

〔联邦德国〕 库特·朗格

海因茨·梅迈尔—诺肯佩尔 著

# 模锻

# MODUAN



# 模 锻

〔联邦德国〕 库特·朗格 著  
海因茨·梅迈尔-诺肯佩尔

杜忠权 张海明 李国仁 译

机 械 工 业 出 版 社

## 译者序

德意志联邦共和国斯图加特大学成形技术研究所的教授库特·朗格 (Kurt Lange) 博士是举世闻名的金属塑性加工技术权威。早在 1958 年, 他便编写出版了《钢的模锻》(Gesenkschmieden Von Stahl) 一书, 影响甚大, 被译成英、日等多国文字出版, 享有“模锻技术的圣经”的美誉。从那时以后, 又过去了 20 年, 锻造无论在理论研究, 还是在工艺、工具和设备等方面, 都有了飞跃的发展; 锻件的热处理技术也达到了空前的水平。人们对锻件精度、表面状态和承载能力的要求也大大提高了。有鉴于此, Lange 教授特地邀请了联邦德国的另一位知名锻造专家——汉诺威技术大学模锻研究所的海因茨·梅迈尔——诺肯佩尔 (Heinz Mayer—Norkemper) 博士合作, 对 1958 年版的“Gesenkschmieden von Stahl”进行全面的补充、修改和增订, 然后更名为《模锻》(Gesenkschmieden), 于 1977 年由驰名世界的施普林格出版社出版。

如果把 1958 年的“Gesenkschmieden von Stahl”算作初版, 那末, 现在的“Gesenkschmieden”便是第二版了。该书出版后, 不胫而走, 迄今已有多种文字的译本问世。

顾名思义, 该书从初版书名“Gesenkschmieden von Stahl”改为第二版书名“Gesenkschmieden”, 说明作者把锻件材料的范围从原来的以钢为主扩大到多种工程用有色金属 (铝、镁、铜和钛) 及其合金, 这也反映了近 20 多年来, 在锻造技术进步的同时, 材料科学也有了长足的发展。

Lange 教授在编著本书初版时, 试图将它写成既是一本工科大学生用的教科书, 又是一本非锻造专业人员进修锻造技术的入门书, 同时还是一本锻造技术的资料汇编。Lange 教授的初衷后来成为本书初版的第一个显著特点, 本书第二版仍然保留了这个特点, 丝毫没有减色。

本书将原理、工艺和设备三部分内容有机地溶合到一起, 既收穿插交融、举一反三之效, 读来又无拼凑糅合之感, 这可说是本书初版和二版的另一个显著的特点。

目前, 我国的高等学校正在~~进行~~教学改革, 改革的主要方向之一是拓宽知识面, 增加选修课, 压缩专业课的教学时数。高等工科院校的锻压专业同样面临着减少锻造专业课教学时数的问题。解决这个问题一个关键便是要有一本删繁就简, 能够抓住要点的教科书或教学参考书, 本书能选精择英, 力避枯燥, 既能旁征博引, 又不落繁琐芜杂, 行文深入浅出, 言简意赅。从适应我国锻造专业教学改革的需要来说, 本书也不失为一本具有很高参考价值和借鉴价值的好书。

我国引进模锻技术, 始于 50 年代初。当时学习模锻理论、工艺和设备莫不以苏联为师, 有关资料和书籍也绝大部分来自苏联。这种情况固为当时的政治历史条件所使然, 但是, 几十年来, 模锻技术本身已经有了很大的进步, 而目前我国高等院校中用以教学的, 工厂中用以从事模锻技术工作依据的, 仍未能完全摆脱这些 50 年代资料的窠臼, 这未免是件憾事。本书汉译本出版以后, 无疑将帮助我国在模锻技术界活跃的教育

工作者、科研人员、学生和工厂中的技术人员打开眼界，了解近代模锻技术发展的进程和现状，为他们提供了极有用的学习外国经验的渠道。译者相信，本书汉译本定将成为广大模锻技术工作者的良师益友。

本书汉译本直接从德文原著第二版译出。参加翻译工作的是杜忠权、张海明和李国仁三人。他们的分工是：张海明翻译0～4章，李国仁对0～4章的译文进行了技术初校，杜忠权翻译前言部分、5～8章和索引，并且撰写了译者序。最后，全书由杜忠权定稿。由于译者的语言和专业水平都有限，谬误在所难免，希望读者不吝批评指正，幸甚。

译者

1987年10月

## 第二版前言

作为一本教科书和手册的《模锻》第二版，是在初版<sup>①</sup>发行后19年才问世的。第二版是在第一版的基础上经过全部重写完成的，它的内容已经不再局限于钢了。这是因为除了钢以外，其它材料的应用日益广泛，利用轻金属制造重载的零件便是一个例子。新版分为九章，是为了使叙述更加简洁，并且也能照顾到诸如温锻和粉末锻造一类新的发展和研究成果。本书所要完成的任务和模锻企业是一致的，即使生产出来的锻件既能承受高应力的作用，又能尽可能地接近成品零件的形状，同时还要能够最好地利用材料的性能。

自从初版刊行以来，模锻技术在许多领域（工艺、模具、设备和材料）内发生了十分重要的变革。对于模锻件的精度、表面状态和承载能力的要求大大提高了，热处理技术也达到了一个更高的水平。在成本和劳动力市场的压力下，在保护环境和改善劳动条件的强烈要求下，由于日益增多地使用压力机而使工艺发生了很大的变化。特别值得指出的是，联邦德国的工作母机工业在这方面做出了不可估量的贡献。这种情况反过来又对模具设计和制造提出了更高的要求。在欧洲锻造联合会范围内进行的国际合作，或者在定期举行的国际模锻学术会议上通过交流经验和互相切磋而使这一发展趋势得到加强。此外，无疑也是很重要的一点是：在高等工业学校里进行的系统性研究活动也推动着模锻技术的进步。联邦德国从1950年起，英国从1960年起，美国从1970年起在全国性的模锻工业组织有系统的指导下，科学研究工作得到了促进。在联邦德国，从1956年到1967年，由联邦德国研究协会资助的“重点成形技术计划”是格外令人鼓舞的。现在，由于日益广泛地将电子计算机应用于工艺、模具和设备等方面而使发展速度大大加快。总的看来，旧经验迟早要被定量的和可靠的理性知识补充和取代。因此，模锻企业中领导阶层的结构正在发生变化，而在大学和专科学校也正在加紧进行着培养工程师的工作。

在这样的背景下，本书初版所要达到的目的二版依然存在，它们是：要成为一本大学生用的简明扼要的教科书，一本生产设计工程师用的模锻入门书和一本为了深入探讨某个问题而能从中检索到大量参考文献的情报性手册。

由于新版的知识面扩大了，所以邀请汉诺威大学模锻研究所的主任工程师海因茨·梅迈尔-诺肯佩尔博士一同来完成本书初版的修订工作。

感谢模锻研究所和其它许多模锻企业及机械厂同意提供资料和实例。感谢施普林格出版社提供了良好的合作和为本书设计了富丽堂皇的封面。

希望新版和初版一样完成向读者介绍模锻技术的任务。欢迎同行们对本书提出意见和加以补充。

K. 朗格和H. 梅迈尔-诺肯佩尔

1977年8月于斯图加特和汉诺威

<sup>①</sup> 本书初版名为“Gesenkschmieden von Stahl”《钢的模锻》。——译者

## 工学博士奥托·金斯勒教授为本 书初版所作序言的摘要

“很早以来，我就意识到，培养制造工程师，只讲授工艺学和机床存在着一定的片面性。尽管大约有半数的金属制品在离开冶金工厂以后，还要经过至少一次的塑性成形过程，但是对未来的工程师却不讲授整个塑性成形技术。模锻从其产品产量看，确实有着很重要的意义，但是，模锻在科学研究上还存在着大量的问题。关于模锻的内外过程，我们知道得还不太清楚，至今还未形成一套模具及其制造方法的理论，以及我们还不敢把锻压机器和机床相提并论。说实在的，在这块尚未开垦的科学园地里，处于当前对模锻件的质量、可加工性、精度和表面的要求大大地提高的情况下，需要我们百倍勤奋地工作。大量生产和自动化必须把这些要求控制在合理的范围以内”。

“这本书填补了工艺技术文献中的一个空白，从此，模锻也象其它工艺那样，成为一门可以讲授的学科了”。

# 目 录

译者序

第二版前言

工学博士奥托·金斯勒教授为本书初版所作序言的摘要

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 0 绪论                           | 1  |
| 0.1 沿革                         | 1  |
| 0.2 技术经济性                      | 2  |
| 0.3 模锻在加工技术中的地位                | 3  |
| 0.4 锻造过程的系统分析                  | 6  |
| 0.5 一般术语、公式符号、尺寸单位             | 7  |
| 1 基本原理                         | 10 |
| 1.1 引言                         | 10 |
| 1.2 模压时的成形条件                   | 12 |
| 1.2.1 时间因素                     | 12 |
| 1.2.2 模具速度与变形速度                | 14 |
| 1.2.3 温度                       | 16 |
| 1.2.3.1 工件温度                   | 16 |
| 1.2.3.2 锻模温度                   | 19 |
| 1.2.3.3 工件间隙中的温度               | 24 |
| 1.2.4 摩擦因数                     | 25 |
| 1.2.5 流动应力                     | 27 |
| 1.2.5.1 一般规律                   | 27 |
| 1.2.5.2 材料的影响                  | 28 |
| 1.2.5.3 流动曲线                   | 29 |
| 1.2.6 工件形状                     | 32 |
| 1.3 锻粗与模压时的运动状态和应力状态           | 35 |
| 1.3.1 概述                       | 35 |
| 1.3.2 锻粗                       | 38 |
| 1.3.2.1 平面锻粗和旋转对称锻粗、应力、材料流动、变形 | 38 |
| 1.3.2.2 楔形截面的坯料的锻平             | 44 |
| 1.3.2.3 立方体的锻粗                 | 44 |
| 1.3.3 模压                       | 45 |
| 1.3.3.1 运动状态                   | 45 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 1.3.3.2 变形状态         | 50  |
| 1.3.3.3 应力状态         | 50  |
| 1.3.3.4 变形力与变形抗力     | 54  |
| 1.3.3.5 力作用点与作用方向    | 60  |
| 1.3.3.6 变形功          | 62  |
| 2 材料与原坯料             | 63  |
| 2.1 变形特性的对比          | 63  |
| 2.2 材料种类             | 65  |
| 2.2.1 碳素钢与合金结构钢      | 65  |
| 2.2.2 不锈钢            | 70  |
| 2.2.3 镁合金            | 71  |
| 2.2.4 铝及铝合金          | 73  |
| 2.2.5 钛及钛合金          | 75  |
| 2.2.6 铜及铜合金          | 76  |
| 2.2.7 铁基、钴基与镍基高温合金   | 77  |
| 2.3 原材料的缺陷及入厂检验      | 79  |
| 2.4 材料分选与熔炼炉号的分类保管   | 81  |
| 3 模锻工艺               | 82  |
| 3.1 模锻的工艺步骤          | 82  |
| 3.1.1 工序             | 82  |
| 3.1.2 原始坯料           | 82  |
| 3.1.3 去氧化皮           | 88  |
| 3.1.4 体积分配           | 89  |
| 3.1.4.1 体积分配形状和体积分配图 | 89  |
| 3.1.4.2 锻粗、局部锻粗和成形锻粗 | 92  |
| 3.1.4.3 拔长与成形拔长      | 95  |
| 3.1.4.4 拔长锻粗         | 95  |
| 3.1.4.5 径向锻造         | 95  |
| 3.1.4.6 热挤压          | 97  |
| 3.1.4.7 冲盲孔          | 97  |
| 3.1.4.8 辊锻与横轧        | 97  |
| 3.1.5 弯曲             | 106 |
| 3.1.6 预成形和终成形        | 111 |

|                                     |     |                                |     |
|-------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 3.1.7 切边和冲孔 .....                   | 117 | 4.7 锻模的装配和固定 .....             | 186 |
| 3.1.8 热后成形 .....                    | 119 | 4.8 锻模的冷却与润滑 .....             | 188 |
| 3.2 变形工步的确定 .....                   | 119 | 4.8.1 冷却剂、润滑剂与脱模<br>剂的性能 ..... | 188 |
| 3.3 特种模锻 .....                      | 124 | 4.8.2 冷却剂 .....                | 189 |
| 3.3.1 精密锻造 .....                    | 124 | 4.8.3 润滑层 .....                | 189 |
| 3.3.2 无飞边模压 .....                   | 128 | 4.8.4 脱模剂 .....                | 192 |
| 3.3.3 粉末锻造 .....                    | 131 | 5 模锻机器 .....                   | 193 |
| 3.3.4 温热锻造 .....                    | 132 | 5.1 结构形式 .....                 | 193 |
| 3.3.5 其它方法 .....                    | 133 | 5.1.1 锤 .....                  | 194 |
| 3.4 平锻机上锻造 .....                    | 134 | 5.1.1.1 运动学和动力学 .....          | 194 |
| 3.5 模锻件的缺陷 .....                    | 137 | 5.1.1.2 部件 .....               | 198 |
| 4 模锻用模具 .....                       | 139 | 5.1.1.3 现有锤的结构举例 .....         | 201 |
| 4.1 种类与名称 .....                     | 139 | 5.1.2 螺旋压力机 .....              | 203 |
| 4.2 锻模的应力 .....                     | 140 | 5.1.2.1 运动学和动力学 .....          | 203 |
| 4.3 锻模的损伤与寿命 .....                  | 143 | 5.1.2.2 部件 .....               | 206 |
| 4.3.1 锻模的损伤 .....                   | 143 | 5.1.2.3 现有螺旋压力机的结构<br>举例 ..... | 208 |
| 4.3.2 锻模的使用寿命 .....                 | 145 | 5.1.3 曲柄压力机 .....              | 209 |
| 4.3.3 影响锻模损伤和使用寿命<br>的各种因素的作用 ..... | 147 | 5.1.3.1 运动学和动力学 .....          | 209 |
| 4.3.4 延长锻模寿命的途径 .....               | 153 | 5.1.3.2 部件 .....               | 211 |
| 4.4 模具用钢 .....                      | 154 | 5.1.3.3 现有曲柄压力机的结<br>构举例 ..... | 212 |
| 4.5 锻模设计 .....                      | 157 | 5.1.4 液压机 .....                | 214 |
| 4.5.1 外形 .....                      | 157 | 5.1.5 锻轧机 .....                | 215 |
| 4.5.2 模槽 .....                      | 163 | 5.2 模锻机器的性能 .....              | 215 |
| 4.5.3 模槽的位置 .....                   | 168 | 5.2.1 能量、功与力的特性参数 .....        | 217 |
| 4.5.4 顶料器 .....                     | 169 | 5.2.2 时间参数 .....               | 218 |
| 4.5.5 组装锻模 .....                    | 169 | 5.2.3 精度参数 .....               | 218 |
| 4.5.6 特种锻模 .....                    | 171 | 5.2.4 生产率 .....                | 220 |
| 4.6 锻模的制造 .....                     | 173 | 5.2.5 辐射特性 .....               | 220 |
| 4.6.1 模块的制造 .....                   | 174 | 5.2.6 工作性能 .....               | 221 |
| 4.6.2 模槽的制作 .....                   | 174 | 5.3 模锻机器的检查 .....              | 222 |
| 4.6.2.1 制作方法的比较 .....               | 174 | 5.4 模锻机器的选择 .....              | 225 |
| 4.6.2.2 铸造 .....                    | 176 | 6 模锻企业中锻造前和锻造后<br>的工序 .....    | 229 |
| 4.6.2.3 挤压 .....                    | 177 | 6.1 分离 .....                   | 229 |
| 4.6.2.4 切削 .....                    | 178 | 6.1.1 剪切 .....                 | 230 |
| 4.6.2.5 电火花腐蚀加工 .....               | 180 | 6.1.2 冷折 .....                 | 235 |
| 4.6.2.6 电化学切削 .....                 | 182 | 6.1.3 锯割 .....                 | 236 |
| 4.6.3 锻模的热处理 .....                  | 183 | 6.2 模锻前加热 .....                | 236 |
| 4.6.4 模槽表面的精加工 .....                | 184 | 6.2.1 对加热设备的要求 .....           | 236 |
| 4.6.5 表面处理 .....                    | 184 |                                |     |
| 4.6.6 锻模的修理 .....                   | 185 |                                |     |
| 4.6.7 锻模的检验 .....                   | 185 |                                |     |

|                              |     |                                                  |     |
|------------------------------|-----|--------------------------------------------------|-----|
| 6.2.2 在燃烧式模锻加热炉中<br>加热 ..... | 238 | 7.4.3 任务和任务的范围 .....                             | 278 |
| 6.2.2.1 加热过程原理 .....         | 238 | 7.4.4 自动化的例子 .....                               | 279 |
| 6.2.2.2 模锻加热炉的部件 .....       | 241 | 7.4.5 锻压设备的运输装置 .....                            | 284 |
| 6.2.2.3 炉子的型式 .....          | 247 | 7.4.6 自动化的条件 .....                               | 286 |
| 6.2.3 电加热装置 .....            | 250 | 8 模锻件 .....                                      | 287 |
| 6.2.4 选择锻造加热炉的原则 .....       | 255 | 8.1 模锻件的主要几何形状 .....                             | 287 |
| 6.2.5 氧化和表面脱碳 .....          | 256 | 8.1.1 形状等级和尺寸限制 .....                            | 287 |
| 6.3 焊接连接 .....               | 258 | 8.1.2 形状上的考虑 .....                               | 289 |
| 6.4 模锻件热处理 .....             | 259 | 8.1.2.1 分模线 .....                                | 289 |
| 6.5 锻件清理 .....               | 261 | 8.1.2.2 壁和肋的尺寸 .....                             | 293 |
| 6.6 利用变形方法进行表面加工 .....       | 262 | 8.1.2.3 底厚 .....                                 | 294 |
| 6.7 切削加工 .....               | 264 | 8.1.2.4 凹槽和冲孔底片(减<br>轻孔) .....                   | 295 |
| 6.8 表面保护 .....               | 267 | 8.1.2.5 侧面斜度 .....                               | 295 |
| 6.9 模锻时的检验和质量监督 .....        | 267 | 8.1.2.6 圆角半径 .....                               | 296 |
| 6.9.1 入厂检验 .....             | 267 | 8.2 模锻件的几何形状缺陷 .....                             | 297 |
| 6.9.2 中间检查 .....             | 268 | 8.2.1 钢模锻件的公差和允许<br>偏差 .....                     | 298 |
| 6.9.3 最终检验 .....             | 268 | 8.2.2 变形镁合金、变形铝合金<br>和变形铜合金模锻件的公<br>差和允许偏差 ..... | 301 |
| 6.9.4 检验结果文件 .....           | 269 | 8.2.3 和公差结合的设计观点 .....                           | 301 |
| 7 模锻企业 .....                 | 270 | 8.2.4 加工余量 .....                                 | 302 |
| 7.1 企业中的部门 .....             | 270 | 8.3 模锻件的强度性能 .....                               | 305 |
| 7.2 设备 .....                 | 272 | 参考文献 .....                                       | 309 |
| 7.3 锻造企业中的运输任务 .....         | 274 | 索引 .....                                         | 322 |
| 7.4 模锻自动化 .....              | 275 |                                                  |     |
| 7.4.1 发展 .....               | 275 |                                                  |     |
| 7.4.2 模锻自动化问题 .....          | 278 |                                                  |     |

# 0 绪 论

## 0.1 历史沿革

模锻是现代化锻造技术中高速发展的一个门类,其标志是采用成形工具(即锻模)及能够提供巨大力量和能量并使模具精确导向的机械。凡是通过工具相对运动来改变工件厚度或截面形状的所有方法皆称为锻造。这种技术早在公元前4000年新石器时代末期就存在了。在出现铁匠之前就活跃着金匠、银匠和铜匠,许多成形方法于此发端。早期的锻造产品是武器、首饰和日用品。虽然埃及早在公元前4000年以前就知道用陨铁制造简陋的工件,但是只有在古海地特王国首先从矿石中炼出了铁后,才开始了锻造的伟大时代。从公元前15世纪的遗物来看,铁在当时已作为珍贵的金属用来制造饰物了。大约公元前700~500年,铁已几乎完全取代了青铜,用于制造武器、工具和其它用品。随后不久,正如荷马史诗中所流传的,人们又发现了铁可以淬硬。在那个时代,铁匠备受器重,希腊人崇拜铁匠赫法伊斯托斯(Hephaistos)为上帝,日耳曼神话中的铁匠维兰德(Wieland)也是家喻户晓的。

古代和中世纪初期的铁匠,虽然由于掌握了完善的锻焊技术而做出了显著的成绩,但他们仅仅凭体力工作,这就限制了锻造产品的尺寸。那个时期的大型锻件主要是船锚。最大的著名锻件是德里铁柱,其直径为400mm,高达7.25m,那是公元前几世纪至公元300年之间的产物。

锻造进一步发展的标志是使用机械。公元1300年,水力传动的带柄锻锤首先得到了采用。这种锻锤决定了直到19世纪为止的自由锻造技术的面貌。在15世纪,利用锻锤不仅能制造各种用具(例如农具),而且也能制造枪炮,其中包括带楔形炮口的后膛炮的中空锻造炮管。

1842年,内史密斯(Nasmith)发明的双作用锻锤开创了锻造技术的新时代。这种锻锤具备现代直接在活塞杆上固定锤头的锻锤结构的所有特点。接着,1860年,哈斯韦尔(Haswell)发明了第一台自由锻造水压机。虽然伦纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci)早已设计出压制硬币用的落锤了,但早期模锻使用的带有锤头平行导轨的落锤是从1750年起才被人们知道的。十九世纪,德国和英国特别发展皮带落锤,而欧洲另一些国家和美国则发展夹板锤。

模锻工艺所用的主要加工工具——锻模,其上面有着和工件形状相同的空心模槽。最早的锻模出现于公元前1600年,那是希腊梅克奈城(Mekeny)和克雷塔岛(Kreta)用来把金板和银板精压成首饰的石制单面模槽。约从公元前800年起才使用类似的模具对硬币单面压花。公元前600年起开始流行第一批青铜锻模。罗马在公元200年使用了闭合的硬币压制模,其上模有方形导向装置。在中世纪,约1250年人们已知道用单面平锻模来锻造铁质装饰品。锻造穿珍珠金属丝用的辊锻模比这还早二百年。到中

世纪后期, 辊锻模已用于锻造火炮与火绳枪的弹丸或精锻焊接炮管。现在这种带飞边形式的锻模是直到 18 世纪末叶才出现的。

模锻的主要组成部分——金属(特别是钢)的带模槽的工具(锻模)以及使模具能精确导向的变形机械——主要是在 19 世纪的一百年中彼此密切联系、共同发展起来的, 从而奠定了模锻技术的基础。

19 世纪中叶, 在德国索林根已出现了第一批刀具锻造工场。约 1870 年后, 模锻才在最初传统手工业的基础上发展成为一种工业加工方法。这种加工方法使许多工业国家建立了独立的模锻工业部门的基础, 但也被一部分大型工厂的锻造车间所采用。推动模锻技术发展的最大动力来自交通工具制造业——汽车制造业及后来的飞机制造业。模锻件越来越大、越来越重, 其几何形状也日益复杂和精细。模锻用金属与合金的品种不断增加, 同时模锻件的精度要求也越来越高。各工业国自 1937 年后制订的公差标准和交货技术条件有力地促进了这种发展趋势。对此, 19 世纪和 20 世纪之交, 美国研制的蒸汽模锻锤与后来的压缩空气驱动模锻锤及德国于 1931 年研制的对击锤、现代的机械式和液力驱动式模锻压力机的发展都是必不可少的前提条件。现在, 众所周知, 模锻锤的冲击能量已达 1250kJ、楔式压力机的压力已达 120MN 以及液压机的压力已达 750MN。与此同时, 系统地确立了模锻的科学理论、开发了模具钢和现代模具制造技术, 以及 1945 年后实现了模锻机械化和自动化。

目前, 钢的模锻在铸造、粉末冶金、冷锻和厚板工件成形等工艺的竞争中正经历一个发展阶段, 其目标是改进设计、节约材料、减少锻件壁厚和底厚并使其更接近零件最终的几何形状。与之密切相关的是: 采用节省时间的中间变形方法——挤压、镦锻、横向辗压——和发展合适的锻压机械, 例如冲击式液力锻压机。此外, 有关噪声和振动的规定也影响着锻锤和压力机结构上的发展。为此, 目前存在着更多地使用压力机的趋向。在模锻自动化方面, 最近正在进行使用机器人的试验。

模锻的特殊部门, 例如涡轮机叶片和齿轮的精锻以及飞机上用的高温合金和特种金属的等温锻造, 有的已成为现实, 有的正在发展之中, 它们一定会对模锻技术产生影响。在轻金属模锻方面, 除了铝合金、镁合金外, 又增加了钛合金。铝合金模锻件在汽车制造方面正扩大着使用范围, 如用以制造轿车的传动部件、底盘、车身和制动装置等等。新式的焊接方法, 例如钢的摩擦焊接, 飞机上高承载零件的电子束熔焊与扩散焊等, 都将扩大模锻件的生产范围。

## 0.2 技术经济性

模锻是逐件大量生产的方法。重量从几克到大大超过一吨的模锻件都可以生产。轻金属飞机零件的尺寸可达 10m 以上。模锻件的生产批量从几件到几百万件。

模锻件主要用作机器, 特别是交通工具的构件。此外, 也用于制造如锤、钳、扳手等工具以及螺钉、销钉、铆钉、螺母等紧固件。表 0.1 列出了模锻件的各行业顾主在成交总额中所占的份额(德意志联邦共和国, 1973 年), 从中既可清楚地看出模锻件的主要买主来自哪些行业, 也可以看出其应用范围之广。

表0.1 1973年模锻工业全部产品的顾客行业分配

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 汽车工业（载客汽车与载重汽车）      | 65.7% |
| 农用交通工具               | 4.9%  |
| 特种车辆（工程车辆、汽车起重机、铲车等） | 3.5%  |
| 两轮车工业（如自行车、摩托车——译注）  | 0.2%  |
| 机器制造业                | 8.9%  |
| 联邦国营铁路               | 5.3%  |
| 矿山建筑业                | 2.3%  |
| 船舶制造业                | 0.7%  |
| 航空工业                 | 0.1%  |
| 其它                   | 8.4%  |
| 合计                   | 100%  |

模锻件对现代机器和车辆制造业的意义，可概括为以下六个方面：

1. 不论何种金属材料的模锻件，均能在成形方法所许可的范围内获得最高的材料利用率。模锻件的强度-重量比十分有利，因此适合做强度高而重量轻的构件。

2. 如模锻与其它加工方法（冷精压、挤压、焊接）联合使用，则将进一步在结构和经济上获得好处。

3. 模锻件材料几乎可以无限制地选用钢与有色金属，同时利用成熟的现代化热处理方法，可将模锻件的使用性能和加工性能调整到最佳程度。

4. 成批生产的模锻件的尺寸和形状可以达到预先规定的不同等级的公差要求。根据不同的最终精度要求，模锻件可以是毛坯件，也可以是成品件。

5. 模锻件内部没有气孔和其它空洞，其组织致密而均匀，可以用最新方法加以检验。因此，凡是在要求有高度可靠性的场合，普遍使用模锻件。

6. 模锻件的加工余量很小而且分布比较均匀，因此可以减少不必要的工时和废料的运送。加之，由于批量通常比较大，故可使用高效加工方法（例如拉削），以实现下述理想的目标：锻件表面在一道工序内切削完毕，既达到成品尺寸要求且表面质量好。

全世界钢模锻件的年产量估计在1000万t以上。西方各国的模锻件总产值在1974年已远远超过150亿马克。德国锻造工业联合会所属各企业现有职工25000人，每年约用120万t钢材生产约100万t模锻件。此外，每年大约还生产25000t铜合金模锻件与10000t铝合金模锻件，而美国锻造联合会所属各企业生产的有色金属模锻件，特别是用于航空和空间飞行器上的高强度结构件，自1970年起，在产值上已远远超过了钢的模锻件。

### 0.3 模锻在加工技术中的地位

锻造是多种工艺的组合，其核心是变形工艺。此外，锻造厂如要把分开的独立工件组成大而复杂的零件，还需要广泛地采用图0.1的加工技术分类表中所示的分离和接合工艺。

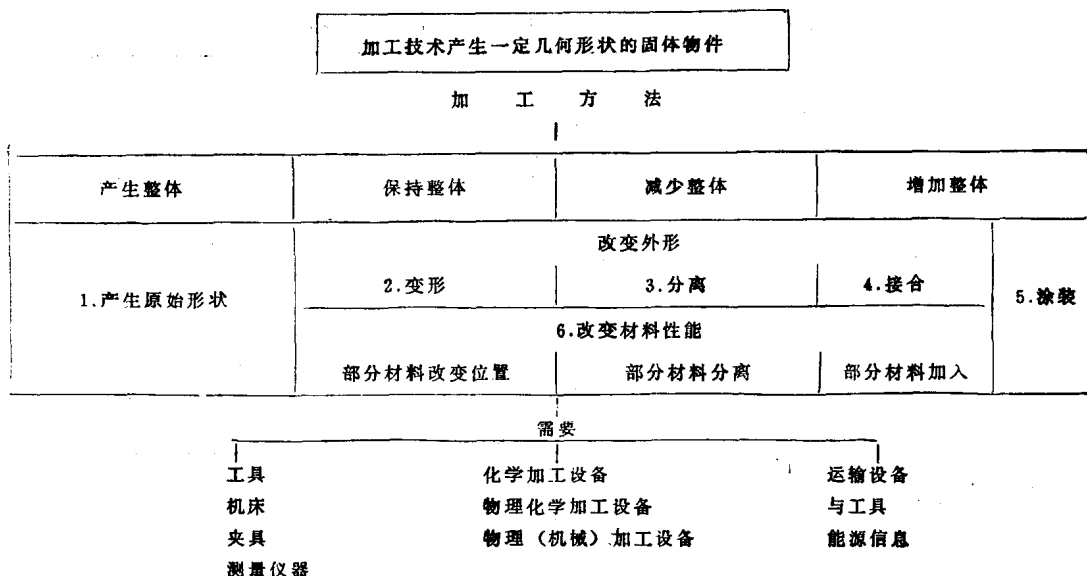


图0 1 加工技术的分类和目标 (DIN 8580.03)

锻造厂所使用的变形方法，在下列德国标准 (DIN) 中予以分类和定义：

DIN8583 加压成形<sup>①</sup>：自由锻、模锻、压制、压延

DIN8586 弯曲成形<sup>①</sup>：借助模具直线运动来弯曲

DIN8587 剪切变形<sup>①</sup>：错移，扭转

DIN8588 分割：剪刀切割，楔形切割

DIN8593 连接：加压接合，材料接合

根据自由成形（非约束性变形）和模内成形（约束性变形）的不同特点，见图0.2，锻造可分为自由锻和模锻两种。



图0.2 自由成形——模内成形

为了降低应力与变形力，亦即为了增加变形能力，锻造一般是在加热到产生回复和再结晶过程的温度范围内进行的。因此，很多金属或合金的锻造温度范围由于考虑到相变而变得非常狭窄。不过，现在也有很多有色金属甚至钢的变形过程是在室温下进行的，称之为冷锻或冷模锻。本书只讨论热锻。图0.3列出了自由锻工厂和模锻工厂主要采用的加工方法。变形和分离这两大类中最重要的加工方法将在第3章和第6章中叙述。总

① 联邦德国标准。

② 见Lange, K. (Hrsg) 著, Lehrbuch der Umformtechnik第1卷, 柏林、海德尔堡、纽约Springer出版社1972年版, 第11页。

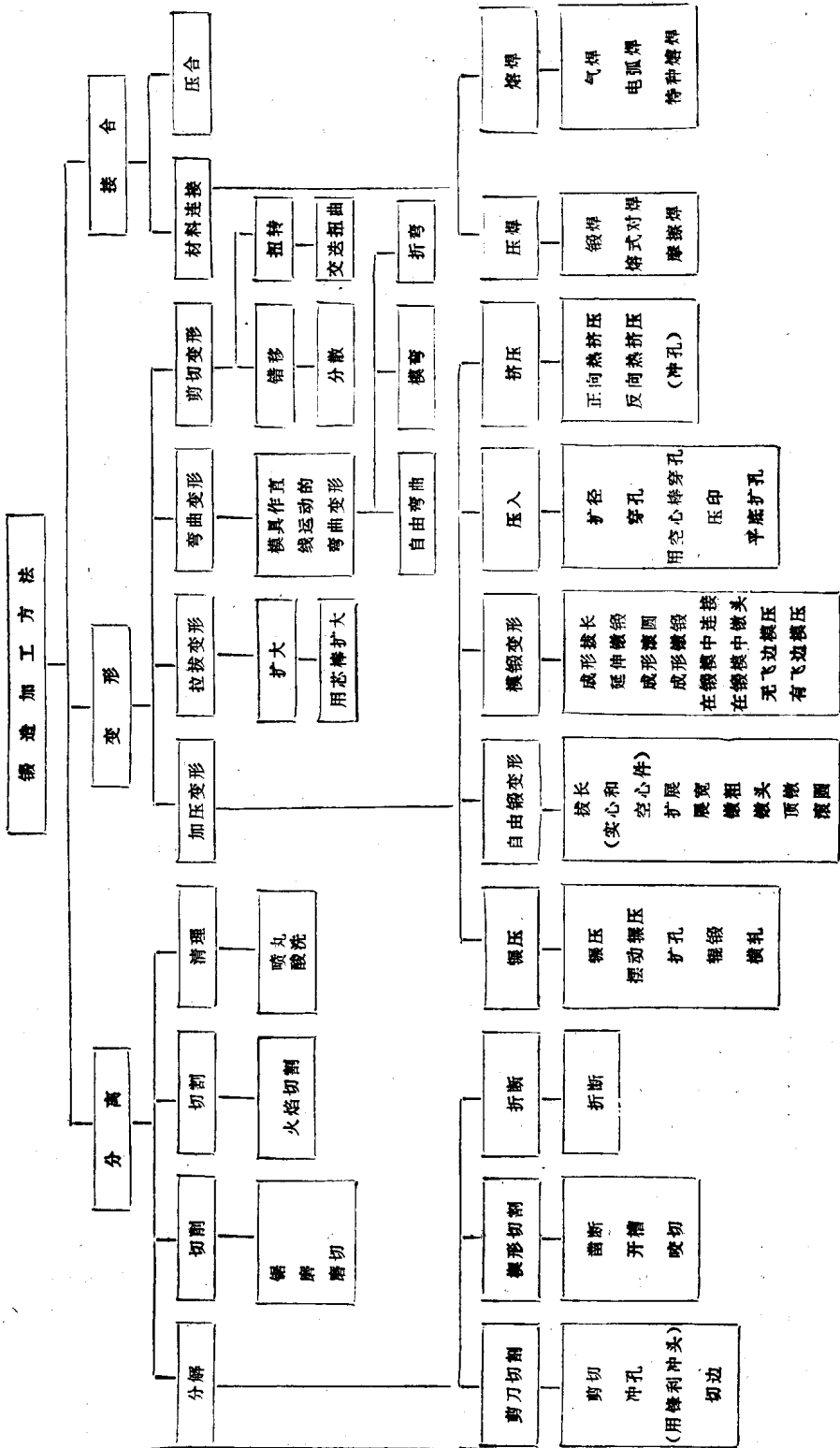


图0.3 锻造加工方法

而言之，模锻可以定义为“使用决定工件形状的模具，通过加热变形、分离和接合来制造工件，使之不留加工硬化痕迹的加工方法”。至于赋予形状的加工方法，现在象图0.1所示的第6大类“改变材料性能”也进入了模锻工厂，这就涉及到热处理方法，如正火、淬火、调质及光亮退火等。许多模锻企业已有切削加工车间，从而增加了生产的深度。有的轻金属模锻企业还附带搞铸造，以便生产大锻件的毛坯或挤压棒材用的铸锭。

## 0.4 锻造过程的系统分析

压力加工技术，包括锻造技术，其所有过程均可按图0.4所示的系统进行详细的分析。该图分八个部分来考虑从塑性理论、金属学及摩擦学的基本原理到实际生产中碰到的问题。

在第1部分的变形区内，工件材料属于塑性状态。在此区域内，塑性理论首先在理想均质材料的假定条件下，提供了确定应力、伸长率和材料流动及与其相应的局部和瞬时温度分布的方法。金属学可以用来描述材料本身内部的微观变化过程，其中包括材料的实际性能（各向异性、织构等）。

第2部分包括工件在变形之前的材料特性。这些特性或多或少影响着变形区内的材料性状与工件变形后的性能。除了材料化学成分外，机械性能，还有晶体组织、织构、金相组织（晶粒度、渗碳体组分和种类等）也起着十分重要的作用。除化学成分不会变化以外，上述各种特性在热处理后会或多或少地发生剧烈变化。此外，变形之前的表面状态及表面处理也有重要意义。

第3部分包括工件性能，主要是变形后的机械性能、表面质量和工件尺寸精度。工件变形后的性能完完全全决定了工件的使用特性（例如螺钉生产时产生的冷作硬化）。

第4部分是部分弹性（刚性）、部分塑性的工件与弹性锻模（实际接触面）之间的接触区。在这个区内，存在着全部与摩擦、润滑、磨损有关的各种需要解决的问题。工件与锻模材料的匹配起着重要作用。此外，在这个区内，工件的原始表面将部分发生显著改变。

变形过程不能孤立于成形工具之外来观察。因此，第5部分包括了来自锻模设计和锻模制造材料方面的各种问题。符合锻造方法要求且经充分考验的结构（例如刚度）、各片相对运动锻模的导向均影响着锻件的精度。锻模材料的正确选择决定着锻模的寿命及“锻模-工件”系统的弹性变形量，反过来又影响工件的精度（第3部分）。

在第6部分、即锻模与工件接触区之外的部分里，工件表面和周围大气之间发生着反应，例如在热变形过程中形成氧化皮和特殊金属变形时吸收气体等。这种反应过程一方面影响后来第3部分中的表面质量，另一方面对本部分的材料性能亦有显著的影响，例

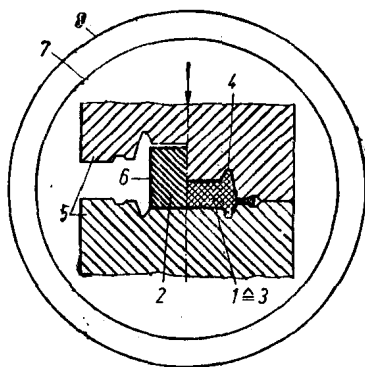


图0.4 分析变形问题的系统

根据Backofen, Gebhardt, Kienzle, Lange, Schey

如特殊金属吸收了少量气体的情况。

“锻模-工件”系统和第1至第6部分总是安装在机械设备上的（锻锤、机械压力机、液压机、轧机等）。这些机械在图0.4中由一内圆表示，称第7部分。它们必须在每一瞬间提供变形过程所需要的力和功，并为各片模具的相对运动提供足够精确的导向（位置精度）。为了满足某一变形目的的需要（体积变形，板料变形），机械应有足够的安装模具和工件操作装置（如果需要）的空间。影响模锻生产率的重要因素最后还有设备冲程数和停机调整时间等。

最后，在图0.4中最外面的一部分即第8部分，必须考虑锻造企业的现有设备（机械、加热设备、表面清理设备、工件操作及运输等）与企业的组织（工作程序）所提出的一切问题。属于这一部分的当然还有生产的经济性，亦即自动化问题。

以上介绍的锻造系统作为一个包括基础研究、应用研究、发展和生产等各方面在内的整体，不仅用于科学研究领域，也用于生产，即工业领域。

该系统已经证明在处理变形技术的各种方法和方法所属类别时是适用的。由于第1至第6部分的各种问题在所有的变形方法中皆会出现（尽管由于各方法的特殊性使侧重点有所不同），因此，在变形条件（滑动速度、正压力等）相似的情况下，从不同方法的各部分问题所获得的认识，至少可以近似地用到别的方法上。图0.5所示的是各种变形方法的原理图。

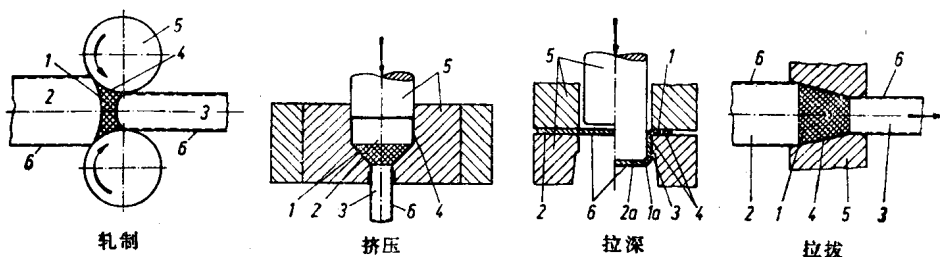


图0.5 不同变形方法的原理图

## 0.5 一般术语、公式符号、尺寸单位

本节汇列出本书中用到的公式符号和一般术语。它们是以国际标准化组织的推荐标准ISO/R31、联邦德国国家标准DIN1304、联邦德国工程师协会规范VDI3137(1976)与国际机械技术研究学会规定的专业术语(1976)为基础的。DIN 50145 (1975.5) 则未考虑在内。

按1969年7月2日颁布的“计量单位法”，本书采用下列单位制：

力的单位：N、KN、MN

能量与功的单位：J、KJ

温度单位：℃、K

应力单位：N/mm<sup>2</sup>（允许按下式换算：1 N/mm<sup>2</sup> ≈ 0.1 kp/mm<sup>2</sup>）<sup>⊖</sup>

压力单位：bar<sup>⊖</sup>

⊖ 1 kp/mm<sup>2</sup> = 1 kg/mm<sup>2</sup>。——译者

⊖ 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa。——译者

## 公式符号

|                                                               |                               |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $A$ ——面积、截面积                                                  | $F$ ——力                       |
| $A_{\text{Hn}}$ ——炉底有效面积                                      | $F_K$ ——离合器上的切向力              |
| $A_K$ ——活塞面积                                                  | $F_N$ ——变形机械的额定力              |
| $A_P$ ——锻件与飞边槽桥部在锻模分模面中的投影面积                                  | $F_{\text{Drell}}$ ——冲击力      |
| $A_{\text{PS}}$ ——锻件（无飞边）在分模面中的投影面积                           | $F_K$ ——摩擦力                   |
| $a$ ——加速度；厚度；热导率                                              | $F_{\text{Sl}}$ ——曲柄压力机的滑块力   |
| $\alpha$ ——曲柄转角（从下死点算起）；平均线膨胀系数（基准温度20℃）；传热系数                 | $F_t$ ——曲柄销的切向力               |
| $B$ ——包括飞边槽桥部在内的锻件宽度                                          | $F_{\text{zul}}$ ——一台机器的最大允许力 |
| $b$ ——无飞边锻件的宽度                                                | $f$ ——频率；弹簧行程                 |
| $b_G$ ——飞边槽桥部宽度                                               | $g$ ——重力加速度                   |
| $\beta$ ——剪切时的轴交角；压杆角                                         | $H$ ——冲程，落锤高度                 |
| $C_w$ ——模具刚度                                                  | $H_{\text{A.}}$ ——单位炉底面积生产率   |
| $c$ ——比热                                                      | $H_u$ ——低热值                   |
| $c_p$ ——恒定压力下的比热                                              | $h$ ——高度，厚度                   |
| $c_v$ ——恒定体积下的比热                                              | $h_t$ ——弹回率                   |
| $D$ ——直径（其中包括带飞边桥部的锻件直径）；加热炉的生产量                              | $h_u$ ——变形区厚度                 |
| $d$ ——直径（其中包括无飞边锻件的直径）                                        | $I$ ——冲量                      |
| $\delta$ ——延伸率；感应加热时的渗透深度                                     | $K$ ——识别强度值                   |
| $E$ ——能量                                                      | $k$ ——冲击系数                    |
| $E_N$ ——额定能量                                                  | $k_t$ ——流动应力（变形抗力）            |
| $E_0$ ——参与冲击的质量产生的冲击能量                                        | $k_{\text{ts}}$ ——锻件的流动应力     |
| $\Delta E$ ——变形加工机械的输出能量                                      | $k_{\text{tG}}$ ——飞边的流动应力     |
| $\varepsilon$ ——相对尺寸变化，例如 $\varepsilon_1 = (l_1 - l_0) / l_0$ | $k_{\text{tm}}$ ——平均流动应力      |
| $\eta$ ——效率                                                   | $k_s$ ——相对切割力                 |
| $\eta_p$ ——变形效率                                               | $k_w$ ——变形抗力                  |
| $\eta_t$ ——炉膛效率                                               | $k_{\text{wm}}$ ——平均变形抗力      |
| $\eta_{\text{ge}}$ ——总效率                                      | $L_A$ ——瞬时声压级                 |
| $\eta_M$ ——机器效率                                               | $L_{\text{eq}}$ ——当量声压级       |
| $\eta_s$ ——打击效率                                               | $l$ ——长度                      |
| $\Theta$ ——旋转质量的惯性矩                                           | $l_s$ ——压杆长度                  |
| $\theta$ ——温度                                                 | $\Delta l_v$ ——收缩率            |
| $\theta_a$ ——废气温度                                             | $\lambda$ ——压杆比，电导率，导热系数，热导率  |
| $\theta_w$ ——加热温度                                             | $M$ ——力矩                      |
|                                                               | $M_a$ ——加速力矩                  |
|                                                               | $M_{\text{Br}}$ ——制动力矩        |
|                                                               | $M_K$ ——离合器力矩                 |
|                                                               | $m$ ——质量                      |
|                                                               | $m_B$ ——滑块（锤头）质量              |
|                                                               | $m_p$ ——基础质量                  |
|                                                               | $m_K$ ——摩擦因素                  |