

冷锻工艺模具学

◎ 卢险峰 编著



化学工业出版社

高等学校教材

冷锻工艺模具学

卢险峰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地讲述了冷锻工艺模具学的基本原理、基本方法、基本经验和最新成果。全书共分为4篇：冷锻加工基本工序、冷锻工艺设计、冷锻模具结构设计和实践教学，共16章。在内容上，各篇章相对独立又相互联系；在技术上，既有理论指导也有工程实践。每章后有习题及思考题，并有大量冷锻技术实例。

本书主要作为高等学校材料成形、材料加工工程等相关专业教材，也适用于各类模具培训班教材；并可供相关领域工程技术及管理人员参考使用；对有志创新的研究人员，将会从中受到启示，而获得新思路、新收获。

图书在版编目 (CIP) 数据

冷锻工艺模具学/卢险峰编著：—北京：化学工业出版社，2008.6

高等学校教材

ISBN 978-7-122-02996-6

I. 冷… II. 卢… III. ①冷锻-工艺-高等学校-教材
②锻模-设计-高等学校-教材 IV. TG316 TG315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 077352 号

责任编辑：彭喜英 杨 菁

装帧设计：潘 峰

责任校对：战河红

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 刷：大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13¼ 字数336千字 2008年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：24.00 元

版权所有 违者必究

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 40 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科学。

现今，普遍认为，冲压、冷锻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重要标志和反映。近十年来，冷锻加工和模具技术在世界各国制造业中的地位与作用有了显著的提高与增强。尤其是冷锻技术的发展动向与趋势，更令人欢欣鼓舞。

鉴于上述背景，并在以前工作的基础上，本书全面而系统地吸纳了国内外现代冷锻加工和模具技术领域的成果内容，特别是近十年来在该学科领域与生产实际中出现的，包括作者取得的一些新的科研成果及生产与教学经验，进而编著出这本《冷锻工艺模具学》。

本书从金属学基本原理角度出发，视金属塑性成形（二次加工）分为冷压、热压两大类成形，而冷压成形由冲压、冷锻构成的理念。故它既可在冷锻课程也可在冲压课程中作为教材用。

作者一生的研究方向是金属材料精密冷压成形，近 50 年来一直从事冲压、冷锻的生产、教学和科研工作。编著这本《冷锻工艺模具学》，既是想为相关专业学生、研究人员提供新教材，介绍有价值的信息，也是图谋为学科发展尽一份微薄之力、起一点促进作用。

本书在作为本科生专业课教材用或初次自学阅读时，建议重点应放在其基本知识、概念特点和体系结构的内容上。至于那些涉及其他学科且较专业性（在书中相应处标有※）的内容，如第 1 篇中某些基本工序变形特点的力学分析，第 2 篇中有关塑性理论、属二次加工的工序、冷锻辅助工序的化学原理，第 3 篇中的优化设计实例及计算机辅助设计系统等，可以不作要求，即可将其留给今后深入学习和进行研讨时用。

本书能顺利出版，归功于前辈专家的精神感染、读者朋友的偏爱好评，以及化学工业出版社与学校的鼎力相助。为此，向他们表示衷心的感谢！同时，将以感激的心情来接受，就书中存在不足之处而提出的批评与指正。

作者

2008 年 4 月于南昌大学

目 录

绪论	1	0.3 冷锻的发展历史	3
0.1 冷锻基本概念	1	0.3.1 古代的冷压加工	3
0.2 冷锻的特点	2	0.3.2 近代的冷锻加工	4
0.2.1 优点	2	0.3.3 现代的冷锻加工	4
0.2.2 难点	2	0.4 冷锻技术发展动向	5

第1篇 冷锻加工基本工序

第1章 墩锻	8	3.4 钢的许用变形程度及其影响	26
1.1 基本概念	8	3.4.1 许用变形程度	26
1.2 墩粗	8	3.4.2 影响钢材许用变形程度的因素	26
1.2.1 变形特点分析	9	3.5 挤压件的质量问题	28
1.2.2 质量问题及其预防	11	3.5.1 表面折叠	28
1.3 顶墩	13	3.5.2 表面折缝	29
1.4 中间墩粗	14	3.5.3 缩孔	29
习题及思考题	15	3.5.4 表面裂纹	30
第2章 型锻	16	3.5.5 内部裂纹	30
2.1 基本概念	16	3.5.6 附加应力与残余应力的影响	30
2.2 端部拔长	16	习题及思考题	31
2.2.1 变形特点	16	第4章 模锻	32
2.2.2 模具工作部分与工艺设计	17	4.1 基本概念	32
2.3 中间压扁	17	4.2 开式模锻	32
2.3.1 轴向延伸的压扁	17	4.3 半闭式模锻	33
2.3.2 展宽压扁	18	4.4 闭式模锻	33
习题及思考题	18	习题及思考题	34
第3章 挤压	19	第5章 压印	35
3.1 基本概念	19	5.1 基本概念	35
3.2 正挤压	20	5.2 压花打印	35
3.2.1 变形的分区	20	5.3 压凹	35
3.2.2 变形过程	20	5.4 精压	36
3.2.3 实际金属的变形及影响因素	21	习题及思考题	36
3.2.4 变形程度的度量	23	第6章 整径	37
3.3 反挤压	24	6.1 基本概念	37
3.3.1 变形的分区	24	6.2 扩径	37
3.3.2 变形过程	24	6.3 缩径	38
3.3.3 变形程度的度量	25	习题及思考题	38

第7章 变薄	39	第8章 组合变形工序	43
7.1 基本概念	39	8.1 基本概念	43
7.2 变薄拉深	39	8.2 正反复合挤	43
7.2.1 变形特点分析	39	8.3 并行挤压	44
7.2.2 变形程度度量	40	8.4 其他二合一工序	46
7.2.3 模具工作部分设计要点	40	8.5 三合一工序	47
7.3 变薄翻边	41	8.6 四合一及以上工序	47
习题及思考题	42	习题及思考题	48

第2篇 冷锻工艺设计

第9章 冷锻工艺过程的设计	50	10.4.2 坯料的软化处理	86
9.1 冷锻零件的设计	50	10.4.3 坯料的润滑与表面处理	88
9.1.1 冷锻零件的设计要求及结构		习题及思考题	93
工艺性	50	第11章 冷锻力与冷锻设备	94
9.1.2 主要类型冷锻件的设计要领	54	11.1 冷锻力及其影响	94
9.2 冷锻工序的设计	57	11.1.1 冷锻力的概念	94
9.2.1 工序设计概述	57	11.1.2 影响单位冷锻力的因素	94
9.2.2 中间工序设计要点	58	11.2 冷锻力的计算	97
9.2.3 冷锻工序设计示例	59	11.2.1 公式计算法	98
9.3 冷挤压零件的工艺编制	62	11.2.2 图算法	103
9.3.1 冷挤压件的结构要素	62	11.2.3 查表法	112
9.3.2 钢质冷挤压件的公差	65	11.2.4 冷锻力计算的说明	114
9.3.3 冷挤压件工艺编制原则	69	11.3 冷锻设备的选择	115
习题及思考题	72	11.3.1 冷锻设备与冷锻加工	115
第10章 冷锻用原材料及制坯	73	11.3.2 选择原则和要求	115
10.1 冷锻用原材料的性能	73	11.3.3 冷锻设备参数	117
10.1.1 冷锻用原材料的形式	73	习题及思考题	118
10.1.2 冷锻用原材料的加工	74	第12章 冷锻变形基本规律	120
10.1.3 材料的冷锻性能及参数指标	75	12.1 冷锻变形常用的塑性理论	120
10.2 冷锻用钢材	76	12.2 冷锻加工基本工序的构成	122
10.2.1 冷锻用金属材料的类别	76	12.2.1 分类的依据和前提	122
10.2.2 冷锻用钢材的性能	76	12.2.2 分类的方法及基本工序的	
10.2.3 按标准选用材料	78	构成	122
10.3 冷锻用非铁金属	80	12.3 冷锻零件的强化	124
10.3.1 铝及其合金	80	12.3.1 冷锻加工硬化	124
10.3.2 铜及其合金	81	12.3.2 冷锻零件的强化热处理	126
10.4 冷锻坯料的制备	82	习题及思考题	127
10.4.1 毛坯的计算与下料	82		

第3篇 冷锻模具结构设计

第13章 冷锻模具一般结构与设计	130	13.1.2 冷锻模的结构特点	131
13.1 冷锻模的一般结构及特点	130	13.2 模具工作零件的结构设计	132
13.1.1 冷锻模的分类与要求	130	13.2.1 下料切刀	132

13.2.2 顶锻模	133	14.1 设计原理	159
13.2.3 模锻模	133	14.1.1 厚壁圆筒的应力、应变分析	159
13.2.4 正挤凸、凹模	134	14.1.2 组合凹模的应力分布	160
13.2.5 反挤凸、凹模	136	14.1.3 组合凹模的计算与试验例	161
13.2.6 变薄拉深模	138	14.2 设计方法	162
13.3 模具材料及热处理	139	14.2.1 组合凹模的形式	162
13.3.1 对模具材料的基本性能要求	140	14.2.2 查表法	163
13.3.2 常用模具材料及热处理	140	14.2.3 图算法	164
13.4 冷锻模 CAD	146	14.2.4 预应力组合凹模的压合工艺	166
13.4.1 工艺方案与模具参数最优化	146	14.3 冷锻凹模的实际受力	167
13.4.2 冷锻工艺及模具的 CAD	149	14.3.1 冷锻凹模的工作内压	167
系统	149	14.3.2 凹模内压有效作用区	167
习题及思考题	158	习题及思考题	170
第 14 章 预应力组合凹模的设计	159		

第 4 篇 实践教学

第 15 章 课程实验和课程设计	172	比较	185
15.1 课程实验	172	实例 20 磁极铁芯等的磷酸锌钙处理	186
15.2 课程设计	172	实例 21 冷挤仪表旋钮帽的通用模架	187
第 16 章 冷锻实例	174	实例 22 汽阀簧座锻挤复合成形	188
实例 1 加长铆钉的冷锻工艺与模具	174	工艺	188
实例 2 自行车托架冷锻坯料形状的	175	实例 23 管道零件复合挤与刚性平移	189
革新	175	工艺	189
实例 3 螺栓锻锻工艺过程	175	实例 24 小型打字锤零件的冷锻挤	189
实例 4 螺母冷锻工艺	176	实例 25 铃锤的冷锻成形	189
实例 5 汽车大梁自动钢印机的打印	176	实例 26 汽车启动机直齿轮冷挤压技术	190
实例 6 轿车电器接电板锻铆冲头形状的	177	水平	190
革新	177	实例 27 多层电容器冷挤压模	191
实例 7 顶杆的冷挤压工艺	178	实例 28 带台阶槽型换向器两次冷锻	192
实例 8 缝纫机梭芯冷挤压工艺	178	成形模	192
实例 9 电容器外壳冷挤压工艺	179	实例 29 平面槽型换向器两次整体冷锻	193
实例 10 照明灯座套冷挤压工艺	179	成形	193
实例 11 轴承内圈冷挤压工艺流程	180	实例 30 带台阶槽型换向器整体	194
实例 12 深孔气缸冷挤压工艺	180	冷锻模	194
实例 13 冷挤压毛坯磷化除氢处理	181	实例 31 平面槽型换向器整体冷锻	195
实例 14 话机零件的复合挤及模具试验	181	实例 32 平面钩型换向器片爪分开整体	196
实例 15 自行车曲柄孔的扩径	182	冷锻	196
实例 16 胶轮手推车车轴的精密冷缩径	182	实例 33 平面钩型换向器片爪相连整体	197
实例 17 铝压力锅锅身的变薄拉深	183	冷锻	197
实例 18 汽车球销的冷锻挤工艺	184	实例 34 轴套零件的温挤工艺	198
实例 19 传动轴的冷挤压与切削工艺	184	实例 35 轴承套圈的温锻工艺	199
参考文献	202		

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的。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 冷锻基本概念

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”实际上是指金属再结晶温度（ $T_{\text{再}}$ ）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。从金属学理论可知，金属的再结晶温度（ $T_{\text{再}}$ ）与其熔点温度（ $T_{\text{熔}}$ ）有关，一般定为 $T_{\text{再}} = (0.3 \sim 0.5) T_{\text{熔}}$ 。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	钨	1200

其次，冷锻应该是一个总的名称，按分类学理论中类目之间的等级关系应为上位类，其下位类包括镦锻、挤压、模锻、压印等工序。尽管现阶段研究得最为活跃的部分是冷挤压，但它仍是冷锻加工的一部分，而不是全部。所以，在某些场合，把冷锻与冷挤压视为同名词或并列词，或将冷锻仅仅看作是冷镦、冷模锻等都是不尽合理的，有悖于分类学基本原理。

此外，冷轧、冷拉、冷拔也属于冷变形（加工）范畴，但因一般又把这些加工划分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，特别是冷镦车间附设有冷拉、冷拔工段（场），故在本书的某些章节中（例如第 10 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；其使用的安装在冷锻设备上的专用工具即为冷锻模。

0.2 冷锻的特点

0.2.1 优点

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 冷锻零件的强度性能最好，因为冷变形有加工硬化效应；
- ② 工件精度高，是一种精密成形技术；
- ③ 材料消耗少，且没有因坯料为热态而污染环境；
- ④ 生产率高，更易实现自动化；
- ⑤ 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（Warm Forging）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复杂的零件。温锻零件的尺寸精度和表面质量要稍亚于冷锻件。有不少实践证明，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。

长期以来，人们习惯上所谓的锻造，实际上是指热锻。在热锻加工中，由于材料的强度及变形抗力很小，塑性变形及流动性更好，故适宜于制造几何尺寸大及形状结构更复杂的零件。自然，热锻件的尺寸精度和内外质量均不如冷锻件。为了产品质量的提高与生产环境的改善，现在，积极发展冷锻是大势所趋。在这个进程中，上述成为难点问题的零件，可以从完全热态过渡到温热态、冷温态乃至冷态。关于这一点，至少在一些中、小型零件上取得了成功。

0.2.2 难点

冷锻的优点往往不能用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2500~3000N/mm²，压印或精压时有的竟达3500N/mm²。所以，模具材料要求更高，且都要设计、制造二至三层的预应力组合凹模。

③ 毛坯往往要进行软化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 冷锻的发展历史

人类最早的生产制造（准确地说是从原材料到产品零件的二次成形加工）技术是冷压，冷作或冲压与冷锻的结合。

在世界文明古国之一的中国：原始社会就出现了制陶工艺；发展到奴隶社会的商代，已进入属于青铜时代的繁荣时期；在出现包括紫铜、青铜的冶炼铸造的同时，也有了多种铜器的制造；进入封建社会，先后创始了冶铁、炼钢技术，铁器制品也获得了广泛的应用。

日本学者工藤英明教授于1980年在哈尔滨工业大学讲学时给出了一个评价，认为中国古代冷锻、冷压加工比埃及还早。

根据有关文献给出的以下重要事例，可以了解古代冷压加工的发展情况。

0.3.1 古代的冷压加工

公元前20世纪（我国夏代时期），中国出现了经过冷锻加工的紫铜刀、凿。

公元前11世纪（我国商代时期），中国就已经用冷作方法制造了黄金箔，厚度仅0.01mm，还冷锻出了青铜兵器。古书中记载有“备乃弓矢，锻乃戈矛，砺乃锋刃，无敢不善”。大意是说军队在出发前，要把戈矛等武器锻好、磨好，以增加其硬度和锋利程度。

公元前11世纪～公元前7世纪（我国西周时期），中国用冷锻方法制作了多种铜、铁器皿。

公元前475～公元前221年（我国东周战国时期），中国用冷作方法制造了紫铜槌胎薄铜缶（容器）。这种紫铜缶壁厚1~2mm，分上下两半，槌成后再冷咬铆接在一起。器身上还有精细、流顺的波纹。如图0-1所示。其中的冷搭接合技术也是十分高明的，直至今日仍然是一种被采用的接合方法。

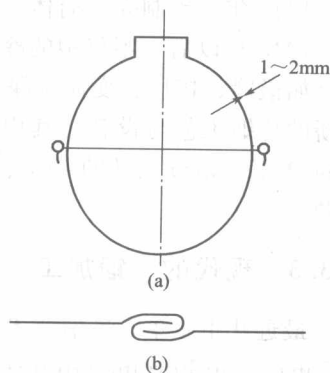


图0-1 紫铜槌胎薄铜缶
(a) 缶身整体；(b) 上下咬接

公元前1世纪，Celt人利用模型把金锭冷压印成货币或装饰品。

公元2世纪，中国用花纹钢制造了宝刀、宝剑。

公元11世纪，中国冷锻出了防身器“瘃子甲”，并提出了金属塑性加工学说中的一个冷锻变形量控制定律。我国北宋时代沈括（1031~1095）在《梦溪笔谈》一书中有“姜善锻甲”的详细记载，记叙了清堂姜人锻出了又薄又轻、又韧又硬的防身器“瘃子甲”：“去来五十步，强弩射之，不能入。”“凡锻甲之法，其始甚厚，不用火，冷锻之，比元厚三分减二乃成。其末留筋头许不锻，隐然如瘃子，欲以验未锻时厚薄。如浚河留土简也。谓之‘瘃子甲’。”从研究锻压史出发，可把这个“比元厚三分减二乃成”称为“变形量控制律”，这是世界上最早的金属塑性学说，比之塑性流动准则中目前被认为最早的Trasca准则起码要早800多年。所以，我国也还是世界上真正最早创立金属塑性学说的国家。

公元14世纪，俄罗斯制造出了银币。

公元16世纪，法国、中国等出现了线材通过拉丝模成形的拉丝。我国明代嘉靖年间（1522~1566）就已经制造和应用了冷拔钢丝，表明当时已经掌握了冷加工硬化方面的知识

和技能。把线材切断,将其头部镦粗制成铁钉的作业,大致已有几百年的历史。我国古代宋应星的《天工开物》中也记载了制钉的生产工艺。

0.3.2 近代的冷锻加工

近代冷锻加工与冲压加工紧密相连,经过近 200 年的发展,也形成了一门应用技术科学和制造技术。其发展简史可用以下重要事例予以说明。

追溯到稍早一点,近代冷锻技术是从 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,一种新工艺。

1830 年,在法国开始了用机械压力机反挤压出铅管和锡管。

1886 年,在法国市面上出现了注射成形出的中空有底的子弹壳。以上事例均属于热锻、热压成形,但却为冷锻的基础。

1900 年,美国 L. E. Hooker 取得了铅、锌、铝和黄铜等有色金属材料空心件正挤压方法的专利,并制造了黄铜的西服扣。

第一次世界大战期间,美国用正挤压方法制造了黄铜弹壳,德国开发了钢弹壳。

1935 年,德国人采用了前一年发明的磷化处理方法和新润滑剂,用挤压的方法制造出了钢质子弹壳,成为二战时期的军事秘密。

1940 年,钢制壳、筒体零件的冷挤压(Newmayer 法)出现了。

1945 年以后,不仅钢的冷挤压达到了实用的条件,而且冷锻生产中逐渐出现将基本工序(如镦锻、挤压、变薄拉深、模锻等)组合起来成形,如复合挤压、镦挤、挤缩镦以及一些新的冷锻工艺与设备。其中的静液挤压工艺是 1893 年英国 J. Robetston 取得发明专利,1934 年 Harvard 大学的 Bridgman 着手研究,直到 1958~1962 年解决了难加工材料的实用问题。

0.3.3 现代的冷锻加工

最近几十年里,冷锻技术的发展更加迅速。1963 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 20 世纪 50 年代初从国外进口有关论文和专利并介绍到日本而开始的。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%,前西德和法国也占 70%~80%。又如,1980 年前,每年用于冷锻的钢材,美国为 115 万吨,前西德 10 万吨,日本 40 万吨。再如,20 世纪末,轿车中冷锻件的使用量,日本平均达 42kg/台,美国、德国等国家也接近 40kg/台;而我国为 4~5kg/台,小一个数量级。

目前,冷锻件的形状类型已达 1000 多种;20 世纪 80 年代后期,国外冷锻零件质量最

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 $6\sim 8\mu\text{m}$ ；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。

表 0-2 各种加工方法的尺寸精度

ISO 等级 加工方法	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。

但我国现代冷锻技术起步发展比外国要慢，比日本也晚了近十年。我国于 20 世纪 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压成形一些铝、铜及其合金零件。黑色金属的冷挤压技术起步于 1958 年，由阮雪榆教授作了开创性的研究和应用。经近十年发展，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；从 20 世纪 70 年代后期起，奥氏体不锈钢、轴承钢等材料的冷锻加工已崭露头角，并成功地实现了如斜齿轮、斜花键类零件的冷锻加工。

20 世纪 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。后来又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个指针零件的镦扁模，该零件的头部尺寸为 $3\text{mm}\times 0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ ，镦扁成 $3\text{mm}\times 1\text{mm}\times 0.25\text{mm}$ （H62 材料），镦扁处质量只有 0.007g（整个零件质量为 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。

0.4 冷锻技术发展动向

进入 21 世纪，在冷锻技术的生产应用和理论研究方面，我国正在继续追赶世界先进水平并且有自己的特色。一些工厂企业，尤其是一些汽车零部件生产厂家，或在积极应用冷锻加工发展汽车零件中的冷锻件，或在采用静液挤压、精冲与冷锻相结合等新工艺，或在应用计算机辅助冷锻工艺和模具设计等新技术，且均已有了令人鼓舞的进展。不少高等院校和科研院所，不仅在冷锻零件的工艺及模具 CAD 系统的软件研发上，还分别运用上限法、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。

特别令人鼓舞的是，2003 年，联合国科教文组织的“产学研结合计划”在中国设立了“冷锻技术讲席”，讲席的主任是阮雪榆院士。显然，这一动向，既标志着冷锻技术的极端重

要，又预示着冷锻技术的美好前途。

为适应这种新动向、新形势的发展，让人们冷锻工艺模具学有一种正确的认识是至关重要的。充分认识、重新强调冷压、冷锻技术的优点和难点，大力发展和应用冷锻件。这里的人们包括冷锻技术工作者、塑性成形或材料加工工程科技工作者以及该领域的组织管理人员。

可以从学科理论中分冷、热两类变形的角度，认识并强调冷压、冷锻在工件质量与环境质量上的意义，参见表 0-3。

表 0-3 两类金属塑性成形主要特点比较

项 目 种 类	变形本质				工件质量				环境质量			
	温度 范围	塑性 效应	塑性 流动	变形 抗力	形位 精度	表面 粗糙度	表面氧 化程度	被强化 能力	振动 噪声	能源 消耗	空气 污染	绿色 程度
热压成形	T_{ar} 以上	回复与 再结晶	更好	小	低	高	严重	有	大	多	有	较低
冷压成形	T_{br} 以下	加工 硬化	稍差	大	高	低	无	大	小	少	无或少	较高

可以从工程实际中分热锻、温锻、冷锻三类变形角度，认识并强调冷锻的工艺技术水平及发展潜力，参见表 0-4。

表 0-4 热锻、温锻、冷锻工艺技术水平比较

模 锻	尺寸精 度等级	表面粗糙度 / μm	锻件质量 /kg	可用金属 原材料	成形件 形状	毛坯的 预先处理	中间处理	经济批量	模具寿命
热 锻	12~16	>100	0.005~1500	有色金属； 黑色金属	没有限制	不要求	不要求	>500	$2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$
温 锻	10~13	<30	0.1~50	黑色金属中： 碳素钢， 合金钢	根据物体转 动的可能性	不要求	不要求	$>10^4$	$10^4 \sim 2 \times 10^4$
冷 锻	8~12	6~8	0.001~35	有色金属； 黑色金属中： 碳素钢， 低合金钢	主要加工旋 转体	有的有要求	部分有要求	$>3 \times 10^3$	$2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$

德国学者、曾长期任国际冷锻协会主席的 K. 郎格教授，1985 年在上海交通大学讲演中，提出了冷锻技术未来的发展趋势和目标是：提高冷锻产品的精度和表面质量；生产出几何形状更为复杂的冷锻、温锻产品；借助 CAD/CAM 提高其工艺模具的设计、制造（现称为数字化，即 KBE 技术）水平；通过采用新的模具材料及表面处理技术，并与新的润滑系统结合起来，提高模具寿命；将冷锻技术应用于小批量生产中，以减小冷锻技术对汽车行业的依赖性，从而开辟冷锻技术实际应用的新领域。

第 1 篇 冷锻加工基本工序

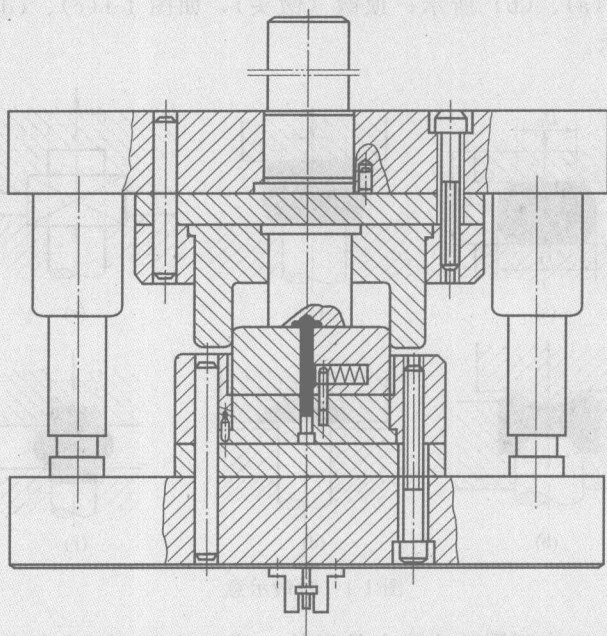
讲述冷锻加工中各种基本工序的

定义

变形特点

成形机理

模具工作零件及其工作部分的结构要点



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，锻可分为：锻粗（整体锻粗），如图 1-1(a)、(b) 所示；顶锻（锻头），如图 1-1(c)、(d) 所示；中间锻粗，如图 1-1(e)、(f) 所示。

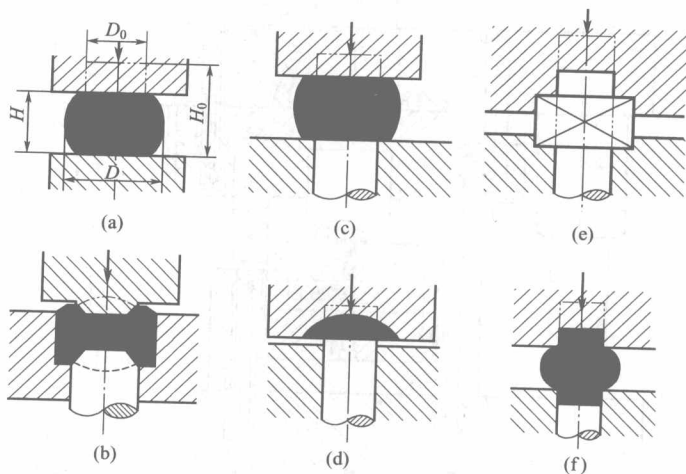


图 1-1 锻 锻示意

各种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。

在现今的锻加工中，整体锻粗是先制备（切断）好坯料，然后锻成形的。而顶锻与中间锻粗，多为先将棒料、线材锻成形，再行切断而获取工件的。比如，在使用某些自动锻机进行顶锻或中间锻粗（包括多道锻成形工序）的加工过程中，最后工序才是切断。

1.2 锻 粗

锻粗，即整体锻粗，是使整个坯料由轴向压缩转为横向扩展的一种锻工序。而且，从变形实质上来看，它是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, 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为 H 、直径为 D 的工件, 这就是镦粗变形的示意。也称此为自由镦粗。

(1) 镦粗变形的度量 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。通常一次镦粗的高径比 (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

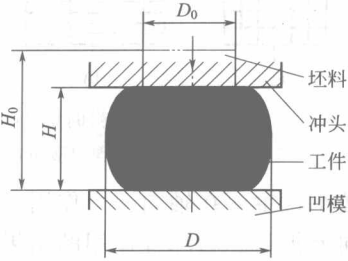


图 1-2 镦粗示意

$$\epsilon_H = \frac{H_0 - H}{H_0} \times 100\% \tag{1-1}$$

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应该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

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

以上两式均表明, 镦粗率愈大, 镦粗变形程度也愈大。

一些金属材料的许用镦粗变形程度列于表 1-1, 一些钢材的极限镦粗率 ϵ_C 和许用镦粗率 ϵ_H 列于表 1-2。它们均为前人的经验数据。

表 1-1 一些金属材料的许用镦粗率 %		
材 料		ϵ_H
钢	10	75~81
	15	70~73
	35	63
	45	40~45
	15Cr	53~60
	34CrMo	50~60
非铁金属	纯铝	约 96
	防锈铝	约 92
	硬铝	约 50
	黄铜	73~80

表 1-2 钢材的极限镦粗率和许用镦粗率 %		
材 料	ϵ_C	ϵ_H
10	80	68
08F, 10F	90	72
20	76	65
35	73	60
15Cr	78	60
40Cr	74	55
30CrMnSiA	87	65
65Mn	50	40
GCr15	60	45
1Cr18Ni9Ti	90	76

※ (2) 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, 然后用黏结剂粘合成一体, 进行镦粗, 如图 1-3(a)。理想镦粗则正方形网格会变成均匀的长方形网格, 如图 1-3(b) 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 1-3(c) 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

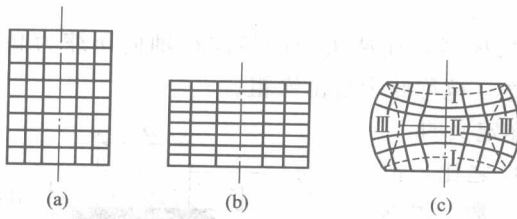


图 1-3 镦粗时的不均匀变形
(a) 坯料; (b) 理想镦粗; (c) 实际镦粗

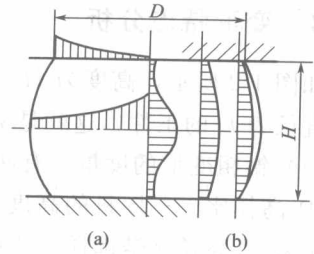


图 1-4 镦粗时的应变分布
(a) 径向; (b) 轴向

响较小，主要在轴向压力作用下产生轴向压缩变形，但由于锥形体 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，因而也呈凸肚状，但其网格变形不大。

根据以上分析可以理解，镦粗加工中材料变形的最大特点是变形不均匀。镦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。这种镦粗时不均匀变形的分析和模型，对于冷镦粗和热镦粗都是适用的。

※ (3) 镦粗时的应力分析 由于镦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，镦粗体内的应力分布也是不均匀的。对于这种不均匀的分布状况，可以作出如图 1-5 所示的定性分析。从图中可以看到，在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，越向边缘，三向压应力程度就越减弱；剪应力 (τ) 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，当镦粗的高径比较小时或摩擦系数很大时，可能整个端面上都有最大的剪应力。而在变形体内部，其正应力和剪应力是从端面向中心逐渐递减。

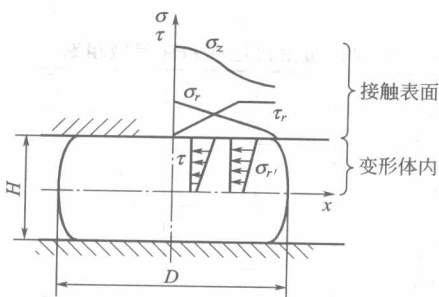


图 1-5 镦粗时的应力分布

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镦粗变形，至今有很多理论，下面介绍其中三种。

① 如图 1-6 所示，对应镦粗变形程度不同的三个区域，刚性区Ⅰ区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，小变形区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 。

② 如图 1-7 所示，该理论与上一个主应力简图-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。它能更好地解释镦粗件外层有纵向开裂的变形缺陷问题。

③ 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