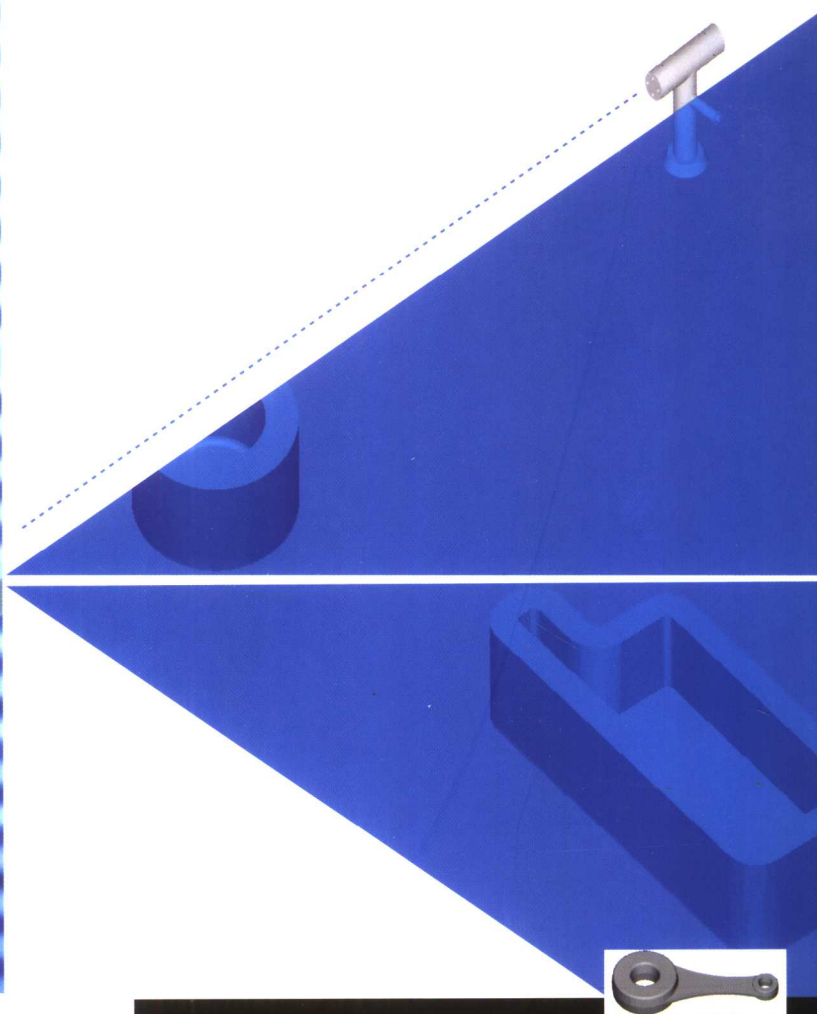
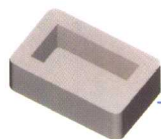
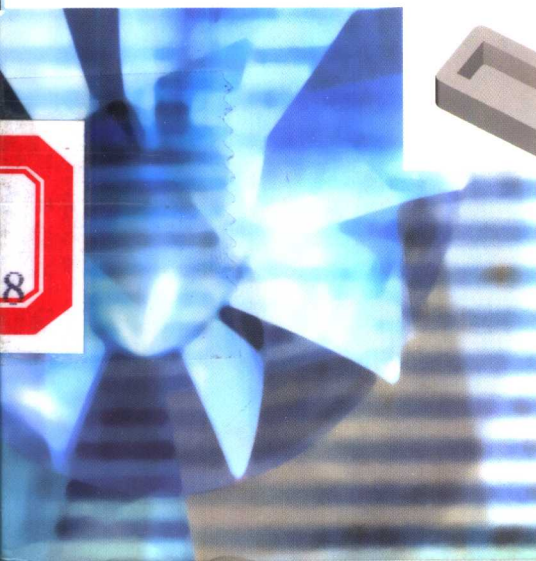




# 液态模锻与挤压铸造技术

● 罗守靖 陈炳光 齐丕骧 编著



化学工业出版社

# 液态模锻与挤压铸造技术

罗守靖 陈炳光 齐丕骧 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

液态模锻（挤压铸造）是使液态金属在高压下凝固、流动成形，直接获得制件或毛坯的方法。它具有液态金属利用率高、工序简化和质量稳定等优点，是一种节能型的、具有潜在应用前景的液态成形技术。

本书全面总结液态模锻技术的国内外研究和应用情况，着重阐明了液态模锻理论、模具设计和设备选用、工艺参数选定及质量控制，以及近年来液态模锻技术新发展，如连铸连锻技术、液态挤压技术和半固态成形技术等。

本书是一本专门性著作，它对高等院校材料及材料加工专业的本科生、研究生，将是一本有益的参考书，对从事本技术研究、开发和应用的科技人员，更是一本有益的借鉴资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

液态模锻与挤压铸造技术/罗守靖，陈炳光，齐丕骧  
编著. —北京：化学工业出版社，2006.12  
ISBN 978-7-5025-9853-2

I. 液… II. ①罗…②陈…③齐… III. 液态模锻  
IV. TG316

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 161407 号

---

责任编辑：刘丽宏 张兴辉  
责任校对：陈 静 宋 夏

文字编辑：徐卿华  
装帧设计：韩

---

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：北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订：三河市东柳万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 29½ 字数 736 千字 2007 年 3 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：62.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

液态模锻又称挤压铸造，是对注入模具中的液态或半液态的金属或合金施加较高的机械压力，使其成形和凝固而获得制件（毛坯）的工艺方法。其典型工艺过程为将液态合金直接注入敞口模具中，随后闭合模具，以产生充填流动，达到制件外部形状，接着施以高压，使已凝固的金属（外壳）产生塑性变形，未凝固金属承受等静压，并在高压下凝固，最后获得制件。由于高压凝固和塑性变形同时存在，制件无缩孔、缩松等缺陷，组织细密，力学性能高于普通铸件，接近或相当于锻件水平；无需冒口补缩，因而金属利用率高，工序简化，为一具有潜在应用前景的新型金属加工工艺。

此种工艺在国内外有多种名称，俄文为“Штамповка из жидкого металла”（液态金属模锻），英文为“Squeeze Casting”（挤压铸造），日文为“溶汤锻造”（液态模锻）。国内常用“液态模锻”和“挤压铸造”，为了更适应广大读者的习惯，故本书定名为“液态模锻与挤压铸造技术”，在本书的各章节中，也会根据参考资料原称，使用不同名称。

液态模锻作为一种新型工艺，在我国于 20 世纪 70 年代进入工业化使用领域，主要是前苏联学者 В. М. Пляцкий 在 1964 年出版了一本专著《Штамповка из жидкого металла》（液态金属模锻），在我国起到了重要的促进作用。

随着液态模锻技术的研究和应用，学术交流活动的日趋活跃。首先，1986 年成立了中国兵工学会金属材料分会挤压铸造专业委员会，1987 年成立了中国机械工程学会锻压分会液态模锻学术委员会。两学会有分有合，先后在国内举行学术讨论会 11 次，且受关注程度日益增强，使得中国机械工程学会铸造分会压力铸造专业委员会相继加入举办者行列，先后出版了《液态模锻》上海交通大学锻压教研组，1981，《挤压铸造》（齐丕骧，1984），《液态金属模锻模具设计》（陈炳光，1989），《钢质液态模锻》（罗守靖，1990）等专著，对液态模锻理论和工艺进行了很好的介绍，推动了液态模锻技术的发展。为了承上启下，作者基于多年从事研究和应用工作实践，以及已有的理论成果和学术交流的积累，期望作些提炼、梳理和系统化，以便构成一个理论与技术结合较好的平台，为从事液态模锻科研、教学和工程等人员，提供一本有益的参考资料。

本书分 4 篇 18 章；第 1 篇为基础理论，由罗守靖编写；第 2 篇为工艺技术，由陈炳光编写；第 3 篇为质量控制及实例，由齐丕骧编写，第 4 篇为新发展，由陈炳光编写（封面作者署名按编写内容先后顺序排列）。最后由三人共同审查定稿，霍文灿教授主审。

编 者  
2007 年 1 月

# 目 录

## 第 1 篇 液态模锻理论基础

|                                                                   |    |                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 液态模锻概述 .....                                                | 1  | 2.6.2 “成分过冷”的过冷度 .....                | 24 |
| 1.1 液态模锻发展简介 .....                                                | 1  | 2.6.3 界面稳定性与晶体形态 .....                | 25 |
| 1.1.1 液态模锻兴起是铸锻工艺结合的<br>产物 .....                                  | 1  | 2.6.4 液态模锻下的“成分过冷” .....              | 26 |
| 1.1.2 液态模锻发展回顾 .....                                              | 1  | 2.6.5 液态模锻下“结构效应” .....               | 28 |
| 1.1.3 发展趋势 .....                                                  | 3  | 2.7 偏析 .....                          | 29 |
| 1.2 工艺方法分类 .....                                                  | 3  | 2.7.1 偏析的基本特征 .....                   | 29 |
| 1.3 工艺特点及适用范围 .....                                               | 6  | 2.7.2 液态模锻下压力对显微偏析的<br>影响 .....       | 29 |
| 参考文献 .....                                                        | 7  | 2.7.3 液态模锻下压力对宏观偏析的<br>影响 .....       | 30 |
| 第 2 章 液态模锻下的物理冶金行为 .....                                          | 8  | 2.8 液态模锻下压力对晶体长大中形成的<br>结构缺陷的影响 ..... | 33 |
| 2.1 液态模锻热力学模型 .....                                               | 8  | 2.8.1 空位的形成 .....                     | 33 |
| 2.1.1 绝热压缩型 .....                                                 | 8  | 2.8.2 位错的形成 .....                     | 33 |
| 2.1.2 等温压缩型 .....                                                 | 9  | 2.8.3 压力对晶格空位和位错的影响 .....             | 33 |
| 2.1.3 混合压缩型 .....                                                 | 9  | 2.9 液态模锻下压力对气体析出过程的<br>影响 .....       | 34 |
| 2.2 液态模锻下合金的热物理参数 .....                                           | 10 | 2.9.1 气体在金属中的溶解度 .....                | 34 |
| 2.2.1 熔化温度 ( $T_m$ ) .....                                        | 10 | 2.9.2 气泡形成 .....                      | 35 |
| 2.2.2 热导率 ( $\lambda$ ) .....                                     | 12 | 2.9.3 压力对气体析出过程的影响 .....              | 35 |
| 2.2.3 密度 ( $\gamma$ ) .....                                       | 12 | 参考文献 .....                            | 36 |
| 2.2.4 结晶潜热和比热容 .....                                              | 12 | 第 3 章 液态模锻下的凝固过程 .....                | 37 |
| 2.3 液态模锻下合金相图的特点 .....                                            | 13 | 3.1 液态模锻下模具温度场 .....                  | 37 |
| 2.3.1 铁-碳 (Fe-C) 状态图 .....                                        | 13 | 3.1.1 解析解 .....                       | 37 |
| 2.3.2 铝-硅 (Al-Si) 状态图 .....                                       | 15 | 3.1.2 数值解 .....                       | 42 |
| 2.4 液态模锻下金属和合金凝固的热力学<br>条件 .....                                  | 16 | 3.1.3 液态模锻模具温度场的分析 .....              | 47 |
| 2.4.1 凝固时体收缩 ( $\Delta V = V_L - V_S > 0$ )<br>的金属和合金的热力学条件 ..... | 16 | 3.1.4 各种因素对模具温度场的影响 .....             | 50 |
| 2.4.2 凝固时体膨胀 ( $\Delta V = V_L - V_S < 0$ )<br>的金属和合金的热力学条件 ..... | 17 | 3.2 液态模锻下熔体的温度场 .....                 | 50 |
| 2.5 液态模锻下金属和合金凝固的动力学<br>条件 .....                                  | 18 | 3.2.1 液态模锻下熔体温度场的试验<br>测定 .....       | 50 |
| 2.5.1 形核率 ( $\dot{N}$ ) .....                                     | 18 | 3.2.2 液态模锻下熔体温度场的试验<br>观察 .....       | 51 |
| 2.5.2 长大线速度 ( $\bar{R}$ ) .....                                   | 21 | 3.2.3 压力下熔体全场温度场 .....                | 53 |
| 2.5.3 压力与动力学条件的关系 .....                                           | 22 | 3.3 液态模锻下的动态凝固过程 .....                | 54 |
| 2.6 成分过冷 .....                                                    | 23 | 3.3.1 浇注时的机械冲刷 .....                  | 54 |
| 2.6.1 “成分过冷”判断式 .....                                             | 23 |                                       |    |

|                                    |    |                                                  |    |
|------------------------------------|----|--------------------------------------------------|----|
| 3.3.2 金属液内的自然对流 .....              | 55 | 4.4 液态模锻过程的力-位移曲线 .....                          | 72 |
| 3.3.3 异形冲头作用下金属液的反向<br>流动 .....    | 56 | 4.4.1 试验装置及过程 .....                              | 72 |
| 3.3.4 硬壳层塑性变形时的金属液<br>流动 .....     | 56 | 4.4.2 力-行程曲线的试验分析 .....                          | 73 |
| 3.3.5 选择结晶产生的低熔点物质<br>流动 .....     | 56 | 4.4.3 力-位移曲线的物理意义 .....                          | 73 |
| 3.4 低碳钢液态模锻时的凝固方式 .....            | 57 | 4.5 力、位移与时间关系曲线 .....                            | 74 |
| 3.4.1 大气压下的低碳钢凝固方式 .....           | 57 | 4.5.1 平冲头加压力下力-时间和位移-<br>时间关系曲线 .....            | 74 |
| 3.4.2 液态模锻时温度场的分布 .....            | 57 | 4.5.2 异形冲头加压力下位移-时间曲线 .....                      | 75 |
| 3.4.3 液态模锻时金属液凝固的特点 .....          | 58 | 4.6 压力-行程和行程-时间理论曲线 .....                        | 76 |
| 3.4.4 低碳钢液态模锻的凝固方式 .....           | 58 | 4.7 冲头下移和凝固补缩的相关关系 .....                         | 76 |
| 3.5 液态模锻件的收缩过程 .....               | 60 | 4.7.1 冲头下移速度与金属凝固速度<br>关系 .....                  | 76 |
| 3.5.1 压力对收缩过程的影响 .....             | 60 | 4.7.2 冲头位移与凝固截面位移关系 .....                        | 78 |
| 3.5.2 液态模锻的收缩特征 .....              | 60 | 4.8 液态模锻过程的压力损失 .....                            | 79 |
| 参考文献 .....                         | 64 | 4.8.1 理论推导 .....                                 | 79 |
| <b>第4章 液态模锻下的力学过程</b> .....        | 65 | 4.8.2 平冲头加压时压力损失 .....                           | 80 |
| 4.1 塑性变形在液态模锻中的地位 .....            | 65 | 4.9 液态模锻时高向变形程度的理论<br>计算 .....                   | 81 |
| 4.2 液态模锻组合体的假设 .....               | 66 | 4.9.1 公式推导 .....                                 | 81 |
| 4.2.1 组合体的连续性 .....                | 67 | 4.9.2 公式使用条件 .....                               | 82 |
| 4.2.2 组合体三个区的力学性质 .....            | 67 | 4.9.3 实例 .....                                   | 83 |
| 4.2.3 组合体力学行为 .....                | 67 | 4.10 液态模锻过程的力学分析 .....                           | 83 |
| 4.3 液态模锻过程中金属的塑性流动 .....           | 67 | 4.10.1 两种力学模型 .....                              | 83 |
| 4.3.1 初期金属塑性流动方式 .....             | 68 | 4.10.2 塑性变形体的力学分析 .....                          | 84 |
| 4.3.2 液态模锻中的基本金属塑性流动<br>方式 .....   | 68 | 4.11 液态模锻比压值的解析解 .....                           | 87 |
| 4.3.3 最后阶段的金属塑性流动方式 .....          | 69 | 4.11.1 固-液组合体的塑性变形 .....                         | 87 |
| 4.3.4 密实金属的塑性流动 .....              | 69 | 4.11.2 固-半固-液组合体的塑性变形 .....                      | 91 |
| 4.3.5 液态模锻过程中金属塑性流动的<br>组织观察 ..... | 69 | 4.11.3 高径比( $H/R < \frac{1}{2}$ )较小的<br>情况 ..... | 92 |
| 4.3.6 塑性流动带来的外部尺寸变化 .....          | 71 | 4.12 作用于液态金属上的有效压力 .....                         | 94 |
| 4.3.7 塑性流动带来的下模周壁形态的<br>变化 .....   | 72 | 参考文献 .....                                       | 95 |

## 第2篇 液态模锻模具(液锻模)、设备与工艺

|                           |     |                       |     |
|---------------------------|-----|-----------------------|-----|
| <b>第5章 液锻模设计前准备</b> ..... | 96  | 5.4.1 液锻件位置 .....     | 101 |
| 5.1 液锻件的结构形状分类 .....      | 96  | 5.4.2 分型面 .....       | 102 |
| 5.2 液锻件的结构工艺性 .....       | 97  | 5.4.3 余量和公差的选择 .....  | 103 |
| 5.2.1 液锻件的形状 .....        | 97  | 5.4.4 脱模斜度 .....      | 104 |
| 5.2.2 液锻件的精度 .....        | 98  | 5.4.5 圆角半径 .....      | 105 |
| 5.2.3 液锻件的表面粗糙度 .....     | 98  | 5.4.6 液锻件的结构分析 .....  | 105 |
| 5.3 液锻方式选择 .....          | 100 | 5.4.7 液锻件的孔 .....     | 106 |
| 5.4 液锻件图设计 .....          | 100 | 5.4.8 液锻件的表面粗糙度 ..... | 106 |

|                                      |     |                                    |     |
|--------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 5.4.9 液锻件的收缩率 .....                  | 107 | 6.12.2 冷却的计算 .....                 | 149 |
| 5.4.10 液锻件图的制定 .....                 | 107 | 6.12.3 冷却结构设计要点 .....              | 150 |
| 5.5 模具设计有关参数及其计算 .....               | 112 | 6.12.4 模具的预热和冷却装置的<br>代码 .....     | 151 |
| <b>第6章 液锻模结构设计</b> .....             | 116 | <b>第7章 液锻模零件设计</b> .....           | 152 |
| 6.1 液锻模的设计步骤 .....                   | 116 | 7.1 凹模 .....                       | 152 |
| 6.1.1 对液锻模的基本要求 .....                | 116 | 7.1.1 凹模的形式 .....                  | 152 |
| 6.1.2 液锻模设计的步骤 .....                 | 116 | 7.1.2 可分式凹模的设计原则 .....             | 152 |
| 6.2 液锻模的类型及基本机构 .....                | 117 | 7.1.3 凹模的强度计算 .....                | 153 |
| 6.2.1 液锻模的类型 .....                   | 117 | 7.1.4 凹模的尺寸计算 .....                | 157 |
| 6.2.2 液锻模的基本机构 .....                 | 117 | 7.1.5 凹模的连接方式 .....                | 157 |
| 6.3 液锻模的连接机构 .....                   | 118 | 7.1.6 凹模的技术条件 .....                | 159 |
| 6.4 卸料机构 .....                       | 119 | 7.2 凸模 .....                       | 159 |
| 6.4.1 下缸顶件式 (X1) .....               | 119 | 7.2.1 凸模的形式及连接方式 .....             | 159 |
| 6.4.2 拉杆打料式 (X2) .....               | 119 | 7.2.2 凸模的强度校核 .....                | 161 |
| 6.4.3 顶杆式 (X3) .....                 | 120 | 7.2.3 凸模尺寸的计算 .....                | 164 |
| 6.5 开、合模 (拔芯) 机构 .....               | 120 | 7.2.4 凸模的技术条件 .....                | 164 |
| 6.5.1 开、合模 (拔芯) 机构的组成 ..             | 120 | 7.2.5 凸模垫板 .....                   | 164 |
| 6.5.2 开、合模 (拔芯) 机构的主要<br>类型及代码 ..... | 120 | 7.3 压头、压套及分流锥 .....                | 165 |
| 6.6 液锻模的浇道结构 .....                   | 123 | 7.3.1 压头 .....                     | 165 |
| 6.6.1 浇道的作用 .....                    | 123 | 7.3.2 压套 (Yt) .....                | 167 |
| 6.6.2 浇道的位置 .....                    | 123 | 7.3.3 分流锥 .....                    | 169 |
| 6.6.3 浇道的形状及尺寸 .....                 | 124 | 7.3.4 压头、压套及分流锥的结构形<br>式及代码 .....  | 170 |
| 6.6.4 浇道的截面形状 .....                  | 125 | 7.4 型芯与镶块 .....                    | 170 |
| 6.6.5 浇道与液锻件的连接形式 .....              | 126 | 7.4.1 型芯与镶块的作用 .....               | 170 |
| 6.6.6 浇道的尺寸设计 .....                  | 127 | 7.4.2 型芯与镶块的设计原则 .....             | 170 |
| 6.7 排气槽及溢流槽 .....                    | 128 | 7.4.3 型芯与镶块的结构形式、固定<br>方法及代码 ..... | 171 |
| 6.7.1 排气槽 .....                      | 128 | 7.4.4 型芯与镶块的技术条件 .....             | 172 |
| 6.7.2 溢流槽 .....                      | 128 | 7.5 导柱、导套和导正销 .....                | 173 |
| 6.8 静压液锻模结构设计 .....                  | 130 | 7.5.1 导向零件的设计要点 .....              | 173 |
| 6.8.1 静压液锻模的结构特点 .....               | 130 | 7.5.2 导柱的设计 .....                  | 173 |
| 6.8.2 静压液锻模的典型结构 .....               | 130 | 7.5.3 导正销的设计 .....                 | 174 |
| 6.9 挤压液锻模结构设计 .....                  | 135 | 7.5.4 导套的设计 .....                  | 174 |
| 6.9.1 挤压液锻模的结构特点 .....               | 135 | 7.6 模板和模柄 .....                    | 175 |
| 6.9.2 挤压液锻模的典型结构 .....               | 135 | 7.6.1 模板和模柄的作用 .....               | 175 |
| 6.10 间接液锻模结构设计 .....                 | 139 | 7.6.2 模板的设计 .....                  | 175 |
| 6.10.1 对间接液锻件的形状要求 .....             | 139 | 7.6.3 模柄的设计 .....                  | 181 |
| 6.10.2 间接液锻件分型面的选择 .....             | 140 | 7.7 卸料 (打料) 零件 .....               | 184 |
| 6.10.3 间接液锻模的典型结构 .....              | 140 | 7.7.1 顶板 (Db) .....                | 184 |
| 6.11 模具预热 .....                      | 143 | 7.7.2 顶圈 (Dq) .....                | 184 |
| 6.11.1 模具的预热方法 .....                 | 143 | 7.7.3 顶杆 (Dg) .....                | 185 |
| 6.11.2 电热装置的计算 .....                 | 144 | 7.7.4 顶套 (Dt) .....                | 187 |
| 6.12 模具冷却 .....                      | 146 |                                    |     |
| 6.12.1 冷却方法及装置 .....                 | 146 |                                    |     |

|                                     |     |                                      |     |
|-------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 7.7.5 卸料板(顶杆固定板)(Db) ...            | 189 | 10.1 涂料的作用及要求 .....                  | 247 |
| 7.7.6 拉杆和推杆 .....                   | 190 | 10.1.1 涂料的作用 .....                   | 247 |
| 7.8 固定板和模套 .....                    | 191 | 10.1.2 涂料的性能 .....                   | 247 |
| 7.8.1 固定板 .....                     | 191 | 10.2 常用的液锻模涂料 .....                  | 248 |
| 7.8.2 模套 .....                      | 192 | 10.3 涂料的喷涂工艺 .....                   | 249 |
| 7.9 开、合模(拔芯)零件 .....                | 193 | <b>第11章 液态模锻用设备</b> .....            | 250 |
| 7.9.1 斜销(K1) .....                  | 193 | 11.1 熔化设备 .....                      | 250 |
| 7.9.2 斜键(K2) .....                  | 195 | 11.1.1 液锻工艺对熔炼炉的要求 .....             | 250 |
| 7.9.3 导滑镶块 .....                    | 197 | 11.1.2 液锻生产中用的熔炼炉 .....              | 250 |
| 7.9.4 液压开、合模(拔芯)机构(K5) ...          | 199 | 11.2 普通液压机 .....                     | 254 |
| 7.9.5 锁模套(K6) .....                 | 201 | 11.2.1 用作液锻生产的普通液压机的<br>基本要求 .....   | 254 |
| 7.9.6 锁模芯块(K7) .....                | 202 | 11.2.2 国产通用液压机的型号及主要<br>技术参数 .....   | 254 |
| 7.9.7 导滑板(轨)(K8) .....              | 202 | 11.2.3 普通液压机改造要点 .....               | 255 |
| 7.10 模具安装用压板及常用标准件 .....            | 204 | 11.3 压铸机改造的卧式液锻机 .....               | 255 |
| 7.10.1 模具安装用压板 .....                | 204 | 11.3.1 用作液锻生产的压铸机的基本<br>要求 .....     | 255 |
| 7.10.2 圆柱螺旋压缩弹簧 .....               | 204 | 11.3.2 国产卧式压铸机基本参数 .....             | 255 |
| 7.10.3 碟形弹簧 .....                   | 207 | 11.3.3 压铸机改造要点 .....                 | 256 |
| 7.10.4 氮气弹簧 .....                   | 211 | 11.4 专用液锻机 .....                     | 256 |
| 7.10.5 常用标准件 .....                  | 219 | 11.4.1 对专用液锻机的要求 .....               | 256 |
| <b>第8章 液锻模的材料及技术要求</b> .....        | 221 | 11.4.2 专用液锻机简介 .....                 | 256 |
| 8.1 工作零件材料的选用及热处理 .....             | 221 | 11.5 辅助设备 .....                      | 258 |
| 8.2 其他零件材料的选用及热处理 .....             | 227 | 11.5.1 喷涂机械手 .....                   | 258 |
| 8.3 液锻模零件的公差、配合及表面<br>粗糙度 .....     | 227 | 11.5.2 取件机械手 .....                   | 258 |
| 8.4 液锻模的技术要求 .....                  | 235 | 11.5.3 余热热处理池 .....                  | 259 |
| 8.4.1 液锻模零部件的技术要求 .....             | 235 | <b>第12章 液态模锻工艺参数</b> .....           | 260 |
| 8.4.2 模具总装后的技术要求 .....              | 235 | 12.1 液态金属质量 .....                    | 260 |
| <b>第9章 液锻模的使用与维修</b> .....          | 237 | 12.1.1 液锻生产中常用的有色合金 .....            | 260 |
| 9.1 液锻模的安装与调试 .....                 | 237 | 12.1.2 有色合金的铸造特性 .....               | 260 |
| 9.1.1 液锻模的安装 .....                  | 237 | 12.1.3 铝合金及其熔炼 .....                 | 262 |
| 9.1.2 液锻模的调试 .....                  | 239 | 12.1.4 铜合金及其熔炼 .....                 | 271 |
| 9.1.3 液锻生产中常遇见的技术问题及<br>其解决办法 ..... | 240 | 12.1.5 常用液锻镁合金的熔炼 .....              | 281 |
| 9.2 液锻生产操作规程及液锻安全技术 ...             | 243 | 12.1.6 镁合金液锻件的处理 .....               | 290 |
| 9.2.1 液锻生产操作规程 .....                | 243 | 12.2 充型速度 .....                      | 296 |
| 9.2.2 液锻生产安全技术 .....                | 243 | 12.3 浇注温度 .....                      | 296 |
| 9.3 液锻模的损坏形式及改进措施 .....             | 245 | 12.3.1 浇注温度对液锻件的质量及模具<br>寿命的影响 ..... | 296 |
| 9.3.1 凹模的损坏形式、原因及其改进<br>措施 .....    | 245 | 12.3.2 浇注温度的选择 .....                 | 297 |
| 9.3.2 凸模的损坏形式、原因及其改进<br>措施 .....    | 245 | 12.4 模具温度 .....                      | 297 |
| 9.3.3 其他液锻模零件的损坏形式 .....            | 246 | 12.5 比压 .....                        | 298 |
| 9.4 液锻模的修复 .....                    | 246 | 12.6 液锻保压时间 .....                    | 299 |
| <b>第10章 液锻模用涂料</b> .....            | 247 | 参考文献 .....                           | 300 |

### 第3篇 液态模锻与挤压铸造件的组织性能、质量控制及生产实例

#### 第13章 液态模锻与挤压铸造合金的组织与

性能 ..... 301

##### 13.1 铝合金 ..... 301

13.1.1 Al-Si 系铸造铝合金 ..... 301

13.1.2 Al-Si-Cu-Mg 系活塞铝合金 ..... 306

13.1.3 Al-Mg 系合金 ..... 308

13.1.4 Al-Cu 系合金 ..... 309

13.1.5 Al-Zn-Mg-Cu 系合金 ..... 314

##### 13.2 铝基复合材料 ..... 314

13.2.1 压力浸渗工艺制备的铝基复合  
材料 ..... 314

13.2.2 搅溶复合工艺制备的铝基复合  
材料 ..... 316

##### 13.3 铜合金 ..... 317

13.3.1 黄铜 ..... 317

13.3.2 锡青铜和铅青铜 ..... 319

13.3.3 铝青铜及其他无锡青铜 ..... 320

##### 13.4 铸铁 ..... 321

##### 13.5 钢 ..... 326

13.5.1 压力下结晶对钢的组织  
影响 ..... 326

13.5.2 碳素钢 ..... 328

13.5.3 低合金钢 ..... 330

13.5.4 高合金钢 ..... 331

##### 13.6 镁合金及镁基复合材料 ..... 333

13.6.1 压力对 Mg-Al 状态图的影响 ..... 333

13.6.2 挤压铸造镁合金的组织与  
性能 ..... 334

13.6.3 挤压铸造镁基复合材料 ..... 337

##### 13.7 锌合金及钴基合金 ..... 337

13.7.1 压力对 Zn-Al 合金凝固特性的  
影响 ..... 338

13.7.2 ZA27 锌合金 ..... 339

13.7.3 ZA43 锌合金 ..... 342

13.7.4 钴基高温合金 ..... 344

#### 第14章 液态模锻与挤压铸造件的常见缺陷及

其控制方法 ..... 345

##### 14.1 表面粗糙及表面损伤类缺陷 ..... 345

14.1.1 表面粗糙类缺陷 ..... 345

14.1.2 直接冲头挤压冷隔 ..... 346

14.1.3 直接挤压夹皮 ..... 347

14.1.4 表面损伤类缺陷 ..... 347

##### 14.2 缩松、缩孔及渗漏类缺陷 ..... 348

14.2.1 压力不足造成的缩松、缩孔 ..... 348

14.2.2 冲头局部受阻而造成的缩松、  
缩孔 ..... 348

14.2.3 压力损失造成的缩松、缩孔 ..... 349

##### 14.3 气孔、气泡类缺陷 ..... 349

14.3.1 热处理起泡的直接原因 ..... 349

14.3.2 直接挤压铸件的热处理起泡  
特点 ..... 350

14.3.3 间接挤压铸件热处理起泡  
特点 ..... 351

##### 14.4 夹渣类缺陷 ..... 352

14.4.1 夹渣卷入的途径 ..... 353

14.4.2 控制夹渣卷入的措施 ..... 354

14.4.3 金属性硬点的形成与防止 ..... 355

##### 14.5 裂纹类缺陷 ..... 356

14.5.1 直接冲头挤压和柱塞挤压时的  
裂纹 ..... 357

14.5.2 间接冲头挤压时的裂纹 ..... 357

##### 14.6 几何形状与图纸不符类缺陷 ..... 358

14.6.1 直接挤压铸造时的形状不符  
缺陷 ..... 359

14.6.2 间接挤压铸造时的形状不符  
缺陷 ..... 359

14.7 化学成分与性能不符合要求类  
缺陷 ..... 360

14.7.1 挤压铸造对密度偏析的影响 ..... 360

14.7.2 挤压铸造异常偏析的形成 ..... 361

#### 第15章 液态模锻与挤压铸造件的开发与

生产实例 ..... 362

##### 15.1 铝合金件的生产实例 ..... 362

15.1.1 铝合金活塞 ..... 362

15.1.2 镶圈内冷铝活塞 ..... 363

15.1.3 铝合金厚壁杯形件 ..... 364

15.1.4 铝合金薄壁杯形件和高脚杯  
形件 ..... 365

15.1.5 气动仪表铝合金零件 ..... 365

15.1.6 摩托车铝轮毂 ..... 368

15.1.7 汽车铝轮毂 ..... 370

15.1.8 汽车空调压缩机缸体 ..... 372

|         |                    |     |            |                              |     |
|---------|--------------------|-----|------------|------------------------------|-----|
| 15.1.9  | 大型线轴铝凸盘 .....      | 373 | 15.3.7     | 锻压模具钢垫板 .....                | 393 |
| 15.1.10 | 油泵铝壳体 .....        | 373 | 15.3.8     | 高速钢辊环 .....                  | 394 |
| 15.1.11 | 起重电机壳体 .....       | 375 | 15.3.9     | 迫击炮球铁弹体 .....                | 396 |
| 15.1.12 | 空压机铝连杆 .....       | 377 | 15.3.10    | 球铁齿轮 .....                   | 397 |
| 15.1.13 | 汽车制动主缸体 .....      | 378 | 15.3.11    | 球铁及贝氏体钢耙片 .....              | 398 |
| 15.1.14 | 大型薄壁整体铝合金壁板件 ...   | 379 | 15.3.12    | 铸铁阀盖 .....                   | 400 |
| 15.2    | 铜合金件的生产实例 .....    | 380 | 15.3.13    | 铸铁锅 .....                    | 400 |
| 15.2.1  | 青铜蜗轮 .....         | 380 | 15.4       | 锌合金及镁合金件 .....               | 402 |
| 15.2.2  | 柱塞轴流青铜泵体 .....     | 381 | 15.4.1     | 增氧机锌合金蜗轮 .....               | 403 |
| 15.2.3  | 青铜法兰盘 .....        | 382 | 15.4.2     | 锌合金齿轮 .....                  | 404 |
| 15.2.4  | 铜合金套筒 .....        | 383 | 15.4.3     | 镁合金轴筒 .....                  | 405 |
| 15.2.5  | 紫铜吹氧喷头 .....       | 383 | 15.4.4     | 镁合金壳体 .....                  | 406 |
| 15.2.6  | 黄铜阀体 .....         | 384 | 15.4.5     | 摩托车发动机镁合金外壳 .....            | 408 |
| 15.2.7  | 黄铜三通阀 .....        | 386 | 15.4.6     | 车用镁合金轮毂 .....                | 410 |
| 15.3    | 钢、铁件的开发与生产实例 ..... | 386 | 15.5       | 金属基复合材料件 .....               | 412 |
| 15.3.1  | 碳钢平法兰与长颈法兰 .....   | 387 | 15.5.1     | 挤压铸造压力浸渗复合法制造<br>铝活塞实例 ..... | 412 |
| 15.3.2  | 碳钢压环 .....         | 388 | 15.5.2     | 搅溶复合挤压铸造法制造履带<br>板实例 .....   | 416 |
| 15.3.3  | 钢质上底座本体件 .....     | 389 | 参考文献 ..... | 418                          |     |
| 15.3.4  | 导弹合金钢前舱盖 .....     | 391 |            |                              |     |
| 15.3.5  | 枪械合金钢支架 .....      | 391 |            |                              |     |
| 15.3.6  | 凿岩机合金钢缸体 .....     | 392 |            |                              |     |

## 第4篇 液态模锻技术的新发展

|        |                           |     |            |                                                  |     |
|--------|---------------------------|-----|------------|--------------------------------------------------|-----|
| 第16章   | 连铸连锻技术 .....              | 420 | 17.4       | 液态挤压强韧化 .....                                    | 434 |
| 16.1   | 连铸连锻（简称连锻）工艺简介 .....      | 420 | 17.4.1     | 锌基合金液态挤压强韧化 .....                                | 434 |
| 16.2   | 连铸连锻技术分析及工艺参数 .....       | 422 | 17.4.2     | ZL108 铝合金液态挤压强<br>韧化 .....                       | 438 |
| 16.2.1 | 连锻生产中的合金液充型过程<br>分析 ..... | 422 | 17.5       | 液态浸渗后直接挤压 $Al_2O_{3sf}/Al$ 复合<br>材料组织与性能研究 ..... | 442 |
| 16.2.2 | 连锻生产中的锻造过程分析 .....        | 423 | 17.5.1     | $Al_2O_{3sf}/Al$ 复合材料的组织<br>研究 .....             | 442 |
| 16.2.3 | 连锻的工艺参数 .....             | 425 | 17.5.2     | $Al_2O_{3sf}/Al$ 复合材料性能的<br>研究 .....             | 444 |
| 16.3   | 连铸连锻模设计 .....             | 426 | 参考文献 ..... | 446                                              |     |
| 16.3.1 | 连锻模的种类 .....              | 426 | 第18章       | 半固态成形技术 .....                                    | 447 |
| 16.3.2 | 连锻模的基本机构 .....            | 427 | 18.1       | 半固态成形特点及应用范围 .....                               | 447 |
| 16.3.3 | 连铸连锻模实例 .....             | 428 | 18.1.1     | 工艺分类 .....                                       | 447 |
| 16.4   | 连铸连锻设备 .....              | 430 | 18.1.2     | 工艺特点 .....                                       | 450 |
| 16.5   | 连铸连锻生产 .....              | 431 | 18.1.3     | 适用范围及应用现状 .....                                  | 450 |
| 第17章   | 液态挤压 .....                | 432 | 18.2       | 半固态成形工艺过程分析 .....                                | 451 |
| 17.1   | 液态挤压类型 .....              | 432 | 18.2.1     | 半固态金属坯料的制备 .....                                 | 451 |
| 17.1.1 | 连续铸挤（Castex） .....        | 432 | 18.2.2     | 半固态金属的二次加热（局部<br>加热） .....                       | 454 |
| 17.1.2 | 固态重熔挤压 .....              | 432 |            |                                                  |     |
| 17.1.3 | 液态挤压 .....                | 433 |            |                                                  |     |
| 17.2   | 管材液态挤压 .....              | 433 |            |                                                  |     |
| 17.3   | 液态浸渗后直接挤压工艺的研究 .....      | 434 |            |                                                  |     |

|                                       |            |                        |     |
|---------------------------------------|------------|------------------------|-----|
| 18.2.3 半固态成形 .....                    | 455        | 18.3.3 半固态压铸工艺 .....   | 457 |
| 18.3 半固态压铸 .....                      | 455        | 18.3.4 半固态压铸工艺实例 ..... | 457 |
| 18.3.1 半固态压铸模具设计 .....                | 456        | 18.4 半固态模锻 .....       | 457 |
| 18.3.2 半固态压铸设备 .....                  | 456        | 参考文献 .....             | 459 |
| <b>附录 1 “液态模锻与挤压铸造”分类名称对照表 .....</b>  | <b>460</b> |                        |     |
| <b>附录 2 各国挤压铸造与液态模锻工艺的名称对照表 .....</b> | <b>460</b> |                        |     |

# 第 1 篇 液态模锻理论基础

## 第 1 章 液态模锻概述

### 1.1 液态模锻发展简介

液态模锻是将一定量熔融金属液直接注入敞口的金属模膛，随后合模，实现金属液充填流动，并在机械静压力作用下，发生高压凝固和少量塑性变形，从而获得毛坯或零件的一种金属加工方法。液态模锻工艺流程如图 1-1 所示，可分为金属熔化和模具准备、浇注、合模和施压、卸模和顶出制件。

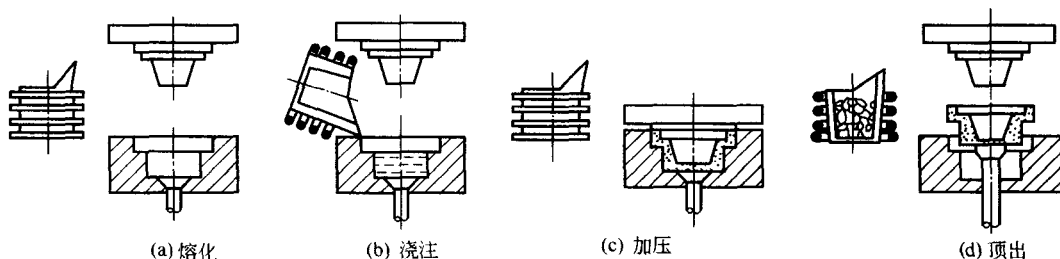


图 1-1 液态模锻工艺流程

#### 1.1.1 液态模锻兴起是铸锻工艺结合的产物

液态模锻是在压力铸造基础上演变的产物。通过实践人们逐渐认识到，压力铸造虽然取代了金属型铸造的重力浇注方式，改在高压高速下充填方式，但金属型利用重力（冒口）的补缩作用，在压力铸造中很难实现，即压力下不可能通过浇道（因浇道比制件凝固早）对熔体持续补缩，直至凝固结束。显然，对于壁厚（大于 6mm）或壁厚相差悬殊制件，很难获得合格的产品。另外，压铸件不能进行热处理，使它的应用范围受到很大的限制。科学工作者吸取了锻造工艺力学成形的观点，对本来仅是一物理化学的铸造过程，变成一个物理化学—力学的液态模锻过程，摒弃了压力铸造的浇口和浇道，采用敞口模具，直接上注。然后，和闭式模锻一样，封闭模膛，液态金属在上模块和横梁自重的作用下，充满模膛。接着施以压力并在压力持续作用下，使液态金属发生结晶凝固，流动成形，直至过程结束，如图 1-1 所示。从表面看，这一过程和模锻成形很相似，即压力作用于制件整个外表面上。所不同的是，前者是把液态金属作为加工对象，而后者是把已加热的固态金属作为加工对象，所以人们把它冠以“液态模锻”的学术名称，就是从这一观点出发的<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.2 液态模锻发展回顾

液态模锻从 1937 年在前苏联问世近 70 年了，初期进展主要集中在对铜合金液态模锻工艺实践研究上。第二次世界大战期间，采用该工艺成功进行了铜合金轴承衬套的大量生产<sup>[1]</sup>。到 1964 年，前苏联采用该工艺生产的已有 150 家工厂，约 200 多种产品，并以 B. M. 普俩茨基发表的专著《液态金属模锻》<sup>[1]</sup>为标志，使这项工艺在生产中完全确立。次

年以“Extrusion casting”为书名译成英文出版，开始在世界范围内传播。

我国从 1958 年便开始开展液态模锻工艺研究工作<sup>[2]</sup>，进入 20 世纪 70 年代后，有一个快速的发展<sup>[3~6]</sup>。液态模锻主要有如下成就。

(1) 建立了一个物理化学与力学成形相融合的理论体系 该理论体系研究了液态模锻下的物理化学过程、凝固过程和力学过程，以揭示压力对合金热物理参数、状态图、凝固的热力学和动力学条件的影响规律，制件凝固的热传导和凝固方式、凝固组织特征及力学性能等变化，力学模型及力的传递、压力损失、塑性变形机制、凝固与塑性变形相互交融规律等，为液态模锻过程稳定建立、工艺参数选定和优化、设备的选定和改造等提供了坚实的可靠平台。

(2) 开展液态模锻材料使用性研究 什么材料使用于液态模锻成形？从理论讲，几乎所有合金，包括铸造、锻造合金，甚至难熔合金，均能进行液态模锻。但目前应用最广泛的、研究最多的有铝镁合金及其复合材料、锌基合金、铜合金和铁合金，其中占主导地位的是铝镁合金及其复合材料。这是由于汽车、摩托车、机电和仪表在零部件制造中，正向着高质量、高可靠性、轻量化和低成本方向发展，铝镁合金及其复合材料便成为首选的零部件材料，而采用液态模锻成形各种零件优势也就凸显出来。

(3) 工艺方法的比较研究 液态模锻工艺依据制件的材质、形状及尺寸，存在多种成形方案。方案选定后，又存在工艺参数（比压、保压时间、浇注温度、模具温度、加压开始时间、加压速度）多种匹配方案，以确定制件尺寸精度和使用性能。在理论研究中所获得的数据积累，可以对一些典型制件成形有极强的指导作用。实际上，制件形状是多样的，成形时的热传导、力的传递千差万别。因此，对某种特殊的制件，开展其实验研究，寻找其中最佳成形方案和优化工艺参数，并和铸造方法、锻造方法进行比较，以获得满意的认知。由此基础研究和比较研究相结合，乃是推进液态模锻应用进展的最佳选择。

(4) 液态模锻设备现状和发展<sup>[7,8]</sup> 液态模锻设备研究远远不如压铸机。早期多采用通用油压机，后发展带辅助活动横梁、顶出器油缸或侧向油缸的普通型液态模锻机，近 10 年又发展了从模具清理、喷涂、浇注、施压到取件全自动化，加压速度可分级调节，工艺参数可全过程计算控制并显示的先进的液态模锻机，其中以日本宇部公司卧式 HVSC 和全立式 VSC 液态模锻机系列最为成功。

(5) 生产规模有较大发展 产品涉及铝、镁、锌、铜、高温合金及复合材料，产品遍及机械、交通、家电等。各国生产的主要液态模锻件如表 1-1 所示。

表 1-1 各国生产的主要液态模锻件<sup>[7,8]</sup>

| 应用领域       | 零件名称                                                                                  |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 汽车受力件      | 铝合金活塞, 铝合金汽车轮毂, 摩托车轮毂, 横梁(十字梁), 转向节, 下支臂, 卡钳, 外部卡钳, 制动卡钳, ABS 零件, 调制器壳体, 制动器主缸, 发动机支架 |
| 汽车耐压、气密性零件 | 压缩机蜗轮, 压缩机零件, 动力转向部件, 动力转向壳体, 油泵, 门锁, 多支管, 燃料分配管                                      |
| 汽车耐磨件      | 拨叉, 连杆, 泵壳体, 摇臂                                                                       |
| 电器耐磨件      | 鼓盘驱动器箱体(影视用), 主轴衬套, 压紧环, 影像磁鼓, 热板                                                     |
| 自行车受力件     | 曲柄, 方向轴, 车架接头                                                                         |
| 其他         | 铝高压锅及炊具, 铜合金阀体, 洁具件, 轴套                                                               |

在我国大批量生产的品种主要是摩托车铝轮毂，各种汽车铝活塞，摩托车前叉及刹车系统零件，液压机气压系统泵体，阀体及其他耐磨件，压力锅及炊具，压缩机件，自行车件，光学镜件以及铜轴套等。但我国由于受到液态模锻设备吨位及设备功能的限制，使大型制件和某些形状复杂的铸件如 14in (35.56cm) 以上汽车铝轮、汽车十字梁等的开发受到了制约，与国外有一定的差距。目前，我国正开发的产品主要有汽车转向节、空调压缩机涡旋盘以及小型发动机零件等。

1.1.3 发展趋势

液态模锻的发展趋势为：理论在不断创新中，完善其理论体系；应用研究集中在铝镁合金及其复合材料成形，从航天、航空及兵器扩展到民用等领域，实现零件制造轻量化、精密化；高温合金应用研究虽然滞后，但对于某些特殊尺寸和形状及其高性能要求的制件，仍存在着应用空间。

(1) 液态模锻集中了铸、锻成形的优势，是实现能源节约的最好途径 液态模锻与铸造相比，不用设置浇冒口或余块，金属液利用率高达 95%~98%，制件性能大幅度提高；与锻造比，可以制造形状复杂的制件，并实现毛坯精化，使后续机械加工量小，节省了金属材料，特别是有色合金材料，可节省 50%~70%。由于是液态金属充填，其变形力低，可以小设备实现大制件，降低了成形能<sup>[9]</sup>。

(2) 机械制造业要做大做强，采用先进制造技术是一大前提 零件成形技术，虽是多种多样，但铸、锻技术是最基本的，推进液态模锻技术在成形中应用，补充铸、锻成形不足，使其零件制造技术更趋精密高效和低成本，以增强市场的竞争力。

1.2 工艺方法分类

目前液态模锻工艺方法分类按加工方式分有三种：凸模加压凝固法、直接液态模锻法和间接液态模锻法。作者提出了一种新的分类方法<sup>[10]</sup>：按施压冲头（上模）端面形状分为平冲头加压法和异形冲头加压法两种，如表 1-2、图 1-2~图 1-6 所示。作者从采用本工艺加工

表 1-2 液态模锻工艺方法的分类

| 类 别    |     | 工艺方法特点                                                                                              | 示图    |
|--------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 平冲头加压  | 直接  | 制件最终形状是由凹模的形状确定。冲头施压时，金属液不作向上移动。适用于锭料或形状简单的厚壁件成形                                                    | 图 1-2 |
|        | 间接  | 制件最终形状由合模后封闭的模膛形状确定，制件尺寸精度高。冲头施压时，金属液作充填模膛流动，并通过内浇道把压力传递到制件上。该工艺适用于产量较大、形状复杂或小型零件生产，也可生产等截面型材       | 图 1-3 |
| 异形冲头加压 | 凸式  | 合模时，冲头插入液态金属中，使部分金属液向上流动，以填充由凹模壁和冲头组成的闭合模膛，获得制件的最终形状。冲头的压力直接加在制件的上端面和内表面，加压效果好。该工艺适用于壁较薄、形状较复杂的制件成形 | 图 1-4 |
|        | 凹式  | 合模时，冲头插入液态金属中，使液态金属沿冲头内型面作反向的填充模膛运动，获得制件最终形状，压力是通过冲头端面或内型面直接施压在制件上的。该工艺适用于壁较薄、形状较复杂的制件的成形           | 图 1-5 |
|        | 复合式 | 合模时，冲头凸部插入金属液，使其反向流动，填充冲头的凹部，并在冲头端面和内凹面的作用下成形，从而获得制件。适用于复杂制件成形                                      | 图 1-6 |

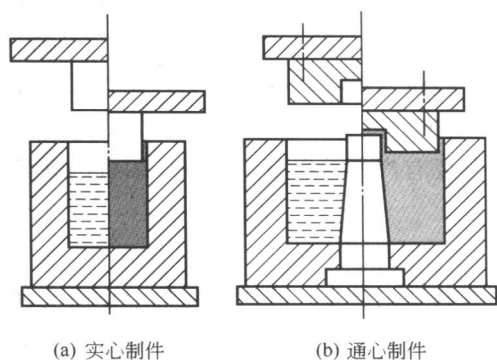


图 1-2 平冲头直接加压

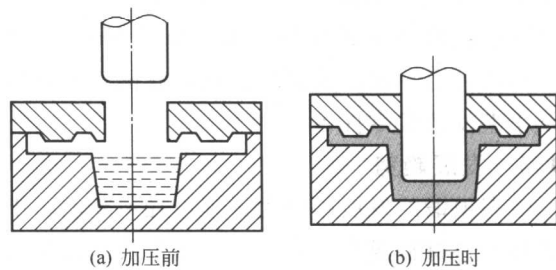


图 1-3 平冲头间接加压

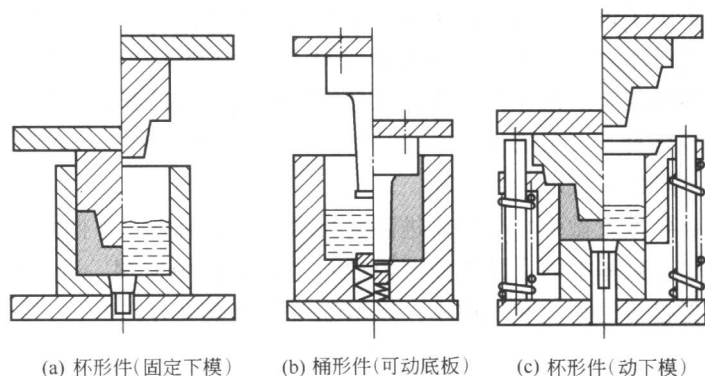


图 1-4 凸冲头加压

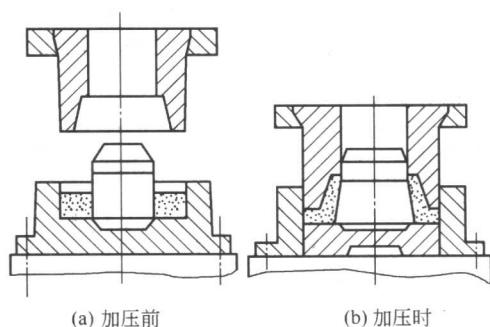


图 1-5 凹冲头加压

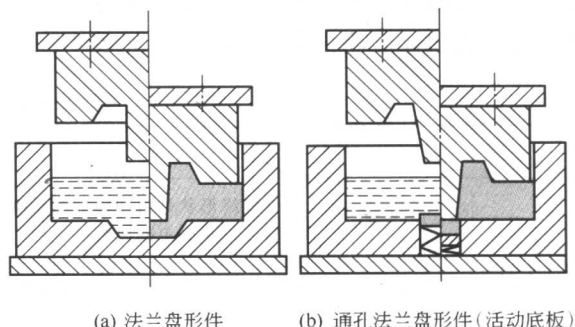


图 1-6 复合式冲头加压

的零件或毛坯出发，考虑保证金属液在凝固成形直至获得合格制件的全过程中，始终保持压力这一特点，以此为基础来进行工艺方法分类，这就抓住了加压方式取决于施压冲头的端面几何形状，而端面的几何形状又和制件的外形、金属液的流动特征相关这一关键。因此这种分类方法更能反映该工艺的实质，更易于理解。

上述工艺方法是最基本的，在此基础上，还产生几种有别于基本的新的加压方式，包括垂直加压凝固法（图 1-7）、倾斜式浇注加压凝固法（图 1-8）、局部加压凝固法（图 1-9）、低压充填-高压凝固法（图 1-10）<sup>[11]</sup>。

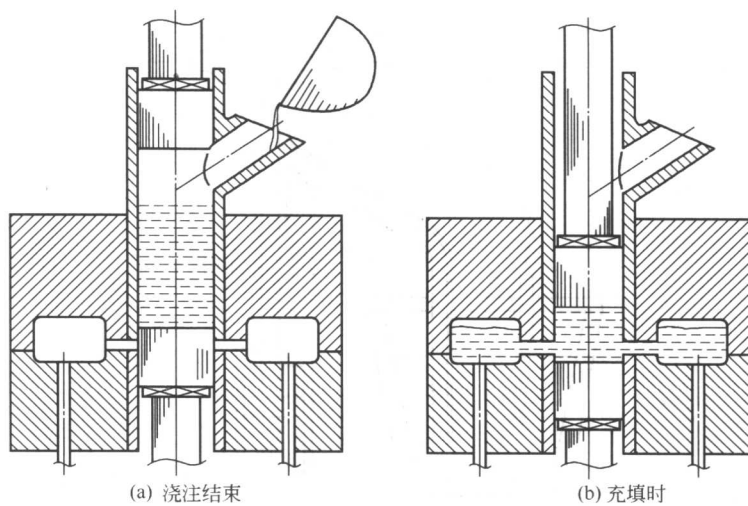


图 1-7 垂直加压凝固法

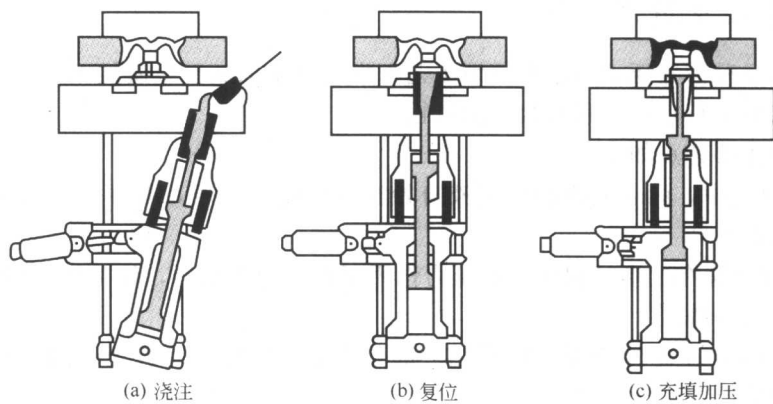


图 1-8 倾斜式浇注加压凝固法

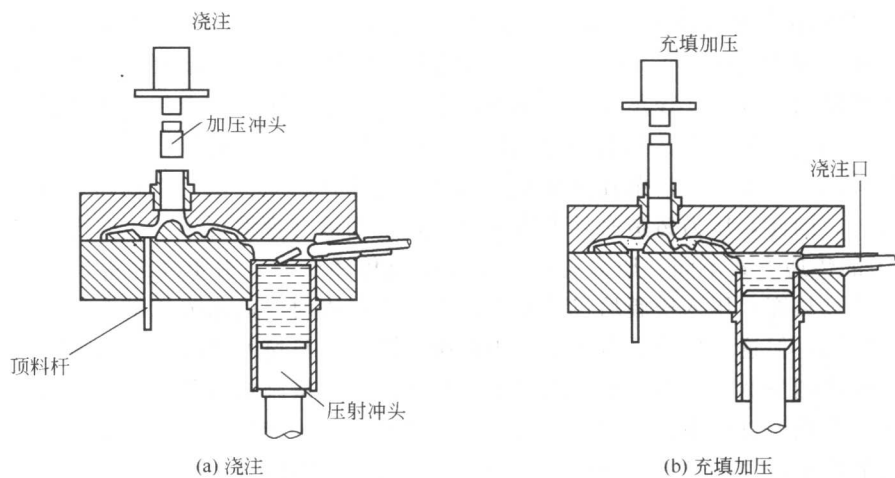


图 1-9 局部加压凝固法

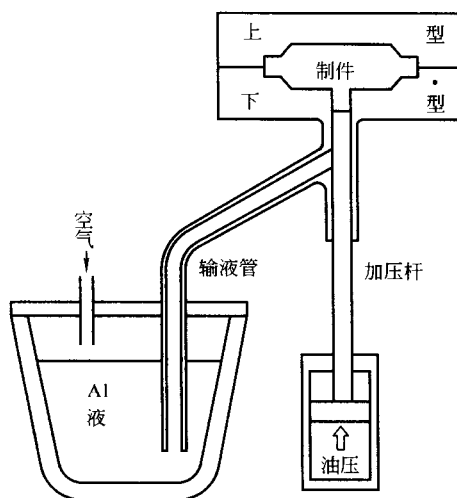


图 1-10 低压充填-高压凝固法

### 1.3 工艺特点及适用范围

液态模锻是一种借鉴压力铸造和模锻工艺而发展起来的新型金属加工工艺，它包含了压力铸造和模锻的若干特点，并且有自己的特性。

液态模锻的主要特点如下。

① 在成形过程中，尚未凝固的金属液自始至终经受等静压，并在压力作用下，发生结晶凝固，流动成形。

② 已凝固的金属在成形过程中，在压力作用下产生塑性变形，使毛坯外侧紧贴模膛壁，金属液获得并保持等静压。

③ 由于凝固层产生塑性变形，要消耗一部分能量，因此金属液经受的等静压值不是定值，而是随着凝固层的增厚下降。

④ 固-液区在压力作用下，发生强制性的补缩。

与压力铸造比较，除了以液态金属作为原料这点相同外，还有许多不同之处。

① 液态金属注入模膛的方式不同。压力铸造是借助压力，沿着浇注系统，在极短的时间内，将熔融金属以高速（15~70m/s）充满闭合的模膛。而液态模锻时，金属液是通过浇包直接注入模膛内，其浇注速度不高。前者由于在高速下模膛内的空气来不及排出，而被卷入金属液内，形成皮下气泡。后者则是在冲头施压（闭合模膛）时缓慢稳定，气体大部分可以从凸凹模间隙中排出，而溶解在金属液内的少量气体在压力下也可以逐渐逸出，在毛坯中不易形成气孔。因此，压力铸造必须考虑排气条件，而液态模锻可不必过多考虑。

② 压力的传递方式不同。压力铸造靠浇注系统传递压力。由于浇道很长，金属液经过浇道很快失掉过热度，压入模膛后迅速凝固。当填充结束时，尚未凝固的金属液可能在压力持续作用下凝固，但这一压力是有限的，更何况在浇道一旦堵塞情况下，金属液便发生自由结晶，液态模锻则不然。压力传递时通过施压冲头端面直接施加（或通过已凝固壳）在金属液面上，除了在成形过程中已凝固层塑性变形要消耗一部分能量外，机器全部能量都用在使金属液获得等静压，并在过程中保持它。因此，两者的根本区别在于后者是在压力作用下发生结晶凝固，流动成形，而前者则不完全属于压力结晶凝固，更不属于压力下液态金属凝固