

合金的熔煉与鑄造

(上 册)

王 义 虎 编
朱 承 兴

北 京 航 空 学 院

1964.8

目 录

結 論	1
第一章 熔融金属及合金的性质	6
第一节 熔融金属的基本性质	6
§ 1 熔融金属的粘滞性	6
§ 2 熔融金属的表面张力	11
第二节 金属与气体的作用	16
§ 1 概述	16
§ 2 金属中溶解气体	18
§ 3 气体自金属中析出	32
§ 4 金属中气体含量的测定	40
§ 5 金属与气体的化学作用	41
第二章 合金熔炼原理	46
第一节 概述	46
第二节 熔融金属与炉衬和坩埚材料的相互作用	47
第三节 金属与炉气间的相互作用	49
第四节 熔剂	51
第五节 合金精炼与除气的方案	63
第六节 变质处理	67
第七节 合金中各种元素的引入	71
第八节 合金成分的控制	88
第九节 制订熔炼温度规范的原则	89
第三章 合金熔炼工艺	91
第一节 轻合金的熔炼	91
§ 1 轻合金熔炼的	91
§ 2 铝合金的熔炼	92
§ 3 镁合金的熔炼	98
§ 4 在实验室条件下熔炼轻合金的特点	105
§ 5 熔炼轻合金的安全技术	107
第二节 钢及耐热合金的熔炼	108
§ 1 概述	108
§ 2 碱性三相电弧炉炼钢过程	110

§ 3	高频感应电炉炼钢的特点	121
§ 4	钢的真空熔炼和真空处理	123
§ 5	耐热合金熔炼的特点	126
第三节	钛合金和铝合金的熔炼	128
§ 1	钛合金的特点及其熔炼方案	128
§ 2	自耗电极真空电弧炉的构造	129
§ 3	电弧	131
§ 4	用自耗电极电弧炉熔炼钛合金	141
§ 5	用自耗电极电弧炉制得钛合金铸锭的缺陷及其防止方法	149
§ 6	用自耗电极电弧炉熔炼时的安全规程	151
§ 7	其他熔炼钛合金的方法	152
§ 8	铝合金的熔炼特点	156
第四章	合金的浇注及其与铸型的作用	158
第一节	概述	158
第二节	浇注过程中金属流的流动	159
第三节	熔融金属与铸型间的相互作用	165
第四节	熔融金属和合金的流动性	167
第五章	铸件的凝固及冷却	180
第一节	概述	180
第二节	金属和合金的结晶	180
第三节	铸件的凝固成型	189
第四节	铸件的收缩	201
第五节	热裂纹	216
第六节	铸造应力	221
第六章	铸锭的铸造	233
第一节	概述	233
第二节	锭模铸锭法	243
第三节	连续和半连续铸锭法	247
第四节	沉入铸锭法	281
第七章	砂型铸造法	285
第一节	概述	285
第二节	砂型铸造工艺的设计过程	285
第三节	造型材料	294

第四节	各种造型方法	3 08
第五节	浇注系統的設計	3 14
第六节	冒口和冷鉄的設計	3 24
第七节	浇注温度、浇注速度和冷却時間	3 30
第八节	鑄件的檢驗	3 34
第九节	砂型鑄造缺陷的分析及其防止方法	3 36
第八章	特种鑄造法	3 40
第一节	概述	3 40
第二节	金属型鑄造法	3 41
第三节	压鑄法	3 57
第四节	熔模精密鑄造法	3 65
第五节	离心鑄造法	3 76
第六节	其他特种鑄造法	3 86
	总结	4 01
	主要参考資料	4 04

緒論

一

本課是研究合金熔煉和鑄造理論和實際問題的工藝課程。熔煉合金的任務是將各種金屬（有時包括一部份非金屬元素）原材料熔合成滿足規定要求的液態合金。鑄造的任務是使制得的合金在一定的冷卻環境下凝固成具有規定形狀和性能的坯料或另件。

熔煉和鑄造兩工序在金属材料或另件的生產和研究中佔有極其重要的地位。除粉末冶金制品以外，金属材料不外乎鑄造材料和變形材料兩大類。冶金產品是純金屬或純元素。它們可以被拿來直接製造另件的很少。必須經過熔煉才能成為供鑄造或變形用的工業合金。在熔煉以後，變形合金被鑄造成各種形狀和大小的鑄錠，經過壓力加工成為型材、板材、帶材、棒材、棧材和鍛件。再經壓制、鉚焊、機械加工等工序後製成可供裝配的另件或部件。在熔煉以後，鑄造合金則直接被鑄成成型鑄件，根據需要情況進行或不進行加工即可供裝配使用。很多合金在上述加工過程中還需要施行熱處理。可見不論鑄造合金或變形合金在付諸使用以前都必須經過熔煉和鑄造這兩個工序。

在材料研究工作中，不論經過怎樣設計的新材料，也不論經過多么周密考慮之後，提出改進意見的現有材料和仿制現有材料都需要首先製備出材料的試樣來試驗其性能。不經過熔煉和鑄造過程又怎麼能夠製成試樣呢？尤其重要的是熔煉鑄造條件對金属材料的成份、組織和性能都有重要的影響。熔煉鑄造質量不高，就不能得到預期的合金，將使對材料的進一步研究無法進行。所以研究材料的第一步工作就是掌握它們的熔煉和鑄造工藝。況且製備材料過程中，熔煉和鑄造兩工序出現的工藝問題又極多，不解決，就無由討論材料性能的研究問題。對金属材料熔煉鑄造工藝問題的研究，對壓力加工工藝的研究，熱處理工藝、表面保護工藝的研究和對合金成份、組織、性能的研究一樣都屬於所謂材料研究工作。而熔煉鑄造問題的研究是研究材料必不可少的重要組成部份。由此可見：金属材料工作者必需具有必要的合金熔煉鑄造方面的理論與實際工藝知識。

二

遠從人類使用金屬的時候起，就開始了熔煉鑄造經驗的積累。人類最早使用的合金是青銅。青銅的熔點低（ $980 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ），化學活性較小，在掌握了鼓風技術後就可以熔煉。所以熔煉和鑄造的歷史就是從青銅開始的。

我國遠在公元前3000多年就已經掌握了熔煉和鑄造青銅的技術。是世界

上熔煉鑄造歷史最悠久的國家。到殷商時代（公元前1400~1200年），我國人民已經掌握了相當高的鑄造青銅技術。殷墟出土文物中的司母戊鼎重達1380斤，長和高超過1米，四周飾有精美的花紋。殷墟出土的文物表明：當時我國已有相當規模的鑄造青銅的手工業作坊。用陶制埴圯熔化，用木炭作燃料，鼓風加熱。同時發現有陶制的鑄型，當時稱為“范”。

春秋時代（公元前770~403年），不但銅合金產量增加，而且鑄造的形式和技術都別具風格。漢朝時（公元前206~8年），青銅的鑄造技術更加完善，而且應用了“失腊鑄造法”，就是後面將講到的熔煉精密鑄造法銅造青銅的藝術鑄件。

據考查，我國的冶鐵技術始於周代。到戰國時代更有了長足的進展。1953年熱河出土的鐵范（鑄鐵用的鑄型）現存中國歷史博物館內。不僅用鐵製造武器，還用鐵製造農具。我國熔煉和鑄造鑄鐵的技術約發明於距今2000多年以前。遠在戰國時代，就有很多富豪是冶鐵致富的。當時鐵的種類很多，不只是鑄鐵，而且發明了生鐵炒熟和煉鋼的技術。而歐洲的鑄鐵技術說是在11~12世紀才由中國輸入的。

到漢代時，規定鹽鐵國有，冶煉工人在10萬以上。唐代年產鐵1000萬斤，明代發展到9000萬斤以上。明代永曆年間鑄造的青銅巨鐘重達84000斤，上刻三部經文滿佈鐘的內外表面，字體工整清晰是世界上知名的珍品。現藏於北京大鐘寺內。

我們國家是最早使用金屬的國家。我們熔煉鑄造合金的歷史最久。我們的祖先曾經對人類文明做出過光輝的貢獻。但是兩千多年的封建統治，特別是解放前近百年三座大山壓在中國人民身上，使我們進步緩慢，近代工業技術一直處於極端落后的狀態。在合金熔煉和鑄造這一領域內，在解放前不但談不到科學和研究，就連一個像樣的鑄造車間也沒有。殘缺的修配廠中只有極原始的鑄造車間，生產着簡單的低質的鑄鐵和鑄銅配件。為廣大農業和人民生活服務的就是更原始的熔鑄技術。用了上千年的簡易熔鐵爐，用了幾百年的鑄鍋泥型一直改進很少。就更談不到輕合金、難熔耐熱合金、稀有金屬合金的熔煉和鑄造了。

自解放以後，在黨的英明領導下，全國人民才有可能迅速地改變這一窮二白的面貌。通過了兩個五年計劃的完成，特別是自大躍進以來，在建設社會主義總路線的光輝照耀下，在三面紅旗的指引下，我國人民發揮了沖天干劲，以奮發圖強自立更生的精神奠定了我國社會主義工業化的基礎。填補了

工业的空白点。大力开展了科学研究工作。近几年来，我們又在极困难的条件下，以惊人的速度和突出的成績出色地冲过了很多技术难关，使企图孤立我們，扼杀我們的国际反动派的阴谋破产。到目前为止不但在常用黑色金属的熔炼和鑄造方面有强大的生产能力，有些达到先进的水平，而且也有了各种有色金属合金及稀有金属合金的生产基地，加工工厂，生产着各种民用和国防需要的特种金属材料供应社会主义建設各方面的需要。我們初步建立了完整的工业体系。不仅如此，还建立了龐大的工程技术和科学研究队伍，有很多設備完善的研究机构。事实表明：在党和毛主席的领导下，依靠我們自己的力量，我們在科学技术上不但站稳了，而且正在大踏步前进。別人会做的我們能够会做，別人沒做过，或者沒做好，我們也将会做而且做好的。在不需太久的时间內，我們的熔炼鑄造科学技术也将隨着我国社会主义建設的其他方面一起攀上世界水平的高峰。为我們壮丽的共产主义事业做出应有的贡献。

三

当代的熔炼和鑄造早已不只是一种技术，而发展为一門科学。随航空工业的发展，对金属材料提出越来越多，越来越高的要求。不断地要求熔炼出新型的合金，不断地要求鑄造出新型的鑄件。也就要求不断地改进熔炼和鑄造方法。而每一种新熔炼鑄造法的改进又将促进了新材料的使用，从而促进了航空工业的发展。为解决这些問題就需要深入地研究熔炼鑄造过程中发生的一系列物理、化学、物理化学变化。从而促使熔炼鑄造工艺应用当代有关学科的最新成果。同时，也为有关学科提出了新的研究課題。

熔炼鑄造是一門应用科学，它的理論基础建立在一系列基础学科之上。它的基础学科是：物理学、化学、物理化学、金属学、金属物理学、傳热学、流体力学，近年又扩展到数学、电工学等等，此外，它还直接地与冶金学、非金属材料学、热工測量技术、真空技术等等相联系在一起。

可見和其他学科一样，合金的熔炼与鑄造与生产之間，与其他学科之間都存在着互相促进，又互相限制的辯証关系。

四

在金属材料专业教学中安排本課的目的是：使同学掌握必备的有关合金熔炼与鑄造方面基本工艺和基本理論知識。一方面能初步具备分析和解决現有材料熔炼鑄造工艺問題的能力；另一方面，能初步具备解决新材料研究中有关合金熔炼和鑄造工艺問題，創造使用性能良好的新型金属材料的能力。

为此，要求在本課的学习中达到下列两点要求：

1. 掌握最基本的熔炼鑄造方法，了解必要的新型熔炼鑄造方法。
2. 掌握最基本理論的本質，会結合具体情况活学活用。

熔炼鑄造方法虽然很多，但是其中有最基本的方法。其他方法与基本方法之間的区别在于具体条件的改变，熟悉掌握基本方法以后，也就比较容易理解和记忆一般方法。

合金的种类很多，本課将以輕合金为主要研究对象。以輕合金为基础来比較其他合金的特点。

在熔炼部份中将以輕合金在坩埚炉中的熔炼为中心内容。在鑄造部份中将以輕合金的連續鑄造、砂型和金屬型鑄造为最主要，最基本的内容。其他方法部份为輔助内容。有关基本原理則是为具体方法服务的。

不同合金的熔炼方法之間有很大差别，但是对合金质量的基本要求是一致的。为掌握熔炼工艺的最基本原理和工艺，深入地掌握熔炼过程的实质問題和一般規律性很重要，将一般規律与具体情况相結合就更为重要。鑄錠和成型鑄件的鑄造方法更多，但是各种方法之間也都有其內在的联系。各种工艺因素对鑄造产品质量的影响也有共同的規律性，而在各种具体鑄造条件下又有其特殊性。所以先从最基本的原理和最基本的熔炼鑄造方法入手掌握住一般規律，在具体熔炼鑄造条件下，再运用基本規律来理解个别的工艺問題，就能对具体問題領会得更透彻一些，对基本規律掌握得更灵活一些。

在学习过程中灵活而有联系地处理基本理論与具体工艺之間的关系，分析实际問題（如思考題、實驗中发生的現象）时，能結合实际情况灵活运用基本知識就是在学习过程中的所謂活学活用。須知在学习阶段的活学活用是工作中活学活用的基础。

学得活的关键是将原理与工艺，理論和实际紧密联系，联系的方法就是細緻地归納、对比和分析。

五

本課将研究的問題如下：

一 熔融金屬与合金的性質。

二 熔炼合金的原理。

三 各种合金的熔炼工艺。

以上是本課的熔炼部份。

四 合金的澆注及其与鑄型的作用。

五鑄件的凝固和冷却。

六鑄錠的鑄造方法。

七砂型鑄造法。

八特种鑄造法。

以上是本課的鑄造部份。

第一章 熔融金属及合金的性质

第一节 熔融金属的基本性质

在整个熔炼和鑄造过程中，首先是加热和熔化金属材料，以获得熔融金属合金。为了很好地掌握熔炼过程，获得良好的熔融金属，也为了得到凝固后的优质鑄件，必需了解熔融金属的基本性质。除去一般基本的物理性质外，此处将就熔融金属的粘滞性、表面张力及金属与气体的作用进行讨论。

§1. 熔融金属的粘滞性

一概述

在实际液体中，由于液体分子之间有作用力，所以在层流运动情况下，各层液体之间就有摩擦阻力，称为内摩擦。它妨碍着液体的流动。此种内摩擦阻力是熔融金属的物理特性之一，称为粘滞性（粘性、粘度）。按物理学的观点，金属的流动性（流度）就是粘度的倒数。

由于液体有粘性，所以使各液层的流动速度不一样，其速度分布如图 1 所示。

两液层之间的相互作用力，由牛顿液体内摩擦定律规定，即各液层作相对移动时所产生的摩擦力(F)与各层接触面积(S)及各层相对移动速度

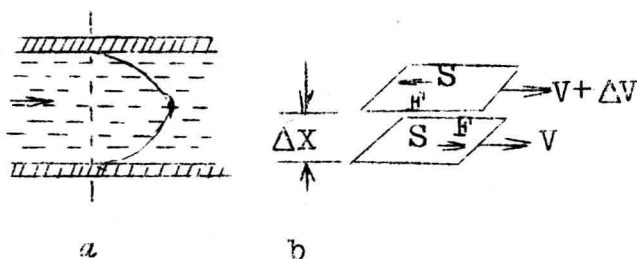


图 1 层流时的流速分佈(a)和粘滞力(b)

$(\frac{\Delta V}{\Delta X}$ 或 $\frac{dV}{dX}$) 成正比，并与液体性质有关。以公式表示为：

$$F = \eta S \frac{dV}{dX}$$

由此
$$\eta = \frac{F}{S \frac{dV}{dX}} \left(\frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} \text{ 或 } \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}} \right)。$$

η 即是代表液体性质的动力粘度系数（绝对粘度系数）。在物理学系统中，以“泊 (Poise)”为度量单位。有时取泊之百分之一为“厘泊”。

把动力粘度除以液体的密度(ρ)即是运动粘度，以 ν 表示：

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\text{厘米}^2}{\text{秒}} \right)$$

运动粘度以“斯(Stokes)”或“厘斯”为度量单位。

测定熔融金属的粘度，要比测定一般液体复杂些。因为要在较高温度下进行，同时熔融金属的氧化及可能出现的固相质点，都会影响测定结果的准确性。

常用的方法有旋转圆筒法及扭摆圆筒法等。

由于采用的测定方法不同和具体条件不同，所以各种金属现有的粘度数值也有差异。如在700°C时，铝的粘度数值就有384、289、1.11厘泊等几种。下表1给出了部分数据。

各种金属的动力粘度和运动粘度 表1

材料	温度(°C)	动力粘度(厘泊)	运动粘度(厘斯)
水	20	1.05	1.05
水 银	不太高於熔点	2.10	0.155
铁	"	40	0.556
0.3%C鋼	1535	2.85	0.407
	1555	2.60	0.375
	1610	2.30	0.339
灰鑄鉄(4%C)	1250	2.10	0.317
銅	1100	3.3	0.41

三影响粘度的因素

对各种純金属而言，它們本身粘度的大小与其原子体积的大小有关。熔融金属原子体积較大的，則其粘度就較低。有人指出：許多金属在熔点附近的液态时，其运动粘度与原子体积(V)成反比。

$$\nu = K \frac{1}{V}$$

式中K为常数，在4~5之間。許多金属运动粘度的計算值与試驗值是相符合的。原因是，熔融金属之原子与相邻原子发生相对移动时，它們相互的摩擦阻力随二者原子中心距离之增加而减小。所以原子体积大者，其中心距离也远些，因而摩擦阻力小，粘度就小。

另一个关系是，某金属的绝对熵較大时，运动粘度就小些。因为绝对熵的大小，反映金属原子排列有序化的程度，当绝对熵很大时，則原子排列的规律性很差(无序程度大)。这样就使原子間的連系和相互作用减小，粘度也就小。

合

通过金属的原子体积和绝对熵，就可以比较各种金属的粘度大小。但对某一种金属或合金的粘度，还将取决于温度、杂质及合金元素。

1. 温度：总的影响是温度增加，则粘度减小。这已由无数实验结果所证实。由于原子热运动加强使原子之间的结合力削弱，故使粘度下降。

在一般情况下（见图2），如果 T_0 和 η_0 代表刚熔化后的温度和粘度，而以 T 和 η 表示过热后的温度和粘度，则几乎对所有的物质而言， $\frac{\eta}{\eta_0}$ 随 $\frac{T}{T_0}$ 而变化的特点都相同。

因而已知刚熔化后的温度和粘度数值，就能得知某过热情况下的粘度数值。

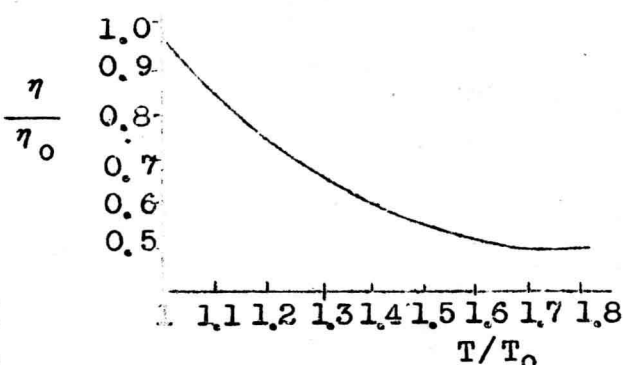


图2 动力粘度与温度的关系

2. 杂质：在熔融金属中悬浮有外来的金属及非金属夹杂物时，一般使其粘度增加。因为这些微粒的存在，阻碍了流动。若夹杂物所佔体积为量不多，并且呈球状时，可以用公式计算出液体的粘度。

$$\eta = \eta_0 (1 + 2.5\phi)$$

式中 η_0 —— 纯净液体的粘度；

η —— 含有夹杂物的液体的粘度；

ϕ —— 液体中夹杂物所佔体积百分数。

夹杂物的形状与液体粘度的关系很大。若夹杂物不是园球形而是其他多角形等，则公式中的系数2.5应代之以另一较大数值。

另外，若夹杂物呈液态时，有时却能减小熔融金属的粘度。如在酸性炉熔炼钢时，钢水中可能夹杂有易熔之硅酸盐熔渣，使钢水粘度降低，而流动性良好。

3. 合金元素：在常遇到的合金中，粘度与各系合金状态图有一定的关系。金属的合金化能显著改变其粘度大小。对此问题的研究还不够彻底，尚有許多未予解决的问题。

比较清楚的是： a 在具有形成稳定化合物的合金系中，在该化合物成分处有粘度的最大值。如 $Mg-Sn$ 系状态图（见图3）中，可以看到有化合物 Mg_2Sn （熔点 $778^\circ C$ ），该处出现了粘度最大值。但也有不符合的情况。

b 在具有共晶成分的合金系中，於共晶成分处，出现粘度最小值。如在 $Al-$

C_u 、 $Al-Si$ 、 $Mg-Sn$ 等系合金状态图（见图 4）上即是。

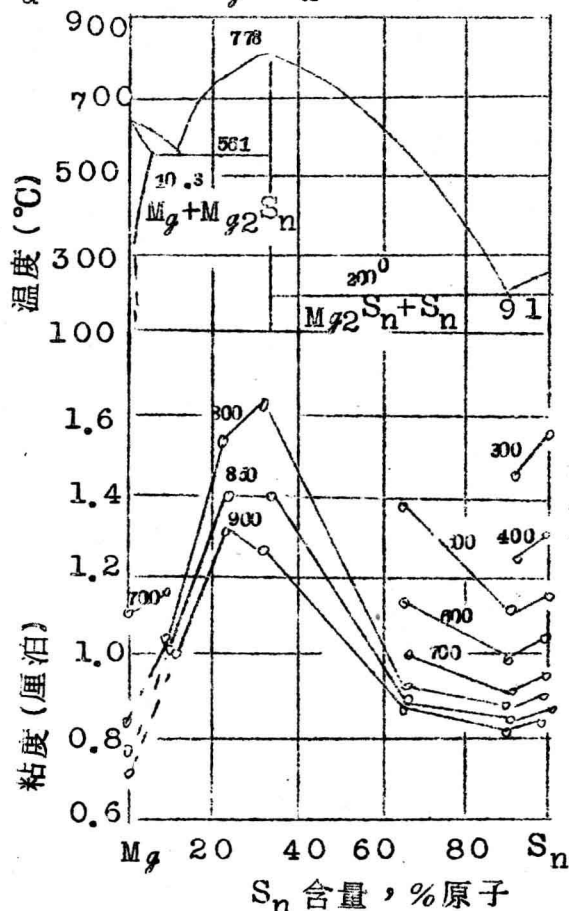


图 3 $Mg-Sn$ 系合金之成份与粘度

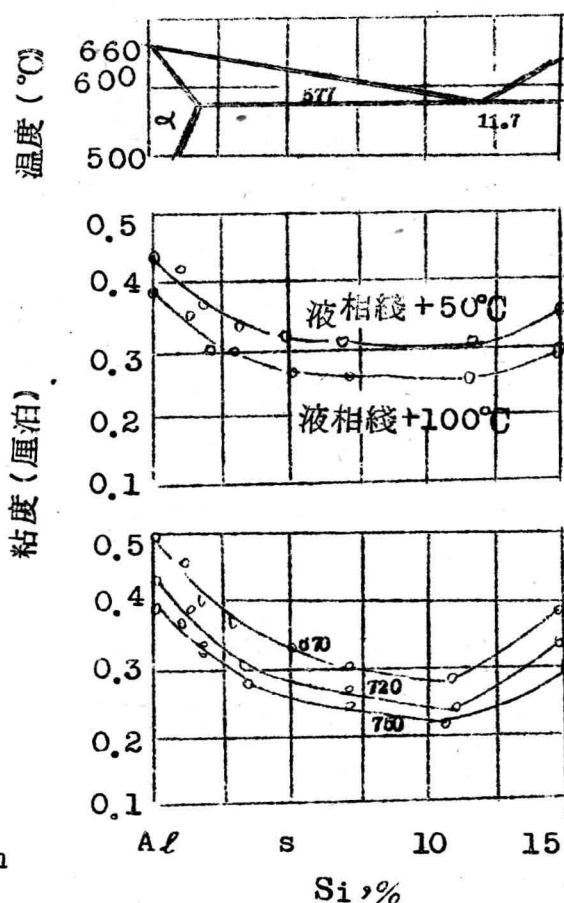


图 4 $Al-Si$ 合金之成份与粘度

三粘度在熔鑄中的意义

粘度能够影响金属液的流动性；在熔炼时影响熔液中合金元素扩散及均匀分布；影响除气及排除悬浮夹杂物的效果；影响浇注系统的設計安置及鑄型充填效果。在鑄件凝固过程中，对排除气体、熔渣及夹杂物，对正凝固部分的补缩等等都有极大影响。

金属液中的夹杂物，按其比重之大小，可以上浮或下沉。如果夹杂物的质点很小，则上浮或下沉的速度很慢，能长时间悬浮於金属液中。

如图 5 所示，在熔融金属中有悬浮的小夹杂物。設該夹杂物为园球形，它本身受重力 W 作用，並受到熔液之浮力 T 。若重力大於浮力，則夹

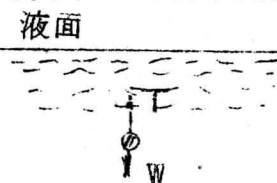


图 5 悬浮夹杂的浮沉

杂物下沉，否則就上浮。今設夹杂物之比重小於金屬的比重，故夹杂物受到一上升的作用力：

$$F_1 = \Gamma - W = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g$$

式中 F_1 —— 夹杂物受到上升的作用力；

r —— 夹杂物的半徑；

ρ_1 —— 熔融金屬的密度；

ρ_2 —— 夹杂物的密度；

g —— 重力加速度。

根据斯托克斯公式，小球在粘滯体中运动时所受到的阻力如下：

$$F_2 = 6 \pi \eta r v$$

式中 F_2 —— 夹杂物（小球）运动时受到的阻力；

η —— 熔融金屬的粘度；

v —— 夹杂物运动的速度。

夹杂物上浮受到阻力，如果上升力等於阻力，故上浮是等速度运动。

$$F_1 = F_2 = 6 \pi \eta r v = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g$$

$$\therefore v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\eta} g \text{ (厘米/秒)}$$

这就是夹杂物在熔融金屬中上浮速度的計算公式，也可称为斯托克斯公式。这个公式仅适用于半徑小於 0.1 毫米以下的质点。由公式可知，1. 夹杂物质点的浮沉，取決於 v 值的 + 或 -， $\rho_1 > \rho_2$ 則 v 为 +，质点就上浮； $\rho_1 < \rho_2$ 則 v 为 -，质点就下沉。2 浮沉速度 v 值与 $(\rho_1 - \rho_2)$ 绝对值及质点半徑 r 的平方成正比；而与 η 成反比。

在熔煉金屬时的精煉操作，就是設法使很小的夹杂物质点以較快速度上浮到金屬液表面或沉降到熔池底部。升高熔融金屬的溫度，能降低粘度 η ，則鋼中的渣和鋁合金中的氧化物夹杂都比較容易浮出；而鎂合金的精煉熔剂（吸附了氧化夹杂物）就易於下沉。增大质点半徑非常有利於浮沉的加速。最后利用浮选原理也可以加速夹杂物的排除。这些問題在下面討論。

另外，假如熔融金屬及夹杂物並非在重力作用下，而在其他力場如离心力作用下的时候，上述公式应改写如下：

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\eta} R \omega^2$$

式中 R_x —— 夹杂物质点距旋轉中心的距离；

ω —— 旋轉角速度。

$R_x \omega^2$ 即是旋轉时质点夹杂物在 R_x 距离上的离心加速度。

当夹杂物质点的半径比较大，超过 0.1 毫米时，其浮沉速度就比较大了，用下式来计算：

$$V = \sqrt{\frac{8r(\rho_1 - \rho_2)g}{3K\eta}}$$

式中 K —— 质点的形状系数。

当熔融金属中的夹杂物未予排除，而呈悬浮状态时，则使得粘度增加。

§2 熔融金属的表面张力

一概述

在熔鑄过程中，熔融金属总与外界存在有接触面。如此即发生界面现象。

液态金属中的原子間有相互的吸引力。在容器内部的原子，受到各方面的吸引力大小都一样，故作用的合力

$R=0$ （见图 6）。但在表面层的原子

只受到下层液体的吸引，使合力 $R>0$

，因此，在液体表面有一厚度相当原子半径的薄层，好像以附加压力 P 压缩液体内部，这个力有将表层质点拉

入液面内部的倾向。但在液体内部的

原子間相互作用很大，足以抵抗这种附加压力，结果表面好像弹性膜一样，受到一定的张力，即表面张力；这是物质在液体状态下一个很重要的特征。

表面张力不只取决于液体性质，也同与其相接触的物质（气、液、固相）的性质有关。一般表面张力系指液体与其蒸汽（或空气）的接触面的界面张力。

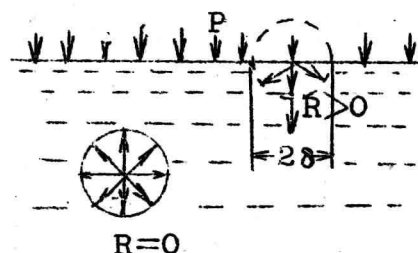
表面张力的大小，可视为在液体表面层每单位长度上能承受的拉伸力大小，如图 7。

$$F = \sigma \ell$$

$$\sigma = \frac{F}{\ell}$$

式中 ℓ —— 表面承拉长度；

F —— 拉伸力；



$R=0$

图 6 表面张力作用示意图

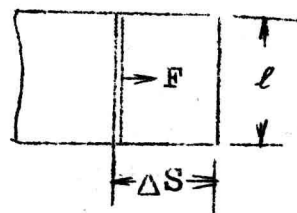


图 7 表面张力

σ —— 表面張力（系数），
度量单位为达因/厘米。

或者 $\Delta W = F \cdot \Delta S = \sigma \ell \Delta S = \sigma \Delta A$

$$\therefore \sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A}$$

式中 ΔS —— 拉伸距离；

ΔA —— 表面积增量；

ΔW —— 拉伸出面积 ΔA 所消耗的功。

这样，表面張力的能量概念，是每增加单位面积所消耗的功，以尔格/厘米²度量。由於这种增加的能量仍能释放出重新作功，在热力学中称为自由能。某一系统的表面自由能总是自动地力求减小，如许多同一物质的小液滴力图聚集变成大的；液体自由表面总是要收缩呈园球形等即是。

在液体的弯曲面下有附加的压力，这一关系可以用拉普拉斯公式表示：

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中 P —— 液体弯曲面下的附加压力（达因/厘米²）；

$R_1 R_2$ —— 液体弯曲面上两互相垂直弧线的曲率半径；

σ —— 液体的表面張力。

若液面弯曲成球形， $R_1 = R_2 = R$ ，

則
$$P = \frac{2\sigma}{R}。$$

若液面弯曲成园柱形， $R_1 = 0$ 、 $R_2 = \infty$ ，

則
$$P = \frac{\sigma}{R}。$$

半径愈小的弯曲面，附加压力愈大。附加压力的方向是由凸面到凹入的一面。

表面張力的测定方法也很多。对熔融金属则常用悬滴法、滴落法及气泡内最大压力法。

三影响表面張力的因素

各种純金属表面張力的大小，也可以按各金属原子体积大小及绝对熵这二因素来判断。同样，原子体积较大及绝对熵较大的金属，其表面張力就小些。

对同一种金属及合金而言，影响其表面張力的因素如下：

1. 温度：一般，温度升高，液体体积膨胀，原子間距离即增加，削弱其結合力，結果表面張力减小。这可以用温度系数来表示：

$$\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{Mg} = -0.34 \text{ 尔格/厘米}^2 \cdot \text{度}, \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{Zn} = -0.25 \text{ 尔格/厘米}^2 \cdot \text{度},$$

$\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{Al} = -0.35 \text{ 尔格/厘米}^2 \cdot \text{度}$ 。在一定温度范围内，表面張力与温度呈直线变化；温度系数为負值，說明随温度之升高，表面張力数值下降。但也有有的金属，如銅及鑄鉄等，温度系数为正值。

2 杂质及合金元素：在熔融金属中若溶有微量元素时，若該元素属活性物质，則它将富集於金属液表面上，也就是因吸附作用，使得熔融金属的表面張力降低。若所含元素为非活性物质，則将使熔融金属的表面張力增加。对熔融金属而言，活性物质系指其原子体积較大者。这样，当其聚集在金属表面时，就使表层的平均原子体积增加，因为降低了表面自由能，这是一自发过程。如对鋁、鎂及鋅而言（它們原子体积分別为11.40、15.7及9.48 厘米³/克原子），錫（17.1）、銻（18.9）、鉛（19.50）及鉍（20.91）等就是活性物质，銅（7.94）及鉄（8.2）等就是非活性物质。图8表示出了鋁中含有杂质元素时，表面張力的变化。活性物质使表面張力急剧降低；非

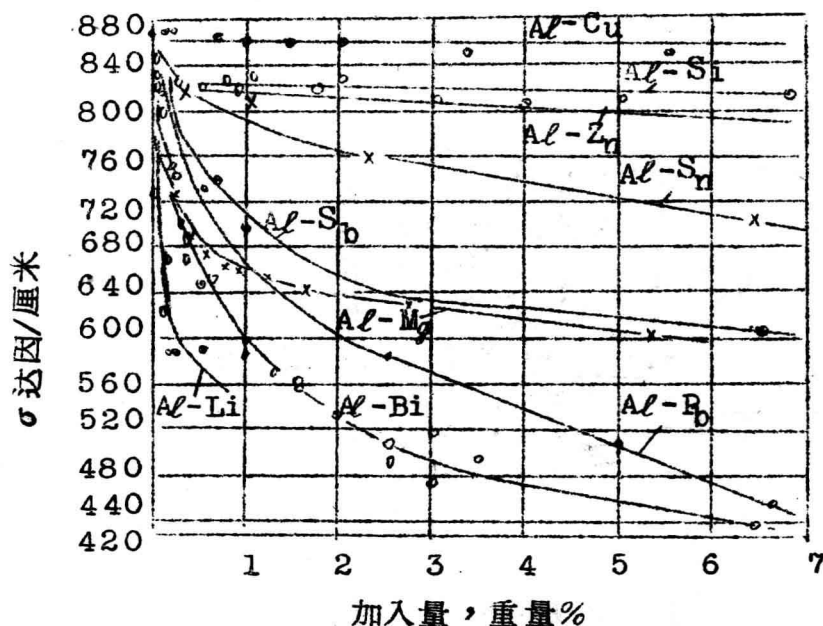


图8 各种二元鋁合金成份和表面張力的关系

合⑥