

沸騰鋼鋼錠的組織

杜 布 羅 夫 著

方宗遠、鄒恆言、王振海合譯

科學技術出版社

沸騰鋼鋼錠的組織

杜布羅夫 著

方宗遠、鄭恆言、王振海合譯



科學技術出版社

1952

出版者的話

本書研究沸騰鋼鋼錠的組織及其基本類型，並列舉許多有關鋼錠形成過程的理論性的假說，在實驗的基礎上，作了批判性的比較。

另外，並研究沸騰鋼鋼錠組織與其他冶煉因素的關係，例如與熔煉過程中的鋼渣情況和含錳量的情況、精煉時間、澆注溫度和鋼的化學成份等的關係。

本書對於從事生產沸騰鋼的鋼鐵廠工程師和從事研究沸騰鋼的科學工作者來講，是有價值的。同樣，對冶金系的學生來說，也是有幫助的。

1952年3月

本書根據蘇聯 Н. Ф. Дубров 著 'Структура Слитка Кипящей Стали' (Металлургиздат 出版社1950年第一版) 一書譯出

* * *

著者：杜布羅夫 譯者：方宗遠、鄧恆言、王振海

責任編輯：高曉楓 責任校對：閻銘泉

1952年4月發排(新華) 1952年7月付印(科技) 1952年7月初版
書號 0077-0-30 31×43¹/18 22印刷頁 1-2060冊 定價5,700元
科學技術出版社(北京歷甲廠17號)出版 中國圖書發行公司總經售

前 言

沸騰鋼品質的優劣，首先由它的鋼錠組織來判定。鋼錠的組織如果健全，在軋製時就會得到很好的技術經濟指標和品質指標。但是要得到健全的鋼錠組織，一方面，固然決定於熔煉時的許多工業因素，而另一方面，在澆注的方法上、在鋼錠的重量上、以及其他生產條件上的種種因素，也具有決定性的作用。

近年來雖然對於 5~7 噸以上的大鋼錠，作了很多的研究，可是，在很多的鋼鐵廠中也澆注 200~500 公斤的沸騰鋼鋼錠。由於沸騰鋼澆注成小鋼錠的生產規模的擴大，同時對於這種製品品質的要求也日漸提高，因此也就有必要進行適當的研究和觀察，並分析一切生產上的指標。

這本書的目的，就在於介紹給廣大冶金界一些研究的結果和結論，從這些研究的結果，可以了解沸騰鋼鋼錠組織的形成過程，同時，這些有關改善途徑的結論，也是基於實際生產上的大量觀察而得出的，並且是經過證實了的。

在這些研究工作中，曾經研究了 450 及 300 公斤重量的鋼錠，鋼是在 50 噸及 70 噸的馬丁爐中煉出的，配料時用 40% 的生鐵和 60% 的廢鋼，裝料時加了 6~9% 的石灰石和 1.0~1.5% 的鋁礬土，並且在精煉的時候，在大多數情況下，還應用了石灰。精煉的時間一般不少於 50 分鐘，在這一階段的鋼渣普通含 FeO 10~14%， MnO 10~12%， CaO 37~40%；最後用錳鐵在爐內進行脫氧，同時在盛鋼桶內停留相當長的時間，再開始澆注。

煉出來的鋼是用下注法澆注的，杯口（注口）的直徑是 37 公厘，錠盤上有 16~24 個鋼錠，澆注的速度是 220~250 公厘/分。在所有的研究中，這樣的速度從來沒有改變過，因為從一方面來說，這樣的速度不能算大；而從另一方面來說，如果速度再減低，固然對沸騰鋼是有利的，但是這樣又不可能，因為澆注的是小鋼錠，如果時間用得很長，鋼液就可能在盛鋼桶內冷卻下來了。

450~470 公斤鋼錠的底部尺寸是 240×315 公厘，頂部是 210×290 公厘；280~300 公斤鋼錠的底部尺寸是 215×215 公厘，頂部是 205×205 公厘；所有鋼錠的高度都是 1000~1200 公厘，至於鋼錠模的高度則是 1370 公厘，底部厚度是 80 公厘，頂部厚度是 60 公厘。

鋼的化學成份如下：450 公斤的鋼錠含 C 0.12~0.20%，Mn 0.35~0.60%，P 在 0.035% 以下，S 在 0.040% 以下，Cr 在 0.20% 以下；300 公斤的鋼錠含 C 0.07~0.14%，Mn 0.35~0.60%，P 在 0.07% 以下，S 在 0.040% 以下。

此外，還有其他各種成份的鋼錠，其中鉻、銅、磷、硫等元素的含量有些變化，對於這類的鋼錠也曾作了很多的研究。

除了關於小鋼錠組織的材料以外，在這本書裏，還依據文獻資料，披露了有關5~7噸以上的沸騰鋼鋼錠組織的資料。總之，根據一系列比較的結果，已經可以確定：很多冶煉方面的因素，對於大的或小的鋼錠的組織形成過程的影響幾乎是相同的。

目 次

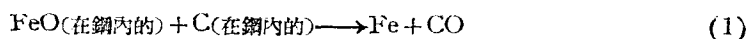
前 言

一 沸騰鋼的性質	1
二 沸騰鋼的鋼錠組織	2
1 鋼錠組織的分帶	2
2 鋼錠的主要形式	2
三 沸騰鋼鋼錠組織的形成過程	4
1 堅殼帶	4
2 蜂窩泡帶	4
3 中間泡帶和中間堅固帶	10
4 錠心	11
5 結論	11
四 鋼的沸騰作用、澆注溫度、鋼液的化學成份及鋼錠模溫度等對於鋼錠組織的影響	13
1 鋼液沸騰作用的影響	13
2 澆注溫度的影響	16
3 化學成份的影響	18
4 鋼錠模溫度的影響	29
五 冶煉沸騰鋼的技術操作因素對於鋼錠組織的影響	32
1 冶煉過程中含錳的情況	32
2 精煉時間與鋼渣情況	32
3 脫氧方法對鋼錠組織及鋼質的影響	35
六 研究試驗的結果及結論	38

一 沸騰鋼的性質

沸騰鋼是一種低碳鋼，因其在澆注時，脫氧的程度恰使鋼液在鋼錠模內凝固的過程中，能發生大量氣體，形成一種‘沸騰’現象，所以稱為沸騰鋼。關於沸騰鋼鋼錠所放出的氣體的成份問題，很多人都作了研究。早在1878年，俄國且爾諾夫(Д. К. Чернов)就曾經指出，澆注沸騰鋼時所放出來的氣體，主要是一氧化碳，而在其他國家的許多科學工作者却認為它的主要成份是氫。

但是，且爾諾夫的看法在以後得到證明是完全正確的，蘇聯的科學研究工作者，在實際工業生產的條件下，仔細地進行了很多實驗，確定了由沸騰鋼鋼錠放出來的氣體中90%是一氧化碳，另外的10%才是氫和氮，並且根據新的材料，還確定了其中的化學反應是：



決定這個反應進行的主要因素，是沸騰鋼在凝固時的結晶過程，當純鐵結晶逐漸冷卻時，母液中的氧化亞鐵和碳也漸漸增多，因此造成了反應(1)進行的有利條件，而生成了一氧化碳(也有二氧化碳)。氣體發生以後，從鋼錠中不斷放出，於是產生了一種‘沸騰’現象，鋼錠的形成過程，主要便是決定於這種沸騰性質和時間長短。並且因為在沸騰的時候，鋼錠上部的質點是運動的，在一個很長的時間內是保持在液體狀態，所以沸騰鋼與鎮靜鋼不同，沸騰鋼鋼錠上部沒有縮孔存在。

二 沸騰鋼的鋼錠組織

1 鋼錠組織的分帶

由沸騰鋼鋼錠沿縱軸方向的切面中，可以很清楚地看到成帶狀的組織，不過一直到最近為止，對於這些帶還沒有準確的分類，在英美的文獻中僅僅區分為兩帶：

1. 邊緣帶 這就是‘霜’帶，是指鋼錠在沿縱軸剖開後，由表皮到蜂窩氣泡一段而言。

2. 中心帶 包括由蜂窩氣泡以內的整個部分，也就是鋼錠的中心部分。

這樣的分類，絲毫不能說明沸騰鋼鋼錠組織的任何特性。實際上在沸騰鋼鋼錠的縱切面上，可以清楚地看到存在的五個帶，就是：1. 堅殼帶；2. 蜂窩泡帶；3. 中間堅固帶（位於蜂窩泡帶及中間泡帶之間）；4. 中間泡帶；5. 錠心等。在大的鋼錠中，蜂窩氣泡有時又更分為兩個獨立的蜂窩泡帶，這些帶都可以在圖1中看出。

在我們所研究的鋼錠中，堅殼帶的厚度是5~40公厘。蜂窩泡帶通常是分佈在由錠底到鋼錠一半高度的地方。不過，如果沸騰鋼的準備及澆注工作做得好，蜂窩泡帶的高度也可以縮得很短，甚至完全沒有。當然，在相反的情況下，它的高度也可以伸展到鋼錠頂部。

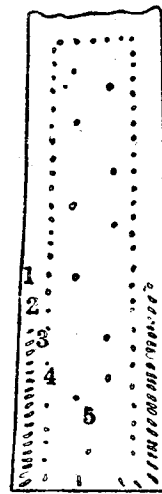
幾乎在所有的沸騰鋼鋼錠中，中間泡帶^①是集中地分佈在鋼錠縱切面的四周，中間堅固帶的厚度普通是5~15公厘，而在錠心中總有或多或少數量的圓形氣泡分佈各處。

2 鋼錠的主要形式

沸騰鋼鋼錠可分為三類，就是高漲鋼錠、下陷鋼錠和正常鋼錠。

當鋼液在鋼錠模中冷卻時，所發生的氣體的量，不足以保持正常的沸騰時，於是鋼液向上高漲，便得到了高漲鋼錠（圖2）。在這樣的鋼錠中，蜂窩氣泡離表面很近，並且還形成了一個‘菜花頭’，經過軋製之後，就產生了大量的廢品。細縫及裂紋很多，同時還產生很大的切頭。

有時在實際生產中可將高漲鋼錠的菜花頭用氧乙炔焰切掉。不過這種措施的效果也不大，因為：第一，把菜花頭切掉，需要很多的時間和財力；



1—堅殼帶
2—蜂窩泡帶
3—中間堅固帶
4—中間泡帶
5—錠心

圖1 沸騰鋼鋼錠的五帶

① 中間泡帶有時也稱為第二帶、深入帶或內帶，不過這些名稱都不能確定氣泡的位置，實際上應當以‘中間泡帶’這一名稱最正確，因為它指明了氣泡的位置是在蜂窩泡帶和錠心之間。

第二，鋼錠在切斷後，位於表面附近的蜂窩氣泡仍然存在，缺點不能完全除去。

在注鋼時，如果鋼裏面含的氣體太多，便會得到下陷鋼錠（圖3）。在這種情形下，除了沸騰之外，還有起泡現象，泡沫上漲超出了鋼液面。等到氣體放完後，泡沫下落，就得到一個很大的空殼。這種空殼在軋製之前必須切掉，而當它超過150~200公厘時，鋼錠一般是要作廢的。

在沸騰鋼的正常鋼錠中，堅殼帶的厚度達20~40公厘，蜂窩泡帶的高度不會超過全鋼錠高度的一半，甚至完全不存在；而在大多數情形下，鋼錠的頂部是平整的，即使有空殼存在，其深度也要小於50公厘，很顯然，這種鋼錠在軋製後，合格品的百分率最高。

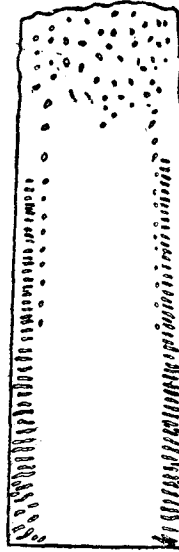


圖2 高漲鋼錠

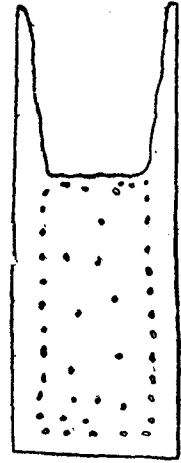


圖3 下陷鋼錠

三 沸騰鋼鋼錠組織的形成過程

沸騰鋼的鋼錠組織是在冷凝過程中，在複雜的物理變化、化學變化和溫度條件下形成的。到現在為止，還沒有足夠的實驗資料幫助我們了解這些過程的全部情形。在這個問題上，有很多理論上的假說，但有時在這些作者之間，他們的假說是相互矛盾的；然而在另一方面，爲了改善鋼錠的組織，首先就必須正確地了解它的形成過程。因此，我們就討論一下目前存在的一些看法。

1 堅殼帶

對於外殼一帶的堅實組織的形成，一般常解釋爲鋼液冷凝時在外殼沒有氣體放出的緣故。這種說法，是根據鋼液結晶的速度是比一氧化碳生成的反應速度爲快的假定。如果我們認爲這個假定可以成立，那麼，在相同的鋼錠模中以及同樣的冷卻條件下澆注沸騰鋼，就應該得到相同厚度的堅殼帶；可是在實際生產上，從來就不曾有過與這種假定相合的情況。在同樣的條件下，在同樣被加熱過的鋼錠模中，澆注過不同的幾爐沸騰鋼，但每爐所得的鋼錠却有的具有很厚的堅殼帶，也有的在殼中充滿了蜂窩氣泡。

且爾諾夫是首先不同意上述假定的一個，他認爲鋼錠氣體的放出，是在鋼液與鋼錠模一經接觸之後就立刻開始的，且爾諾夫這種見解的正確性，可以由鋼錠模壁發出‘火花’的現象作爲證明；很顯然，澆注沸騰鋼時發生的火花是由放出的氣體所生成的。在別茲堅聶斯奈赫及其他研究者的實驗工作中，也同樣證明了這一點，就是說：沸騰鋼鋼液在開始流入鋼錠模時，由鋼錠四周放出來的氣體，比由中心放出來的要多幾倍。

因此就必須認爲，在堅殼帶氣體放出得愈強烈，則堅殼帶就愈堅實，並且厚度也愈大；反之，如果鋼在結晶過程中，沒有氣體放出，並且鋼液的黏度很大，那麼在堅殼帶就會生成蜂窩氣泡。

2 蜂窩泡帶

很多的研究工作者，把蜂窩氣泡的形成，與沸騰鋼鋼錠冷凝時樹枝狀組織的發生和長大聯繫起來看。而且，按照若干外國的研究工作者的意見，認爲當樹枝狀組織長大時，要放出來的氣體被壓縮在這些組織的結晶之間，沒有放出，於是形成了蜂窩氣泡。依照這種說法，對於蜂窩氣泡的形成起主導作用的是樹枝狀組織，而氣泡本身，則居於從屬的次要地位。支持這一派意見的人，認爲不但在樹枝狀組織之間蜂窩氣泡的形成決定於樹枝狀組織，就是這些氣泡的形狀、大小和排列形狀，也都完全爲樹枝狀

組織所決定。

且爾諾夫對於這一現象的看法，與這些人根本不同，他認為氣泡是有足夠的力量來突破樹枝狀組織而上浮的。遠在 1878 年，他就對於蜂窩氣泡的生長用圖解的方法（圖 4）表示了出來；他認為最初在已經冷凝的表面生成了一個不大的氣泡，然後，鋼液內與氣泡相鄰的氣體就向着它集中，於是這個氣泡的體積就逐漸增大，而且向鋼錠

中心的方向延伸，當情況有利時，一部分氣泡上浮，即將沿途的樹枝狀組織突破。鋼液在此凝結時所形成的樹枝狀組織有一個傾向，竭力企圖與氣泡的外殼銜接。

谷爾特格林（Гультгрэн）和弗拉格滿（Фрагмен）在 1939 年曾對蜂窩氣泡的形成作了一個圖解，這個圖解與且爾諾夫的圖解完全相同，現在把他們的圖解介紹如下：

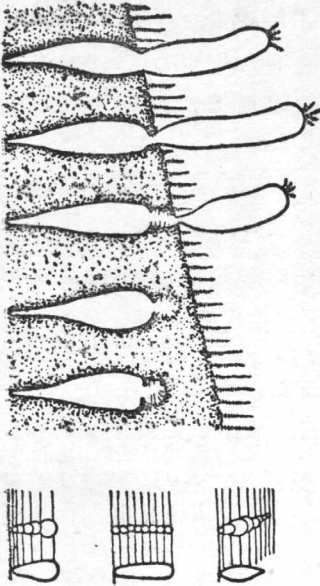


圖4 且爾諾夫(1878年)的鋼錠蜂窩氣泡的發生和長大的圖解



圖5 谷爾特格林和弗拉格滿的蜂窩氣泡形成圖解

在圖 5 中，a 表示黏附在冷凝表面上的小氣泡，當鋼的冷凝層向前繼續擴展時，圍繞着氣泡的表面，並且因為在這個氣泡鄰近的鋼液中，一氧化碳是過飽和的，於是它就向這個已經形成了的氣泡擴散，使這個氣泡繼續漲大（圖 5, b, c），當其體積超過一已知的限度，表面張力不足以抵抗氣泡上浮的力量時，整個氣泡或氣泡的一部分就會浮出鋼面，剩下的縮小了一部分便被包裹在冷凝的鋼液裏（圖 5, e）。

比較一下且爾諾夫在 1878 年和谷爾特格林及弗拉格滿在 1939 年時對這個問題的見解，很顯然，俄國學者且爾諾夫的圖解是較好的。且爾諾夫理論的真確性還可以用下面的試驗結果加以證明：

用 1% 的硫酸銅溶液將有蜂窩氣泡的樣片進行浸蝕，以觀察樹枝狀組織。圖 6 就是浸蝕後的一塊樣片，在這個照片中可以看出，大多數蜂窩氣泡開始的地方就是樹枝

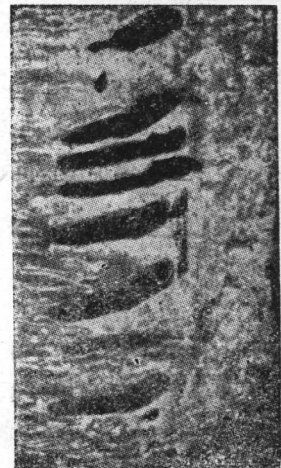


圖6 沸騰鋼經過 1% 的硫酸銅溶液浸蝕後的樹枝狀組織

狀組織終止的地方。如再以稀硫酸來浸蝕，還可以看到蜂窩泡帶鋼的組織情形(圖7)。圖7所示樣片的結晶分佈情形與圖6所示的組織情形很相似，在圖7和圖6中，顯然地可以看出，蜂窩氣泡是遠大於樹枝狀組織的。由於這一事實，以前認為樹枝狀組織是決定蜂窩氣泡形成過程的主要因素，便根本不能成立。

因此，從且爾諾夫的理論出發，對於蜂窩氣泡的形成，起主要作用的不是別的東西，而是氣泡本身。這樣的結論是具有很重要的實際意義的，承認這個結論，那麼在生產沸騰鋼的時候，就必須把注意力集中在鋼液中存在的氣體問題和這些氣體在澆注時的行為問題上面來。

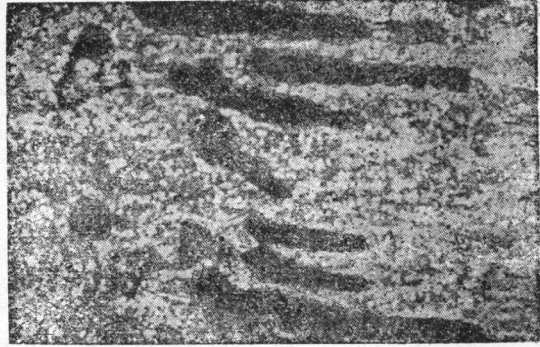


圖7 以稀硫酸作熱浸蝕後的沸騰鋼組織

在近年來，特別是列文(С. Л. Левин)、博爾納斯基(И. И. Борнацкий)、阿爾費洛夫(К. С. Алферов)、普拉斯費林(К. С. Просвирин)和沙赫諾夫斯基(Н. А. Сахновский)等，在1949年出版的著作中，對於蜂窩氣泡形成的真象作了更為詳細的和在科學上更為健全的說明。這些研究工作者的理論，是建立在事實基礎上，也就是沸騰鋼放出的氣體中大約有90%是一氧化碳的這一事實上的。他們把單位時間內由單位放氣表面放出的氣體量表示如下：

$$\frac{dQ}{dt} = C(p'_{co} - p_{co}), \quad (2)$$

式中 t = 鋼錠模中某一鋼液面開始凝固算起的時間，分鐘；

$\frac{dQ}{dt}$ = 單位時間內由單位放氣表面放出的氣體量，公分³/分；

p'_{co} = 一氧化碳放出的壓力，公斤/公分²；

p_{co} = 一氧化碳在小氣泡內的分壓力，公斤/公分²；

C = 一氧化碳向小氣泡內移動的速度常數。

依照上式，則氣泡體積增大的速度為：

$$\frac{dv}{dt} = 4\pi r^2 C(p'_{co} - p_{co}), \quad (3)$$

式中 r 和 v 分別表示小氣泡在時間 t 時的半徑和體積(公分³)。

在這裏小氣泡內一氧化碳的分壓力，可以當它等於外部壓力，不致有什麼特別的誤差，也就是說，一氧化碳的分壓力就等於作用於小氣泡形成地點的壓力，這個壓力就等於大氣壓力及鋼液柱壓力之和(毛細壓力則不計算在內)，即：

$$P = 1 + H\gamma, \quad (4)$$

式中 H = 小氣泡形成處上面的鋼液柱高度, 公分;

γ = 鋼液的密度, 公斤/公分³。

但因

$$H = v_p t \quad (v_p \text{ 爲澆注速度, 公分/分}),$$

所以

$$P = 1 + v_p t \gamma,$$

$$\frac{dv}{dt} = 4\pi r^2 C(p'_{co} - 1 - v_p t \gamma), \quad (5)$$

但

$$v = \frac{4}{3}\pi r^3,$$

所以

$$dv = 4\pi r^2 dr \text{ 或 } dr = \frac{dv}{4\pi r^2},$$

得到

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} = C(p'_{co} - 1 - v_p t \gamma). \quad (6)$$

但在鋼錠模中某水準面的小氣泡停止突破, 並且蜂窩氣泡開始形成的一瞬間, 氣泡的直線增長速度 $\frac{dr}{dt}$ 比堅殼帶逐漸凝固增厚的速度 $\frac{de}{dt}$ 僅大一個很小的數字 m , 即:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{de}{dt} + m, \quad (7)$$

e = 在時間 t 時堅殼帶已經凝固了的厚度, 公分。

並且, 因堅殼帶凝固增厚的速度

$$\frac{de}{dt} = \frac{k}{2\sqrt{t}}, \quad (8)$$

所以表示蜂窩氣泡開始形成時的方程式可化爲:

$$C(p'_{co} - 1 - v_p t \gamma) = \frac{k}{2\sqrt{t}} + m; \quad (9)$$

解(8)式, 將 t 的值代入(9)式中, 得:

$$v_p e^3 - \frac{[C(p'_{co} - 1) - m]k^2}{C\gamma} e + \frac{k^4}{2C\gamma} = 0. \quad (10)$$

令

$$\frac{[C(p'_{co} - 1) - m]k^2}{C\gamma} = a \text{ 及 } \frac{k^4}{2C\gamma} = b,$$

代入(10)式, 得:

$$v_p e^3 - ae + b = 0, \quad (11)$$

或

$$v_p = \frac{ae - b}{e^3}. \quad (12)$$

由(12)式可以看出, 當澆注速度增大及一氧化碳放出的壓力減低時, 則蜂窩氣泡分佈的深度(距表皮)必會減小。

儘管上面所推演的各數學式已經相當詳細, 但是還應當說明, 這些式子還遠不能完全說明蜂窩氣泡形成過程的實際情況, 並且這些數學式對於氣泡形成過程的初步

階段，僅能應用到一定的程度，因為在這個階段決定氣泡上浮的力量，還沒有表現出來；而且，正如且爾諾夫早就指出的，這些力量是居於突破樹枝狀組織的狀態，因此也大大地改變了蜂窩氣泡的形成過程。

假使從上述研究工作者的結論出發，那麼可以推出在堅殼帶的厚度一致的部位，其附近氣泡的長度也應相同；但在實際上，這樣的情形很少，在大多數的情形下，愈接近於鋼錠頂部，蜂窩氣泡也愈形縮短（在堅殼帶的厚度比較一致時）。這件事實正可以說明：當在鋼錠上部各層有比較多的氣泡流存在時，這些氣泡流的力量就要破壞蜂窩氣泡深入鋼錠內層的前進過程。

關於鋼液受放出氣體的攪動的意義，將來在討論下陷鋼錠和其他鋼錠的組織時，可以作較詳細的解說，這裏暫時不談，下面再討論一下為什麼蜂窩氣泡分佈在鋼錠的下半部的問題。

一般來說，蜂窩氣泡是分佈在鋼錠的下半部，其原因曾經多布洛霍托夫（Н. Н. Доброхотов）作過解釋：因為在鋼錠下部幾層氣泡所受到的鋼液壓力比較在上部的大些，所以在冷凝的時候，上部的氣泡能够浮在鋼錠表面，而下部的就困難得多。在沸騰鋼鋼錠中氣泡上浮的速度可以按斯托克斯公式（Формула Стокса）計算：

$$W = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2 \cdot r^2}{\eta} \quad (13)$$

從這個公式可以看出，氣泡上浮的速度與每個小氣泡半徑的平方及介質與上浮物質的比重之差成正比，而與介質的內部阻力或黏度（ η ）成反比。

關於氣泡的體積，則依照波義耳-馬略特定律（Закон Бойля-Мариотта），是與該氣泡上部的壓力成反比的，而在鋼錠中氣泡所受的壓力等於：

$$p = P + h\gamma + \frac{2\sigma}{r}, \quad (14)$$

式中 P = 大氣壓力；

$h\gamma$ = 氣泡上所受到的鋼液靜壓力；

$\frac{2\sigma}{r}$ = 圍繞氣泡的鋼液表面薄膜的壓力。

這個公式在這裏是比較近似的，因為氣泡上浮時並不能永遠作層狀流動（即直線流動）。

因為在鋼錠下部氣泡所受的靜壓力較在上部的大些，留在這裏的氣泡數量應當比較多些，並且愈接近於上部，靜壓力愈減少，因此對於氣泡的形成過程及上浮過程便愈形有利，由於在鋼錠上部放出大量氣體的緣故，遂使鋼液沸騰的強度增大，這樣便破壞了蜂窩氣泡的形成過程，而這樣的過程，在從鋼錠底部開始時就是已經發生了的。

關於由鋼錠上部放出的氣體比較多些的這一事實，可以由沸騰鋼鋼錠堅殼帶的

化學分析結果加以證明，在表 1 中可以看出，鋼錠下部的碳和氧的含量較上部為高，便是一個明證。

表 1 沸騰鋼鋼錠全高度中碳和氧的含量(%)

取 樣 地 點	O	C	O	C	O	C	O	C
	鋼 錠 重 量 (噸)							
	4	3	2	1				
上 部	0.012	0.039	0.011	0.036	0.010	0.041	0.020	0.047
中 部	0.016	0.041	0.016	0.042	0.017	0.046	0.022	0.052
下 部	0.025	0.043	0.026	0.051	0.023	0.047	0.028	0.064

從多布洛霍托夫的解釋出發，可以作出一個結論：為了使沸騰鋼鋼錠蜂窩泡帶的高度減低，就必須把鋼錠本身的高度儘可能地改小些。這個結論是正確的，曾經在一次實驗中，把一爐鋼分別在幾個錠盤上澆注，在第五個錠盤上的鋼錠高度是 1230 公厘。在第七個錠盤上的鋼錠高度是 1120 公厘。而在第十個錠盤上的是 800 公厘。在這一爐鋼中，碳含量是 0.12%，錳則較平常稍高，它的含量是 0.45%。鋼的沸騰作用並不厲害，在第五個錠盤上沸騰延續了 4 分鐘，在第七個錠盤上是 4 分 30 秒，在第十個錠盤上也是 4 分鐘。從這樣的三個錠盤上各截一個鋼錠(圖 8)，其中在第七錠盤中的鋼錠，因為沒有用鐵蓋子蓋住，錠心特別壞，至於這三個鋼錠蜂窩泡帶的高度則分別為 830 公厘、700 公厘、400 公厘，各佔該鋼錠全部高度的 65%、63%、50%。這個結果告訴我們：在高度較小的鋼錠中，蜂窩泡帶的高度也相對地小些。

但是從上面的結果，還不能斷定蜂窩氣泡在鋼錠的某種高度中是不可避免的，不過，假如從鋼液進入鋼錠模開始的時候起，就已經構成了劇烈沸騰的條件，那麼蜂窩氣泡的形成過程將會遭受破壞，甚至還可以避免這種氣泡的發生。關於這種問題，後面我們將作較詳細的討論。在這裏，則根據實驗和實際生產上的大量資料，已經可以確定：澆注沸騰鋼所用的鋼錠模，其橫截面對於高度的比率，應當儘可能地加大。

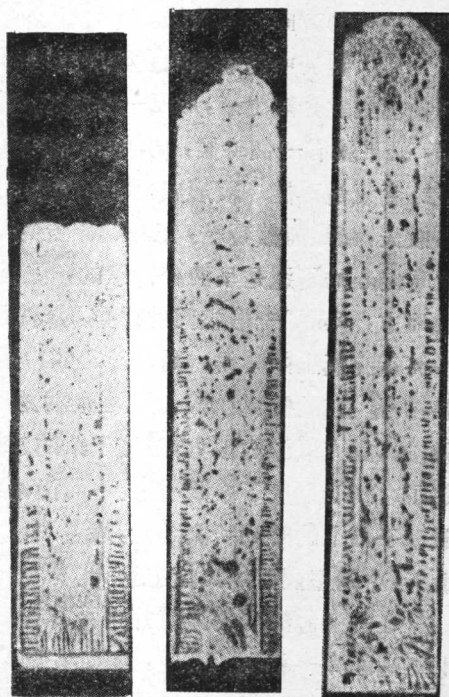


圖8 由同一爐鋼澆出來的三個鋼錠，高度各為800公厘、1120公厘、1230公厘

3 中間泡帶和中間堅固帶

關於中間氣泡的發生，若干研究工作者，把這個問題與冷凝時鋼錠與鋼錠模之間形成空氣間隙的現象聯繫了起來，他們認為空氣間隙一經生成之後，鋼錠的冷凝就會更慢，所形成的氣泡能由鋼中的冷凝地方除去，但是有部分的氣泡在鋼錠加了蓋子之後，因為沒有來得及浮到表面，便生成了中間氣泡。

根據地尼伯彼得羅夫冶金學院(Днепропетровский металлургический институт)的實驗工作，已經確定空氣間隙並不是同時在鋼錠全長度中發生的，例如，在一個用下注法於6分鐘內澆注的鋼錠(高1200公厘)中，其底部的空氣間隙是在開始澆注後2分鐘生成的，上部的空氣間隙是10分鐘才生成的。

關於鋼錠堅殼帶的厚度(D)，與鋼液和鋼錠模接觸的時間(t)的關係，有一個公式：

$$D = -3.048 + 22.86 \sqrt{t \text{ (分鐘)}}, \quad (15)$$

依此公式，則在生成空氣間隙之後，鋼錠底部的堅殼帶厚度是30公厘，上部的堅殼帶厚度是50公厘，由此應該得出下列的結論：“中間氣泡的分佈線，必定永遠是斜向鋼錠中央的”；但是如果把鋼錠沿縱軸剖開，則不能看出這種情形，中間氣泡是在沿鋼錠表面平行的方向分佈着的。

所以關於中間氣泡的實際形成過程應當如下：當蜂窩氣泡向中央移動時，有一部分氣泡由它分離出來，形成一股氣流，並且在蜂窩氣泡向中央移動的過程中，愈來愈強，結果就有一個時候，由於這種自下而上的強大氣流的影響，使蜂窩氣泡不能繼續形成；與此同時，因熱量不斷由鋼錠模壁向外散失，鋼錠繼續凝結，正在凝固着的鋼把氣流向錠心推擠，而此時錠心的鋼還是呈液體狀態的，這樣一來就在蜂窩氣泡鄰近的地方，形成了一層堅固的地帶，這就是中間堅固帶。在用鐵蓋子將鋼錠蓋上的時候，對於錠心的冷凝過程發生一個突然的衝擊，於是鋼液體積收縮，並且在最弱的地方，就是在與中間堅固帶接界處有氣流的地方，破壞了鋼的連續性，因此這種氣泡流固定了之後就形成了中間泡帶。中間泡帶與錠心分佈的比率，是由鐵蓋子加上的時間所決定的，鐵蓋子蓋得愈遲，中間泡帶離錠心愈近，中間堅固帶的厚度也愈大。

在熱浸蝕的沸騰鋼試片中，有時可以看到在蜂窩氣泡與中間氣泡之間有相通的孔道，例如在圖9所示的鋼錠切面中，就可以看出這兩種氣泡之間的聯繫，他們是循着同一個路線前進的，這種事實說明了本聶地克斯(Бенедикс)及其他諸人認為蜂窩氣泡裏面完全是氫，而中間氣泡裏面則完全是一氧化碳的說

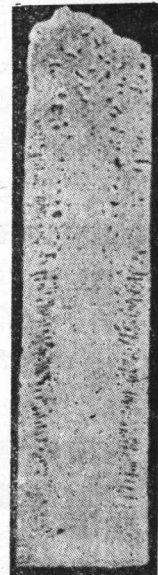


圖9 鋼錠縱切面圖，說明蜂窩氣泡與中間氣泡之間的關係

法,是不能成立的。

大多數的冶金工作者都認為在沸騰鋼鋼錠中,要避免中間氣泡的發生是不可能的。但是依我們的意見,還應當努力使單個氣泡的體積儘量減小,很顯然,要達到這樣的目的,首先必須是澆注時鋼液的黏度不高才行。

4 錠心

沸騰鋼鋼錠錠心的形成過程似乎是這樣:沸騰鋼鋼液與溫度較低的鋼錠底盤(或鋼錠模底)接觸以後,在鋼液中發生了小氣泡,此後,由於一氧化碳和其他氣體向這些小氣泡內繼續擴散,在達到一定體積後,就向鋼錠頂部浮動,並且與這種氣泡流動同時,含有多量的硫、碳和磷的母液也向上浮動。無疑地,後者的上浮是由於氣泡流動所激動的結果,這種理由也可以部分地解釋為什麼在沸騰鋼鋼錠內部各種雜質的偏析比鎮靜鋼鋼錠內部的情形顯著些。

鋼錠頂部冷卻後,鋼液變稠,於是氣泡終止上浮,停留在鋼錠內部,並大部分分佈在鋼錠的上半部,這就是錠心氣泡。錠心氣泡幾乎永遠是圓形的,愈接近鋼錠頭部分,氣泡的體積也愈大。

如澆注溫度較低或者是在最後幾個錠盤上,則在這些鋼錠的縱切面上,有時可以發覺,也有蜂窩氣泡分佈在鋼錠下部的錠心部分。

一般來說,沸騰鋼鋼錠的錠心是由小的球狀結晶組成的,這可以從圖6及圖7所示的浸蝕試片中觀察出來,在由鋼錠縱切面製出的包曼硫印(Баумановский отпечаток)中,可以清楚地看出在鋼錠上部的錠心上,硫及磷分佈的情形比鋼錠下部為多。

為了降低錠心氣泡的數量,最好的方法就是及時地用鐵蓋子將鋼錠蓋住,以縮短錠心停留在黏滯狀態的時間。圖10所示的兩個鋼錠的縱切面情形,可以作為例證。這兩個鋼錠是由同一爐鋼澆注出來的,鋼錠模立在同一錠盤的兩對方,其中甲錠是在沸騰3分鐘之後就蓋住了的,乙錠則未曾蓋住,我們可以顯然地看出,甲錠錠心氣泡的數目要少得多。

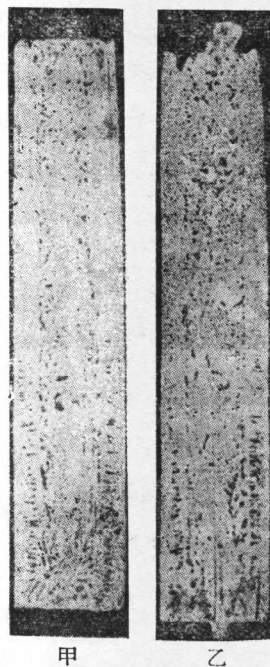


圖10 同一爐的兩個鋼錠切面
甲—加鐵蓋的 乙—未加鐵蓋的

5 結論

將沸騰鋼鋼錠組織形成過程的若干理論,作了一番嚴格的分析,並將若干研究和試驗的結果以及實際生產上的資料,作了詳細考察之後,已經可以得出如下的結論:

在澆注小鋼錠時,為使鋼錠組織最能令人滿意,也就是說,要想使鋼錠沒有高濃