

中等专业学校試用教科书

# 鑄造合金及熔煉

漢口機械學院主編

只限學校內部使用



中國工業出版社

中等专业学校試用教科书

# 鑄造合金及熔煉

漢口機械學院主編

只限學校內部使用



中國工業出版社

本书是根据1959年批准的中等专业学校鑄造专业的“鑄造合金及熔炼”四年制教学大纲草案編写的。最近又本着鑄造专业教材选編會議提出的精神进行了修訂。参加修訂的有汉口机器制造学校張家为、北京工业学校朱承永、沈阳工业学院卞慎余等同志；参加初稿編写的还有郑州机械专科学校張紹甫同志。

本书内容包括鑄造性能、鑄造合金（鑄鉄、鑄鋼和有色合金）、合金熔炼的物理化学基础、合金的熔炼等部分。可供中等专业学校鑄造专业試用教科书，也可供鑄造工作者的参考。

由于技术革新和教育革命不断发展，虽在編訂时尽可能收集現場資料，但限于水平和時間仓促，难免有遺漏和不妥之处，希讀者能予以批評指正。

## 鑄造合金及熔炼

汉口机械学院主編

\*

第一机械工业部教材編审委员会編輯（北京复兴門外三里河第一机械工业部）

中国工业出版社出版（北京左門前大街10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

\*

开本 850×1168  $1/32$ ·印張 11  $5/8$ ·字数 291,000

1961年8月北京第一版·1962年1月北京第二次印刷

印数 03,838—04,917·定价(9-4)1.20元

\*

統一书号: 15165·657(一机-134)

緒論	5
----	---

## 第一篇 鑄造合金

第一章 合金的鑄造性能	7
第一节 流动性	7
第二节 收縮	19
第三节 內应力、变形和裂紋	29
第四节 吸气性	39
第五节 偏析	44
第二章 鑄鐵	48
第一节 灰口鑄鐵及其石墨化过程	49
第二节 孕育鑄鐵	71
第三节 球墨鑄鐵	76
第四节 合金鑄鐵	89
第五节 可鍛鑄鐵	99
第三章 鑄鋼	110
第一节 碳鋼鑄件	110
第二节 合金鋼鑄件	123
第四章 有色金屬鑄件	134
第一节 鑄造銅合金	134
第二节 鑄造鋁合金	142
第三节 鑄造鎂合金	148
第四节 鑄造鋅合金和巴氏合金	151

## 第二篇 鑄造合金的熔煉

第五章 合金熔煉的物理化学基础	155
第一节 化学热力学原理	156
第二节 化学平衡	160
第三节 氧化物及其它化合物的分解压力	163
第四节 炉渣	168
第六章 鑄鐵的熔煉	172
第一节 化鐵炉的构造	172

第二节	鑄鐵熔煉的原料 .....	181
第三节	冲天炉熔煉的理論基础 .....	189
第四节	冲天炉的操作和控制 .....	199
第五节	冲天炉鉄水的加制 .....	216
第六节	冲天炉工作的強化及其装备 .....	223
第七节	冲天炉主要尺寸的計算 .....	237
第八节	双連法熔煉鑄鉄 .....	245
第七章	側吹轉炉煉鋼 .....	252
第一节	側吹轉炉构造及其主要設備 .....	252
第二节	酸性轉炉煉鋼法 .....	257
第三节	側吹碱性轉炉煉鋼 .....	264
第四节	轉炉煉鋼过程的強化 .....	268
第五节	轉炉熔煉合金鋼 .....	269
第八章	平炉煉鋼 .....	270
第一节	平炉的构造 .....	271
第二节	平炉煉鋼的原料 .....	272
第三节	碱性平炉熔煉工艺 .....	273
第四节	酸性平炉熔煉工艺 .....	280
第五节	在平炉內熔煉合金鋼 .....	281
第九章	电炉煉鋼 .....	283
第一节	电弧炉的构造及計算 .....	283
第二节	碱性电弧炉煉鋼 .....	297
第三节	酸性电弧炉煉鋼 .....	308
第四节	电弧炉熔煉合金鋼 .....	311
第五节	高頻无鉄芯感应电炉煉鋼 .....	312
第六节	同电弧炉的联合与混合煉鋼法 .....	321
第十章	有色合金熔煉 .....	324
第一节	中間合金的制备 .....	325
第二节	銅合金的熔煉 .....	327
第三节	鋁合金的熔煉 .....	345
第四节	鎂合金的熔煉 .....	352
第五节	巴氏合金及鋅合金的熔煉 .....	360
附录	.....	363
参考文献	.....	374

## 緒 論

鑄造合金及熔煉] 是研究各種鑄造合金的化學成分、金相組織、各種性能（機械性能、鑄造性能和特殊的物理化學性能）以及獲得這些合金熔煉過程的一門課程。

我國是生產和發展鑄造事業最早的国家之一，遠在 3500 多年前（殷朝），我國已能生產很多精美的青銅器。例如在河南安陽出土的殷朝祭器司母戊鼎，重達 875 公斤，長和高度都超過 1 米。當時我國不僅掌握了青銅的熔煉和鑄造技術，而且能夠根據鑄件不同的用途和性能要求，配制各種不同成分的青銅合金。譬如製造兵器的青銅含錫量高，以提高其硬度，而製造鐘和鼎用的青銅則含錫量較少。

我國鑄鐵的應用約在公元前 600 多年的周朝，到了戰國時代，鑄鐵的應用就更廣泛了。而在西歐，鑄鐵件的生產直到中世紀才開始。

在距今 2000 年前，有些地方便發明了煉鋼術，中國古代許多名貴的寶劍都是用鋼製成的，如 [干將]、[莫邪] 等寶劍是很負盛譽的。

古代的熔煉設備，在原理上和現代相同的，即有 [爐]、[囊]、[埵] 三種。[爐] 就是熔爐；[囊] 是一個大皮囊，是一種人工鼓風器；[埵] 是爐邊通入空氣的管子。爐子的種類很多，小的有坩堝爐。大的清朝有高達二丈四尺到三丈的 [高爐]，較小的稱為 [飯爐]，後者與現在的 [摠爐] 相同，以後又有 [三節爐]，一直延用到現在。

勤勞、勇敢、智慧的中國人民，不僅以指南車、印刷術和火藥等偉大發明著稱於世，在鑄造的發展史上，也寫下了光輝的一頁。只是近百年來，由於帝國主義的侵略和反动政府的統治，使

6

我国在鑄造方面未能得到进一步的发展。

解放后十一年来，随着机械工业的发展，鑄造生产在党的领导和全国鑄造工作者的努力下，取得了巨大的进步。在鑄造合金及熔炼方面，我們不但能够生产各种不同的鑄鉄，特别是球墨鑄鉄的制造和应用上所取得輝煌的成就。目前，球墨鑄鉄的强度达到  $42\sim 45$  公斤/毫米<sup>2</sup>，而用天容加鎂可使鎂的消耗量降低到0.10%左右。

1960年群众性的技术革新和技术革命运动开展以来，全国各地在熔炼方面取得了輝煌的成績。为了节约焦炭、提高鉄水温度和利用土鉄、土焦等，創造了各种多室冲天炉。为了满足我国社会主义建設对特种鋼日益增长的需要，混合炼鋼法有了很大的发展。例如用平炉——电炉混合炼鋼来制造发电机轉子用的鉻鉬鋼鑄錠和机車汽缸鑄件等。大鑄件的生产采用几个平炉或电炉的多炉熔炼和多包澆注方法，解决了单个設備能量不足的問題。

农业是国民經济的基础，随着农业的发展，农业机械化程度的提高，对鑄件，首先是鑄鉄件的要求将日益增加，因此，应该繼續研究“以鑄代鍛，以鉄代鋼”的新的工艺方法，和扩大球墨鑄鉄的使用范围，及进一步利用土鉄和土焦。在合金鋼鑄件上要結合我国的資源情况，寻求和創造新型合金，以建立我国完善的合金鋼系統，来满足工农业发展的需要。目前我們正处于技术飞跃发展的时代，对合金材料又提出了新的要求。因此合金熔炼工作者，必須进一步提高生产和理論知識水平，运用科学上和技术上的新成就，投身到群众性的技术革新和技术革命运动中去，为完成党交給我們的任务而努力。

# 第一篇 鑄造合金

## 第一章 合金的鑄造性能

鑄造性能是合金在鑄造上的一些工艺性能，它包括对合金的物理性能、化学性能及物理化学性能。这些性能对于获得健全鑄件有着重要的影响。

通常鑄造性能是指合金的流动性、收縮、应力及变形、吸气性和偏析等。

### 第一节 流动性

液体合金充滿鑄型的能力叫做流动性。合金流动性的好坏，不仅直接影响到鑄型是否能够充滿，是否能够获得形状完整、輪廓清晰的零件，而且对鑄件的其它质量也有很大的关系。經驗証明，流动性好的合金，得到的鑄件往往較为致密，分散性縮孔較少；此外，由于流动性好，就容易使合金中的气体和非金屬夹杂物分离出来。

在溫度、压力等条件不变的情况下，普通液体的流动性可以理解为粘度的倒数。但是作为合金的流动能力來說，流动性是取决于液体金屬在型內运动时控制它的凝固的各种物理化学条件。

流动性的本质和它对鑄件质量的影响是非常复杂的。它和其它任何鑄造性能一样，不仅取决于液体金屬的物理化学特性，同时也取决于澆注条件和鑄型特性(鑄型的結構，注入金屬的方法，型砂的成分和物理-机械性能等)。



## 一 影响合金流动性的因素

影响合金流动性的因素有三种：金属的化学成分和性能，铸型的特性和浇注条件。

我们在分析这些因素之一时，最好把其他两方面的因素固定不变。

### 1 液体金属的物理化学性能

一) 液体金属的组织 and 粘度的影响 粘度或内摩擦就是介质中一部分质点对另一部分质点作相对运动时所受到的阻力。

粘度本身并不妨碍铸型的填充。例如石膏浆和瀝青粘度很大，可是作出的石膏像轮廓却很清晰；而瀝青还是具有可动性，只要时间不受限制，仍然可以流到所需的地方。

这种时间的因素是很重要的，石膏浆和瀝青所以能流动和充满铸型，在于它们具有可流动的粘度的时间较长。但是合金就不一样了。合金在相当高的温度时，其粘度很小，例如硅铝明（一种铝硅合金）在  $750^{\circ}\text{C}$  时的粘度差不多和水一样。然而，由于这种金属的导热性很好，很快就要冷却，即使高温时流动性好，随着温度的降低，粘度骤然增加，在很短的时间内就失去可动性而不能流动。

因此在合金完全失去可动性之前，要争取时间流远一些，也就是说流动速度要快，要使流动速度高，则粘度就要小。

在浇注时，液体金属流保持着层流直到它的流速超过临界速度为止。临界速度由下式决定：

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{临界}} D}{\nu} \quad (1-1)$$

式中  $\text{Re}$ ——雷诺数；

$D$ ——金属流直径，厘米；

$\nu$ ——粘性率或运动粘度， $\text{厘米}^2/\text{秒}$ ；

$v_{\text{临界}}$ ——临界速度， $\text{厘米}/\text{秒}$ 。

由公式看出：粘性系数（粘度）愈大，临界速度也愈高。这

样，由于不致发生湍流，就可以减少空气与金属氧化物的卷入。从这一角度来看，提高金属的粘度是有好处的。但另一方面，粘度提高，使流速降低，对于型腔的充满，尤其是薄的部分，是不利的。同时也增加了气体和夹杂物分离与上浮的困难，削弱了结晶时的补缩作用，因而不易获得坚实的铸件。

粘度小的合金，对清除气体和非金属夹杂物的条件较好。杂质上浮的速度，可由斯托克斯 (Stoke) 的公式看出：

$$V = \frac{2}{9} g \cdot \frac{1}{\eta} \cdot r^2 (d_{\text{金属}} - d_{\text{夹杂物}}) \quad (1-2)$$

- 式中  $V$  —— 夹杂物上浮的速度，厘米/秒；
- $g$  —— 重力加速度；
- $\eta$  —— 动力粘度，克/厘米秒；
- $r$  —— 夹杂物半径，厘米；

$d_{\text{金属}}$  和  $d_{\text{夹杂物}}$  —— 金属和夹杂物的密度，克/厘米<sup>3</sup>。

合金的粘度和它的过热度 and 纯度有关，也可以说与合金的化学成分有关。提高过热温度就可以降低粘度，例如含 0.3% C 的碳钢的过热度由 25° 提高到 100°C，就可使动力粘度降低约 20%，就有利于夹杂物的上浮。在生产中，提高温度不仅可使钢的粘度大为降低，并且钢的组织对粘度也有很大的影响。

近代对合金结晶的研究指出，液体合金由于很接近于凝固温度，可能存在着类似固态结构的原子团。此外还存在着悬浮物及气体，因而使粘度增加。

铸铁的粘度和温度的关系如图 1-1 所示。

二) 表面张力的影响：

液体金属的表面张力可以影响铸型的充填和铸件的表面质

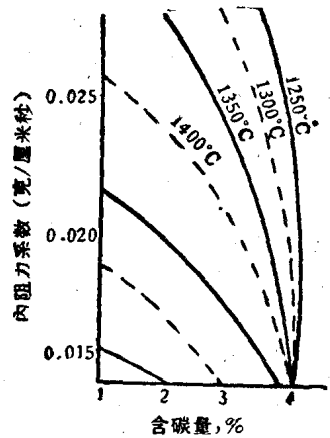


图1-1 液体铸铁的粘度和温度的关系。

量。流动性是随表面张力的增大而下降的，表面张力愈大，金属充填型腔愈难。

液体和固体接触面上，在表面张力作用下有两种情况：湿润和不湿润（图1-2）。

合金表面张力增大，不湿润铸型表面，所得铸件表面清洁。但用这样的液体金属充填铸型，由于表面张力的作用，液面好像有一层橡皮膜，有向下拉的趋势。因此，液体就受到一个局部压力：

$$P = \frac{2\sigma}{r} \cos \alpha \text{ 克/厘米}^2, \quad (1-3)$$

式中  $P$  ——附加压力；

$\sigma$  ——表面张力；

$r$  ——液体运动沟槽的半径；

$\alpha$  ——湿润角（金属和铸型形成的角度）。

要使此压力得到平衡，就要增加压力头。

即 
$$h \cdot d_{*} g = \frac{2\sigma}{r} \cos \alpha,$$

故 
$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r d_{*} g}, \quad (1-4)$$

式中  $h$  ——消耗之压力头；

$d_{*}$  ——液体金属的比重。

因此，要克服金属液在铸型中的表面张力，必须造成静压头等于或大于  $h$ 。从公式可见，表面张力  $\sigma$  和湿润角  $\alpha$  愈大，沟槽半径愈小，要求的压头愈大。

事实上，由于表面张力本身产生的阻碍作用并不很大，例如灰口铸铁的表面张力约为 980 达因/厘米，而湿润角  $\alpha$  在完全不湿润的情况下为  $180^\circ$ ，在半径为  $r$  的毛细管中，求液面高  $h$ 。由公式 (1-4) 可得：

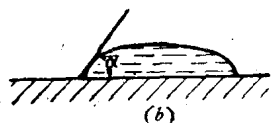
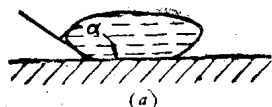


图1-2 液体金属与固体物湿润现象示意图：  
a—不湿润；b—湿润。

$$h \approx \frac{0.3}{r} \text{ 厘米。}$$

由此可知表面張力的影响仅仅是使压力略为增加，特别是在壁厚的地方表面張力的影响是不显著的。

但要指出的是：表面張力影响获得清晰的鑄件輪廓；湿润能帮助得到清晰的輪廓。表面張力愈小，湿润角愈小，鑄件形状愈清晰。鋼的  $\sigma$  和  $\alpha$  数值比鉄和有色金属为高，所以常使鑄件棱角不清。

一些金属和合金表面張力的大小列于表 1-1，以供参考。

表1-1 金属和合金的表面張力

材 料	温 度 (°C)	表 面 張 力 (达因/厘米)
水	20	81
錫	232	526
銅	1181	1103
灰鑄鉄(3.9%C)	1300	1150
可鍛鑄鉄(2.2%C)	1420	1500
鋼(0.3%C)	1520	1500

三) 表面薄膜的影响：表面薄膜对于鑄件质量的影响是非常有害的，它会降低金属液的流动性，尤其是不溶解的固体氧化膜影响更大。它常使鑄型的充满性恶化，使气体和非金属夹杂物难以从金属液中跑出，气泡受到型中金属压力的作用而破裂，包裹在鑄件中形成气孔和非金属夹杂物，降低鑄件的机械性能。

表面薄膜大部分是由氧化物和少量氮化物组成的。氧化物主要是在浇注时由于液体金属表面层被空气氧化而形成的；但其中也有一定数量的氧化物是在熔炼过程中生成的。

有些合金的表面薄膜是较厚实的、连续不断的、坚固的，并能显著地增大表面張力。实验指出：克服铝表面上的膜所需的压力约为克服铝表面張力所需压力的三倍（洁净的铝表面上的表面張力约为 300 达因/厘米，而复盖有  $Al_2O_3$  薄膜时为 840 达因/厘米）。

当加热和熔炼铝锭时， $Al_2O_3$  薄膜可能坚固到足以支持铝液的压力，使其好像处在这种薄膜做成的盒子里。利用这种特性，在浇注铝合金时，如将浇包靠近铸型，使薄膜保持不破裂，则金属流好像在薄膜管中流动，防止金属液带入气体和继续氧化。

有些合金，氧化物溶于其中，表面上不能生成坚固的薄膜，如铜、锡等。因此，它们在液态时的流动性，仅取决于表面张力和粘度。

为了减小氧化膜的危害作用，可使它破碎，从液体金属中将其排至冒口内。为此，可以选择适当的浇注速度和用涂料。这种涂料可在金属与铸型壁之间形成气膜，因而可以保证使薄膜上浮到液体表面。在型腔内造成还原性或非氧化性气氛，对于防止钢液形成氧化膜有良好的作用。

当浇注速度慢时，氧化膜变厚，金属的流动性降低。当浇注

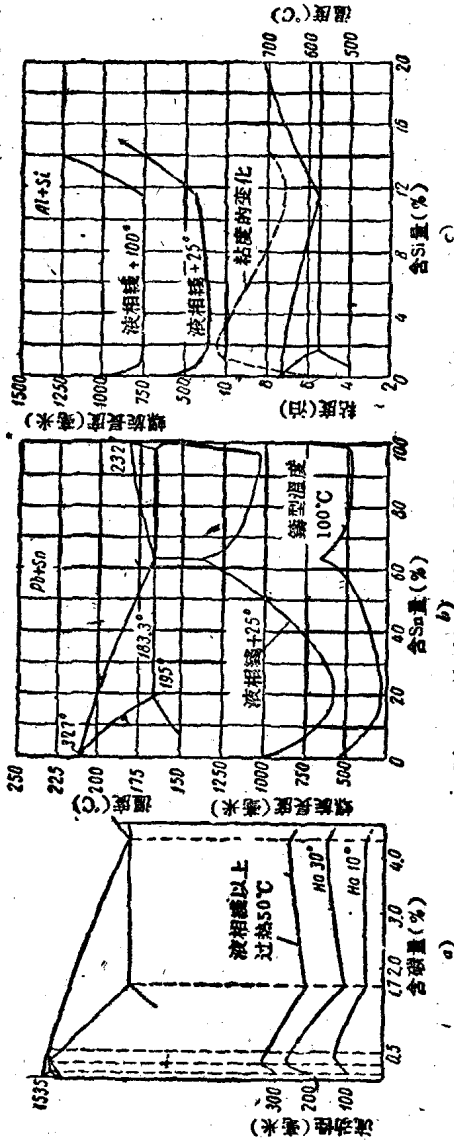


图1-3 流动性与粘度随着状态而变化：  
a—Fe-C合金；b—Pb-Sn合金；c—Al-Si合金。

速度大(如压鑄)时,致使金屬的氧化速度赶不上金屬液的結晶速度,則对流动性影响甚小。

四) 結晶特性的影响: 合金流动性与其在状态图上的位置有关。由平衡图可見,純金屬和共晶成分的合金在一固定溫度下結晶; 而形成固溶体的合金,則在一定的溫度間隔範圍結晶。

由实验得出的一般規律是: 随着結晶範圍的增加,流动性减小(图 1-3)。这一規律不仅在有色金屬內得到了証实, 并且也符合于 Fe-C 系。这是由于結晶时,析出固相的形状和数量不同所致。

当金屬液中有树枝状結晶时,增加流动阻力(图 1-4),流动性降低。結晶溫度間隔愈大的合金,愈易产生枝晶,所以流动性愈低。如果結晶是层状或在液

体合金不同区域中,毫无秩序地形成圓形或尺寸小的晶体,不产生連續的固相,則对流动性的影响甚小。

因为化合物結晶非常規則,对流动性阻力最小,所以它的流动性最好。共晶体和純金屬的晶体一般为球形,流动性仅次于化合物。其他成分的合金,多为树枝状結晶,所以随着結晶間隔的增大,流动性降低。鋁鎂合金流动性即是最典型的一个例子

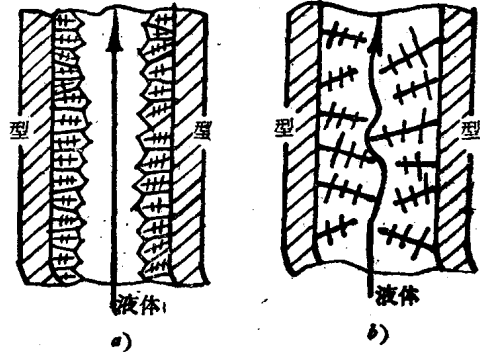


图1-4 凝固溫度間隔小(a)及間隔大(b)的結晶对流动性的影响。

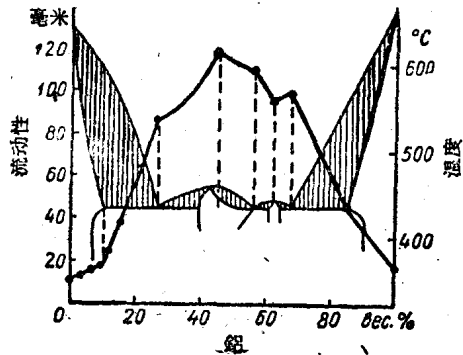


图1-5 鎂鋁合金的流动性。

(图1-5)。

#### 五) 化学成分的影响:

1) 加入合金元素使合金成分靠近共晶点, 或改变共晶点在平衡图中的位置, 均可能改善它的流动性。在鑄鉄中加入硅, 使共晶点向左移动, 降低共晶成分的含碳量, 流动性增加。

2) 加入合金中的元素, 若增加合金的粘度和表面張力时, 則降低流动性。例如鑄鉄变质处理时加入硅鈣后, 或在鑄鉄中加入硫, 粘度增加, 流动性降低。

加入合金中的元素, 能形成高熔点(难熔的)或低熔点(易熔的)組織成分时, 也能改善合金流动性。如鑄鉄中加入磷, 减小表面張力和粘度, 增加金屬对鑄型壁的湿润作用, 并且磷和鉄形成易熔共晶, 因此大大地提高鑄鉄的流动性。由于这样可以在鑄件上得到更加尖锐的棱角。因此, 对于薄的和艺术品的鑄件利用含磷高的鑄鉄(达1.0%)。

六) 金屬的密度、热容量、导热性、潜热的影响: 当其他条件相同时, 金屬的密度愈大, 流动性愈好。

金屬液的热容量和导热性是金屬液充滿鑄型的重要因素, 它对于金屬和鑄型之間热交换和金屬的冷却速度影响很大。热容量大而导热性小, 則金屬的冷却速度小, 金屬在鑄型內保持液态的时间长, 因而流动性好。

金屬結晶潜热愈大, 金屬液在鑄型中冷却愈慢, 所以流动性愈高。

七) 澆注温度的影响: 澆注温度升高, 則合金的热含量增加, 因而合金的流动性增加。这个因素的影响是如此之大, 以致澆注温度成了主要的变数, 改变澆注温度就能得到填满各种鑄型所需的合金流动性。

以鑄鉄來說, 可以认为澆注温度升高 $10^{\circ}\text{C}$ , 断面为50毫米<sup>2</sup>的螺旋长度增加4厘米。

八) 金屬中析出气体的影响: 澆入鑄型中的金屬, 析出气体,

在大的表面張力或堅固的表面薄膜作用下，這些析出的氣體，將聚集在金屬表面層以內而形成皮下氣孔。

從液體金屬中析出的氣泡。可能挾帶着懸浮夾雜物，因此對於流動性具有良好的影響。但當析出大量氣體時，金屬流則出現旋渦，使液體具有明顯的渦流，使鑄型充滿不良。

## 2 鑄型的主要物理化學性能和工藝特性的影響

一) 型砂的水分和煤粉含量的影響：隨着造型混合料的水分增加到 6%，炭粉含量增加到 7%，鑄鐵的流動性在開始時增加，然後又下降（圖 1-6）。

這是因為加入少量的水分和炭粉，在高溫時，金屬與型壁之間形成氣體隔層，減小流動阻力，所以流動性好。同樣，在鑄型壁上塗刷石墨粉，或在型砂混合料中加入重油（2% 以下），或運用分離劑時，均可提高流動性。但是如果造型混合料中水分

和產生氣體的物質很多時，則由於形成極多的蒸氣，不僅加速冷卻，而且增加了金屬在鑄型中流動的阻力，流動性反而下降。

二) 澆注系統的影響：金屬流動速度與壓力頭的關係為：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1-5)$$

式中  $v$  —— 金屬流動速度；

$h$  —— 壓力頭。

由此可知，當壓力頭增加時，金屬流速增大。在同樣的冷卻條件下，它流的距離就遠些。

試驗指出：直澆口高度增加 100 毫米，則斷面為 50 平方毫米的螺旋長度由 200 增加到 250 厘米。因此，在許多情況下，可以利用高壓頭使金屬更好的填滿鑄型，以減少由澆不到和冷隔而造成的廢品。

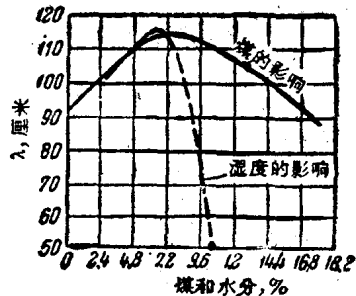


圖 1-6 造型混合料中水分和炭粉含量對低硅鑄鐵流動性的影響。



应用如压铸时所发生的高压，也可以显著地提高流动性。在这种情况下，当浇注温度很低，甚至在结晶范围内时，仍可保证很好地填满铸型而获得清晰的外形。

内浇口的断面对于流动性的影响，盖尔绍维奇实验指出：流动性（ $\lambda$ ）和内浇口断面积（ $F_n$ ）之间有下列关系：

$$\lambda = k \sqrt{F_n}, \quad (1-6)$$

式中  $k$  —— 比例系数。

三) 铸型材料和状态的影响：金属型与砂型比较（图 1-7）：  
由于金属型散热快，液体金属冷却快，所以流动性降低较多。但预热铸型可提高流动性。

干型与湿型比较：当浇注低温易熔合金时，干型流动性大，这是因为干型吸热少而散热慢的缘故。对高温难熔合金则相反，因为湿型对高温金属的温度下降影响小，且使水分蒸发形成气垫，金属不与型壁摩擦，因而流动性好。

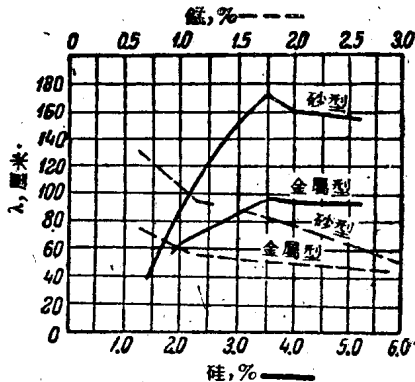


图1-7 各种硅、锰含量的铸铁，在砂型和金属型中浇注时的流动性比较。

## 二 流动性的计算和测定方法

影响流动性的因素很复杂，因此，到目前为止，流动性尚无法加以精确的计算，不过可以用下式定性的加以概括：

$$\lambda = v\tau = k \frac{Rd}{\alpha} \cdot \frac{C(t_{\text{液}} - t_0) + mL}{t_{\text{M}} - t_{\text{D}}} \quad (1-7)$$

式中  $\lambda$  —— 螺旋的长度（厘米）；

$v$  —— 金属在铸型内运动的平均速度（厘米/秒）；