

現代鑄工補充參考資料

(第一輯)

鑄鐵的鑄造性能及鑄鐵爐操作

陳 農 編譯

王樹良 校閱

大東書局出版

現代鑄工補充參考資料

第一輯

鑄鐵的鑄造性能及鑄鐵爐操作

陳 農 編 譯
王 樹 良 校 閱

大東書局出版

現代鑄工補充參考資料 (第一輯) 內容提要

本書共分三章，第一章專論鑄鐵的鑄造特性如流動性、收縮性、縮孔形成性、變形及裂紋、氣體含量等，對上述各項特性，均詳加討論。第二章論及提高熔鐵溫度的方法，其中主要介紹熱風爐、加氧送風及熔鐵吹氣法，並加以比較研究。最後一章評論熔鐵爐的理論研究，對熔鐵爐的工作原理加以說明，對改進熔鐵爐操作有很大幫助。本書為工廠技術人員及高職學生的參考資料。

書號：5102

現代鑄工補充參考資料 (第一輯)

編譯者	陳	農
校閱者	王	樹良
出版者	大東書局	
	上海福州路310號	
印刷者	大東印刷廠	
	上海安慶路268弄	

25開 63印刷頁 90,000字 定價8,500元

一九五三年八月初版

(0001—3000)

上海市書刊出版業營業許可證出 043 號

上海市書刊發行業營業許可證發 061 號

目 錄

一 鑄鐵的鑄造性能	1
1. 流動性	1
2. 收縮性	10
3. 收縮孔及縮鬆	19
4. 鑄件的內部應力、變形及裂縫	30
5. 氣體與非金屬雜質的產生原因	49
二 製造高強度鑄鐵時提高熔鐵溫度的方法	61
1. 熱風爐法	61
2. 加氧送風法	81
3. 熔鐵吹煉法	90
4. 上述三種方法的比較	97
三 熔鐵爐操作的主要原理	100
1. 底炭層的燃燒情形	100
2. 熔鐵爐內的過剩空氣	113
3. 熔化帶及底炭	115
4. 熔鐵爐的熔化速率	115
5. 爐氣組成	116
6. 爐氣組成與溫度的關係	117
7. 熔鐵爐的送風量	118

一 鑄鐵的鑄造性能

本章專論鑄鐵在鑄造時的特性，其中包括流動性、收縮性、縮孔形成性、內部應力、變形及碎裂的可能性等，此外更論及非金屬雜質及氣體之含入等，鑄鐵的鑄造性能，非常優越，而其機械性能，亦不太差。

1. 流動性

根據最近的研究，流動性的提高，目的並非單純的。除了充滿鑄模空腔及使鑄件的外形精確外，更能使氣體容易排出，補縮作用更為充份，防止發生氣泡、縮孔、熱裂等現象。

熔鐵的流動性，由下述各項因素所決定：是即熔融物的粘性、表面張力及表面氧化物的強度。除上述鑄鐵本身的特性外，試驗流動性所用的鑄模，及熔鐵在鑄模中的熱傳導率，也有關係。

測定流動性的方法，基本上可分為三種方式：1. 澆鑄各部份截面積相同的細鐵桿或鐵條，測定其長度。2. 澆鑄形狀複雜的骨架狀物，如U字形或山字形物，此時注入熔鐵急速改變方向，損失動能，以致不能完全注滿鑄模，測定時可測量改變方向後的長度，長度愈長，流動

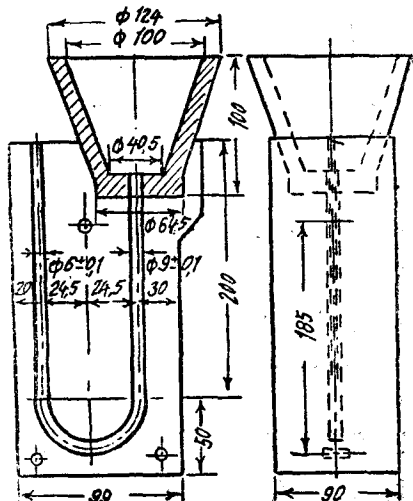


圖 1.1 測定流動性所用試棒

性愈高。3. 澆鑄逐漸改變截面積的鑄件如楔片，測定熔鐵侵入窄隘楔片前端的程度。“現代鑄工”^①上册附錄內所述的螺旋測定法，屬於第一種方式；圖 1.1 所示 Ю. А. 納赫德齊氏及 А. М. 薩馬林氏測定法，屬於第二種方式；圖 1.2 所示的圓球試驗法，即係第三種方式的實例，

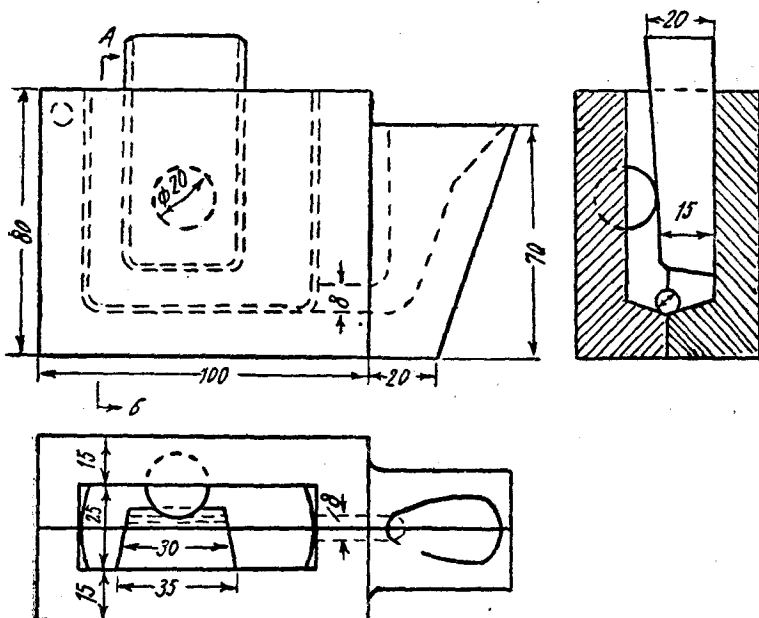


圖 1.2 圓球試驗法測定流動性所用的鐵模

此時鑄模內設有一直徑 20 公厘的球，球與鐵模內鐵片接觸處的空間成為楔狀，注入熔鐵，不能完全充滿此空間，而流動性的高低，即可憑此項未充滿圓孔的直徑而測定。事實上第一與第二種方式的基本原理仍屬相同，因此嚴格區分時，只有第一與第三兩種方式而已。

根據 Ю. А. 納赫德齊氏的研究，熔鐵的流動性，可用下述公式計算：

① “現代鑄工”陳農編著，大東書局出版。

$$\lambda = v\tau = k_1 v \frac{Rd}{\alpha} \frac{c(t_M - t_0) + mL}{t_M - t_\phi} = K \frac{Rd}{\alpha} \frac{c(t_M - t_0) + mL}{t_M - t_\phi} \quad (1.1)$$

上述公式內 v = 熔鐵在鑄模內的平均流動速度, 公分/秒

τ = 經過時間的秒數

R = 鑄件或試片的計算厚度, 公分

d = 熔鐵的密度, 克/立方公分

α = 導熱係數, 卡/平方公分·秒·°C

C = 熔鐵的比熱, 卡/克·°C

$t_M - t_0$ = 過熱溫度 (與流動性為零時的溫度比較)

m = 流動性為零時熔鐵內固態部份的含率

L = 熔融潛熱, 卡/克

$t_M - t_\phi$ = 熔鐵與鑄模間溫度之差

K 及 k_1 均係常數

根據上式可知熔鐵的流動速度 v 愈大, 流動性 (λ) 亦愈高, 與流動性為零的熔鐵相較而熔鐵所含熱量, 即 $dc(t_M - t_0) + dmL$ 愈大時, 流動性愈高; 試片的計算厚度 R 愈大, 熔鐵在鑄模中的熱量損失 $\alpha(t_M - t_\phi)$ 愈小, 流動性必愈高, 事實上決定流動性的主要因素為熔鐵冷却至凝固點前的運動距離, 在開始凝固至完全凝固間的一段時間內, 流動距離甚短, 尤以澆注溫度甚高時為然。

根據公式 (1.1) 可知決定流動性的基本因素為熔鐵與鑄模間的熱量傳導, 其他因素如熔鐵的物理性質、粘性及表面張力等影響較小。

熔鐵的運動粘性 ν 與其他金屬相似, 大致與水相同, 不像熔渣與水相差甚大。

粘 性 係 數	水	熔 鐵	熔 渣
η ·克/公分·秒	20°C 0.0102	1200—1400°C 0.02—0.04	1300—1400°C 0.5—30

而熔鐵的運動粘性($\nu = \frac{\eta}{d}$)比水還小:

	η , 克/公分·秒	d , 克/立方公分	$\nu = \frac{\eta}{d}$, 平方公分·秒
水(20°C)	0.0102	1.0	0.0102
熔鐵(1200—1400°C)	0.02—0.04	6.9—6.3	0.003—0.006

上述現象能增加熔鐵的限界蘭諾氏值 (Reynold's number, Re)

$$Re = \frac{VD}{\nu} = 4R \frac{V}{\nu} \quad (1.2)$$

上式內 V 為熔鐵的平均流速, ν 為熔鐵的運動粘性係數, D 為熔鐵通路的直徑, R 則為流體力學上的通路半徑, $D=4R$ 。

Re 增加後, 熔鐵在運動中的能量損失率便能減少; 減少粘性係數 ($\eta \cdot \nu$), 便能增加 Re 值及流動性。 Re 值大時, 層流現象^②的極限速度便可增加, 在實際工作中, 熔鐵並不能作層流運動, 全部為亂流運動。^③

據一般研究, Re 的實際值小於極限 Re 值時, 液體始能作層流運動, 以溫度為 1200—1400°C 之熔鐵而論, 極限 Re 值約為 2300, 因此最大層流速度 $V_{kp} = \frac{Re_{kp}}{4R} \nu = \frac{2300}{4R} (0.003—0.006) = \left(\frac{1.7}{R} — \frac{3.4}{R} \right)$ 公分/秒。 以厚度為 2.5 公厘之鑄件而論, 雖 R 已減少至最低限度, V_{kp} 之值僅 13.5—27.0 公分/秒而已, 此值比實際流速小去不少。由此可知熔鐵之流動, 完全為亂流, 在此種情況下, 粘性係數對流動性的影響甚小。

影響粘性係數之因素甚多, 其中以溫度及熔鐵之化學成份最為重要。 據文獻所記, 溫度及含炭量增加時, 粘性係數便減低, 而灰鐵的減低率比白口鐵大, 因熔融之灰鐵中有大量不能用顯微鏡檢出的小石墨結晶, 溫度增加後, 石墨溶化, 粘性因而大減。 根據同樣原理, 可知加

② (Laminar flow) ③ (Turbulent flow)

製鑄鐵在投入砂鐵後粘性大增，而等待相當時間之後，石墨析出或溶化，粘性反而減少。

關於各種化學元素對熔鐵粘性的影響，研究者甚少，根據已有文獻，大致如下：熔鐵的過熱程度相同時，砂、錳及磷能減低粘性，圖 1.3 a 示此種情況。若溫度保持一定，則上述各項元素含量愈大，粘性的下降

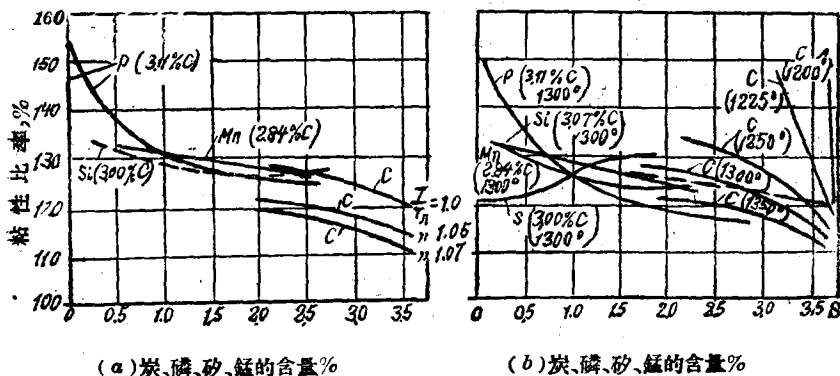


圖 1.3 炭、砂、磷及錳對流動性的影響

量急劇增加，此時固態點亦有下降，等於預熱度之增加。硫能增加粘溫性，尤以成為硫化錳時為然。

熔鐵的表面張力，與溫度及化學成份均有關係，溫度愈高，表面張力愈大，減低炭量能增加熔化溫度及表面張力，減低磷量則減低表面張力。炭與磷均能影響熔鐵的流動性。

溫度 °C	1150	1200	1225	1205	1300	1310	1350
表面張力(達因/公分)							
灰鐵(C3.3%. Si2.76%)	—	826	846	880	—	926	P4.49%
表面張力(達因/公分)							
高磷鐵(C3.52%. Si0.65%)	1054	1071	—	1088	1105	1108	P1.6%

(一) 澆注溫度對流動性的影響：增加澆注溫度，能增加熔鐵所含

的熱量，因而提高流動性。溫度為決定流動性的主要因素，澆注各式鑄件時，必須控制澆注溫度，使之有足夠的流動性，足以澆滿鑄模空腔。

根據各次試驗的平均結果，澆注溫度每提高 10°C ，截面為 50 平方公厘的螺旋體長度增加 40 公厘。此項溫度與流動性間的關係，已由大量試驗所證實，如圖 1.4 所示。溫度愈高時，溫度對流動性的影響愈小；澆注溫度愈低，流動性急劇下降，尤以溫度降至凝固點時為然，此時液體內開始發生結晶核，流動性大為減低。

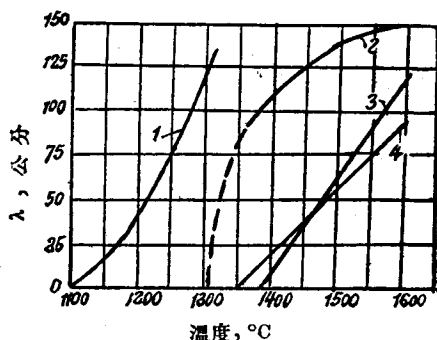


圖 1.4 溫度對流動性的影響

1. 季爾蘇米起氏 2. 納赫德齊氏
3. 許格里爾氏 4. 安得魯氏

(二)化學成份的影響：據

A. A. 白去伐氏及其他人員的研究，流動性與該合金在平衡

圖上的地位，有極大關係，流動性隨凝固期限之增加而減少，此種關係不但在有色合金中可以證實，鐵-炭合金中亦是如此。

當合金的過熱程度（即超過液態點之溫度）不變時，共晶體^①合金的流動性最佳。此種現象，主要由於初晶組織所引起。在鑄鐵中，凝固期限愈大，愈易生成樹枝狀結晶，熔鐵須在樹枝間移動，因而減低流動性，此外樹枝狀結晶又能增加熱量傳導損失率，更加減低流動性。一般鑄鐵之 m 值〔公式(1.1)〕大部份小於 10—20%，而共晶體鑄鐵之 m 可達 30%。含炭率在 2.0% 左右的低炭鑄鐵，流動性最少，共晶鐵最

① (Eutectic)

大。當溫度一定時，共晶鐵之液態點最低，因而過熱程度最大，流動性更為增加。過熱程度一定時的流動性稱為真正流動性；而溫度不變時的流動性則稱為實用流動性。據各家的試驗，證明炭、矽、錳及磷均能增加亞共晶體鑄鐵的實用流動性，而減低過共晶體鑄鐵的實用流動性。

圖 1.5 示此種情況。

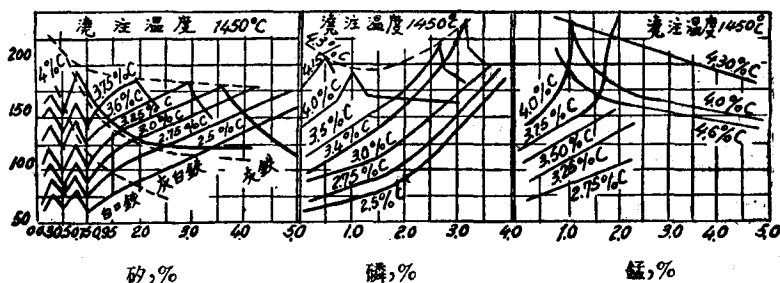


圖 1.5 炭、矽、磷及錳對流動性的影響

據圖 1.5 可知共晶體鑄鐵的流動性最大，但並非全部共晶體鑄鐵的流動性均相同。共晶體的含矽量愈多時，流動性便降低；磷量逐漸增加時，流動性經過一最低點而上昇，此最低點相當於 1% 的磷。為提高流動性計，以含炭最多的共晶體鐵最佳，尤以澆注溫度較高時為然，澆注溫度較低時，則以含磷較高的共晶鐵比較相宜，磷能減低液態點。減低熔鐵的粘性，又能增加熔鐵的濡濕力，製得形狀精細的鑄件，最適於美術鑄件之用。

錳的影響，雖與磷及矽相同，但作用較弱；當鐵內含有多量硫時，錳與硫化合生成硫化錳，流動性急劇降低，造成澆不全等缺陷，至於硫對低錳鑄鐵流動性的影響，研究資料甚少。根據實際經驗及少數資料，硫能增加熔鐵的粘性，因而減低流動性，此種現象，在含硫 0.18% 的鐵中，已甚顯著。

其他合金元素對流動性的影響，研究資料甚少，僅能作約略估計而

已，鎳對流動性並無多大作用，銅則能幫助熔鐵流動，鉻則能減低流動性。

鎳%	0.2	0.4	1.0	1.66	1.87	2.65	3.31
流動性 λ ,公分	72	60	64	60	47.5	42.5	3.5

鉻能提高液態點，又能在表面生成氧化鉻層，減低流動性。此外鉍、鈳及鋁等，對流動性均不利。一般而論，各種合金元素的含量並不多，對流動性的影響亦不顯著。

(三) 液體狀態的影響：

過熱程度增加時，即使澆注溫度保持不變，流動性仍能增加，圖 1.6 示此種情況，增加過熱程度能減少鐵中超顯微^⑥程度的固體物，是即石墨結晶核，因而增加流動性。過熱溫度與澆注溫度的作用，完全相同。

加製鑄鐵的流動性，必有若干降低，據研究結果，投入矽鈣後，流動性確有降低，螺旋長度自 62 公分降至 46 公分。

鐵的產區特性對含氣、含非金屬雜質及析出石墨形狀，均有顯著的影響，對流動性亦如此，產地不同的鑄鐵，即使成份相似，流動性仍大不相同。此外熔化條件不同時，流動性亦有改變。熔鐵含氣體及非金屬

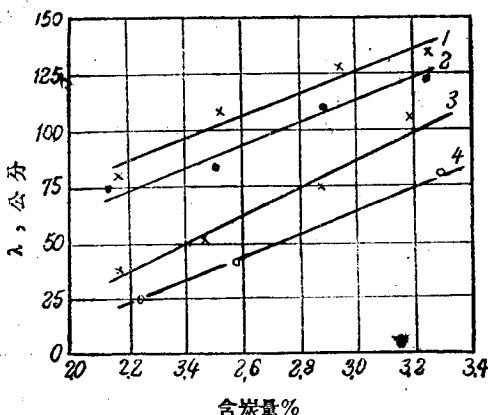


圖 1.6 過熱溫度，澆注溫度對熔鐵流動性的影響

1. 過熱溫度 1650°C，澆注溫度 1540°C
2. 過熱溫度 1540°C，澆注溫度 1540°C
3. 過熱溫度 1540°C，澆注溫度 1530°C
4. 過熱溫度 1530°C，澆注溫度 1430°C

⑥ (Ultra-Microscopic)

雜質愈多，析出石墨結晶愈大，流動性愈低。同一鑄鐵經多次熔化後，含氣體及雜質量逐漸增加，流動性便降低。

熔 化 次 數	1	2	3	4
流動性 λ ,公分	70	40	30	15

根據同樣原理，熔鐵爐中加入廢鋼時，即使熔成鐵的化學成份與不加廢鋼的鐵相同，流動性仍有降低。反之，用木炭熔化鑄鐵，或令液態鐵過熱，均有增加流動性之效。

據 IO. A. 許利德氏在“共營”工廠的試驗，在電爐中投入鐵礦石，製成氧化性極高的熔渣，除去熔鐵中的二氧化矽雜質，結果流動性大為增加，可澆注厚度甚薄的鑄件。

(四)鑄模對流動性的影響：鑄模的構造，對熔鐵流動的抵抗及熱傳導性等，與流動性有極大關係。增加阻力及加速冷卻，均能減低流動性。據 H. Γ. 季爾蘇未起氏的研究，鑄砂內含水量增加至 6% 烟煤粉含量增至 7% 左右，流動性最高，超過上述限度後，流動性逐漸降低，如圖 1.7 所示。上述物質，於注入熔鐵後，能在鑄模與熔鐵間生成氣體膜，減少阻力。根據同樣理由，在鑄模面塗石墨層，或於鑄砂內加入重油 2%，亦有增加流動性之效。鑄砂內加入有機物質，如油砂泥芯中的油等，能影響熔鐵的表面張力，使之能充滿鑄模，造成表面精密的鑄件。

採用金屬鑄模時，流動性必有降低，如圖 1.8 所示，此時鑄模的導熱能力大為增加，加速熔鐵的冷卻，因而減低其流動性。

此外注入熔鐵的靜壓力，對流動性也有影響。據實際試驗，直澆口高度增加 100 公厘後，截面 50 平方公厘的螺旋長度，自 200 公厘增加至 250 公厘，直澆口高度增至 180 公厘時，均有增加流動性的功效，高度超過此限度時，冷卻作用甚強，流動性反而減低。

利用高壓力施行澆注時，亦能增加流動性，此即壓力式硬模澆注法

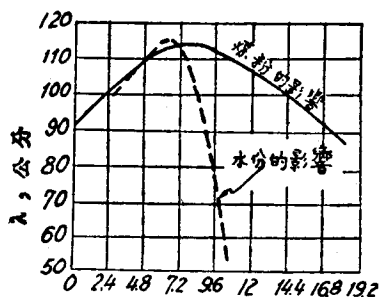


圖 1.7 煤粉及水份含量對低砂鐵流動性的影響

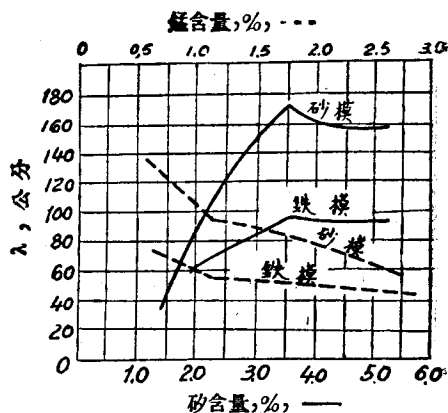


圖 1.8

的原理，此法能製得形狀很精細的鑄件。此外小澆口截面積對流動性也有關係，若 $F\eta$ 為小澆口截面積， λ 為流動性的長度（公分）

$$\lambda = K \sqrt{F\eta}$$

影響流動性的因素甚多，根本無法用數學公式計算。根據各種研究及實際操作，各種鑄件所需的最低流動性，大致如下：

鑄件厚度，公厘	3—6	6—15	16—25	25以上
最低流動性 (截面50平方公厘的螺旋長度)公分	50—70	40—50	30—40	20—30

2. 收縮性

圖 1.9 示熔鐵在凝固過程中的體積變化情形，自該圖可知在液態及固態下，溫度降低時體積減少，而在凝固期間，體積有時增加，有時減少，視鐵之成份而定（白口鐵減少，灰鐵增加）。

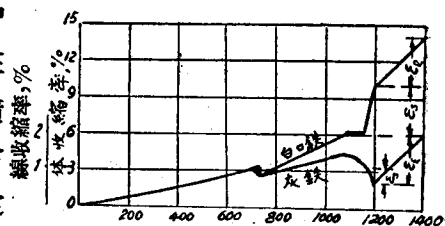


圖 1.9 白口鐵及灰鐵的收縮

液態收縮率 ϵ_m 及凝固時的收縮量 ϵ_s 對縮孔有極大影響，而固態

時的收縮，主要為線收縮，為決定模型放縮量的主要因素。

影響鑄件收縮量的因素，共有下述數項：鑄鐵的成份，鑄件的構造、冷卻速度、造鑄模方法、收縮阻礙性、熱處理方式、及鑄模的精確程度等。一般而論，收縮量約在 -0.5 至 2.5% 之間，負號表示鑄件長度比模型大。

鑄模的精確度愈高，鑄件收縮率的意義愈為重要。小型鑄件照一般方法製造時，精確度可達到蘇聯標準的 9-8 級，採用金屬鑄模或比較精確的方法製造鑄模，小型鑄件的精確度可達 7-6 級，採用壓力式硬模鑄造法或失蠟式精密鑄造法時，精確度可達 5-4 級，或更高至 3 級。

在正常的造鑄模情況下，瞭解收縮的情形，對提高鑄件尺寸的準確性，有極大幫助。

(一) 鑄件在液態下的收縮情形：液態收縮係造成收縮孔的主要原因之一，此項收縮量，與澆注溫度 (t_p) 及液態點 (t_e) 間的收縮係數 α_e 及澆注溫度至液態點間的溫度差 ($t_p - t_e$) 成正比：

$$\varepsilon_e = 100\alpha_e(t_p - t_e) \quad (1)$$

在上式內， t_p = 澆注溫度， t_e 為液態點溫度。

根據圖 1.9 可知 α_e 與溫度並無關係，而與炭素含量，有極大關係。炭素愈多，收縮率 (α_e) 愈大，與其他元素則無多大關係。在一般亞共晶鑄鐵內， $\alpha_e = (90 + 30C) 10^{-6}$ 。

根據鐵炭平衡圖，可知在亞共晶鑄鐵內，含炭率每增加 1%，液態點降低 90°C ，因此 $t_p - t_e = t_p - (1540 - 90C)$ 。

$$\begin{aligned} \text{故 } \varepsilon_e (\text{亞共晶鑄鐵}) &= 100(90 + 30C) \times 10^{-6} \times [t_p - (1540 - 90C)] \\ &= (90 + 30C)(90C + t_p - 1540) \times 10^{-4} \end{aligned}$$

由此可知，增加炭素，一方面增加液態時的收縮係數，另一方面降低液態點，增加過熱程度，使液態時的收縮率大為增加。

(二)凝固中的收縮情形：在凝固中鑄鐵的組織發生變化，此項變化，包括析出石墨，結晶、還元作用及析出氣體等在內，此時體積亦發生變化。在凝固中的收縮，對鑄件的縮孔，有決定性的作用。

白口鐵在凝固中體積收縮，灰鐵則因有析出石墨作用，能抵銷一部份收縮作用，因此凝固中有時可能發生膨脹現象。

$$\text{白口鐵 } \varepsilon_s = 3-5\% \quad \text{灰鐵 } \varepsilon_s = (-1.5) - (+3)\%$$

鑄鐵的凝固，需要相當的溫度期限，在此期限內，鑄鐵發生組織變化，體積因溫度下降而有收縮。由組織變化所生的收縮，平均約為3%；溫度下降時的收縮率約為 $100 \cdot 10^{-6}$ ，因此在凝結時期內的總收縮是為 ε_s 。

$$\varepsilon_s = 3.0 + 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} (t_e - t_s) = 3.0 + 10^{-2} (t_e - t_s) \quad (2)$$

上式內 t_e = 液態點， t_s = 固態點

在亞共晶鑄鐵內，含炭量每減少1%，凝結溫度的期限增加 90°C ，則 $t_e - t_s = (4.3 - C) \times 90$ 。

$$\text{因此 } \varepsilon_s = 3.0 + 10^{-2} \cdot 90 (4.3 - C) = 6.9 - 0.9C$$

當析出石墨時，體積膨脹，根據試驗，石墨結晶每析出1%，體積增加2%。由此可知 ε_s 之值如下：

$$\varepsilon_s = 6.9 - 0.9C - 2C_G \quad (C_G \text{ 爲石墨析出量})$$

在一般情況下，初晶大部份為石墨，此項析出石墨量，根據全部炭量及含矽量而定，當矽量為2%時，結合炭量約為1.6%，則 $C_G = C - 1.6$ 。

代入上式，可知 ε_s 之值如下：

$$\varepsilon_s = 6.9 - 0.9C - 2(C - 1.6) = 10.1 - 2.9C \quad (2)$$

根據上述公式，可計算白口鐵及灰鐵在凝固期間的收縮量如下：

$$C\% \quad \dots \quad 2.0 \quad 2.5 \quad 3.0 \quad 3.5 \quad 4.0$$

$\varepsilon_s\%$	白口鐵	+5.1	+4.6	+4.2	+3.7	+3.3
	灰鐵	+4.3	+2.8	+1.4	+0.1	-1.5

由此可知，在亞共晶組織的灰鐵中，炭素愈高，凝固期限中的收縮量愈少，當炭素甚高時，體積反而膨脹。

液態及凝固時期中的總收縮量，可由公式(1)及(2)計算：

$C\%$	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_e + \varepsilon_s, \text{溫度 } 1440^\circ\text{C}, \%$	白口鐵 +5.8	+6.1	+6.6	+7.2	+8.0
	灰 鐵 +5.0	+4.3	+3.8	+3.6	+3.2
$\varepsilon_e + \varepsilon_s, \%, t_p - t_e = 50^\circ\text{C}$	白口鐵 +5.8	+5.4	+5.1	+4.7	+4.4
	灰 鐵 +5.0	+3.6	+2.3	+1.1	-0.4

炭素對收縮的影響，在液態及凝固期限內相反。在白口鐵內，當澆注溫度固定不變時，液態收縮量為主要因素，因此炭素愈高，收縮量愈大；當 $t_p - t_e$ 保持不變時，結晶期限內的收縮量為主要因素，此時炭素愈高，收縮量愈小。在灰鐵中，析出石墨作用最為重要，因此炭素愈高，收縮量愈小。

(三) 固體狀態下的收縮率：決定固體狀態下體收縮 ε_t 及線收縮 $\varepsilon = \frac{1}{3}\varepsilon_t$ 的因素甚多，其中包括溫度降低、固體金屬析出氣體、擴散作用、位相變化、析出石墨、鑄模的阻礙作用及其他因素等。此項收縮，能決定鑄件的尺寸，以及熱裂及冷裂現象。

根據溫度收縮曲線，可知開始凝固後，有初期膨脹現象，此膨脹量為 ε_{exp} ，在此膨脹期間後，始生收縮現象。此項收縮，又可分為前珠光體期及後珠光體期二部份。全固態收縮量 ε_{st} 及鑄造時的收縮量 ε_{π} 間相差一初期膨脹率 ε_{exp}

即

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{\pi} + \varepsilon_{exp}$$

初期膨脹率主要因凝固後析出石墨，析出氣體而起，此外擴散作用