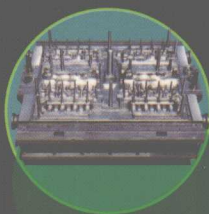
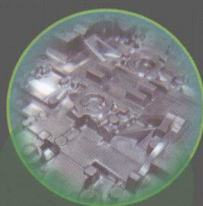
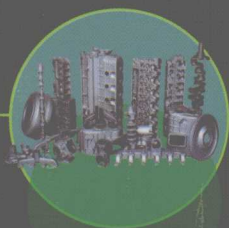
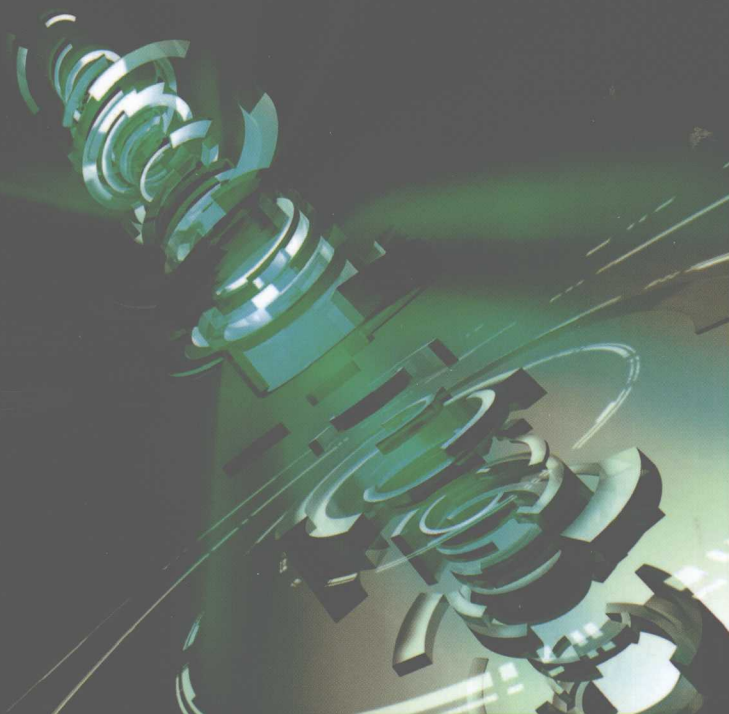


高等学校教材

# 铸型材料基础

◎ 李远才 编

ZHUXING CAILIAO JICHU



化学工业出版社

本书分为9章,较系统地介绍了砂型铸造用铸型(芯)材料的基本知识和最新信息。第1章为绪言,第2章介绍了型(芯)砂用骨干耐火材料,第3章和第4章分别介绍了黏土黏结剂型(芯)砂和水玻璃型(芯)砂及其它无机黏结剂型(芯)砂,第5~7章分别介绍了热硬、自硬和气硬树脂型(芯)砂,第8章介绍了铸造涂料,第9章介绍了包括冒口套、覆盖剂和过滤器等的工艺过程材料。

本书可作为高等院校铸造专业本科生教材;也可作为材料成型与控制工程专业本科生及研究生的教材或参考书;也可供从事铸造技术管理及铸型(芯)原辅材料生产、销售工作的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

铸型材料基础/李远才编. —北京:化学工业出版社,  
2009.5  
高等学校教材  
ISBN 978-7-122-05049-6

I. 铸… II. 李… III. 砂型铸造-造型材料-高等学  
校-教材 IV. TG221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 035385 号

---

责任编辑:彭喜英  
责任校对:蒋宇

装帧设计:韩飞

---

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)  
印装:化学工业出版社印刷厂  
787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数307千字 2009年6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:25.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

铸造是机械行业最基础的产业,在我国,铸造又俗称“翻砂”,其中“砂”即为广义的铸型(芯)材料,而“翻”理解为使用铸型(芯)材料的技术。铸型(芯)材料的主要特点是:①从学科理论来看,其开发、生产和应用涉及硅酸盐学、矿物学、陶瓷学、无机化学、高分子材料、有机合成、精细化工和铸造工艺等诸多学科,远远超出了铸造专业的研究范围,是多学科结合的产物。从事研究开发及应用的相关人员必须有较宽的知识面和合理的专业结构。②品种及规格繁多,给生产、应用、管理和质量控制带来了诸多问题,从而对其提出了更高的要求。③对铸件质量影响大,大多数铸造缺陷(据统计约70%)都与铸型(芯)材料的质量和选用有关。因此,铸型(芯)材料在铸造中的重要性不言而喻。

砂型铸造与其它铸造方法相比,其优点是:不受零件形状、大小、复杂程度及合金种类的限制;所用材料来源广,生产准备周期短,成本低。砂型铸造是铸造生产中应用最广泛的一种方法,世界各国用砂型铸造生产的铸件占总产量的80%~90%。

为此,《铸型材料基础》以砂型铸造为主线,首先以大量篇幅较系统全面地介绍各种无机和有机黏结剂砂的原材料性质、硬化工艺原理和生产应用;随后介绍砂型(芯)涂料;最后,首次将工艺过程材料列入铸型(芯)材料中加以介绍。

作为型(芯)砂有机黏结剂,有天然的植物油和矿物油,工业副产物的合脂、渣油和纸浆废液,以及人工合成的树脂等。除了人工合成的树脂外,其它有机黏结剂曾在我国一段时期广泛使用,随着人工合成的树脂黏结剂的推广应用,其它有机黏结剂的缺点逐渐暴露,其应用领域和范围逐渐被人工合成的树脂黏结剂所取代。为此,为节省篇幅,本书不再介绍其它有机黏结剂(对其有兴趣的读者,请查阅其它铸造教科书或手册),而主要以热硬、自硬和气硬的固化原理为主线,介绍人工合成的树脂黏结剂。

具体内容如下:

在第1章绪言中,介绍了砂型和砂芯的制造方法及砂芯的分级,造型材料的分类及特点,造型材料发展趋势及展望等。

在第2章中,较详细地介绍了硅砂的基本性质和性能,铸造用硅砂的技术指标和硅砂的处理等;对非石英质耐火骨料,主要介绍了锆砂、镁砂、橄榄石砂、铬铁矿砂、石灰砂、碳质砂及铝-硅系耐火骨料等。

在第3章中,主要介绍了黏土湿型砂用原材料及其配方,以及黏土湿型砂的典型铸造缺陷,同时还简单介绍了干型砂和表干型砂。

在第4章中,重点介绍了水玻璃黏结剂砂,包括水玻璃的基本性质和性能、水玻璃的硬化及黏结强度和各种水玻璃砂的硬化方法;介绍了磷酸盐 and 水泥等其它无机黏结剂砂;就可溶芯黏结剂砂,重点介绍了水溶芯黏结剂砂的原材料、配方及其成型方法,并对可溶芯黏结剂砂的应用前景作了展望。

在第5章中,重点对覆膜砂用原材料、配方及其覆膜工艺、覆膜砂制芯(型)工艺和覆膜砂及壳型(芯)典型铸造缺陷及其防止对策作了介绍;介绍了热芯盒树脂砂用原材料、射芯工艺和热芯盒法存在的主要问题及解决途径;简要介绍了具有应用前景的温芯盒法。

在第6章中,就酸硬化的呋喃树脂、酯硬化的碱性酚醛树脂和胺硬化的酚尿烷树脂三种自硬砂,分别介绍了其黏结剂系统特征、硬化工艺原理和主要工艺参数,同时对其引起的典型铸造缺陷和型(芯)砂的再生也进行了介绍。

在第7章中,重点介绍了目前广泛应用的三乙胺气体硬化的酚尿烷冷芯盒树脂砂工艺,包括该树脂砂用原材料、主要工艺过程及应用和该工艺的发展,还对酚尿烷/胺法冷芯盒芯砂及铸件的缺陷和防止措施进行了阐述;作为气硬冷芯盒砂,还介绍了二氧化硫硬化的呋喃、环氧树脂砂;最后简略介绍了几种具有开发前景的低毒、无毒的气硬冷芯盒工艺。

在第8章中,介绍了铸造涂料的发展、分类与作用;铸造涂料的主要组成及其配制、施涂和干燥;几种典型的砂型(芯)涂料的特点;涂料常规性能的检测和常见的缺陷及其防止措施等。

在本书的最后一章——第9章,先后介绍了冒口套、覆盖剂和过滤器用材料性质及组成、制作配方与应用效果。

本书是在总结作者多年来从事《铸造工艺学》和《造型材料》等课程教学和科研的实践经验的基础上,同时吸取国内同仁多年的教学改革成果而编写成的。全书介绍了造型材料的基本知识和最新应用成果,汇集了较为翔实的技术资料、数据和图表,可读性和实用性较强。

本书可作为高等院校铸造专业本科生教材;可作为材料成型及控制工程专业本科生及研究生的教材或参考书;本书还能供从事铸造技术管理及原辅材料生产、销售工作的人员等方便地查找并选取各自所需的内容,为相关行业的读者在生产、科研和教学中提供帮助与服务。

在编写过程中,受到编者所在单位华中科技大学材料科学与工程学院领导及各位同仁的支持与关心,在此表示衷心感谢。

由于编者知识面及视野有限,加之时间仓促,在学术观点及内容选取上难免有诸多不当和疏漏之处,敬请读者不吝赐教。

编 者  
于 2008 年 10 月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 砂型和砂芯的制造方法 .....           | 1  |
| 1.2 砂芯的分级与黏结剂的选用 .....         | 2  |
| 1.2.1 砂芯的分级 .....              | 2  |
| 1.2.2 砂芯黏结剂的分类 .....           | 2  |
| 1.2.3 砂芯黏结剂的选用 .....           | 4  |
| 1.3 铸型（芯）材料的分类 .....           | 4  |
| 1.4 铸型（芯）材料的特点 .....           | 5  |
| 1.5 铸型（芯）材料的发展趋势与展望 .....      | 6  |
| 第 2 章 型（芯）砂用骨干耐火材料 .....       | 9  |
| 2.1 概述 .....                   | 9  |
| 2.2 硅砂 .....                   | 10 |
| 2.2.1 硅砂的基本性质 .....            | 10 |
| 2.2.2 铸造用硅砂的来源和筛分 .....        | 12 |
| 2.2.3 铸造硅砂的性能 .....            | 13 |
| 2.2.4 铸造用硅砂的技术指标 .....         | 16 |
| 2.2.5 原砂的预处理 .....             | 18 |
| 2.3 非石英质原砂 .....               | 22 |
| 2.3.1 锆砂 .....                 | 22 |
| 2.3.2 镁砂（magnesite） .....      | 23 |
| 2.3.3 橄榄石砂（olivine sand） ..... | 24 |
| 2.3.4 铬铁矿砂 .....               | 25 |
| 2.3.5 铝-硅系耐火骨料 .....           | 26 |
| 2.3.6 碳质耐火材料 .....             | 29 |
| 第 3 章 黏土黏结剂型（芯）砂 .....         | 31 |
| 3.1 概述 .....                   | 31 |
| 3.2 黏土湿型 .....                 | 31 |
| 3.2.1 黏土湿型用原材料 .....           | 31 |
| 3.2.2 湿型砂的制备和性能控制 .....        | 41 |
| 3.2.3 湿型砂的紧实 .....             | 44 |
| 3.3 干型（芯）砂和表面烘干型砂 .....        | 46 |
| 3.4 湿型砂典型的铸造缺陷 .....           | 47 |
| 3.4.1 砂眼 .....                 | 47 |
| 3.4.2 膨胀缺陷——夹砂结疤和鼠尾 .....      | 47 |
| 3.4.3 胀砂 .....                 | 50 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第4章 水玻璃型(芯)砂及其它无机黏结剂型(芯)砂</b> | 51  |
| 4.1 概述                           | 51  |
| 4.2 水玻璃黏结剂型(芯)砂                  | 51  |
| 4.2.1 水玻璃黏结剂的物理化学性能              | 51  |
| 4.2.2 水玻璃的硬化及黏结强度                | 54  |
| 4.2.3 CO <sub>2</sub> 吹气硬化水玻璃砂   | 57  |
| 4.2.4 水玻璃自硬砂                     | 61  |
| 4.2.5 烘干法和微波硬化法水玻璃砂              | 64  |
| 4.3 磷酸盐黏结剂型(芯)砂                  | 65  |
| 4.3.1 磷酸盐黏结剂                     | 65  |
| 4.3.2 磷酸盐黏结剂型(芯)砂配方              | 66  |
| 4.3.3 磷酸盐黏结剂型(芯)砂的抗吸湿性           | 67  |
| 4.4 可溶芯黏结剂砂                      | 68  |
| 4.4.1 概述                         | 68  |
| 4.4.2 水溶芯黏结剂砂                    | 68  |
| 4.4.3 非水溶性可溶芯黏结剂砂                | 74  |
| 4.4.4 可溶芯的发展方向                   | 75  |
| <b>第5章 热硬树脂黏结剂型(芯)砂</b>          | 77  |
| 5.1 覆膜砂及壳型(芯)制造                  | 77  |
| 5.1.1 覆膜砂的应用及特点                  | 77  |
| 5.1.2 覆膜砂用原材料的选用                 | 78  |
| 5.1.3 覆膜砂配方及覆膜工艺                 | 87  |
| 5.1.4 覆膜砂的标准与分类                  | 88  |
| 5.1.5 覆膜砂制芯(型)工艺                 | 90  |
| 5.1.6 覆膜砂及壳型(芯)典型缺陷——脱壳          | 92  |
| 5.2 热(温)芯盒法树脂砂                   | 94  |
| 5.2.1 热芯盒法用树脂黏结剂                 | 94  |
| 5.2.2 热芯盒树脂硬化用催化剂                | 97  |
| 5.2.3 热芯盒法砂的配制及主要性能指标            | 97  |
| 5.2.4 热芯盒法射砂工艺                   | 98  |
| 5.2.5 热芯盒法存在的主要问题及解决途径           | 99  |
| 5.2.6 温芯盒法制芯                     | 99  |
| <b>第6章 自硬冷芯盒树脂型(芯)砂</b>          | 101 |
| 6.1 概述                           | 101 |
| 6.2 自硬呋喃树脂砂                      | 101 |
| 6.2.1 我国自硬呋喃树脂砂的应用现状             | 101 |
| 6.2.2 呋喃树脂的种类                    | 103 |
| 6.2.3 呋喃树脂的性能指标                  | 104 |
| 6.2.4 自硬呋喃树脂用催化剂(固化剂)            | 105 |
| 6.2.5 硅烷偶联剂                      | 107 |

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 6.2.6      | 自硬呋喃树脂砂的硬化 .....              | 108        |
| 6.2.7      | 自硬呋喃树脂砂的主要工艺参数 .....          | 111        |
| 6.2.8      | 自硬呋喃树脂砂铸件的主要缺陷及防止措施 .....     | 111        |
| 6.3        | 酯硬化碱性酚醛树脂砂 .....              | 114        |
| 6.3.1      | 碱性酚醛树脂黏结剂 .....               | 114        |
| 6.3.2      | 酯硬化酚醛树脂砂工艺特性 .....            | 116        |
| 6.3.3      | 酯硬化酚醛树脂砂固化机理及硬化特性 .....       | 116        |
| 6.3.4      | 酯自硬酚醛树脂砂工艺性能 .....            | 117        |
| 6.4        | 胺自硬酚脲烷树脂砂 .....               | 117        |
| 6.4.1      | 胺自硬酚脲烷树脂砂用黏结剂 .....           | 117        |
| 6.4.2      | 胺自硬酚脲烷树脂砂的特点 .....            | 119        |
| 6.4.3      | 胺自硬酚脲烷树脂砂工艺 .....             | 119        |
| 6.4.4      | 胺自硬酚脲烷树脂砂工艺的应用现状 .....        | 121        |
| 6.4.5      | 胺自硬酚脲烷树脂砂的常见缺陷 .....          | 122        |
| 6.5        | 自硬树脂砂的再生 .....                | 123        |
| 6.5.1      | 三种自硬树脂砂再生的难易程度 .....          | 123        |
| 6.5.2      | 再生砂质量控制指标及特性 .....            | 123        |
| 6.6        | 三种自硬树脂砂性能比较 .....             | 124        |
| <b>第7章</b> | <b>气硬冷芯盒法型(芯)砂 .....</b>      | <b>126</b> |
| 7.1        | 气硬冷芯盒法概述 .....                | 126        |
| 7.2        | 酚脲烷/胺法冷芯盒工艺 .....             | 126        |
| 7.2.1      | 酚脲烷/胺法冷芯盒工艺简介 .....           | 126        |
| 7.2.2      | 酚脲烷/胺法工艺用原材料 .....            | 128        |
| 7.2.3      | 混砂工艺 .....                    | 130        |
| 7.2.4      | 酚脲烷/胺法制芯工艺的应用 .....           | 130        |
| 7.2.5      | 酚脲烷/胺法冷芯盒工艺的发展 .....          | 131        |
| 7.2.6      | 酚脲烷/胺法冷芯盒芯砂及铸件的缺陷和防止措施 .....  | 131        |
| 7.3        | SO <sub>2</sub> 硬化法 .....     | 132        |
| 7.3.1      | 呋喃树脂/SO <sub>2</sub> 法 .....  | 132        |
| 7.3.2      | 自由基法 .....                    | 134        |
| 7.3.3      | 环氧树脂/SO <sub>2</sub> 法 .....  | 135        |
| 7.3.4      | 丙烯酸树脂/SO <sub>2</sub> 法 ..... | 135        |
| 7.4        | 乙缩醛硬化法(红硬法) .....             | 135        |
| 7.5        | 低毒、无毒气硬冷芯盒法 .....             | 136        |
| 7.5.1      | 酚醛酯冷芯盒法 .....                 | 137        |
| 7.5.2      | 聚丙烯酸钠/CO <sub>2</sub> 法 ..... | 137        |
| 7.5.3      | 酚醛树脂/CO <sub>2</sub> 法 .....  | 138        |
| 7.5.4      | 压缩空气法 .....                   | 139        |
| <b>第8章</b> | <b>铸造涂料 .....</b>             | <b>141</b> |
| 8.1        | 概述 .....                      | 141        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 8.2 铸造涂料的分类与作用 .....                 | 141 |
| 8.2.1 铸造涂料的分类 .....                  | 141 |
| 8.2.2 铸造涂料的功能和作用 .....               | 142 |
| 8.3 铸造涂料的主要组成 .....                  | 142 |
| 8.3.1 耐火粉料 .....                     | 143 |
| 8.3.2 载体 .....                       | 143 |
| 8.3.3 悬浮剂 .....                      | 146 |
| 8.3.4 黏结剂 .....                      | 148 |
| 8.4 涂料的配制、施涂和干燥 .....                | 149 |
| 8.4.1 涂料的配制 .....                    | 149 |
| 8.4.2 涂料的施涂 .....                    | 150 |
| 8.4.3 涂料的干燥 .....                    | 156 |
| 8.5 几种典型的砂型(芯)涂料 .....               | 157 |
| 8.5.1 树脂砂型(芯)涂料 .....                | 157 |
| 8.5.2 湿型用涂料 .....                    | 159 |
| 8.5.3 水玻璃砂型(芯)用涂料 .....              | 160 |
| 8.6 涂料常规性能的检测 .....                  | 160 |
| 8.6.1 涂料工艺性能的测定 .....                | 161 |
| 8.6.2 涂料烘干态性能的测定 .....               | 163 |
| 8.6.3 涂料高温性能的检测 .....                | 164 |
| <b>第9章 工艺过程材料</b> .....              | 166 |
| 9.1 冒口套 .....                        | 166 |
| 9.1.1 冒口的作用 .....                    | 166 |
| 9.1.2 冒口套用材料组成 .....                 | 167 |
| 9.1.3 冒口套用保温材料 .....                 | 168 |
| 9.1.4 保温冒口套的制作与应用 .....              | 171 |
| 9.1.5 发热冒口 .....                     | 177 |
| 9.2 覆盖剂及其应用 .....                    | 179 |
| 9.2.1 概述 .....                       | 179 |
| 9.2.2 HM-1 型冒口覆盖剂 .....              | 180 |
| 9.2.3 XF 型和 MF 型冒口覆盖剂 .....          | 181 |
| 9.2.4 复合型冒口覆盖剂 .....                 | 182 |
| 9.3 液态铸造合金用过滤器及浇注系统 .....            | 182 |
| 9.3.1 液态铸造合金用过滤器及其性能特点 .....         | 182 |
| 9.3.2 耐火纤维编织过滤网 .....                | 184 |
| 9.3.3 直孔芯型陶瓷过滤器 .....                | 185 |
| 9.3.4 泡沫陶瓷过滤器 .....                  | 185 |
| 9.3.5 过滤器在浇注系统中的位置及放置处浇道截面积的确定 ..... | 188 |
| 9.3.6 泡沫陶瓷过滤器的应用 .....               | 190 |
| <b>参考文献</b> .....                    | 192 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 砂型和砂芯的制造方法

将原砂或再生砂 + 黏结剂 + 其它附加物所混制成的混合物称为型砂或芯砂。在造型（芯）过程中，型（芯）砂在外力作用下成型并达到一定的紧实度或密度，形成砂型（芯）。它是一种具有一定强度的微孔——多孔隙体系，或者叫毛细管多孔隙体系。原砂是骨干材料，占型砂总质量的 82%~99%；黏结剂起黏结砂粒的作用，以黏结薄膜形成包覆砂粒，使型砂具有必要的强度和韧性；附加物是为了改善型（芯）砂所需要的性能，或为了抑制型砂不希望有的性能而加入的物质。

原砂作为型（芯）砂的主要骨干材料，一方面，它为砂型（芯）提供了必要的耐高温性能和热物理性能，有助于高温金属液顺利充型，以及使金属液在铸造型中冷却、凝固并得到所要求形状和性能的铸件；另一方面，原砂砂粒能为砂型（芯）提供众多孔隙，保证型、芯具有一定透气性，在浇注过程中，使金属在型腔内受热急剧膨胀形成的气体和铸型本身产生的大量气体能顺利逸出。但孔隙大小要适当，过大，将恶化铸件的表面质量，不仅增大表面粗糙度值，降低铸件尺寸精度，甚至引起铸件严重粘砂。

用型砂、芯砂造型、造芯，根据砂型、砂芯本身建立强度过程中其粘（固）结机理的不同，通常可分三种类型的方法（见图 1-1），即机械黏结造型（芯）；化学黏结造型（芯）和物理固结造型（芯）。

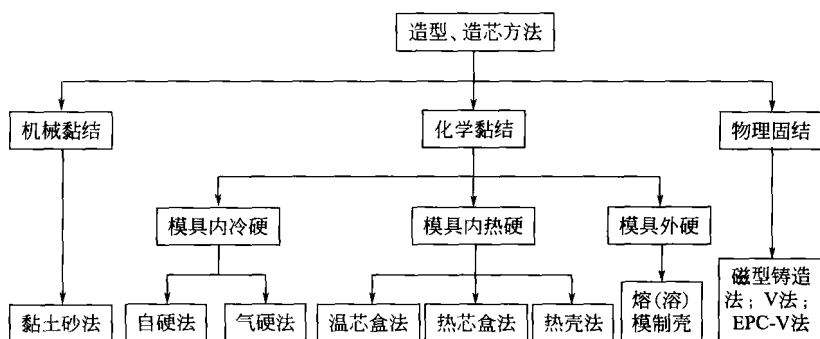


图 1-1 砂型和砂芯的制造方法

机械黏结是指以黏土作为黏结剂的黏土型（芯）砂产生的黏结。由于自然界中黏土资源丰富，价格低廉（开采后只需稍作加工即可供生产使用），砂型制造工艺简单，旧砂回用处理容易等，因此广泛用来配制型（芯）砂制造砂型（芯）。

化学黏结是指型砂、芯砂在造型、造芯过程中，依靠其黏结剂本身发生物理-化学反应达到硬化，从而建立强度，使砂粒牢固地粘接成为一个整体。其中所用黏结剂可分为无机黏结剂和有机黏结剂，对于前者，有钠水玻璃、水泥、磷酸盐等黏结剂；而后者有热硬、自硬和气硬树脂砂黏结剂等。

所谓物理固结，是指用物理学原理产生的力将不含黏结剂的原砂固结在一起的方法。例如磁型铸造法（magnetic molding process），负压造型或真空密封造型法（vacuum sealed molding process）或薄膜负压造型（简称 V 法）以及消失模法（evaporative pattern casting，简称 EPC-V 法）等。磁型铸造法、负压造型法和消失模铸造法属于特种铸造方法，将是特种铸造一书所应介绍的内容。

## 1.2 砂芯的分级与黏结剂的选用

### 1.2.1 砂芯的分级

砂芯主要用来形成铸件的内腔、孔洞和凹坑等部分（见图 1-2），在浇注时，它的大部分或部分表面被液态金属包围，受金属液的热作用和机械作用强烈，排气条件差，出砂及清理困难，因此对芯砂的性能要求一般比型砂高。为了便于合理地选用砂芯用芯砂的黏结剂和有利于芯砂的管理，根据砂芯形状特征及在浇注期间的工作条件和产品质量的要求，生产上常将砂芯分为 5 级（见表 1-1）。

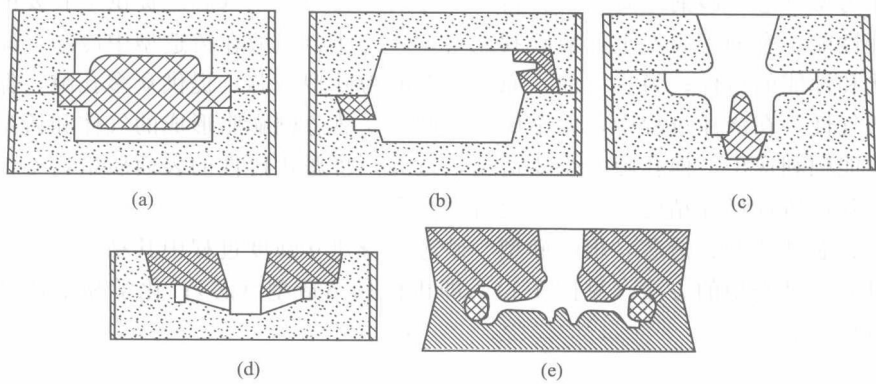


图 1-2 砂芯的作用

(a) 内腔；(b) 凸台；(c) 孔洞；(d) 盖芯；(e) 组芯造型

各级砂芯所需的湿强度大都取决于砂芯特点和造芯工艺。如果砂芯在芯盒内硬化成型，则要求芯砂湿强度宜低，以保证有好的流动性和减轻造芯劳动强度。如果脱模后硬化，则Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级砂芯要求有高的湿强度。对于Ⅰ、Ⅱ级砂芯，尤其是Ⅰ级砂芯，为使砂芯流动性好、发气性低，湿强度可低一些。

### 1.2.2 砂芯黏结剂的分类

各级砂芯的要求不同，而目前铸造生产上可应用的黏结剂和造芯工艺名目繁多，新的黏结剂和新的造芯工艺不断涌现。为了便于合理选用黏结剂和造芯工艺，也为了便于开发新的黏结剂，有必要对黏结剂加以分类。黏结剂的分类方式很多，对于铸造用黏结剂来说，最好结合砂芯本身需要来分类，这样才有利于黏结剂的选用和改进。现介绍两种。

① 比强度（或称单位强度）是指每 1%（质量分数）的黏结剂可获得的芯砂干拉强度。我国目前采用的比强度是含有溶剂的黏结剂的比干拉强度。该分类法还指明了化学属性（有机、无机）；黏结剂是否易吸湿，即基团、结构是亲水的还是憎水的。知道黏结剂比强度，就有利于按砂芯级别挑选黏结剂。

表 1-1 砂芯的级别及其特征

| 级别    | 特 征                                                                                                                         | 典 型 砂 芯              |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| I 级   | 砂芯剖面细薄、形状复杂、芯头窄小,大部分表面被金属包围,在铸件内形成不加工的表面质量好、光洁的内腔。此级砂芯应具有很高的干强度、好的断裂韧性和高温强度,好的透气性、出砂性、防粘砂性和低的发气性                            | 缸盖水套砂芯,液压件多路阀体砂芯     |
| II 级  | 砂芯大部分表面被液体金属包围,形状较复杂,有局部薄断面,芯头比 I 级砂芯的大,在铸件中构成表面质量好、光洁、部分或完全不加工的内腔。此级砂芯也应具备高的干强度、高温强度、耐火度、防粘砂性、透气性、出砂性以及低的发气性               | 排气管、暖气片、潜液油泵叶轮,阀体的砂芯 |
| III 级 | 形状中等复杂,没有很薄的部分,但局部有凸缘、棱角、肋片、在铸件中构成重要的不加工表面的各种体积较大的砂芯。另外受到冲刷的砂芯,大铸件靠近浇道的砂芯以及复杂的外廓砂芯也属于此级。所有这些砂芯应具有较好的干强度、透气性、出砂性、容让性和较高的表面强度 | 车床溜板箱砂芯、缸体的缸筒砂芯      |
| IV 级  | 外形不复杂,在铸件中构成还需机械加工的内腔,或形成虽不加工但对粗糙度要求不很严格的表面的砂芯。另外具有一般复杂程度和中等复杂程度的外廓砂芯也属于此级。这些砂芯在表面强度足够的条件下,应具有适度的干强度、良好的容让性                 | 离合器外壳,车床主轴箱体的砂芯      |
| V 级   | 在大铸件中构成很大内腔的简单大砂芯。这些砂芯在浇注过程中只能热透很少一层,因此,砂芯中如加有有机黏结剂,就不能完全燃烧和分解,而使出砂性很差,此类砂芯应有很高的容让性                                         | 机床床腿砂芯               |

② 按黏结剂用于造芯时的硬化工艺、硬化温度分类,可分为模具内冷、热硬及模具外热硬,而这些又可派生出诸多方法,如表 1-2 所示。

表 1-2 化学黏结的制型、制芯方法

| 模 具 内 冷 硬 |      |                                 |        |      |            | 模 具 内 热 硬           |                                        | 模 具 外 热 硬   |              |
|-----------|------|---------------------------------|--------|------|------------|---------------------|----------------------------------------|-------------|--------------|
| 吹气冷芯盒法    |      |                                 | 自硬冷芯盒法 |      |            | 热活化法                |                                        | 炉内烘干        |              |
| 硬化温度      | 硬化时间 | 方法名称                            | 硬化温度   | 硬化时间 | 方法名称       | 硬化温度                | 方法名称                                   | 硬化温度        | 方法名称         |
| 室温        | 秒计   | 酚醛-脲烷-胺法(Isacure)、              | 室温     | 以分钟计 | 呋喃-酸、      | 约 100℃<br>(属温芯盒法体系) | 改进型酚醛-脲烷-胺法                            | 800~900℃ 焙烧 | 水溶芯(氢氧化钡)    |
|           |      | 呋喃-SO <sub>2</sub> 法(Hardox)、   |        |      | 酚醛-酸、      |                     | 聚丙烯酸系/促进剂(Arbond)                      | 300~360℃    | 黏土砂          |
|           |      | 环氧-SO <sub>2</sub> 法(Rutapox)、  |        |      | 油脲烷、       | 150~175℃            | 呋喃-酸-真空处理(IQU)                         | 200~220℃    | 干性油砂制芯、合脂砂制芯 |
|           |      | 丙烯酸脲烷-SO <sub>2</sub> 法(FRC 法)、 |        |      | 酚醛脲烷、      |                     | 温芯盒法(呋喃磺酸的金属盐)                         | 160~180℃    | 纸浆砂          |
|           |      | 酚醛-SO <sub>2</sub> 法、           |        |      | 多元醇脲烷、     | 200~250℃            | 热芯盒法:<br>呋喃-酸性盐<br>酚醛-酸性盐<br>酚醛-脲烷-酸性盐 |             |              |
|           |      | 酚醛-酯法、                          |        |      | 钠水玻璃-酯、    | 250~300℃            | 热壳法                                    |             |              |
| 室温        | 秒计   | 红硬法、                            | 室温     | 以分钟计 | 磷酸盐-碱性氧化物、 | 450℃                | 热冲击法                                   |             |              |
|           |      | 水溶性树脂-粉状硬化剂-CO <sub>2</sub> 法、  |        |      | 快硬水泥砂法     |                     |                                        |             |              |
|           |      | 酚醛-CO <sub>2</sub> 法、           |        |      |            |                     |                                        |             |              |
|           |      | 冷壳法、                            |        |      |            |                     |                                        |             |              |
|           |      | 钠水玻璃-CO <sub>2</sub> 法          |        |      |            |                     |                                        |             |              |

### 1.2.3 砂芯黏结剂的选用

#### 1.2.3.1 根据砂芯特点

I、II级砂芯选用如表 1-1 所示的具有高比强度的黏结剂，砂中加入较少量的黏结剂就可以使砂芯具有高的干强度，这样，也使芯砂发气量少，有利于保证铸件质量。III级砂芯可选用比强度稍低的黏结剂。IV、V级砂芯选用黏土、水玻璃等作黏结剂也可满足强度要求。

#### 1.2.3.2 根据生产条件

在大批量生产条件下，为提高造芯效率，且要求砂芯具有高的尺寸精度，I、II级甚至III级砂芯采用壳芯法、热芯盒法、温芯盒法和冷芯盒法生产砂芯，除个别I级砂芯外，黏结剂常采用呋喃、酚醛树脂和酚醛-酚脲烷树脂。

在小批量生产条件下，采用自硬呋喃、酚醛、酚脲烷树脂或者采用烘干法硬化的植物油、合脂及渣油作I、II、III级砂芯的黏结剂。

为提高铸件表面质量，有时IV、V级砂芯也采用自硬法用树脂黏结剂，如机床和工程机械等铸件。

#### 1.2.3.3 根据材料的来源和成本

因地制宜，并注意降低成本。选择合理的芯砂成分和使黏结剂得到最有效的利用，对降低铸件成本和保证铸件的质量有重要的意义。但许多工厂的砂芯黏结剂的利用率极低，黏结剂实际所产生的强度为正确使用时所能得到强度的 $1/2 \sim 2/3$ 。黏结剂消耗过多的原因，是不必要地追求高强度，以致增加黏结剂加入量；为获得高的表面强度，而使用高级黏结剂；芯砂所用的原砂中常含有大量黏土而白白消耗掉一部分黏结剂；使用黏结剂而不考虑其使用范围等。

#### 1.2.3.4 根据造芯工艺技术的发展方向及国家环保政策

即要全面考虑环境保护、能源、效益及一次性投资等。应指出的是，发展无污染黏结剂，开发壳法及无毒、无害和低毒气体硬化造芯是今后造芯技术发展的主流。

## 1.3 铸型（芯）材料的分类

型砂铸造与其它铸造方法相比，其优点是：不受零件形状、大小、复杂程度及合金种类的限制；造型材料来源广，生产准备周期短，成本低。虽然铸型只能使用一次，有时生产率稍低，但砂型铸造仍是铸造生产中应用最广泛的一种方法，世界各国用砂型铸造生产的铸件占总产量的 $80\% \sim 90\%$ 。

为此，本书所指铸型（芯）材料，主要是指在用型砂或芯砂造型、制芯及合箱浇注过程中，所使用的一切非金属、消耗性、不直接参与铸件形成冶金过程的材料。铸型（芯）材料是铸造生产中造型制芯用的原辅材料，是造型制芯工艺的基础，由于它们的发展往往带来铸造工艺的变革，也就是说铸造工艺的发展与造型材料密切相关。

从造型材料的分类来看，从总体上可分为无机矿物和有机化学品两大类，按照使用情况可分为如表 1-3 的 5 类。

本书所涉及的造型材料，主要介绍型（芯）砂骨干材料-原砂、湿型（芯）砂、模具内热硬和冷硬的水玻璃型（芯）砂和各种人工合成树脂砂；同时介绍与砂型（芯）配套的起提高铸件表面质量的铸型（芯）涂料以及包括冒口套、过滤器和覆盖剂等工艺过程材料等。

表 1-3 造型材料的类别及作用

| 项目 | 类 别    | 作 用                                                                                                        |
|----|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 原砂     | 原砂是砂型铸造和其它铸造工艺的基本骨料,包括硅砂及其它非石英砂,如锆砂、铬铁矿砂、镁砂、刚玉砂、铝矾土砂以及橄榄石砂等                                                |
| 2  | 黏结材料   | 将原砂(再生砂)或耐火粉料黏结起来,使之成为型、芯[包括砂型、芯,熔(溶)模型、芯及消失模型、芯等]的有机和无机材料,如各种人工合成树脂(包括相应的固化剂)和膨润土,还有油类黏结剂、水玻璃、水泥、硅溶胶和磷酸盐等 |
| 3  | 添加材料   | 改善型(芯)砂的某些性能而在型(芯)砂中添加的一些特殊材料,如煤粉、淀粉、防毛刺添加剂、增强剂、溃散剂和促硬剂等                                                   |
| 4  | 辅助材料   | 为更好地造型、制芯,以解决造型制芯及浇注过程中出现的某些质量问题而配套使用的辅助材料,如涂料、脱模剂、修补膏、封箱条(膏)、黏合胶、通气绳、泡沫塑料和密封垫等                            |
| 5  | 工艺过程材料 | 为提高浇注及凝固过程中的铸件质量,并解决有关的铸造缺陷而添加的材料,主要有保温冒口套、发热保温冒口套、保温补贴、各种过滤网、覆盖剂和陶瓷管等                                     |

1.4 铸型（芯）材料的特点

(1) 涉及学科多 铸型（芯）材料的开发、生产和应用涉及硅酸盐、矿物学、陶瓷、无机化学、高分子材料、有机合成、精细化工和铸造工艺等诸多学科，远远超出了铸造专业的研究范围，是多学科结合的产物。从事研究开发及应用的相关人员必须有较宽的知识面和合理的专业结构。

(2) 品种及规格繁多 铸型（芯）材料的品种及规格成百上千，给生产、应用、管理和质量控制带来了诸多问题，从而对其提出了更高的要求。

(3) 材料消耗量大 在砂型铸造中，每生产 1t 铸件可能会消耗数公斤至数十公斤黏结剂，消耗上百公斤乃至 1t 以上的原砂以及其它辅料。

(4) 对铸件质量影响大 大多数铸造缺陷（据统计约 70％）都与铸型（芯）材料的质量和选用有关。由于品种规格多，消耗量大，涉及学科多，也给质量管理带来了不便。除造型材料的质量、使用方法或者选用不当会影响到铸件质量和成品率外，有些造型材料的开发本身就是为了解决某些铸造缺陷和提高铸件质量。

(5) 引起的环境问题多 大多数铸型（芯）材料都含有一些有毒的化学物质，它们在使用中有的挥发和分解出有毒有害气体，有的产生有害的粉尘，有的产生大量的废弃物，这些都给人体和环境带来了危害和污染，是对铸造业竞争力的严峻考验，必须引起铸造领域从业人员的高度重视。

(6) 与工艺和装备的联系密切 不同的工艺与装备都对铸型（芯）材料提出了不同的要求，都须有与之相适应的铸型（芯）材料，它们是互相结合发展的，同时有些工艺和装备的不足，可以通过改进铸型（芯）材料的性能来弥补，反之亦然。因此，铸型（芯）材料如何与工艺和设备结合，提高成型速度（固化速度），简化操作，方便使用，将会对铸造生产的效率产生重大影响。

(7) 许多技术规范难以统一 由于铸型（芯）材料涉及铸造以外的多种学科，生产厂家和品种多，产品的特色性能强，涉及技术保密和技术交流的限制，同时铸造工厂以及不同的工艺对其要求和习惯各不相同，导致了許多技术规范难以统一，给行业技术管理造成了一定

困难。

(8) 铸件尺寸精度 铸型（芯）材料直接受高温金属熔体的多种作用，它们自身的物理化学变化和与金属熔体的多种反应，将会影响到铸件的尺寸精度，必须根据铸件大小和复杂程度、材质、工艺等来选择合适的造型材料。

(9) 生产成本 铸型（芯）材料均为消耗性的材料，它们对铸造质量和成品率、生产效率又有较大影响，因此选择高质量、合适的铸型（芯）材料，对降低铸件的生产成本意义重大。

(10) 劳动条件和环境 造型车间、制芯车间、清理车间及浇注车间的操作者，都会接触到铸型（芯）材料产生的有害粉尘、气体及各种分解物，铸造工厂大量废弃物的一部分也都是由铸型（芯）材料转化来的，由此导致的环境问题直接关系到铸造业的生存，治理这些环境问题必须要有一定的投入，铸型（芯）材料的开发应该向毒性小、消耗低和易再生的方向发展。

1.5 铸型（芯）材料的发展趋势与展望

目前国内外砂型铸造工艺主要发展为以下三大工艺，即以汽车行业为代表的机械化、高密度黏土砂湿型铸造工艺配合各类树脂砂造芯；适合各种合金单件小批量或大批量生产的以呋喃树脂为代表的自硬砂工艺；适合铸钢生产的树脂砂和水玻璃砂工艺，以及与之相配套的铸造涂料。

随着铸件市场的全球化，竞争更加激烈，对铸件的优质精化将提出了更高的要求，需要更广泛地采用各种近无余量的精确成型新工艺，因此必须建立与之相适应的造型材料体系。为适应“绿色铸造”的要求，铸型（芯）材料的产品从生产、使用到回收及废弃物处理的每一个环节，都应符合环境保护要求，对环境无害，并且最大限度地利用天然资源和节约能源，以实现“既满足当代人需要，又不对子孙后代满足其需求能力构成危害”的可持续发展。

铸型（芯）材料的应用展望及研究开发的重点如表 1-4 所示。

表 1-4 铸型（芯）材料发展趋势与展望

| 项 目     | 应用展望                                                       | 研究开发的重点                                                                                                                                                                                                    |
|---------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 原砂及耐火骨料 | 原砂及耐火骨料是砂型铸造和其它铸造工艺的基本材料，硅砂是用量最大、最广泛的原砂，其它还有锆砂、铬铁矿砂以及橄榄石砂等 | 1)开发二氧化硅含量高、粒形好，储量大，开采方便、地理位置分布合理(中西部)的硅砂新矿点；2)采用现代化的擦磨、脱泥、酸洗、分级和干燥加工处理工艺和装备，改善硅砂的粒形，除去表面杂质，降低含泥量，调整酸值；3)根据不同要求，使成品砂的粒度分布可以任意控制且分布合理，推广大包装烘干砂；4)推广陶粒砂、相变砂等特种砂；5)开发各种型(芯)砂的再生处理工艺，扩大热法再生，提高再生利用率，减少旧砂对环境的污染 |
| 高密度湿型砂  | 在如汽车、内燃机缸体、缸盖、箱体类等中、小铸件大批量流水线生产中，将广泛采用射压、气冲、高压和静压造型等高密度湿型砂 | 1)采用先进的勘探和采矿方法，以及采用现代化的混合、活化、干燥、制粉工艺和装备，稳定膨润土的质量；2)在严格选用蒙脱石含量高的膨润土原矿的基础上，对膨润土进行改性处理，如进行有机物-膨润土复合改性，使其分散性、黏结性得到更大限度的发挥；3)开发无毒、无味、无腐蚀、颜色浅、含光亮碳高、含硫和灰分低的煤粉代用材料                                                |

续表

| 项 目         | 应用展望                                                                           | 研究开发的重点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 树脂自硬砂       | 在机床、造船、通用机械和重型机械等中、大型单件小批量铸件的生产中广泛采用,还将继续扩大应用范围                                | 1)进一步提高树脂砂的综合性能指标,如使树脂加入量降至1.0%以内,铁砂比控制在1:2~1:3,废品率降至2%以下;2)充分发挥多种自硬树脂砂的优势和特点,形成酸硬化呋喃、酯硬化碱性酚醛和胺硬化酚脲烷等多种自硬砂竞相发展的局面;3)开发出少污染和无污染的新的树脂品种,使铸造过程挥发的苯、甲苯等有毒气体大幅度下降,甚至完全消除;4)树脂的性能将向加快固化速率、降低黏度、增加抗吸湿性、提高常温强度和高温强韧性的方向发展,树脂砂的品种将会更加多样化、系列化,以适应于不同原砂、不同环境条件、不同合金材质、不同形状铸件的特殊要求;5)为满足铸件“轻量化”的需求,开发专门用于铝、镁合金的分解温度低、易溃散的树脂                                                                                                |
| 有机酯水玻璃砂     | 在铸钢件生产中,特别是在大件和特大件铸钢件的生产中,有较好的应用前景                                             | 进一步解决水玻璃砂的旧砂回用问题,提高再生脱膜率和回收率                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 壳型(芯)覆膜砂    | 在今后相当长的一段时期内仍会保持较大的市场规模                                                        | 1)开发取代硅砂和锆砂的覆膜砂用原砂、多品种的覆膜砂用树脂以及各种添加剂,制成具有特殊性能的系列壳型(芯)覆膜砂,以适应不同覆膜砂性能的要求;2)开发新型无氮且固化速率快的固化剂;3)研究壳法覆膜砂与铸(钢)件表面缺陷的生成机理及防止措施;4)为提高铸件的尺寸精度,开展高渗透性薄层涂料或无涂料化工艺的研究;5)开展覆膜砂预热工艺及设备的开发与研究                                                                                                                                                                                                                                 |
| 三乙胺及其它冷芯盒工艺 | 从节约能源、改善工作条件和提高砂芯精度出发,冷芯盒法工艺的应用会呈快速上升的趋势,它将逐渐取代热法,特别是取代热芯盒法                    | 1)为减少对环境的污染,开发和改进树脂品种,改进吹气工艺和尾气净化装置,使三乙胺的排放量控制在工业卫生排放标准范围内;2)进一步提高树脂砂的抗吸湿性;3)大力发展碱酚醛树脂砂、甲酸甲酯固化酚醛树脂砂等各类新的低毒、无毒冷芯盒气硬制芯工艺                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 铸造涂料        | 铸造涂料的发展应顺应近净形(near net shape)和绿色集约化铸造技术的总发展趋势,在铸件精化、提高铸件品质、节约资源、保护环境等方面充分发挥其作用 | 1)开发新型及复合耐火骨料,以提高涂料的抗粘砂性能,拓宽纳米材料和超细分材料在涂料中的应用等;2)不用载液、少用载液或主要用水作为载液,尽量不用苯、二甲苯、酒精、甲醇等有害人体健康的挥发性溶剂,以解决醇基涂料的污染和成本的问题;3)采用自干、快干和微波干燥方法,以提高水基涂料的干燥效率和表面质量;4)发展粒状或粉状铸型涂料,以解决醇基涂料运输周期长、费用高、不安全,而且由于醇基涂料的悬浮稳定性较差,涂料在长途运输和存放过程中易产生板结(死沉淀)现象;5)研究铸铁件用的白色或浅色涂料,加快涂料绿色化生产,以适应环境保护的要求;6)推广树脂砂流水线上高效优质的流涂涂料,建立与近无余量精确成型技术相适应的新型系列涂料及其施工工艺;7)使涂料由单一的防粘砂作用向多功能化发展,进一步开发表面合金化涂料、控制凝固速度的涂料、能阻隔铸型(芯)中有害气体侵入铸件的烧结型屏蔽涂料,建立完善的涂料商品系列 |

续表

| 项 目            | 应用展望                                                                 | 研究开发的重点                                                                                                                                             |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 型砂性能测试仪器和砂处理设备 | 对于保证型砂、砂芯质量以及制定造型材料标准至关重要                                            | 1)提高砂处理设备的效率和可靠性,使之柔性化、智能化和网络化;2)开发新一代的型砂性能检测仪器,运用计算机、自动化技术的最新成果,实现砂处理系统的在线检测和型砂质量的智能化控制                                                            |
| 过滤器            | 近 20 年来,过滤器及其在液态铸造合金过滤领域的应用已得到了长足的发展。仅就泡沫陶瓷过滤器而言,国内铸造行业的潜在年需求量约 1 亿片 | 1)采用先进的自动化大批量生产的泡沫陶瓷、蜂窝陶瓷和直孔陶瓷过滤器的工艺和装备,使产品的质量稳定可靠,实现规模化生产;2)改进三种陶瓷过滤器的高温性能,提高直孔陶瓷过滤器的孔隙率;3)加强各种过滤器的应用研究,为推广提供软件支持;4)过滤器与冒口套相结合,减少浇注系统,提高工艺出品率和清理效率 |
| 冒口套            |                                                                      | 1)开发大批量高精度发热和保温冒口套的生产工艺和装备;2)推广发热保温冒口套;3)推广冒口套与易割片的使用工艺;4)开发低毒、少污染新型发热和保温冒口套                                                                        |

思考题及习题

- 1. 造型材料可分为哪几类? 各自的主要作用是什么?
- 2. 铸型(芯)材料的一些主要特点是什么? 在铸型(芯)材料的开发及应用方面应注意哪些? 指出铸型(芯)材料的发展方向。

# 第 2 章 型（芯）砂用骨干耐火材料

## 2.1 概述

耐火原（材）料的种类繁多，分类方法也多种多样。按原料的生成方式可分为天然原料与人工合成原料两大类，天然矿物原料仍然是耐火原料的主体。自然界中存在的各种矿物是由构成这些矿物的各种元素所组成的。现在已探明氧、硅、铝三种元素的总量约占地壳中元素总量的 90%，氧化物、硅酸盐和铝硅酸盐矿物占明显优势，是蕴藏量十分巨大的天然耐火原料。天然耐火原料的主要品种有：硅石、石英、硅藻土、蜡石、黏土、铝矾土、蓝晶石族矿物原料、菱镁矿、白云石、石灰石、镁橄榄石、蛇纹石、滑石、绿泥石、锆英石、珍珠岩、铬铁矿和天然石墨等。天然原料通常含杂质较多，成分不稳定，性能波动较大，只有少数原料可直接使用，大部分都要经过提纯、分级或煅烧加工后才能满足耐火材料的生产要求。

按耐火原料的化学组分，可分为氧化物原料与非氧化物原料。按化学特性，耐火原料又可分为酸性耐火原料，如硅石、锆英石等；中性耐火原料，如刚玉、铝矾土（偏酸性）、莫来石（偏酸性）、铬铁矿（偏碱性）、石墨等；碱性耐火原料，如镁砂、白云石砂、镁钙砂等。

习惯上，人们通常按耐火原料的化学矿物组成、开采或加工方法、特性以及在耐火材料中的作用进行综合分类。

耐火原料是铸造及冶金行业应用最为广泛的非金属材料。在铸造生产的造型制芯及铸型涂料的配制中，使用的耐火原料通常是以粒状（称为砂）或粉状形式出现的。在铸造上，通常将新砂添加于型（芯）砂中，称为原砂，而经造型制芯并与金属液接触过的砂子往往称为旧砂或再生砂。

作为原砂，其中用量最大的是以石英为主要矿物成分的天然硅砂。这是因为天然硅砂资源丰富，分布极广，易于开采，价格低廉，能满足铸造大多数情况的要求。

表 2-1 列出了铸造生产中使用的耐火材料的物理化学性能。

表 2-1 铸造用耐火材料的物理化学性能

| 原砂<br>类别 | 密度<br>/g·cm <sup>-3</sup> | 莫氏<br>硬度/级 | 耐火度<br>/℃                   | 热导率      |                              | 线胀系数     |                          | 高温稳定性     |   |    |         |         |
|----------|---------------------------|------------|-----------------------------|----------|------------------------------|----------|--------------------------|-----------|---|----|---------|---------|
|          |                           |            |                             | 温度<br>/℃ | 热导率<br>/W(m·K) <sup>-1</sup> | 温度<br>/℃ | 线胀系数<br>/K <sup>-1</sup> | 还原性<br>气氛 | 碳 | 金属 | 酸性<br>渣 | 碱性<br>渣 |
| 硅砂       | 2.65                      | 7          | 1713                        | 1200     | 1.59                         | 20~580   | $0.8 \times 10^{-5}$     | 劣         | 劣 | 劣  | 良       | 劣       |
|          |                           |            |                             |          |                              | 20~1000  | $1.6 \times 10^{-5}$     |           |   |    |         |         |
|          |                           |            |                             |          |                              | 20~1480  | $4.55 \times 10^{-5}$    |           |   |    |         |         |
| 石灰石砂     | 约 2.8                     | 3          | 约 2300<br>(700~900<br>开始分解) | 1200     | 7.117                        | 20~1200  | $1.36 \times 10^{-5}$    | 劣         | 劣 | 可  | 劣       | 可       |