



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

# 轻量化手册 ③

## HANDBUCH LEICHTBAU

# 轻量化加工工艺 ——成型，加工和处理

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning)

[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)

北京永利信息技术有限公司

陈瑶

主编

译

审

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

# 轻量化手册 ③

## HANDBUCH LEICHTBAU

# 轻量化加工工艺 ——成型，加工和处理

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning)

[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)

北京永利信息技术有限公司

陈瑶

主编

译

审



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

轻量化加工工艺: 成型, 加工和处理 / (德) 亨宁 (Henning, F.), (德) 穆勒 (Moeller, E.) 主编; 北京永利信息技术有限公司译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 3

(轻量化手册; 3)

ISBN 978-7-5682-0169-8

I. ①轻… II. ①亨… ②穆… ③北… III. ①汽车轻量化-研究 IV. ①U462.2  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 014189 号

---

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-0361 号

Copyright © 2011 Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

All rights reserved.

Authorized translation from the original German language edition  
published by Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.25

彩 插 / 1

字 数 / 345 千字

版 次 / 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 132.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

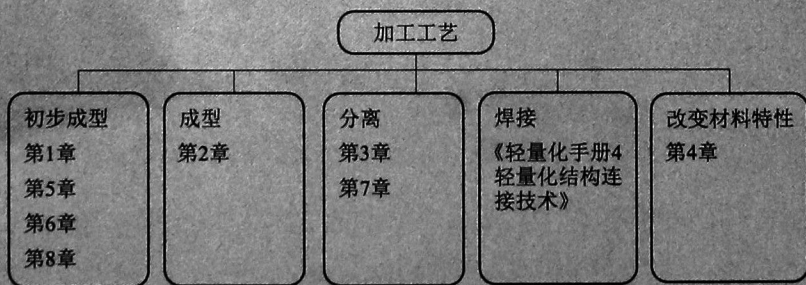
图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前言

本书主要讲解轻量化结构的加工工艺,论述了部件的成型和加工工艺,以及部件使用特性的设定。根据《轻量化手册2 轻型材料和属性》中给出的相关要求,本文将根据材料的种类将部件分为若干类型进行论述,尤其是在涉及某些生产加工技术时,由于某些技术只能应用于特定的原材料,因此有必要做出这样的安排。本书将对金属、陶瓷、塑料和纤维增强塑料几个部分进行讲解,另外还将介绍复合材料的生产制造工艺。在 DIN 8580 标准中给出了生产制造工艺主要分类中的若干细分类别,这些信息是本书分类标准的补充。本书中各个章节的内容和分类参见示意图中的描述。

由于焊接涉及的范围较大且具有极其重要的意义,因此将焊接工艺单独放在《轻量化手册4 轻量化结构连接技术》进行介绍。

根据本书导论中给出的说明,本书中介绍的第一种生产加工工艺为金属材料的加工工艺。在第1章中,首先介绍了成型工艺,主要包括采用典型的铸造工艺铸造轻量化金属部件,以及所制造的部件的特性,此外,还涉及粉末冶金工艺路线以及泡沫材料的特性;第2章将详细论述成型工艺,此外,还将论述锻造、金属板材成型、弯曲成型的要求和方法;第3章对不同的加工工艺分别进行了论述,即当被加工部件为轻金属材料或者金属基体复合材料时,对其进行切割、切削和表面磨蚀加工中需要特别注意的地方;在第4章中介绍了材料特性变化工艺,除了热处理之外还会涉及一些令人关注的机械表面处理。



本书加工工艺章节的划分按照 DIN 8580 的分类方法实施。

第5章和第6章分别论述了塑料和纤维增强塑料的制造工艺,热塑性矩阵以及热固性塑料的制造方法,以及用于增强塑料强度的纤维的类别,如短纤维、长纤维、连续纤维增强,以及上述三种纤维增强的主要区分标准。

通过切削工艺对纤维增强塑料进行加工时，需要满足特别的要求，具体的内容将在第7章中进行论述。

第8章论述了以陶瓷为原材料的轻量化结构部件。由于其他加工步骤的成本较高，本章主要介绍了成型工艺。第9章论述了由不同材料制成的单个部件的加工工艺，由不同材料制成的单个部件也被称为混合复合材料。



# 目 录

## 1 金属轻量化材料的初步成型

**Andreas Bührig-Polaczek / 1**

### 1.1 铸造 / 2

- 1.1.1 铸造轻量化结构的生产工艺 / 2
- 1.1.2 生产工艺和合金对部件性能的影响 / 4
- 1.1.3 铸造技术工艺 / 7
- 1.1.4 重力铸造工艺 / 11
- 1.1.5 低压硬模铸造工艺 / 15
- 1.1.6 压力铸造工艺 / 17
- 1.1.7 熔模铸造 / 19
- 1.1.8 前景展望 / 21
- 1.1.9 附加信息 / 23

### 1.2 烧结 / 23

- 1.2.1 粉末的制造 / 23
- 1.2.2 铝烧结部件的制造 / 27
- 1.2.3 铝烧结成型件的应用示例 / 30
- 1.2.4 铝合金高性能材料的制造 / 32
- 1.2.5 前景展望 / 36
- 1.2.6 附加信息 / 37

## 2 金属轻量化材料的成型

**Sami Chatti, Daniel Pietzka, Alessandro Selvaggio,  
Michael Trompeter, A. Erman Tekkaya / 38**

### 2.1 通过钢板成型加工制造轻量化结构部件 / 39

- 2.1.1 各种轻量化策略 / 39
- 2.1.2 板材液压成型工艺的其他板材成型极限 / 40
- 2.1.3 负荷匹配板材成型件的制造 / 44
- 2.1.4 最高强度板材成型件的加压淬火 / 46
- 2.1.5 基于金属板半成品的混合结构型式 / 46
- 2.1.6 附加信息 / 49

### 2.2 通过整体成型制造轻量化结构 / 50

- 2.2.1 整体成型及其工艺的分类 / 50
- 2.2.2 挤压 / 50
- 2.2.3 锻造 / 59
- 2.2.4 附加信息 / 62

### 2.3 通过弯曲成型制造轻量化结构部件 / 63

- 2.3.1 作为轻量化基础的型材 / 63

- 2.3.2 通过弯曲成型工艺制造直型材 / 64
- 2.3.3 利用弯曲工艺制造负载匹配的型材 / 68
- 2.3.4 管材和型材的弯曲成型 / 71
- 2.3.5 应力匹配管材和型材的弯曲 / 76
- 2.4 总结 / 78
- 2.5 附加信息 / 78

### 3 轻量化金属材料的分离

**Volker Schulze, Jürgen Michna / 82**

- 3.1 分解 / 83
  - 3.1.1 分解工艺 / 83
  - 3.1.2 切割表面的磨损和形状缺陷 / 84
  - 3.1.3 有色金属的分解 / 84
- 3.2 用一定几何形状的切削刃进行切削加工 / 86
  - 3.2.1 对切削加工工艺的影响 / 86
  - 3.2.2 有色金属的切削加工 / 89
- 3.3 用未定义几何形状的切削刃进行切削加工 / 95
  - 3.3.1 喷水切割 / 95
  - 3.3.2 磨削 / 96
- 3.4 整平 / 96
  - 3.4.1 激光加工 / 96
  - 3.4.2 电火花磨削加工 / 97
- 3.5 总结 / 98
- 3.6 附加信息 / 98

### 4 轻量化金属材料特性的改变

**Alexander Erz, Jürgen Hoffmeister, Volker Schulze / 101**

- 4.1 通过成型加工进行硬化 / 102
  - 4.1.1 喷丸硬化(喷丸处理) / 102
  - 4.1.2 滚压硬化(深滚压) / 102
- 4.2 热处理 / 103
  - 4.2.1 淬火 / 103
  - 4.2.2 钢的调质处理 / 108
  - 4.2.3 钢的化学工艺 / 109
  - 4.2.4 时效硬化 / 110
  - 4.2.5 镁合金的时效硬化 / 114
  - 4.2.6 钛合金的淬火和热机械处理 / 114
- 4.3 总结 / 117

- 4.4 附加信息 / 117
- 5 塑料加工
  - Axel Kauffmann / 119**
  - 5.1 挤出 / 120
    - 5.1.1 管材挤压和型材挤压 / 121
    - 5.1.2 挤压吹塑成型 / 122
  - 5.2 注塑成型 / 124
    - 5.2.1 热塑性塑料注塑成型 / 125
    - 5.2.2 弹性体注塑成型 / 127
    - 5.2.3 热固性塑料注塑 / 127
    - 5.2.4 特殊工艺 / 128
  - 5.3 发泡工艺 / 132
    - 5.3.1 挤出发泡成型 / 132
    - 5.3.2 颗粒发泡 / 133
    - 5.3.3 聚氨酯泡沫塑料 / 135
  - 5.4 压制工艺 / 136
  - 5.5 深冲 / 137
  - 5.6 滚塑成型 / 139
  - 5.7 总结 / 141
  - 5.8 附加信息 / 141
- 6 纤维增强塑料的加工
  - Frank Henning / 143**
  - 6.1 短纤维增强塑料的加工 / 144
    - 6.1.1 带热固性基体短纤维增强塑料的加工工艺 / 145
    - 6.1.2 带热塑性基体短纤维增强塑料的加工工艺 / 146
  - 6.2 长纤维增强塑料的加工 / 148
    - 6.2.1 长纤维增强热固性塑料的生产 / 148
    - 6.2.2 长纤维增强热塑性塑料的生产 / 153
  - 6.3 连续纤维增强和织物增强热固性塑料件的生产 / 163
    - 6.3.1 手动层压技术 / 163
    - 6.3.2 预浸料技术 / 168
    - 6.3.3 复合材料液体成型工艺-LCM 技术 / 179
  - 6.4 连续纤维增强和织物增强热固性塑料部件的生产 / 201
    - 6.4.1 有机板成型-压制工艺 / 201
    - 6.4.2 用橡胶模具进行成型 / 201
    - 6.4.3 金属对模模塑 / 202



6.5 附加信息 / 203

## 7 纤维增强塑料的分离

**Volker Schulze, Chris Becke / 207**

7.1 加工缺陷和加工质量 / 208

7.2 使用一定几何形状的切削刃进行切削加工 / 210

7.2.1 磨损与刀具材料 / 210

7.2.2 铣削 / 210

7.2.3 钻孔 / 211

7.2.4 车削 / 215

7.3 使用未定义几何形状的切削刃进行切削加工 / 216

7.3.1 磨削 / 216

7.3.2 水射流切割 / 216

7.4 烧蚀 / 218

7.4.1 使用激光束烧蚀 / 218

7.4.2 电火花烧蚀(EDM) / 218

7.5 总结 / 219

7.6 附加信息 / 219

## 8 技术陶瓷的成型

**Reinhard Lenk / 222**

8.1 陶瓷生产技术 / 223

8.2 技术陶瓷的成型 / 225

8.2.1 陶瓷成型原理 / 225

8.2.2 陶瓷成型工艺 / 227

8.2.3 黏合剂方案和脱黏方法 / 237

8.3 复杂的陶瓷部件结构 / 238

8.3.1 原理 / 238

8.3.2 轻量化中的加工技术方法和应用实例 / 240

8.4 总结 / 251

8.5 附加信息 / 251

## 9 混杂复合材料的制造工艺路线

**Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader / 252**

9.1 作为加工准备的表面处理 / 253

9.1.1 借助等离子进行表面改性 / 253

9.1.2 化学活化 / 253

9.2 模内组装(IMA) / 255

9.2.1 压力注塑包封和加压压制 / 255

- 9.2.2 混杂复合材料有机板的加工 / 255
- 9.2.3 局部连续纤维增强长纤维复合材料的  
制造工艺 / 257
- 9.2.4 混合内高压成型 / 259
- 9.3 模后装配(PMA) / 261
  - 9.3.1 模后装配(PMA)和模内组装(IMA)的比较 / 261
  - 9.3.2 连接技术是模后装配路线的重要方面 / 262
- 9.4 混杂复合材料与其他部件的连接 / 264
- 9.5 总结 / 264
- 9.6 附加信息 / 264

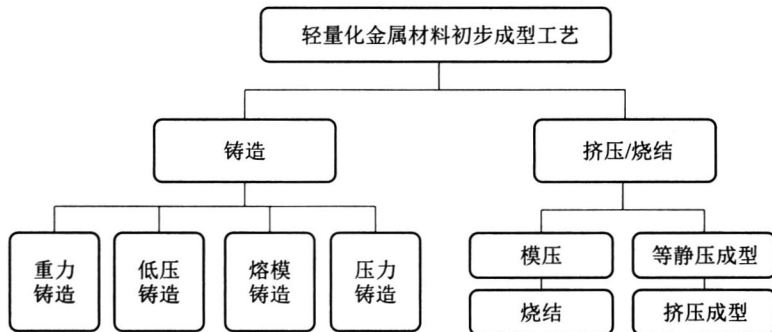
# 金属轻量化材料的初步成型

Andreas Bührig-Polaczek

参与本部分内容编写工作的还有：Samuel Bogner, Stephan Freyberger, Matthias Jakob, Gerald Klaus, Heiner Michels, Christian Oberschelb, Uwe Vroomen

按照标准 DIN 8580 给出的定义，初步成型是指采用各种必要的手段对不成形的固体材料进行加工。待加工、未成形的材料可以呈固态、液态、气态或者处于两个物态之间的过渡态，即呈蒸气状、糊状或者膏状。下图为对轻量化金属材料初步成型工艺的分类。

铸造工艺可以仅通过一个生产步骤就将熔化的金属制成接近终形的部件。



轻量化金属材料初步成型工艺的分类

如果铸造设计人员选择了一个合适的铸造工艺方案，则几乎可以铸造出任意自由曲面形状和空心构造的铸件。铸造设计人员可以自由选择材料和铸件的形状，从而使部件的结构满足特殊要求。如果由于结构原因，同一个部件出现局部位置负载差别较大的情况，则可以采用铸造的合成材料和复合材料，允许各种金属或者非金属材料相互复合。在这种情况下，可以有选择地利用整个部件中至少两种材料的特性。由于所使用金属和合金的特性不同，因此以这种工艺生产出的铸件具有较大的应用范围，既可以在最高工作温度和最低工作温度环境下使用，也可以在较大的温度交变负载下以及高腐蚀性介质中使用。

此外, 采用粉末冶金制造技术生产精密部件或者精密成型部件被认为是现代具有成本优势的加工制造技术。在轻量化部件制造领域, 采用铝材, 以粉末冶金技术制成部件的方案相对于铸造成型技术的方案具有越来越大的竞争力。虽然其他的一些轻金属(如镁和钛)可以以粉末冶金的技术生产出部件来满足一些特殊的应用要求, 但因为铝金属粉末冶金技术在应用中具有更大的意义, 所以本文仅介绍铝金属粉末冶金制造工艺。在开发新的乘用车发动机时, 发动机能否满足环保要求, 以及能否达到车辆使用者对车辆燃油经济性的要求, 是判断发动机是否成功的关键, 也就是说, 开发发动机的目标是提高发动机的效率、降低燃油消耗并减少废气排放。为了达到上述目标, 一方面要通过轻量化(包括车身轻量化和发动机轻量化)的方法来降低汽车的重量; 另一方面, 可以通过降低气门机构以及燃烧室的配重来提高发动机的效率。此外, 也可以通过降低部件重量的方法来减小摩擦力, 并使摩擦力均匀分布在气门机构、活塞环区域和曲柄轴承处。如果减少了摩擦损失, 则油耗将降低, 尤其是在低速行驶时(城市路况), 其效果更为明显, 同时还可以降低噪声。

基于上述原因, 业内对采用铝制部件替代原来钢制部件有着很大的兴趣。在有些情况下, 铝制部件比钢制部件轻 60%, 原因是铝的密度与钢的密度之比为 1:3。特别要指出的是, 采用粉末冶金技术制造的铝硅合金部件改进了铝制部件的一些局限性, 具有明显的优点。

## 1.1 铸 造

在采用铸造方法制造部件时, 通常会组合应用材料轻量化和结构设计轻量化技术, 以使部件重量尽可能最小。只使用一种低密度材料往往不能达到预期要求, 所以需要一种能更好地满足部件相应特性要求的材料。因此, 应选取具有合适的强度、尽可能低的密度以及足够铸造技术性能的材料。

### 1.1.1 铸造轻量化结构的生产工艺

#### 1.1.1.1 铸件的设计

铸件的设计应遵守铸件结构设计的总体原则, 此外, 应保证铸件的壁厚尽可能相等, 且壁厚差异尽可能小。铸件的设计强度不应通过材料堆积的方法, 而应通过使用加强筋表面来实现。加强筋应按顺序放置, 且应保证当加强筋凝固收缩时不会出现拉伸应力过大的情况。同时还应注意, 铸件能够承受的压应力应比能够承受的拉伸应力大得多。

在进行轻量化部件设计时, 拓扑优化法和仿生设计方法都属于常见的设计方法(参见第1册第4章)。采用铸造工艺可以较好地实现这些原理方法, 因为在设计铸造部件和确定铸造工艺参数时只受到少数相关工艺技术条件的几何约束。当采用铸造替代焊接时, 利用了拓扑优化(图 1.1), 以设计出能够满足负荷要求且应力较小的铸件几何形状(图 1.2), 并在球墨铸铁砂型中批量生产铸件(图 1.3)。

由于工艺技术上的原因，选择铸造材料和铸造工艺往往同时进行。例如，由于铁基合金的熔化温度较高，因此通常采用砂型铸造法制造；而钛金属具有较高的熔化反应活性，所以只能采用精密铸造法制造。铝金属和镁金属制造有相当多的工艺可供选择（表 1.1）。



图 1.1 拓扑优化后的设计方案



图 1.2 详细设计方案的应力模拟

### 1.1.1.2 铸造工艺的特性参数

按照铸件在凝固过程中冷却速度的不同，铸造工艺可分为快速冷却铸造和慢速冷却铸造两类。如果采用具有良好导热能力的金属铸模和主动散热措施对铸件施加较高的金属静压力，则称为快速冷却铸造；而采用具有不良导热性能的矿物或者陶瓷铸模，且铸件受到一个自然的金属静压力，则称为慢速冷却铸造。考虑到部件应达到的机械性能，应尽可能采用快速冷却铸造工艺。在常规铸造工艺中，冷却速度处于  $1\ 000\ \text{K/s} \sim 1\ \text{K/s}$  之间。一般来说，铸造过程中部件的冷却速度按照下列顺序递减：压力铸造—重力硬模铸造—砂型铸造—熔模铸造。按照同样的顺序，铸造过程中的局部充型速度从  $100\ \text{m/s}$  下降到几厘米每秒。通常，通过静置充型可以降低内部缺陷的发生率，且能够保证在较低冷却速度下生产出具有较高性能的铸件。



图 1.3 球墨铸铁 (EN-GJS-400-15) 原铸件  
(图片来源：克拉斯铸造两合公司)

压铸工艺的轻量化解决方案主要是通过尽可能降低铸件壁厚来实现的，然而这种方法会对几何自由度有所限制，并且不允许采用内部中空结构；而硬模铸造，尤其是砂型铸造往往不存在或者很少存在限制条件，所以这种铸造工艺能够在满足结构设计要求的同时生产出轻量化程度较高的产品。如果采用铸芯进行铸造，则可以生产出具有高阻力矩的薄壁空心体，这样，重量较轻的部件也能达到较大的刚度。采用精密铸造工艺时，部件的几何尺寸具有较大的自由度。同时，采用精密铸造工艺能够制造出对几何尺寸和表面精度都有较高要求的部件，例如采用微结构表面来提升功能性。

## 1.1.2 生产工艺和合金对部件性能的影响

### 1.1.2.1 凝固条件对铸件组织和强度的影响

铸件组织的大小和形态对铸件的强度和延性有显著的影响。一般来说, 铸件组织在原始状态下越纤细, 结构排列越均匀, 则其强度和延性就越高, 这可以通过选择合金种类、熔化处理方法和铸造工艺, 以及后续热处理来实现。随着冷却速度的加快, 单个微观结构组成的尺寸越来越小, 且其形态越来越纤细。枝晶间距 (Dendrite Arm Spacing, DAS) 是描述铝合金材料特性的一个参数, 是指枝晶主轴上长出的相邻二次枝晶的中心间距, 其大小完全由铸件凝固冷却的速率决定, 冷却速率可能会受主动冷却铸模的影响, 或受高导热能力被动冷却元件整合到铸造系统中的影响。此措施在设计铸件和铸模时通常就已考虑到局部承受高应力的部件。由此可以使低强度的粗砂型铸造组织 (图 1.4) 局部细化 (图 1.5), 并使其获得更好的性能。即使使用铸铁材料时, 从强度的角度看, 也应制造出具有尽可能纤细铸造特性的铸件, 因此需要对标准 EN ISO 945 中定义的石墨形状和尺寸进行评估。然而, 需要注意的是, 标准化材料的重量控制不是通过化学成分或者结构组成实现的, 而是通过工件的强度或者铸造的测试棒实现的, 所以应根据部件的用途来选择合金材料。下文概述了各种合金适用的工艺技术, 以及可能达到的性能。

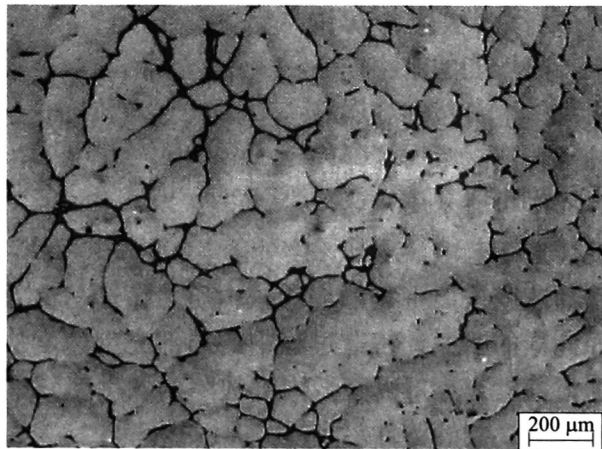


图 1.4 AlCu<sub>4</sub> 合金材质砂型铸件的显微结构

### 1.1.2.2 压铸镁合金

由于镁的密度低, 因此被视为传统轻量化材料。根据 ISO 16220 中给出的数据, 压铸镁合金的抗拉强度为 260 MPa。一些常用于砂型铸造的特殊合金, 经过热处理后抗拉强度为 250 MPa, 而一些常见的、但以非常规方法生产的合金, 其抗拉强度则超出了 250 MPa (参见第 2 册第 4 章)。

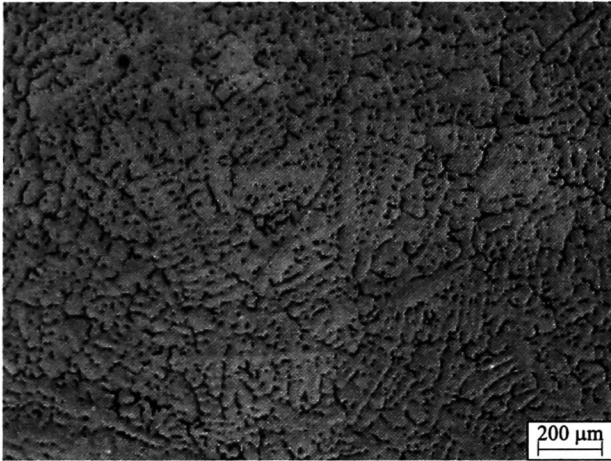


图 1.5 AlCu<sub>4</sub> 合金材质硬模铸件的显微结构

(图片来源: 铸造研究所)

镁及其抗腐蚀标准合金非常适用于薄壁部件, 其可突破因工艺条件限制而存在的轻量化部件结构的限制, 并以更容易被浇铸、更轻的材料实现批量化生产。如果采用压铸工艺, 则可以使铸件具有更大的面积和更长的流动长度, 从而制造出壁厚为 2.5 mm 的部件。由于镁合金的轻量化程度高, 其在轻量化材料中处于十分突出的地位。在车辆中, 齿轮箱和气缸曲轴箱因使用了大量的镁合金材料而具有较大的减重潜力, 在这些位置采用新型的、极为适用的且具有抗蠕变性能的镁合金铸件具有重要意义, 与常见的铝制结构相比, 其重量可减少 25%~30%。

### 1.1.2.3 压铸铝合金

铸造性能良好的铝合金可应用于铸造工艺的多个方面, 且由于其数量充足, 可以满足很多要求, 如最高可延展性和耐磨性要求 (参见第 2 册第 3 章)。EN ISO 1706 规定, 经加工的压铸合金 AlMg5 可达到的抗拉强度为 250 MPa。采用新型真空辅助压铸工艺及其改进工艺不断制造出延展性较好的可热处理压铸件, 其拉伸强度可达 300 MPa 以上。通常, 在产品形成过程的设计阶段, 客户和供应商之间会商定非规范的强度特性。在砂型铸造和硬膜铸造中, 含铜合金由于通常会进行后续热处理而使拉伸强度达到 300 MPa。例如, 在熔模铸造中, 应用获得专利的 HERO®-工艺可实现较高的机械性能。

铝合金的应用是多方面的, 其应用最广的领域是汽车行业, 主要涉及大批量制造工艺。除了大量压铸部件外, 通常还生产硬膜铸造件 (图 1.6) 和砂型铸造件 (图 1.7)。

### 1.1.2.4 成型铸造用钛合金

钛及钛合金的密度介于轻金属和重金属之间 (参见第 2 册第 5 章), 具有较高的熔点和优异的耐化学性。根据标准 DIN 17865, 普通钛合金的强度可达 880 MPa。由于该材料具有理想的强度密度比, 因此成为较受欢迎的用于高应力部件的轻量化

材料 (图 1.8)。材料等级  $\gamma$ -钛铝合金, 由于其较好的耐温性, 较适用于制造飞机发动机的涡轮叶片和机动车的废气涡轮增压机。由于具有较高的熔融温度和氧亲和力, 原则上成型铸造用钛合金只通过熔模铸造工艺进行加工。

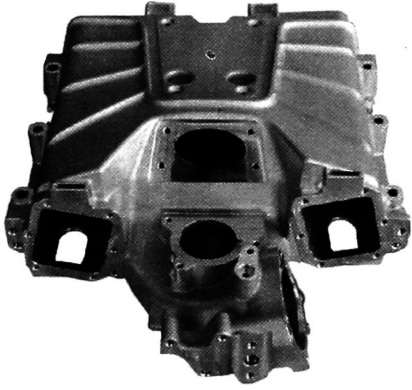


图 1.6 通过铝-硬膜铸造工艺制造的  
压缩机壳体

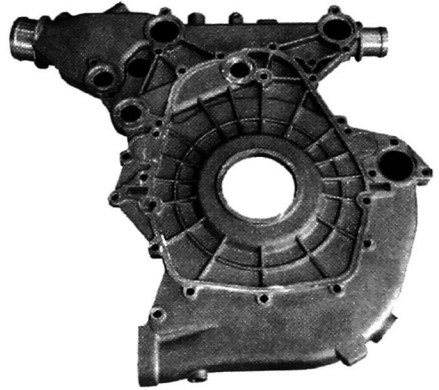


图 1.7 采用铝砂型铸造工艺制造的  
发动机密封法兰

(图片来源: Ohm & Häner 金属制品股份有限公司)

#### 1.1.2.5 铸铁材料和铸钢

由于铸铁材料 [片状石墨铸铁 (GJL)、蠕墨铸铁 (GJV)、球墨铸铁 (GJS)、等温淬火球墨铸铁 (ADI)] 的密度较高, 因此从表面上看它并不属于轻量化材料; 同时由于铸铁材料结构自由且结构中含碳 (通常被称为球墨), 因此其强度低于钢。然而, 铸铁材料比钢的密度最多可低 10%, 而阻尼特性和热传导性提高, 且铸造性能极佳。因此对壁厚较大、要求较大且承受较大特定载荷的待铸造部件提出了使用强度方面的较高要求, 并实现了相对较低的重量。符合 EN 1561 强度标

准的片状石墨铸铁 (GJL) 材料, 由于存在对应力方面不利的片状石墨, 其减重可能性很小, 但具有较高的热传导能力。石墨的强度和材料的基本强度以片状石墨铸铁 (GJL)、蠕墨铸铁 (GJV)、球墨铸铁 (GJS) 的顺序递增, 并分别可以相应地达到 350 MPa、500 MPa、900 MPa 的抗拉强度。应当指出, 这个与壁厚有很大关联的数值原则上与直径为 30 mm 的独立铸造拉伸试棒相关。等温淬火球墨铸铁 (ADI) 具有很好的机械特性, 因此可以用来制造高负荷部件 (图 1.9)。根据 EN 1564 (草案), 类似于传统球墨铸铁 (GJS) (EN 1563), 但在延伸率为 1% 的情况下进行热处理的合金可达到 1 400 MPa 的抗拉强度, 结合优异的铸造性能, 可以制造出具有较高轻量化等级的壁薄且强度高的部件。



图 1.8 钛合金材质的熔模铸造件  
(图片来源: Tital 股份有限公司)



如果铸铁合金采用的是通过传统铸造工艺可以实现的标准壁厚，则其无法达到轻量化的效果。根据 DIN EN 10293，一般应用下，铸钢在 10% 的延伸率下可以达到 1 200 MPa 的抗拉强度。通过采用先进的铸造工艺，例如 3cast®-工艺（这种工艺最小可以达到 1.5 mm 的壁厚），则可以形成高强度结构，这种结构与型钢材质的钢板结构差不多（图 1.10）。



图 1.9 一个 10 缸柴油发动机的等温淬火球墨铸铁（ADI）材质轮罩  
（图片来源：Claas 铸造股份有限公司）

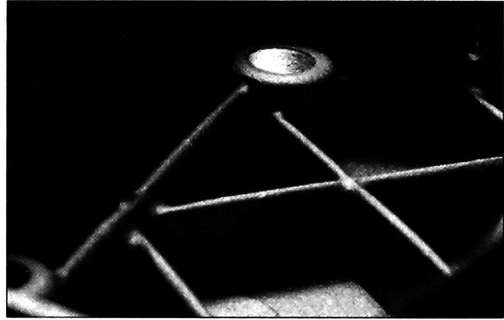


图 1.10 一个薄壁铸铁结构的详图  
（图片来源：Evosteel 股份有限公司）

### 1.1.2.6 混合材料

混合材料，也称复合材料，已经使用了很长时间。通过不同材料的组合，可以制造出符合要求的、局部具有期望特性的铸件。通过这种方式，例如对摩擦性能的要求，可以实现高硬度或热传导性，典型的例子是铝制气缸曲轴箱和铸铁缸套。新应用和未来应用表现在通过铸造节点加强的钢板结构上（图 1.11）。通过这些设计理念的应用，可以实现较高的轻量化等级，因为轻型且稳定的铸造结构可对钢板起到加固作用，并有助于发挥其全部潜力。

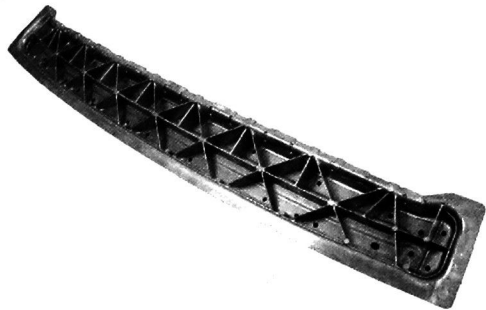


图 1.11 铸造节点加强的钢板结构混合材料车身部件  
（图片来源：Imperia 应用汽车发展股份有限公司）

### 1.1.3 铸造技术工艺

为了制造高质量铸件，需要进行精密工艺控制，因此还需要了解相应的有效参数。参数与所采用的成型工艺有很大关系，图 1.12 所示为成型铸造工艺的分类，可以分为消失模铸造和永久模铸造工艺。

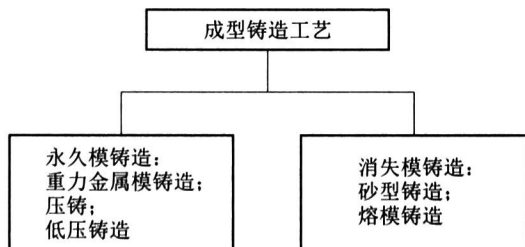


图 1.12 成型铸造工艺的分类