

高等学校教材

铸造工艺学

华中理工大学 曹文龙 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

目 录

绪论	1
第一篇 金属-铸型的界面作用	
引言	3
第一章 砂型的特点及其工作条件	5
§ 1-1-1 砂型的特点,毛细管体系	5
§ 1-1-2 砂型的工作条件	8
第二章 金属与铸型的物理作用	10
§ 1-2-1 传热与传质现象	10
一、传热与铸型的热物理性能	10
二、砂型的受热过程	11
三、传质现象和砂型表层的水分迁移	15
四、砂型受热时的膨胀	19
§ 1-2-2 膨胀缺陷,夹砂结疤、鼠尾、毛翅	22
一、夹砂结疤、鼠尾	22
二、毛翅	27
§ 1-2-3 液体金属对砂型表面的冲刷作用及砂眼形成机理	29
一、液体金属对砂型表面的冲刷作用	29
二、砂眼形成机理	29
§ 1-2-4 型壁移动	29
§ 1-2-5 气体和侵入性气孔	31
一、铸型中的气体	31
二、侵入性气孔	32
第三章 金属与铸型的化学和物理化学作用	36
§ 1-3-1 金属及铸型界面产生的气体的化学反应及反应性气孔形成机理	36
一、金属-铸型界面产生气体的化学反应	36
二、反应性气孔形成机理	37
§ 1-3-2 粘砂现象	40
一、机械粘砂(渗透粘砂)	40
二、化学粘砂	44
§ 1-3-3 铸渗现象	48
一、铸件得到表面合金化层的	

几种方法	49
二、铸件表面合金化工艺简介	50
三、表面合金化层的形成机理	52
第一篇 思考题	52
第一篇 参考文献	52
第二篇 铸型的制造	
引言	54
第一章 湿型	55
§ 2-1-1 湿型铸造特点	55
§ 2-1-2 湿型砂	55
一、湿型砂性能要求及检测原理	56
二、湿型砂用原材料	62
三、湿型砂制备及质量控制	96
§ 2-1-3 湿型砂质量的控制	112
一、砂型的紧实度	112
二、铸件表面粗糙度	113
三、铸件尺寸精度	116
习题	117
第二章 无机化学粘结剂砂型(芯)	118
§ 2-2-1 钠水玻璃及钠水玻璃砂的硬化机理	118
一、钠水玻璃及其质量要求	118
二、钠水玻璃砂的硬化机理	121
§ 2-2-2 CO ₂ -钠水玻璃砂及砂型(芯)的制造工艺	124
一、芯(型)砂及芯盒(模样)	124
二、制芯(型)及吹CO ₂ 硬化	125
§ 2-2-3 自硬钠水玻璃砂	128
一、粉状硬化剂的自硬砂	128
二、液态有机酯硬化剂自硬砂	129
§ 2-2-4 钠水玻璃砂存在的问题及其解决途径	130
一、出砂性差	130
二、铸铁件粘砂	131
三、型、芯表面粉化(白霜)	133
四、砂芯抗吸湿性差	133
五、其它	134

§ 2-2-5 钠水玻璃-石灰石砂	135	二、优质涂料应具有的性能和获得条件	184
§ 2-2-6 水泥及水泥砂芯(型)	136	三、涂料的基本组成	189
一、硅酸盐水泥砂	136	四、涂料的配制	193
二、矾土水泥自硬砂	137	五、涂料的使用方法	195
三、双快水泥自硬砂	137	六、涂料的新进展	196
§ 2-2-7 磷酸盐及磷酸盐粘结剂砂芯	138	§ 2-4-2 胶合剂及修补材料	197
一、铁、镍磷酸盐粘结剂砂	138	一、胶合剂	197
二、铝磷酸盐粘结剂砂	140	二、修补材料	198
习题、思考题	141	习题、思考题	199
第三章 有机化学粘结剂砂芯(型)	142	第二篇 参考文献	199
§ 2-3-1 概述	142	第三篇 铸型工艺方案	
一、砂芯的分级	142	第一章 铸型工艺方案的问题	204
二、砂芯粘结剂的分类	144	§ 3-1-1 产品结构及技术条件的审查	204
三、制芯方法的类别及其发展	145	一、铸件壁的合理结构	204
§ 2-3-2 油砂和合脂砂	146	二、能简化工艺的铸件结构	207
一、油砂	146	三、加工定位基准和某些技术条件的合理性	209
二、合脂粘结剂及合脂砂	148	§ 3-1-2 浇注位置的确定	210
三、渣油砂及其它憎水有机粘结剂砂	150	§ 3-1-3 铸件分型面的选择	213
§ 2-3-3 壳芯(型)	151	§ 3-1-4 确定砂芯形状(分块)的基本规则	217
一、壳型(芯)的制造	151	第二章 浇注系统	221
二、壳法覆膜砂用原材料及混制工艺	153	§ 3-2-1 浇注系统在铸型充填系统中的地位	221
三、脱模剂(分型剂)	156	§ 3-2-2 浇注系统对铸件质量的影响和对它的要求	221
四、壳型、壳芯制造和使用中的问题及原因分析	157	一、浇注系统对铸件质量的影响	221
五、质量管理	158	二、对浇注系统的基本要求	223
§ 2-3-4 温(热)芯盒法砂芯	162	§ 3-2-3 浇注系统的分类	223
一、热芯盒法用粘结剂及催化剂	162	一、按浇注系统各基本组元截面积的比例分类	223
二、热芯盒法砂的工艺性能及树脂砂的配制	164	二、按浇注系统在铸件浇注时的位置分类	224
三、热芯盒法存在的部分问题	165	§ 3-2-4 浇注系统基本组元中的水力学现象	227
四、温芯盒法	165	一、浇口杯	228
§ 2-3-5 自硬冷芯盒法制芯	166	二、直浇道	231
一、般催化树脂自硬砂	167	三、直浇道窝	232
二、自硬尿烷树脂砂	175	四、横浇道	232
三、酚醛-酯自硬砂	176	五、内浇道	235
§ 2-3-6 气硬冷芯盒法制芯	177	§ 3-2-5 浇注系统的充满理论	239
一、三乙胺法	177		
二、SO ₂ 法	179		
三、无毒、低毒气体促硬制芯法	182		
习题、思考题	183		
第四章 铸造用涂料及胶合剂	184		
§ 2-4-1 铸造用涂料	184		
一、涂料的作用	184		

V

§ 3-2-6 提高横浇道撇渣能力的措施	242	一、冒口的类型	267
一、几种常见的措施	242	二、冒口的设计原则	268
二、使用陶瓷片的金属液过滤技术	243	§ 3-3-3 冒口设计	273
§ 3-2-7 浇注系统位置的选择	245	一、模数法	273
§ 3-2-8 浇注系统的计算	247	二、缩管法	278
一、常用的浇注系统计算公式	247	三、铸铁件均衡凝固观点	281
二、确定浇注系统截面尺寸的图表	253	§ 3-3-4 各种合金冒口设计特点	282
三、阶梯式浇注系统的计算	253	一、铸钢件的冒口	282
§ 3-2-9 各种合金浇注系统的特点	255	二、球铁铸件用的实用冒口	288
一、铸钢件的浇注系统	255	§ 3-3-5 提高冒口补缩效率的方法	294
二、可锻铸铁件的浇注系统	258	一、大气压力冒口	294
三、球墨铸铁件的浇注系统	259	二、电热冒口	295
四、型内处理时的浇注系统	260	三、发热冒口	295
五、轻合金铸件的浇注系统	261	四、保温冒口	296
六、铜合金的浇注系统	264	§ 3-3-6 冷铁及铸筋	298
第三章 冒口	266	一、冷铁	298
§ 3-3-1 冒口的作用及其对铸件质量	266	二、铸筋	305
的影响	266	第三篇 思考题	307
§ 3-3-2 冒口的类型及设计原则	267	第三篇 参考文献	308

绪 论

铸造生产的内容可以概括为三个方面，即：铸造合金及熔炼（包括铸件的热处理在内）；铸造工艺（包括造型材料在内）和铸造过程的机械化及自动化。

铸造工艺学的主要内容是论述和评估现有的造型材料及工艺的特点与发展趋势；阐述铸件成型过程中金属与铸型之间的相互作用及其对铸件质量，尤其是表面质量的影响；以及金属充填铸型、补给铸件的方法和原理等。从而为合理的制定零件的铸造方案和开发铸造新工艺和新的造型材料、造型方法等奠定基础。

铸造工艺又分为砂型铸造工艺和特种铸造工艺两种。前者是本书所涉及的方面，后者为特种铸造的内容。

砂型是用各种无机或有机粘结剂与砂（包括石英砂、锆砂、铬铁矿砂、铬镁石砂等，而以石英砂为主）以及必要时加入的各种附加物配成的型（芯）砂制成的。常见砂型有：湿型、干型、水玻璃砂型、各种树脂砂型等等。这类铸型只能使用一次，所以也有人称之为一次型。

铸造生产中，砂型铸造应用得最广泛。世界各国用砂型生产的铸件占铸件总产量80%以上。这是因为它生产率高，成本低，灵活性大，适应面广，而且一般说来技术也比较成熟。一些汽车制造厂，机床厂，大型机器制造厂都广泛采用砂型铸造。它是一种古老而又需要继续发展的铸造方法。

随着工业的发展，对铸件质量的要求也日益提高，从而对铸型的要求也随之增高。关于铸型的概念已不是以前那种只要求能使铸件形成给定的几何形状的造型而已，而是要求铸型不仅要赋予铸件以规定的形状、尺寸，还要使铸件具有所规定的性能（由合金性质引起的除外），也就是说铸型的最基本的作用是要使铸件的性能、尺寸公差、表面粗糙度等能最大限度地接近成品零件的要求。换句话说，就是要大力地去开发少、无切削工艺。此外，大型厚断面铸件还要求铸型要具有足够的耐高温性能以支持和保护厚大铸件冷却到一定的强度，以便进行随后的处理。铸型的另一个未硬性规定的作用是控制中等壁厚铸件的冷却速度对灰铸铁机械性能的影响。许多铸造中的问题与铸型的这些基本性能有关，在某种程度上也与缺乏正确的知识或认识有关。

随着我国四化建设的开展，有些工程如大型水力和核动力电站的建设以及海底石油的开发等，需用具有很大尺寸和重量的优质铸件。因此，如何按照形势要求，尽可能深入地探究和掌握生产铸件的规律，保质、保量地生产出各种规格的铸件，是铸造工作者义不容辞的责任，也只有这样才能进一步扩大铸件的应用范围。

自从开始采用球墨铸铁以来，在提高砂型素质以保证铸件质量方面有了许多进展。高密度造型工艺、射挤压造型工艺对提高铸型的紧实度或刚性，从而对减小铸件尺寸公差和降低表面粗糙度，保证对铸件的补给，减少铸件的废品率起到了很大的作用。但由于实现该种工艺所需的设备投资较大，因此其应用范围受到了一定的限制。

化学粘结剂的使用和发展，使造型工艺进入到一个新的领域，达到了一个新的水平。这

类方法的特点是利用化学硬化原理使铸型快速硬化以达到较高的尺寸稳定性和热稳定性以及良好的溃散性，从而提高了铸件的质量，节约了工时。这种方法既可以在机械化的车间里使用，也可以在手工工厂里使用，具有较大的灵活性，因此近年来得到广泛的发展。但是使用有机粘结剂时会造成不同程度的环境污染，有待于工程技术人员继续研究，设法解决。

在本世纪70年代，先后出现了利用物理方法（如磁力、真空和冷冻等）使砂粒固化成型的造型方法。它们的特点是使用不含粘结剂、能自由流动的干砂或铁丸造型。这样就简化了砂处理和旧砂回用所需的设备和工时，大大简化了铸件的落砂、清理过程，节约能耗和材料，降低了成本，被认为是很有发展前途的造型方法。

近年来，有综合利用诸种造型方法以进一步提高铸件质量、减轻铸件重量、降低铸件成本的趋向。

造型材料和造型工艺是相互联系的。一方的变化会促进另一方的发展。如高密度造型工艺和冷硬树脂砂的出现都促进了另一方的变革。另一方面，金属-铸型的相互作用也是相互联系、相互制约的。弄清楚它们之间的关系就可以为进一步发展铸造工艺打下基础。虽然近20多年来，国内外进行了许多工作，仍有许多问题不很清楚。就需要有更多的人为此而努力工作。

学习本课程时应特别注意理论联系实际，要明确各篇章所涉及到的内容的特点和它们之间的关系，为制订铸件的工艺方案和开发新的造型材料和新工艺奠定良好的基础。

本课程的主要内容如下：

- (1) 金属-铸型界面相互作用的基本机理和规律及其对铸件质量的影响；
- (2) 型（芯）砂用原材料的基本性能及其对型（芯）砂性能的影响，型（芯）砂性能及其对铸件质量影响的基本规律，型（芯）砂的配制及其性能控制和检测的基本原理；
- (3) 工艺设计的基本原则和方法以及浇冒口系统的作用和基本原理，提高其效率的措施。

本课程应在学完铸造形成原理及铸造化学课程后讲授。

第一篇 金属-铸型的界面作用 (Interface Reactions Between Metal and Mould)

引言⁽¹⁾

金属流入铸型中时，金属与铸型直接接触并发生相互作用，导致金属液的凝固成形和冷却，从而获得铸件。能否有效地控制这种相互作用的发生和发展，将直接影响铸件的质量，尤其是铸件的表面质量。显然，二者之中，金属对铸型的作用是第一性的，而铸型的作用是第二性的。然而，后者在获得合格铸件中却往往是决定性的。

液态金属充填铸型的过程中，由于各种原因，如果出现金属液冲刷铸型壁的情况，被冲刷下来的东西将由金属液夹持并带至它行进中的某处，金属凝固后留在铸件中成为夹杂缺陷。在铸型表面与金属液直接接触以前，由于受到金属液的热辐射作用，温度开始升高，而当铸型与金属液相接触时，金属液放出的过热热量使铸型表面温度急剧升高。这样，铸型表层中将出现内应力；表层中粘结剂烧失，强度下降；低温蒸发、挥发物质强烈气化、分解的结果，造成金属-铸型界面处的压力急剧升高。此时，气体在压力场和温度场的作用下，一方面开始向铸型深处滤流（传质现象），其中的水蒸气则在铸型壁内某个深度凝聚，建立起低强度的高水区，使铸型有可能沿着这层发生剥离，而在铸件表面形成夹砂、结疤类缺陷。另一方面，穿过界面的气体，有可能部分地溶解于金属液中，也可能以气泡形式进入液态金属中，上浮并逸出。此外，随着金属静压头增高到一定程度，金属液将渗入到铸型面层的砂颗粒间隙中，轻则使铸件表面粗糙，严重时甚至可能夹持住砂颗粒而形成所谓机械（物理的）粘砂；或者由于铸型强度不够，造成铸型型壁移动，型腔胀大，铸件出现胀砂缺陷。

在金属液的热作用下，预先涂敷在铸型内腔表面涂料层中的合金元素熔化，并扩散到铸件表层金属内，实现铸件的表面合金化，以提高该部分或整个铸件表面的抗磨、耐蚀等性能。

金属与铸型气氛相互作用的结果使金属表面形成薄的氧化物层。

铸件表面形成硬皮层以后，就开始了铸型与金属硬皮的相互作用阶段。此时，金属的大部分过热热量已经散失，热的传递主要取决于金属凝固结晶时放出的热量。在铸型壁中气流得到较大的扩散，而水蒸气沿砂型中的微孔（毛细管孔）滤流至更深处，使湿型的大部分温度升高到100℃。铸件硬皮强度不足时，由于金属静压力的作用被压向铸型表面，而当其强度足够时，就自身承受着全部金属静压力，并由于收缩而离开铸型表面，二者之间产生间隙。铸件收缩时，若受到较大的来自铸型方面的阻力就可能发生热裂（较高温度下出现裂纹）。若铸型的透气性小而发气能力大，界面处的气体压力超过金属硬皮的强度时，气体就有可能穿入铸件内形成气孔而不上浮。

在这阶段中还开始了金属氧化物与造型材料的相互作用和造型材料的烧结过程（sintering process of moulding materials）。

铸件与铸型的相互作用继续发展，铸型表面温度升高到某一最高值的同时，铸型的受热深度也增大。铸件强烈地进行收缩时由于受到型砂膨胀时的有力阻滞有可能产生裂纹。如果造型材料烧结为一整块，将给铸件落砂带来困难。金属氧化物与造型材料相互作用的结果，在硅砂铸型中形成一系列硅酸盐化合物，这些化合物中的低熔点成分迁移到型砂的孔隙中，将铸件和铸型联结起来，其内层为粘砂层。此外，在铸型气氛的影响下，金属表层中可能出现脱碳层或渗碳层，或者渗硫层等。

最后，铸型和铸件一道冷却下来。铸件中具有较大的温度差的部位，将产生内应力和变形。

以上为金属与铸型相互作用的概貌，可以看出，在金属与铸型的界面上和在铸型内部发生了一系列相当复杂的过程和现象，其中主要的是传热与传质，力学的和物理化学方面的过程。下面将对当中的一些过程和现象作进一步的阐述。

第一章 砂型的特点及其工作条件

§1-1-1 砂型的特点：毛细管体系^(2~4)

造型过程中型砂在外力作用下成型并达到所要求的密度（又称为紧实度）(compactibility) 而成为砂型。型砂是由耐高温的颗粒材料（以下简称耐火材料）(refractory granular material) 或原砂、粘结剂 (binder) 和附加物 (additives) 等按一定比例均匀混制而成的。型砂通常由混砂机混制出来，经过松砂机后，其紧实度约为 $1.0 \sim 1.1 \text{g/cm}^3$ 。在造型（芯）机上面砂斗中贮留的型（芯）砂，其紧实度约为 $1.15 \sim 1.25 \text{g/cm}^3$ 。在一般震击压实造型机上得到的砂型紧实度可达 1.65g/cm^3 。高压、射挤压造型时，砂型的紧实度大于 1.7g/cm^3 。通常在采用湿型进行大量/成批生产的条件下，液体金属的静压力多低于 1kPa ，因此，一般湿型的紧实度控制在 1.6g/cm^3 左右是合适的。其它种类的铸型也都要按照生产条件的要求达到规定的紧实度，因为紧实度不足的松软砂型容易造成金属液渗入，使铸件的表面粗糙 (roughness of surface) 或出现机械粘砂，或者砂型由于承受不住金属静压力的作用而变形胀大，使铸件尺寸超出容许的公差范围或内部出现缩孔等缺陷。

图1-1-1是型砂紧实后的结构示意图。图1-1-2是水玻璃砂紧实后的微孔分布图，试样是采用标准的三锤紧实，用 CO_2 气吹制的。由该二图可以看出，一次用砂型是一种微孔-多孔隙体系，或者毛细管-多孔隙体系。

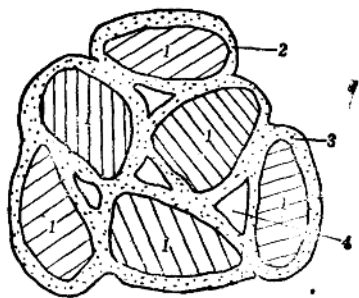


图1-1-1 型砂结构示意图

1—耐火材料砂粒 2—粘结剂 3—附加物
4—微孔

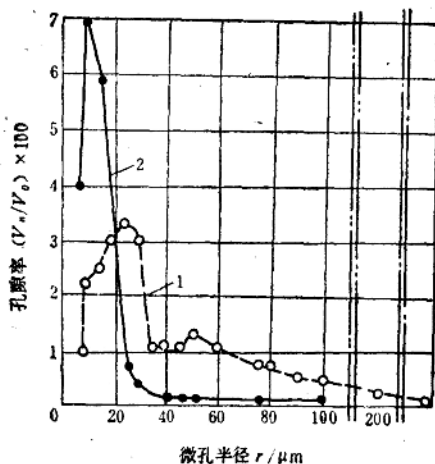


图1-1-2 水玻璃砂紧实后的微孔分布曲线图⁽³⁾

1—硅砂 2—铬镁石砂
 V_v —微孔容积 V_0 —物体的总容积

微孔在铸型中的特点，不仅表现在尺寸大小上，还表现为它的形状、在整体中的相互排列和分布，以及是否与外表面相沟通等。因此铸型中微孔的特征应当包括总的孔隙率，微孔

尺寸和它们按尺寸的分布。一般情况下,任何多孔性物体的孔隙率 n 都用微孔的容积 V_v 对物体的总容积 V_0 的比来表示,即 $n = (V_v/V_0) \times 100\%$ 。

孔隙率是多孔物体的一个主要的物理特性,对铸型的属性有大的影响。与容积孔隙率有关的铸型参量有:导热系数,热容,热扩散率,蓄热系数,容积重量,热膨胀及其它。此外,孔隙率对于评价铸型的质量也有实际意义,因为它在很大的程度上决定着铸型的透气性和铸型总体上的气体状态,变形过程,表面层强度,型砂的吸附能力和其它性能。

一个多孔体系,由于组成上的差异,也必然会引起该体系的孔隙率和微孔尺寸产生差异。由图1-1-2中看到,在用硅砂配制的水玻璃砂中,微孔的大部分具有 $r = 20 \sim 30 \mu\text{m}$ 的尺寸,许多微孔的尺寸为 $r = 30 \sim 40 \mu\text{m}$,微孔尺寸 $> 200 \mu\text{m}$ 的在该种砂试样中实际上没有。在用铬镁石砂配制的水玻璃砂中,绝大多数的微孔半径为 $r = 8 \sim 20 \mu\text{m}$,大孔的数目非常少。这种差异是由于使用的砂的颗粒组成不同而造成的(见表1-1-1)。

表1-1-1 砂的颗粒组成

筛孔尺寸/mm	0.63	0.40	0.315	0.200	0.154	0.100	0.071	0.066	底盘
	质量分数								
砂的种类	$W_i \times 100$								
硅砂	0.10	4.4	20.34	58.8	14.84	1.2	0.14	0.08	0.04
铬镁石砂	0.06	5.2	12.88	10.14	14.44	14.34	6.08	5.86	28.2

在大多数情况下,型砂的孔隙率是通过实验,根据型砂试样所吸收液体(酒精、煤油、水银及其它)的容积确定的。一旦确定了毛细管的反压力 p_c 和液体的表面张力 σ 及它对砂型的润湿角 θ ,就可以求出铸型微孔的综合特征尺寸 r ($p_c = 2\sigma \cos\theta/r$),而且毛细管尺寸愈小,就会愈强烈地将浸润性液体吸入毛细管-多孔体系中。利用浸润性液体(如酒精)确定的(砂型中)孔的整体容积与物体的总容积的比,基本上可以反映出物体的真实孔隙率。铸型和非浸润性液体接触时,随着作用于该液体上的外压力增加,液体最初穿入大的微孔,然后进入细小的微孔。但是不论在多大的外压下,非浸润性液体也不能通过全部微孔而渗入到砂型中,微孔不会全部为渗入的液体所充满。表1-1-2列出在相同试样中分别用酒精和水银时所得到的孔隙率。

表1-1-2 型砂中微孔的特征^[3]

型砂的组成 (质量分数)	微孔体积分数 $\phi \times 100$		型砂的组成 (质量分数)	微孔体积分数 $\phi \times 100$	
	用酒精时	用水银时		用酒精时	用水银时
(1) 硅砂+6%水玻璃	37	23.5	(4) 硅砂+6%水玻璃+30%硅砂粉	26	17.1
(2) 硅砂+6%水玻璃+10%硅砂粉	36	21.8	(5) 铬镁石砂+6%水玻璃	25	17.3
(3) 硅砂+6%水玻璃+20%硅砂粉	31	18.7			

由表1-1-2中看到,当在硅砂中加入10%(质量分数)的硅砂粉时,最大数量的孔的尺寸实际上没有减小。而当加入30%(质量分数)的硅砂粉时,其孔隙率与铬镁石砂的相似(砂的颗粒组成参阅表1-1-1)。

若用模拟方法^[4]分析单元立方体容积中均一直径小圆球的紧密堆积形式,则当它们分

别呈立方体（简单立方）、菱柱形（简单六方）和角锥形（立方最密或六方最密）堆积时（见图1-1-3 a、b、c），其相应的配位数（接触点数）分别为6、8和12，相应的孔隙率分别为47.6%、39.54%和25.95%。因此，相同尺寸的圆球不能堆积出小于25.95%的孔隙率。而且由相同直径圆球组成的体系的堆积密度，配位数及孔隙率只取决于堆积形式，并不受圆球直径大小的影响。孔隙率也不决定于微孔尺寸大小，即不因球的直径大小而异。

微孔尺寸依赖于球的尺寸。孔隙率相同时，微孔尺寸可能随颗粒尺寸的变化而不同。如果用 d_1 表示由直径为 D 的球所形成的微孔的内切圆直径，当球为立方体堆积时 $d_1=0.414D$ ；当为角锥形堆积时 $d_1=0.155D$ 。

假定原砂是由两种不同直径的小圆球组成的二元系统，如图1-1-4所示。配位数为6的立方体堆积的大球之间的间隙中正好可容纳一只小球，此小球的直径为大圆球直径0.414倍。可以计算出，这种颗粒分布时的孔隙率为44.3%，即孔隙率由原来单一大球时的47.6%降低到现有二元系统的44.3%。对其它的情况也可以用纯几何学的方法计算出二元系的孔隙率。可以得出，这种大小颗粒的镶嵌现象将较大降低孔隙率，也将使砂型的透气性降低。

在实际的型砂中，砂颗粒的形状并非球形，而且颗粒的组成具有分散的特征。在颗粒之间的空隙中可能堆积着或多或少的细小成分。此外，由砂颗粒形成的微孔中可能含有各种固态或液态成分，如粘结剂、固化剂或其它附加物。用密度 $\rho=2.62\text{g/cm}^3$ 的石英球配成的混合料分别呈角锥形、菱柱形和立方体形堆积时，其密度相应地为 1.95g/cm^3 、 1.54g/cm^3 和 1.38g/cm^3 。当颗粒材料的真密度 \ominus 不相同，在相同的尺寸和堆积形式下得到的密度（或紧实度）是不相同的，但孔隙率是相同的。也就是说紧实度受颗粒材料真密度的影响，而孔隙率则不受颗粒材料真密度的影响。

在实际的造型用型砂中，砂颗粒的堆积形态并不与前面讲到的典型的堆积形式相吻合，其堆积形态决定于它们的组成和紧实时条件，它们可能具有上述三种堆积形式的中间状态。在锤击三次的标准紧实条件下，实际型砂的密度（紧实度）一般为 $1.5\sim 1.8\text{g/cm}^3$ ，孔

\ominus 真密度是指材料自身的密度。

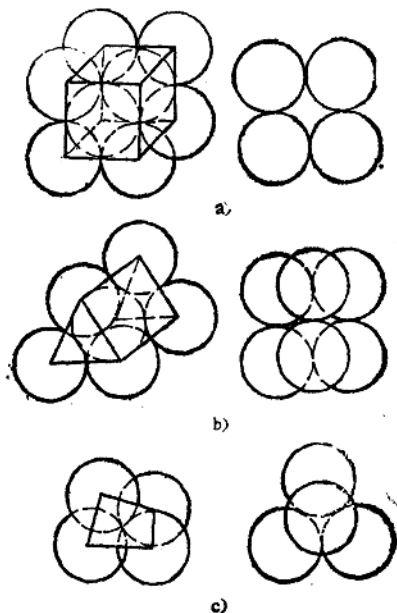


图1-1-3 单元立方体容积内均一直径小圆球的堆积形式

a) 立方体堆积 b) 菱柱(斜方)形堆积
c) 角锥形堆积

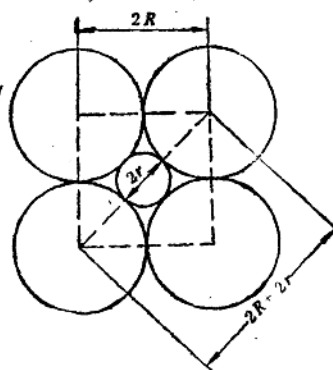


图1-1-4 配位数为6时计算 d_1/D 或 r/R 的图解

隙率为30~40%。

使用角形砂粒时，孔隙率及每个微孔的断面积都可能比使用圆颗粒砂的大些，而这个不规则形状微孔的内切圆半径可能小些。因为，不规则形状的微孔可能呈过度伸长的形状。

在浇注金属的热作用下，型砂组分中的有机材料烧尽，易熔的组分烧结，某些组分和浇注金属的氧化物之间发生化学上的相互作用。这些都会不同程度地改变砂型的孔隙率和微孔尺寸。在大多数情况下，上述的过程会造成铸型表面层内的孔隙率和微孔尺寸的增加。但也有可能由于所形成的低熔点化合物迁移到铸型深处而降低孔隙率。型砂在铸件的热作用下出现烧结现象时，究竟是增大还是降低微孔尺寸，目前尚无一定的规律性。

型砂的耐火度和烧结性需要结合浇注过程中铸型的加热速度及加热程度，或铸型受热时间长短及温度的高低，一道进行分析。日本有资料指出，在给定温度下，烧结在本质上依赖于加热速度。例如，加热速度由3℃/min增至8℃/min时，膨润土型砂的开始软化温度由1050℃提高到1090℃。

出现烧结现象时，具有较大意义的是砂试样的变形，它与粘结剂的熔化或烧失有关，也与铸型的蓄热系数，即型砂的热物理性能有关。

§1-1-2 砂型的工作条件⁽⁵⁾

铸型的工作条件，除了在常温下要能承受在搬运、合箱等生产环节中可能发生的震动、撞击、摩擦、压力等方面的作用外，主要是指从浇注金属开始，铸型所面临的各种热的、力学和化学方面的作用。铸型必须有能力承受住这些方面的作用。有学者将铸型直接与金属液相接触及受到其影响的部分称为接触区，而把铸型中的其余部分称为一般区。铸型与金属之间出现的这三个方面相互作用的一般情况，已经在前面的引言中作了概括性的说明。根据这些情况，铸型接触区的那部分造型材料体积或者铸型层不仅参与热量的蓄聚，进行液态金属和铸型成分之间的相互扩散与传质，放出自身气体，或者吸收来自液态金属的气体，而且对液态金属、相互作用产物的生成和铸件的成形有直接影响。

苏联的研究者认为：随着铸件的壁厚、液态金属的温度、热含和化学活度以及铸型组成成分的活度和其结构的疏松程度的增加，被加热的铸型接触区温度增高，而且范围也增大。后者决定于液态金属的性能，也决定于铸型表面层的性能。

随着蓄热系数 b 和热扩散率 a 的增加，材料的热阻 R_r 的减小，铸型接触区的深度 δ_m 增大。

浇注10kg重的铸件的结果表明，加热到 $0.65T_m$ (T_m 为合金的液相线温度)温度时，各种铸型中接触区深度 δ_m 分别是：石墨型约2mm；耐火粘土型1.5mm；含水5%的硅砂铸型1mm；珍珠岩铸型0.3mm；多微孔轻质材料铸型0.1mm。化学上的相互作用区一般扩展到铸型内0.5~0.6mm深度，并且决定于造型材料的孔隙率及其本性和与液态金属有关的参量。铸型表面层与液态金属相互作用时，铸型的接触区部分有可能局部受到破坏并在铸件表层上形成不同的缺陷。

铸型接触区的第一层是各种化合物和熔化物（氧化物、硫化物、氮化物、氢化物及其它）的集合体。其第二层是填料颗粒的多晶形转变、分解、裂变成成为熟料和莫来石化的产物。

一、二层的深度比，主要决定于铸型材料的化学组成，在多数情况下为1:3~1:5。

铸型接触区要能经受住液态金属，熔融氧化物和气流股所施加的流体动力学的、侵蚀性的、化学上的和热的作用。

铸件和铸型接触区中进行这些过程的主要控制参量有铸型表层（涂料层）的本性、厚度和密度（目前对它们还研究得不够）。厚度和密度是相互有联系的数量，它们决定于填料和粘结剂的本性与浓度、悬浮物的量和干燥规范。基底的本性和结构对涂料层的形成有很大影响。

接触表面微观几何形态的变化决定于充填铸型的流体动力学和液体金属与铸型表面的物理—化学性质。

充填铸型时，液态金属的运动速度 v_0 大大超过润湿表面的速度 v_* ($v_0 > v_*$)。金属运动时激烈地冲刷（掉）铸型表面的空气（气体）吸附层和疏松层，在液态金属的表面和表面层内产生涡流和气穴。这样就使得主要与铸型表面的凸起点相接触的液体金属形成“悬浮层”，如图1-1-5 a所示。

在结晶阶段，运动速度和润湿速度发生变化 ($v_0 < v_*$)，将液态金属吸入微孔中的毛细管力和直接对铸型表面有影响的结晶化学场与能量场的作用就成为重要的因素，因为铸件表面层就是在这些过程的作用下形成的。铸件的表面基本上是重现铸型表面的宏观及微观几何形态，见图1-1-5 b。液体金属和铸型相接触的程度及界面上的特性决定于二者相接触时润湿角的大小以及铸型表面的结构。

直到设想的铸件表面层完成结晶的时刻为止，金属静压力和铸型内的水蒸气压力以及金属与铸型之间化学上的相互作用对其表面几何形态有较大的影响。在这个时期内，由于结晶、汽化、分解和相互作用产物的形成，接触区的相互渗透和总体上的不均匀性（多相性）将激烈地加大，见图1-1-5 c。

此后，直到铸件和铸型之间形成气隙以前，金属和铸型之间的各种化学上的相互作用增强。这样，金属和铸型接触表面的侵蚀作用也将进一步加强。

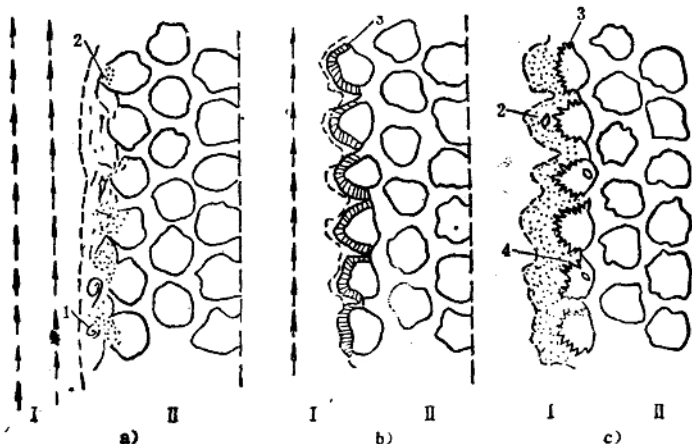


图1-1-5 铸件I和铸型II相接触表面的微观几何形态与相应的结晶化学和孔隙率
 a) 充填铸型的流体动力学 b) 润湿 c) 金属静压力、气体压力以及化学上的相互作用的关系
 1—局部涡流 2—非金属夹杂（来自铸型的） 3—结晶体 4—气穴

第二章 金属与铸型的物理作用

§1-2-1 传热与传质现象

传热与传质是很普遍的自然现象。高温金属浇入砂型后，砂型的温度升高很快，促进了传质现象的迅速发生和发展，并引出了前面概述中所提到的许多现象。显然，在这些现象的发生过程中，热现象还是起主导作用的。

一般说来，砂-粘土铸型是典型的毛细管-多孔性物体，在热物理性能方面必然与相同材质的密实物体存在着某种程度的差异。在实际的铸造条件下，铸型有着从初始温度到接近金属结晶温度的全部温度谱。在铸型中观察到传导、对流和辐射传热。从热方面看铸型不是各向同性的。因此，在铸型的各不同区域中各种传质过程的发生和发展是不会完全相同的。另一方面，一些传质现象，例如水分迁移过程，不仅带走较多热量，还以自己的特性影响热的传递，这样又对铸型的温度场有很大的影响。它们之间相互影响着，在砂型铸造中传热传质过程是复杂的，为叙述方便，下面将分开讨论。

一、传热与铸型的热物理性能

从金属液进入铸型中的时刻起，就开始金属和铸型的热相互作用。铸型中的传热是金属—铸型—周围介质之间热力学不平衡的结果，它出现在任何铸型中，并且将持续到温度完全均匀为止。恰当地挑选具有不同冷却能力的材料用于铸型的不同区域，就可以为控制铸件主要性能的形成创造必要的条件。

分析物体之间或者物体与周围介质之间的热交换，必须考虑各种热交换系数。在一般情况下，这些系数不是由一个物体的内部性质推导出来的，而是由所有相接触的物体和接触区的性质、周围介质的状况及其它因素决定的。然而在辐射热传递的情况下，热交换部分地受到参与其中的物体的内部性质、它们的辐射系数或者黑度（也依赖于表面状态）的影响。

一般说来，影响传热的因素有：

- (1) 热的不平衡程度——温度梯度；
- (2) 铸件和铸型的热物理性能——热扩散率 a 和蓄热系数 b ，需要时还有辐射系数；
- (3) 几何因数——铸件的形状和壁厚，涂料层的厚度，铸型壁厚等。

在热物理性能中，型砂的热扩散率 a 和蓄热系数都与其热导率 λ 、比热容 c 及密度 ρ 有关。但热导率 λ 对蓄热系数的影响比对热扩散率的影响小些，这是因为在 $b = \sqrt{\lambda c \rho}$ 中 λ 是以 0.5 次方进入的，而在 $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ 中它是以一次方进入的。而且相对应的容积热容的作用增大了。实际上，具有高的蓄热能力（锆砂、铬铁矿砂、铬镁砂、镁橄榄石砂等）的型砂，不仅具有高的热导率，也具有较高的比热容和密度。

铸型中热量的蓄聚和迁移不仅与比热容、密度、热导率有关，而且还与相变、化学反应、传质、接触状况及其它过程有关。不受这些现象的限制而得出的热物理特性值称为实效值。

比热容是物质的特征性质之一。温度对比热容有很大的影响。水对比热容的实效值有重大的影响。水在液态时能蓄聚大量的热，而且在汽化过程中还能吸收更多的热。

常温下大多数原砂的比热容约为 $0.8 \sim 1.2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。常温下硅砂的实效比热容可以近似地采用 $1.0 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于大多数型砂而言，比热容随温度的变化为 $(0.08 \pm 0.04) \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

铸造用砂型，可以近似地看作在整块石头上钻了许多孔、增加了热阻的物体。在给定情况下没有考虑气体介质的导热，因为在温度不高时它比硅砂颗粒的导热能力低许多。按照这种模型，就可以说型砂的密度与它的导热之间成正比关系。但在高温下所采用的假定就显得不够充分。因为实际上，型砂中的热传递是复杂的过程，其中既有颗粒材料和微孔中气体介质的导热，也有微孔内的辐射传热。在颗粒相接触处的很大接触热阻更使情况变得相当复杂。因此上述因素造成的实效热导率应由实验确定。

图1-2-1和图1-2-2示出实效热导率与温度的关系。可以看出，正常温度下热导率实际上由铸型中的固态骨料的导热所决定。随着温度升高，对流和辐射的作用增大。在接近浇注温度时，辐射起主要的作用。紧实度增高，热导率增大。但是在高温下，当颗粒间隙中的热传递增长时，增高紧实度对热导率的影响比在低温时的小许多。

铸型表面的辐射系数，或者黑度，在很大程度上决定着由金属表面向铸型的敞开部分传递热的强度。实践中所用的型砂的黑度系数接近于1。因此要减小吸收辐射的能力，只能通过使用有较高反射能力的其它材料来防护铸型表面，提高铸型的热稳定性。

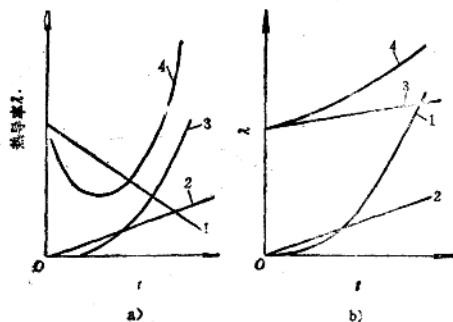


图1-2-1 温度对以硅砂(图a)和非硅质砂(图b)为基的型砂的热导率的影响(根据D. Atterton资料)^[6]

1~4—分别为传导、对流、辐射传热和总的(实效的)热导率曲线

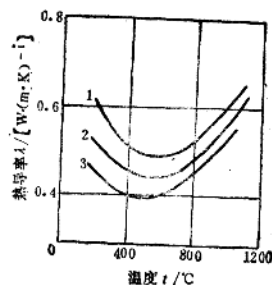


图1-2-2 温度对膨润土型砂的热导率的影响^[6]

型砂的紧实度: 1— $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 2— $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ 3— $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$

二、砂型的受热过程

在铸件—砂型系统中，不同时刻或不同时间间隔的温度场实际上决定了金属—砂型分界面上以及砂型体积内各种过程产生的条件。因此，描述铸型各部分温度分布随时间而变化的温度场是表征铸型热状态特征的最好形式。(参见图1-2-3、6、7)。

图1-2-3是树脂砂铸型及铸件的温度场。由 T_{max} 曲线看到，离界面愈近，铸型层所能取得的最高温度愈高，而且所需要的时间也愈短。界面附近的最高温度大大超过粘结剂的分解

温度(参阅表1-2-1),于是粘结剂(包括其中所含的催化剂及其它)迅速分解成为各种气体。经色谱法分析检定,热分解气体中包含有 O_2 、 N_2 、 CO 、 H_2 、 CH_4 、 H_2S 、 SO_2 及其它气体。这些气体在一定条件下能成为铸件表层发生气孔或出现异常组织的根源。

根据温度曲线还可以判断树脂砂性能变化情况或者砂颗粒表面上附着的树脂的焦化情况。由 T_{max} 曲线看,树脂的焦化状态近似地与距界面的距离成比例,即愈接近铸型外壁,达到最高温度所需的时间愈长,树脂的焦化程度愈小。用扫描电镜观察发现,靠近铸型外壁,树脂膜平滑地附着于砂粒表面;距铸型外壁40~50mm的内侧,附着的树脂因受热而成为多孔质的焦炭,在铸型界面附近的砂粒上附着的多孔质焦炭量减少并可以观察到砂粒表面。树脂砂的高温强度一般随着温度的上升而急剧下降。700℃以上时强度非常低,这是由于有机物质随温度上升发生热分解和氧化作用而造成的,参阅图1-2-4。

铸件凝固冷却时,铸型也在到达最高温度后逐渐冷却下来,到铸件落砂时铸型仍具有一定的温度和强度,这时的强度称为砂型(芯)的残留强度,简称残强。由图1-2-5中看到水玻璃砂在600℃左右时残强最低,在200℃和800℃左右时残强很高。呋喃树脂砂在大约200~300℃时硬结成块,强度也很高。为了便于铸件的落砂、清理,希望在铸件落砂时,水玻璃砂铸型及砂芯的温度处于600℃左右(参阅图1-2-5),而呋喃树脂的铸型及砂芯的温度最好高于350℃。

表1-2-1 几种粘结剂的分解温度

粘结剂名称	糊 精	尿素甲醛	苯酚甲醛	亚麻仁油
分解温度 t/℃	121	163	316	427

由此可见,根据温度场,并结合其它的测试、分析结果(如色谱分析、扫描电镜观察、差热分析等),可以研究砂型对铸件凝固的影响,研究和分析接近真实条件下砂型中的温度变化、气氛的性质及作为回用和再生用的旧砂的性能变化情况,为合理地制订工艺方案提供依据。例如,作 CO_2 水玻璃砂的溃散性试验时,如果将试样放在炉内加热到规定温度以后进行空冷,则所测得的残强可能是比较低的。但用这种水玻璃砂配方制成铸型并浇注金属后,铸件落砂时其溃散性往往却不够理想。如果根据砂型(芯)的温度场定出试样随炉冷却的工艺规范,得到的结果就可以用于指导生产了。

砂型(芯)某规定点上的加热(或冷却)速度是制订型砂高温性能研究方法以及使实验条件最大限度地接近于实际相互作用条件所需的参数。为此,铸型的温度场也是很有用的。

干型、 CO_2 水玻璃砂型、树脂砂型等的受热过程都与上述情况有相似之处。而湿型在浇入

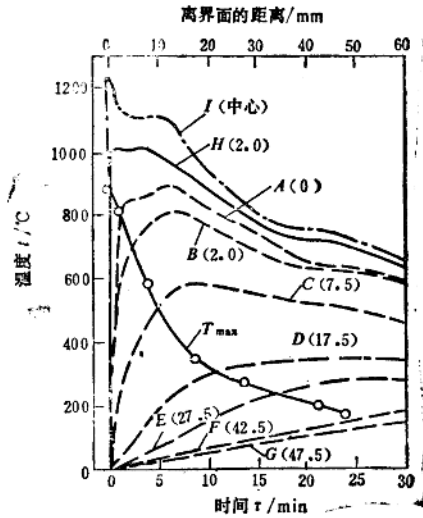


图1-2-3 树脂砂型及铸件的温度场和它的最高到达温度与距界面距离的关系⁽⁷⁾

A~G—分别为离界面距离为0(界面),2.0,7.5,17.5,27.5,42.5,47.5mm时铸型的温度 I、H—分别为铸件中心及离界面2.0mm处的铸件温度 T_{max} —铸型内最高到达温度与离界面的距离的关系曲线

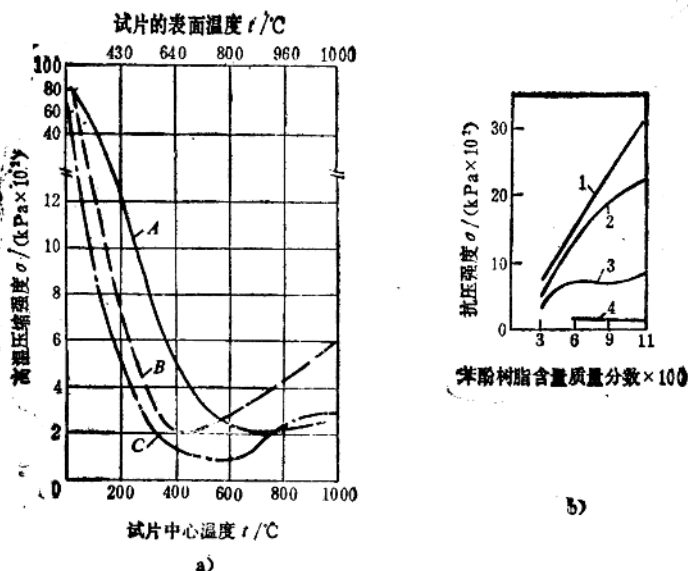
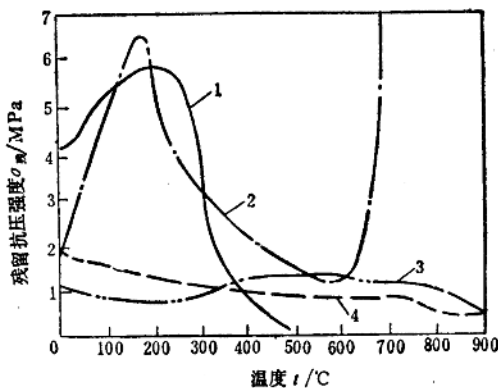


图1-2-4 树脂砂的高温强度

a) 呋喃树脂砂A 油尿烧树脂砂B及酚尿烧树脂砂C b) 苯酚树脂砂
1—常温 2—300℃ 3—500℃ 4—1100℃

金属液后的受热过程比较特殊，简述如下：

图1-2-7 a是厚度30mm的平板铸铁件在湿砂型中凝固时湿型断面上的温度分布，铸型的初始水分 m_0 等于8%（质量分数）。由图中看出，含水铸型的温度场在任何时刻都可以划分为三个特征区，见图1-2-7 b。I区为干砂区；II区是温度为100℃、水分由 m_0 增至 m_1 的高水区；III区的温度和水分分别由毗邻II区的100℃及 m_1 降至室温 t_0 和 m_0 。这三个区是逐渐地由型腔表面向铸型内部延伸扩展的。这种现象的出现首先是由于金属液的高温使表面层型砂及其所含的水分迅速升温，当水温达到相变温度时，水变成蒸汽离开I区（留下干燥区）向内扩散，引起传质现象并相继发生相变形成II区和III区。这种传质现象不仅带走大量的热而且影响到铸型内的热传递。这样，它使湿型内的温度分布曲线和其它铸型的大不相同。对于这种温度分布，湿型的热物性值要用简化了的付立叶方程的解行式求出是困难的。日本有人对干燥区的形成过程进行了研究^[9]，可以参考。

图1-2-5 几种型砂的残留强度举例^[8]

1—呋喃树脂砂 2—CO₂水玻璃砂 3—干型 4—水泥砂

水的这种传质现象通常称为湿型中的水分迁移现象，将在传质一章中叙述。

由图中的强度曲线看出，II区的铸型强度最低，低于湿型砂的初始强度，这是由于该区的水分超过湿型砂的最适水分造成的。通常称II区的铸型型砂强度为“热湿强度”。