的同时，还通过对模具材料的研究和表面处理研究，提高了模具寿命，并使电子计算机技术和激光技术也在冷锻加工领域大显身手。80 年代以来，日本致力于冷锻技术在高精度、复杂形状零件加工方面的应用和研究，并取得重要成果。

近半个世纪以来，欧、美各国的冷锻技术得到持续不断的发展。冷锻在汽车工业、标准紧固件行业的应用更为显著。如美国，1965 年冷锻件总产量中汽车零件占 80%，西德和法国也占 70%~80%。1980 年前，每年用于冷锻的钢材，美国为 115 万吨，西德 10 万吨，日本 40 万吨。

目前，冷锻件的形状类型已达一千多种；80 年代后期，国外冷锻零件重量最少为 2g，最大达 35kg；冷锻材料由铝、铜及其合金、软钢逐步发展到中碳钢，低、中碳合金钢及不锈钢、高速钢等；冷锻件的表面粗糙度 R_a 为 6~8 μm ；冷锻件的尺寸精度与其他加工件对比见表 0-2，这是 K. 朗格教授总结和提出的。

80 年代初，日本的工藤英明教授在华讲学时也认为中国古代的冷锻加工比埃及还早。

但我国现代冷锻技术发展比外国要慢，比日本也晚了近 10 年。我国于 50 年代初开始从国外引进了冷锻技术和冷锻机进行黑色金属冷锻并开始挤一些铝、铜及其合金零件。黑色金属的冷挤压技术起步于 1958 年，由阮雪榆教授做了开创性的研究和应用。经过 10 年发展，在拖拉机、轻工、机械、仪器仪表及电子元件等行业得到了较广泛的应用，铜、铝及其合金的冷锻加工技术更趋成熟。在这以后，奥氏体不锈钢、轴承钢等材料的冷锻加工已崭露头

○ 参阅：祝慈寿。中国工业技术史。重庆出版社，1995，P812。

李维先。我国古代锻压技术初探。锻压技术。1985（4）：27~33。

角，并成功地实现了如斜齿轮、斜花键类零件的冷锻加工。

80年代后期，中国应用冷锻技术加工的挤压零件最大为14kg；最少为0.23g。现已出现了比这还轻的冷锻零件。比如：作者与一个工厂共同革新了某仪表中的一指针零件的锻扁模，该零件的头部尺寸为 $3\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ，锻扁成 $3\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ （H62材料），锻扁处重量只有0.007g（整个零件重2g）。目前，我国冷锻加工零件的材料有铝及其合金、铜及其合金；银、镍、镁、锌、镉合金、可伐合金（kovar）等非铁金属；铁金属中除碳钢、合金结构钢、轴承钢之外，还有若干品种的高速钢。

表 0-2 各种加工方法的尺寸精度

加工方法 \ ISO 等级	尺寸精度值											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
热模锻、热挤												
温 锻												
冷 锻												
研 磨												

注：1. ISO 国际标准化组织。

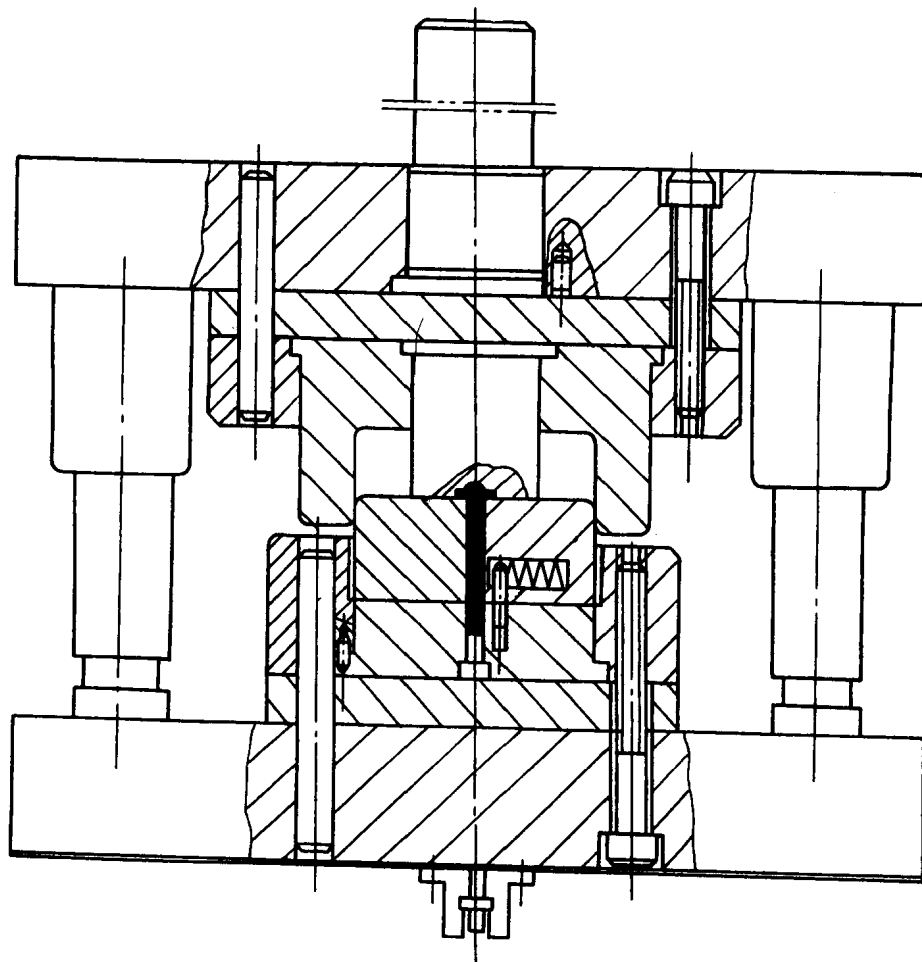
2. 实线表示能达到的精度。

3. 虚线表示大部分工件能达到的精度。

在冷锻技术理论研究方面，我国正在追赶世界先进水平并且有自己的特色。一些工厂，在采用静液挤压、精冲与冷锻相结合等新工艺方面，在应用计算机辅助冷锻工艺和模具设计等新技术方面，已经有了令人鼓舞的进展。不少高等院校和科研院所，分别运用上限法、有限元法、边界元法、滑移线法和特征线法等塑性力学方法，分别采用压电石英晶体测力、光刻网格、密栅云及声发射等实验检测手段，近年来相继取得了不少很有意义的成果。如果能较有效地克服推广和应用冷锻技术中目前尚面临的若干困难，中国冷锻技术的理论与实践一定会有更大的发展。

第 1 篇 冷锻加工基本工序

讲述冷锻加工中各种基本工序的定义、变形特点、成形机理以及模具工作零件或其工作部分的设计要点。



第 1 章 锻 锻

1.1 基本概念

冷锻的定义：利用冷锻设备施给的压力，在冷锻模具工作零件——冲头与凹模之间，使金属坯料的整体或其一部分由轴向压缩转为横向明显扩展的一种冷锻加工方法。锻锻的特点是坯料的横截面积增大。

在冷锻加工过程中，支承坯料的模具工作零件叫凹模，给坯料直接传递作用外力的模具工作零件叫冲头（又称凸模）。一般冲头在上面也叫上模，凹模在下面也叫下模。

依据坯料变形部位的不同以及冲头、凹模工作部分形状相应的不同，锻锻可分为：锻粗（整体锻锻），如图 1-1a、b 所示；顶锻（锻头），如图 1-1c、d 所示；中间锻粗，如图 1-1e、f 所示。

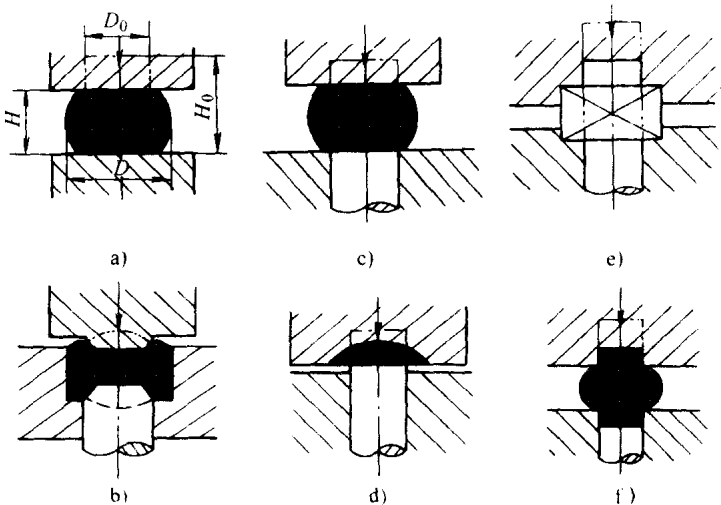


图 1-1 锻锻

各种锻锻方法可加工出不同的冷锻产品零件，就连日常生活中时常可见的螺母、螺钉、铆钉及双头螺栓类零件，也都要分别经锻粗，锻头及中间锻粗而成形出来。

1.2 锻粗

锻粗，即整体锻锻，是使整个坯料由轴向压缩转为横向扩展的一种锻锻工序。而且，从变形实质上来看，它是锻锻加工中最为典型的基本工序。不仅如此，模锻、挤压等工序中也都含有锻粗的变形过程。故首先对它进行较为详细的分析。

1.2.1 变形特点分析

如图 1-2 所示，轴向高度为 H_0 、直径为 D_0 的坯料，在冲头与凹模间被轴向压缩为高度 H 、直径为 D 的工件，这就是锻粗变形的示意。也有称此为自由锻粗的。

对于锻粗变形，有两个参数是这样定义的：

1) 高径比——坯料的高度 H_0 与直径 D_0 之比，记为

$$H_0/D_0$$

高径比是选择、计算坯料的一个参数。根据体积不变条件，由冷锻件的尺寸要求，可计算出坯料的高径比。通常一次锻

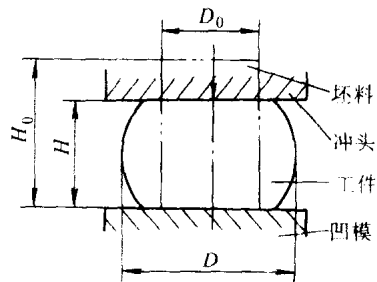


图 1-2 锻粗示意

粗的高径比 (H_0/D_0) 不能大于 2~2.5, 这也是镦锻工序的成形极限。

2) 镦粗率——镦锻前、后高度变化与原始高度之比, 记为

$$\epsilon_H = (H_0 - H)/H_0 \times 100\%$$
 (1-1)

镦粗率 ϵ_H 是一种相对应变, 是对镦粗变形程度的一种度量。与板料冲压加工中少用相对应变、多用对数应变道理一样, 各种冷锻加工工序的变形程度也多用对数应变来度量。故镦粗率的另一种定义为镦粗前、后高度之比取对数, 记为

$$\epsilon_H = \ln(H_0/H)$$
 (1-2)

以上两式均表明, 镦粗率愈大, 镦粗变形程度也愈大。

一些金属材料许用镦粗变形程度列于表 1-1。

表 1-1 一些金属材料的许用镦粗率

材 料		ϵ_H (%)	材 料		ϵ_H (%)
钢	10	75~81	非铁金属	纯铝	~96
	15	70~73		LF3	~92
	35	63		LY11	~50
	45	40~45		黄铜	73~80
	15Cr	53~60			
	34CrMo	50~60			

(1) 镦粗时的不均匀变形 如果将坯料按轴线剖开, 在其中心剖面上制备正方形网格, 然后用粘结剂粘合成一体, 进行镦粗。理想镦粗则正方形网格会变成均匀的长方形网格, 如图 1-3b 所示。然而, 实际镦粗的结果, 剖面上的网格均已发生了不同程度的变形, 如图 1-3c 所示。一般视剖面分为 I、II、III 三个区域, 即整个变形区由三个部分组成。

I 区称为难变形区或刚性区, 这是与冲头、凹模相接触的部分。由于表层受到很大的摩擦阻力, 故该区域内的单元体都处在三向压应力状态, 但由于摩擦力的影响是随离接触表面的距离而减弱的, 因此, I 区大致成一个圆锥体形状。

II 区为大变形区, 它处于 I 区上、下两个圆锥体之间。该区内的金属受上述摩擦力的影响较小, 主要在轴向压力作用下产生轴向压缩变形, 但由于圆锥体 I 区的影响, 材料不能均匀向外扩展。其综合作用的结果, 各单元体网格在径向由中心向上、下内凹, 在轴向则是由中心向外侧凸凹, 使得变形体外形成为了一种鼓形。

III 区称为小变形区, 位于其外侧的筒形区部分。该区端面受到上述摩擦力的影响更小, 在受到轴力压缩的同时, 受到来自 II 区的扩张作用, 加上外侧又为自由表面, 因而也呈凸肚

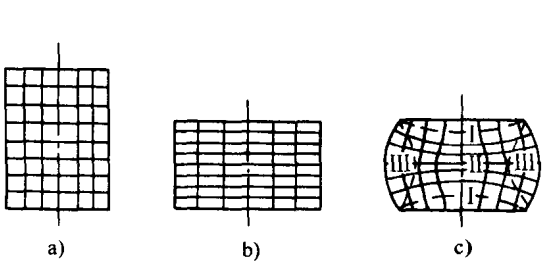


图 1-3 镦粗时的不均匀变形

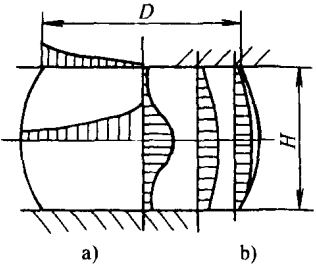


图 1-4 镦粗时的应变分布
a) 径向 b) 轴向

状，但其网格变形不大。

根据以上分析可以理解，锻粗加工中材料变形的最大特点是变形不均匀。锻粗时的变形区的应变有如图 1-4 所示的分布。对于这种粗略的定性分析，也有实验测试出符合这种分析的数值验证。这种锻粗时不均匀变形的分析和模型，对于冷锻粗和热锻粗都是适用的。

(2) 锻粗时的应力分析 由于锻粗时的应变分布不均匀，根据塑性变形中应力应变关系理论，可以肯定，锻粗体内的应力分布也是不均匀的。这种不均匀的分布状况，可以定性地如图 1-5 所示。从图中可以看到，与模具相接触的表面，中心部分的轴向压应力 (σ_z) 和径向压应力 (σ_r) 都高于边缘部分，呈三向压应力状况，愈向边缘，三向压应力程度就减弱；剪应力 (τ_r) 是由摩擦作用而引起的，在边缘上的数值高于中心部位的数值，高径比小的锻粗时或摩擦系数很大时，可能整个端面上都有最大的剪应力。而变形体内部的正应力和剪应力是从端面向中心逐减。

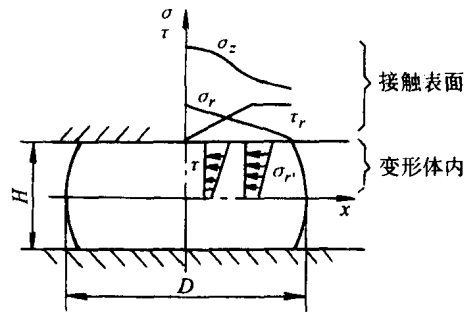


图 1-5 锻粗时的应力分布

由于主应力法分析金属塑性变形比较简便，所以很早就开始被使用了。用主应力简图来分析锻粗变形，至今有很多理论，下面介绍其中三种：

A. 如图 1-6 所示，对应锻粗变形程度不同的三个区域，刚性区 I 为三向压应力的主应力状态，大变形区 II 区也是三向压应力状态，小变形的 III 区为单向压应力状态。这里的 σ_1 即为切向应力 σ_θ ， σ_2 为径向应力 σ_r ， σ_3 为轴向应力 σ_z 。

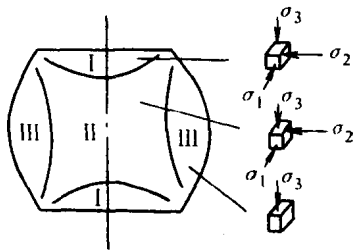


图 1-6 主应力简图 A

B. 如图 1-7 所示。该理论与上一个主应力简图 A 理论的不同是，变形 III 区不是单向压应力，而是具有切向、径向为拉应力的三向应力状态。它能更好解释锻粗件外层有纵向开裂的变形缺陷问题。

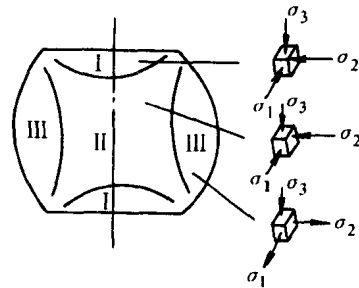


图 1-7 主应力简图 B

C. 如图 1-8 所示。该理论首先在分区上就与上面两个理论不同，I 区可以视为大致一样，其余部位的分区则全然不同；其次，这里处于中心部位的区域为轴向压应力、切向和径向均为拉应力的状态，而上两个理论的中心部位均为三向压应力状态。这一理论能很好地解释锻粗件内部有纵向开裂的缺陷问题。

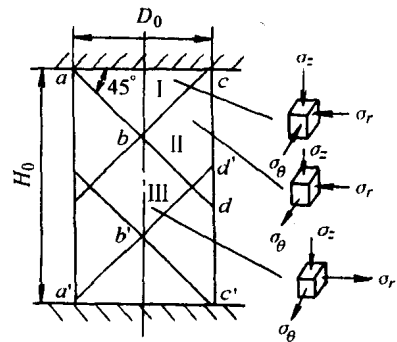


图 1-8 主应力简图 $CH_0/D_0 < 2$

C理论是由研究热镦粗的学者新近提出来的。该新理论把Ⅱ区称为主动塑性变形区，Ⅲ区称为被动塑性变形区。这一理论已被定性的物理模拟、定量的数值模拟及生产实践所验证。它是基于刚塑性力学模型推导出的拉应力理论。虽然该理论是针对热镦粗而研究提出的，但冷镦粗与热镦粗相比，尽管物理性不完全相似，而几何性上却完全相似；况且，有一些冷镦粗件、冷镦锻件也存在有内部纵向裂纹、斜向裂缝的缺陷问题，故本书作者认为该理论中关于主应力简图C的模型可以适用于冷镦粗。

另外，图1-8所示的模型只是该理论在 $H_0/D_0 > 1$ 情况下拉应力理论中的一种；且对于 $H_0/D < 1$ 的情况，还提出了静态应力模型的切应力理论。有兴趣的读者可查阅相应的参考文献去了解、学习和研究。

1.2.2 质量问题及其预防

镦锻各种工序的镦粗变形过程中可能会产生以下一些缺陷，影响镦粗件的质量。为此，必须很好了解这些缺陷，才能有效采取相应的预防措施。镦粗件常见的缺陷主要有以下6种。

(1) 纵向弯扭 镦粗及镦锻中，坯料因被垂直压缩，产生失稳而出现一种弯扭的现象，称这种现象为纵向弯扭，如图1-9所示。产生纵向弯扭的原因：

- 1) 坯料高径比太大。
- 2) 坯料本身有弯曲。
- 3) 坯料端面不平。
- 4) 冲头或凹模端面倾斜等。

对于高径比大于2.5的镦粗、中间镦粗、顶镦，纵向弯扭通常是不可避免的。在这种情况下，可采取图1-10所示的措施，即分两次镦粗，第一次用内锥形冲头预镦成锥形件，第二次用成形镦粗方法，可避免产生纵向弯扭。

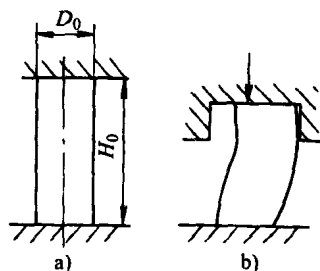


图 1-9 镦粗弯扭现象

a) 坯料 b) 弯扭

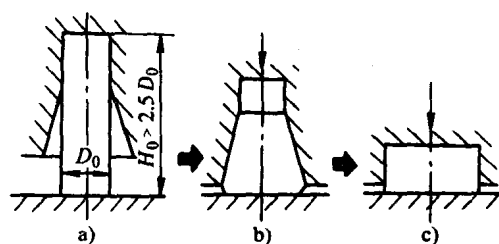


图 1-10 防止弯扭的镦粗

a) 坯料 b) 预镦 c) 成形镦

此外，有试验研究表明：加工硬化指数 n 值愈大的材料，其弯曲失稳的极限值愈高，参见表1-2。

表 1-2 纵向弯扭极限与 n 值的关系

试验材料	加工硬化指数 n 值	纵向弯扭极限 H_0/D_0	
		坯料两端润滑	坯料两端固定
铝	0.2	2.0	3.0
硬铝	0.3	2.6	3.4
黄铜	0.4	2.8	3.6
钢			

(2) 表面折叠 冷锻变形过程中, 坯料相邻表面重迭在一起而压入表层的一种缺陷叫表面折叠。在镦粗变形过程中, 产生表面折叠的情况主要有两种:

1) 已经产生纵向弯扭而继续镦锻时, 相邻表面被强行镦锻变形而折入工件内部。此时产品外形虽然看似完好, 但已形成内部缺陷, 如图 1-11a 所示。

2) 如图 1-10 所示的预镦, 如果上部的圆柱与下部圆锥相交处不够平滑, 则在其后的成形镦锻时会产生如图 1-11b 所示的折叠缺陷。

(3) 表面裂纹 裂纹是指连续体的金属出现不连续而开裂的现象。镦粗体表面裂纹主要表现为纵向裂纹与斜向裂纹两种情况, 如图 1-12 所示。产生表面裂纹的原因:

1) 镦粗变形本质所致, 用图 1-7 的主应力简图 B 能很好地予以解释。

2) 材料本身表面有伤痕或纤维组织粗大等缺陷。

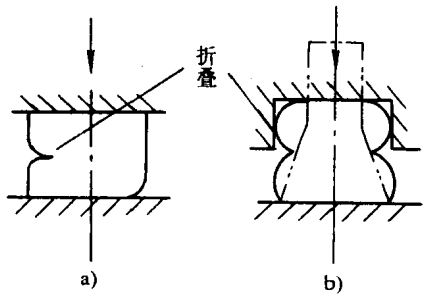


图 1-11 表面折叠示意

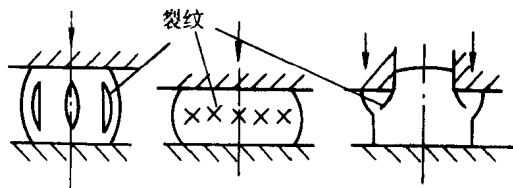


图 1-12 镦粗体的表面裂纹

采用锥形模镦粗或者采用半封闭模的镦锻可以得到没有裂纹的镦粗件, 其中包括用模锻方法镦出飞边, 然后把飞边冲切或车切掉。

(4) 内部裂纹 这是指产生在镦粗体内部的裂纹。镦粗体内部裂纹除了有纵向裂纹和斜向裂纹以外, 有时还有横向裂纹。产生内部裂纹的原因:

1) 镦粗变形的本质所致, 图 1-8 所示的主应力简图 (C 理论) 很好地解释了这一点。

2) 材料本身内部有偏析, 缩孔等缺陷。

3) 残余应力的影响, 尤其易导致横向裂纹。

防止内部裂纹产生的措施有:

1) 采用锥形模镦粗。

2) 利用内凹形冲头与凹模预压一次, 再镦粗。

3) 镦粗完后增加一次平面精压。

(5) 鼓形 鼓形 (鼓肚) 是镦粗变形规律的表现, 不应该算作镦粗的缺陷。但是, 对于外侧面要求平直的镦粗制品, 存在鼓形当然是一种质量问题。消除或减小鼓形的工艺措施主要有:

1) 用冲模切边。

2) 用刀具切削。

3) 改自由镦粗为半封闭式镦粗。如图 1-13 所示。

4) 采用铆镦方法。所谓铆镦, 是先将坯料两端局部镦锻变形, 再重击镦锻出中部呈内凹形, 然后镦成圆柱形, 如图 1-14 所示。图中 a 是小毛坯用的旋转打棱示意; 对于较大毛坯, 可用赶铁赶成图 b 形状。这种方法既能避免鼓肚形, 也能防止裂纹的产生。