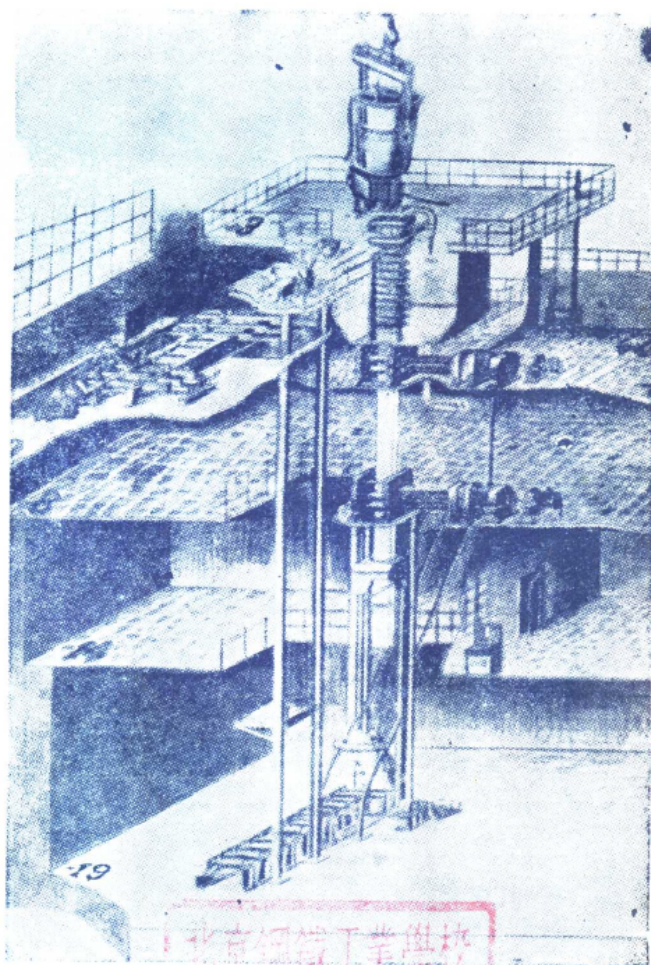


石景山冶金學院
閱覽室藏書
圖書

連續鑄鋼專輯

(第一輯)



北京鋼鐵工業學校
圖書館藏書

北京黑色冶金設計總院編

連續鑄鋼在我們國家來說是一項新技術，所以本專輯有些譯名很難譯得準確。現將個別譯名列表於后，供大家參考。希望同志們提出寶貴意見，以便再版時改進。

另外，為着及時滿足我院科研小組的需要，本專輯在編輯前就進行了制版工作，因而插圖中 Слиток（錠坯）和 Корочка（硬殼）二詞的翻譯與譯文不符。該二詞應分別改為鑄坯和凝固層。

幾個俄華名詞的對表照

Слиток 鑄坯、鋼錠、錠坯

Кристаллизатор с прямой (обратной) конусностью 正(倒)錐形結晶器、
正(反)錐度結晶器

Кристаллизатор 結晶器、鑄模

Скорость вытягивания 拉坯速度、下拉速度、抽錠速度

Корочка 凝固層、硬殼

Зависание 懸掛、掛皮、粘着

Затравка 引坯、引錠、結晶拉頭

Лунка жидкого металла 液相穴、液相管、液相孔洞

注：本專輯的各位譯者原來採用的名詞不統一，經研究暫時推薦採用上列俄文單詞的第一個譯名。我們盼望國內專家們提出更合適的譯名。

技 術 通 訊 科

連續鑄鋼過程的研究

В. С. 魯捷斯和 Д. П. 耶夫捷也夫

(中央黑色冶金科學研究院)

中央黑色冶金科學研究院曾對連續鑄鋼過程的掌握進行了研究。在研究工作中，確定了過程主要參數（澆注速度，液相深度，澆鑄金屬的溫度，鋼號，冷卻強度等）之間的相互關係。有關這些主要參數的知識給着手設計和建造工業性的連續鑄鋼設備奠定了基礎。新土拉冶金工廠及「紅索爾莫沃」工廠最初安裝的工業性裝置的工作經驗証實，以前所得到的過程規律性是正確的，同時在掌握上述設備的過程中，也發生了一些新的問題。

其中主要問題之一，是將澆注速度提高到一定的限度，以保證在較短的時間內澆注較大量的液體金屬，也就是提高設備的生產能力。澆注速度的提高會引起連續鑄坯中液相深度的增加，結晶線的改變（即結晶器出口處鑄坯凝固表層厚度的縮小），改變鑄坯表面與結晶器器壁之間的摩擦值的改變等等。

強烈的冷卻法保證得到細粒組織的鑄坯，但另一方面，鑄坯的強烈冷卻將引起內裂縫的形成。這樣，為了擬定最優越的連續鑄鋼工藝過程，必須確定過程所有的重要參數——澆鑄速度，冷卻強度等，與所得之連續鑄坯質量之間的相互關係。要解決這些任務，不進行廣泛的連續鑄鋼過程的理論研究是不行的。

工作經驗指出，研究過程的主要方向應當是研究鋼的結晶與熱交換的條件。這方面的知識，可以提高澆鑄速度，改善鑄坯質量，製造構造合理壽命較長和二次冷卻操作正確的結晶器，從而保證設備生產率的提高。

研究的任務：研究連續澆鑄時鋼的結晶和

熱交換的第一階段，包括有下列任務：

1. 研究連續鑄坯與結晶器之間的熱交換和結晶器通道中水的流速、結晶器工作壁的錐度以及澆鑄速度之間的關係。

2. 研究二次冷卻區內鑄坯與水之間的熱交換條件。

3. 研究連續澆鑄過程中鋼的結晶條件。

研究的方法：根據所提出的任務，採用了下列研究方法。

1. 利用測量結晶器銅壁溫度，或者測量通過結晶器的冷卻水的消耗量及其加熱溫度的方法，測定結晶器中的散熱量。

2. 測量二次冷卻區的耗水量及水的加熱溫度，以確定二次冷卻的散熱量。

3. 用試驗的方法測定連續鑄坯中液相深度和結晶線，以研究鋼的結晶條件。

連續鑄坯中液相深度及結晶線的確定①

採用兩種方法確定液相深度和結晶線：射線照相法及測量鑄坯內部溫度的方法。

射線照相方法包括在澆鑄末期在鑄坯中加入一定數量的放射性同位素：磷 P^{32} 或硫 S^{32} ，同時兌入液體鉛（圖1）。從鑄坯上切得橫向和縱向試樣，磨光以後，攝取其射線照片，即可確定結晶線在鑄坯高度上和橫斷面上的位置。液相的深度，則可按切割鑄坯過程中所發現的鉛的分佈位置來確定。

第二種方法，是用裝置在引坯中的鉑—鉍熱電偶，測量結晶鑄坯內部的溫度。

①，中央黑色冶金科學研究院，新土拉冶

「索爾莫沃」工廠，

電偶的接點，距引坯300—400公厘，並用石英套保護。熱電偶的電極安在外部襯有耐火材料的鋼管內。後來用中央黑色冶金科學研究院研究出的ЦНИИЧМ—1型電極制做熱電偶。在這種情況下，接頭沒有保護，在澆鑄過程中直接與液體金屬接觸。熱電偶的讀數記錄在專門的儀表上。按溫度—時間座標上曲綫的拐點確定鑄坯完全凝固的時間（圖2）。

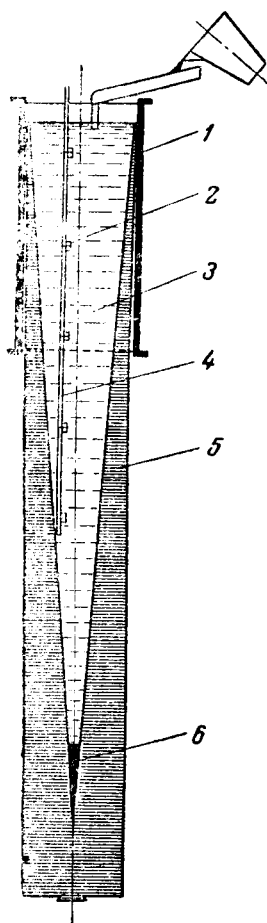


圖1 鑄坯中加入鉛和放射性指示劑磷以確定液相深度和液相形狀：

- 1. 結晶器； 2. 指示劑磷； 3. 鋼水；
- 4. 鉄桿； 5. 凝固硬殼； 6. 鉛。

所進行的試驗結果確定，扁坯完全凝固的

時間，例如3號鋼（СТ.3），在鑄坯厚度為150公厘時是6分鐘，並在一定的鑄坯冷卻條件下，液相深度與澆鑄速度成正比，即

$$L = 6 \cdot u \quad (1)$$

其中L——液相深度，公厘；

u——拉坯速度，公厘／分鐘。

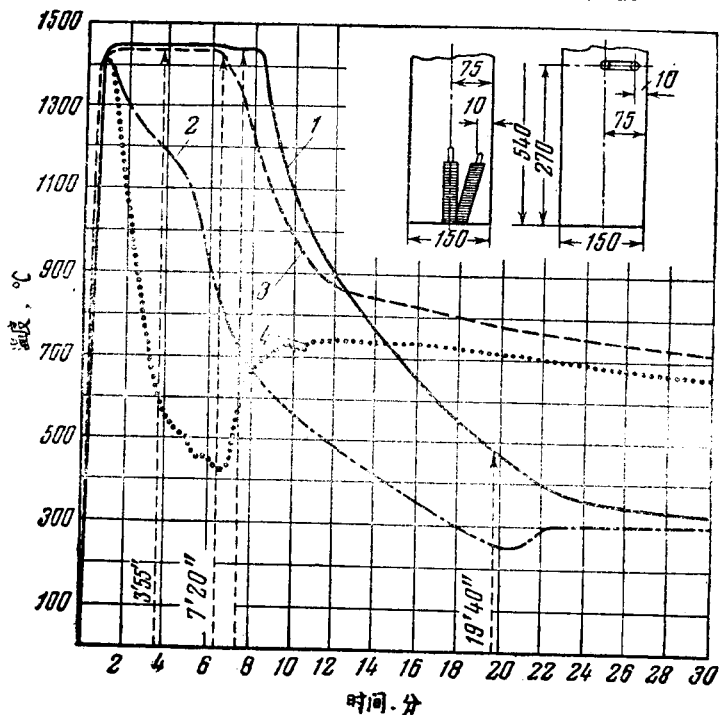


圖2 熱電偶在鑄坯內部的佈置簡圖及金屬溫度與時間的關係。

1X18H9T不銹鋼№28鑄坯；

1——中心；2——表面；7' 20" ——澆鑄時間；19' 40" ——二次冷卻時間，Y8ΓA鋼№88鑄坯；3——中心；4——表面；3' 55" ——澆鑄時間；6' 30" ——二次冷卻時間。

由測量鑄坯內部（沿其軸心）溫度的方法所得到的完全凝固時間，和用放射性指示劑和鉛所得到的液相深度的結果是很符合的。設完全凝固時間為6分鐘，當拉坯速度為315公厘／分鐘時，所得到的液相深度為1890公厘，當拉坯速度為500公厘／分鐘時，液相深度為3000公

厘，拉坯速度為600公厘／分鐘時，液相深度為3600公厘，拉坯速度為700公厘／分鐘時，液相深度為4200公厘。用射線照相法得到的液相深度，在上述拉坯速度下，分別為1900，3030，3630，及4160公厘。根據厚度為150公厘的3號鋼鑄坯完全凝固時間的試驗數據來看，平均結晶速度等於12.5—14.6公厘／分(0.156—0.244公厘／秒)。

當研究連續鑄鋼工藝過程時，結晶器出口處鑄坯凝固層的厚度有很大的意義。用射線照相法確定凝固層厚度的結果指出，結晶器出口處凝固層的厚度隨着澆鑄速度的增加而減小。這樣，當澆鑄3號鋼(CT.3)，厚度為150公厘的扁坯時，結晶器出口處凝固層厚度為：

澆鑄速度(公厘／分)	凝固層厚度公厘	
	寬面，	窄面
400	50	40
550	46	37
700	42	33

上述情況下，寬面長度與窄面長度之比在3.2—4.0範圍內。

由所列出的數據看到，窄面凝固層厚度比寬面小些，這是由於鑄坯凝固收縮時，鑄坯與結晶器之間，形成空隙的條件不同所造成的。沿窄面形成的空隙比寬面早。隨着寬面長度與窄面長度比值的減少，寬窄邊凝固層厚度差異減小。當比值等於2時，得到下列結果：

澆鑄速度 公厘／分	凝固層厚度，公厘	
	寬面	窄面
315	50	49
600	34	32

由上述數值可以確定，3號鋼(CT.3)凝固層厚度與單位時間內結晶器的散熱數值及鑄坯斷面周邊間的下列相互關係。

$$\delta = \frac{Q}{11.5up}$$

其中 δ —凝固層厚度，公厘，

Q —散熱值大卡／秒，

u —澆鑄速度，公尺／分，

p —鑄坯周邊，公尺，

確定150×600公厘1X18H9T不銹鋼鑄坯凝固層厚度的結果，也說明凝固層厚度隨澆鑄速度的增加而減小。拉坯速度由500公厘／分提高到1200公厘／分時，結晶器出口處凝固層厚度由50減少到20公厘。

根據所列出的資料可以得出，斷面厚度為150公厘的3號鋼(CT.3)扁鑄坯，當澆鑄速度為400—700公厘／分時，平均凝固速度，寬面

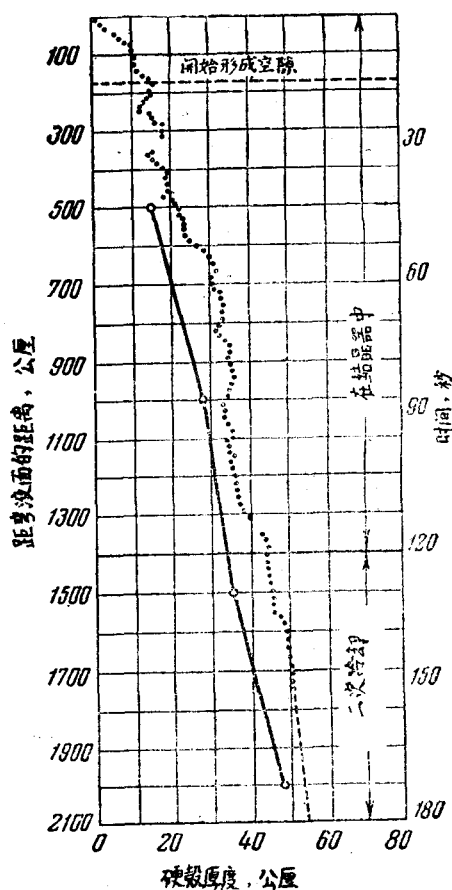


圖3 3號鋼鑄坯斷面為150×475公厘，澆鑄速度為700公厘／分，鑄坯高度上凝固層厚度的變化：

虛線——寬面；實線——窄面

虛線——寬面；實線——窄面

變化為 15.4~22.7公厘/分，而窄面變化為 12.3~17.8公厘/分。澆鑄150×600公厘的1X18H9T鋼鑄坯時，當拉坯速度為500—1200公厘/分時，平均結晶速度為17.8~17.1公厘/分。

所列出的1X18H9T鋼和3號鋼(CT.3)鑄坯，其寬面長度與窄面長度之比值為3.2—4.0，隨着此比例值減少到2.0—2.4時，3號鋼(CT.3)平均凝固速度增加到17.4~20.7公厘/分(澆鑄速度為500—600公厘/分)。

鑄坯由結晶器抽出后，結晶速度逐漸減小，這可以由表示高度的凝固層厚度沿着鑄坯的變化曲線圖中看出(圖3)。

除此之外，由此圖中還可看到，結晶線並不是平坦的曲線或平直的表面，而是有凸起或凹陷的，這是由於結晶器中鑄坯冷卻的不均勻，液體鋼流冲刷的作用，初晶形成的速度不同，以及介質的物理狀態等不同的原因所造成。在不銹鋼鑄坯中，凝固層厚度的變化特別不均勻。而在鑄坯凝固末期，結晶線的不均勻性則逐漸減小。

確定連續鑄坯中，結晶線和液相深度的結果可以得出下列的結論：

1. 液相深度的數值與拉坯速度成正比。
2. 在結晶器出口處鑄坯凝固層厚度隨着拉坯速度增加而減小。
3. 寬面長度與窄面長度之比值愈大，則寬面凝固層厚度比窄面凝固層厚度亦就愈大。
4. 結晶器中鑄坯凝固層的平均結晶速度高於整個鑄坯的平均結晶速度。
5. 沿着鑄坯高度的凝固層厚度的變化是不均勻的。鑄坯凝固末期結晶線逐漸趨向展直。

結晶器與二次冷卻區熱交換

的研究，結晶器工作的熱條件

結晶器中的散熱量與其通道中水的流速，澆鑄速度之關係。對3號鋼(CT.3)及1X18H9T鋼澆鑄150×500及150×600公厘扁鑄坯，進行了結晶器熱交換與其通道中水的流速及澆鑄速

度關係的研究。

根據測量結晶器中水的耗量及水的加熱溫度確定了散熱量。耗水量用裝置在排出管上的流量板及環形無標度的流量計進行測量，後一種流量計上帶有將讀數傳送到第二個儀表的感應傳送器或EHC型浮子式差示讀數的壓力計。結晶器進水和排水系統安裝有鉻鋁鐵合金—鋁矽鎂合金差示熱電偶，其據有很小的慣量，對測量結晶器進出水溫度差有很大靈敏度。根據上述的測量，可以按下面公式計算出單位時間內結晶器總的散熱量。

$$Q = CWr\Delta t$$

其中C——水的熱容量，大卡/公斤·°C

W——水耗量，立升/秒

r——水的比重，公斤/立升

Δt ——結晶器中水的溫升，°C

Q——散熱量，大卡/秒

澆鑄3號鋼(CT.3)試驗時所得到的結晶器中水加熱溫度的變化與其通道中水流速(或結晶器耗水量)的關係的數據列於表1和圖4

澆注3號鋼時，結晶器中之散熱量 表1

澆鑄速度， 公厘/分	通道中水的 流速， 公尺/秒	水的溫 升，°C	散熱量 大， 卡/秒
400 (鑄坯150×600)	2.94	13.8	287
	3.78	10.6	284
	5.27	8.2	308
	3.20	9.5	237
450 (鑄坯150×500)	3.85	8.0	240
	4.50	7.0	244
	5.13	5.8	232
	5.80	5.5	248
480 (鑄坯150×500)	3.85	8.2	246
	4.50	7.0	245
	5.13	5.8	244
	5.64	5.3	232

澆鑄金屬的溫度等於1560—1590°C。

由列出的試驗數據得出，隨着結晶器通道

中水流速的減少（或水耗量的減少）水的受熱溫度不斷升高；但散熱強度實際上並沒有改變，因為冷卻水加熱溫度的升高抵償了水耗量的減少。例如，在以速度為400公厘／分經過150×600公厘斷面結晶器進行澆鑄的情況下，冷卻水流速由5.27降低到2.94公尺／秒時，水的溫升由8.2°提高到13.8°C；澆鑄速度為480公厘／分時，經過150×500公厘斷面結晶器的冷卻水，冷卻水流速由5.64降到3.85公尺／秒時，水的溫升由5.3°C提高到8.2°C。在第一種情況下，散熱量波動在308—287大卡／秒範圍內。在第二種情況下散熱量波動在232—246大卡／秒範圍內。鑄坯寬度由600公厘減少到500公厘，對於結晶器中水的受熱溫度沒有很大的影響。

為了確定澆鑄速度對於散熱強度的影響，在澆鑄3號鋼（CT.3）時，曾進行了專門的試驗。在同一爐鋼的澆鑄過程中，拉坯速度變化為300—800公厘／分。試驗在兩個不同錐度的結晶器中進行，結晶器錐度為：

$$\frac{F_H - F_B}{F_H} \cdot 100$$

其中 F_H ——結晶器下部橫斷面積；

F_B ——結晶器上部橫斷面積。

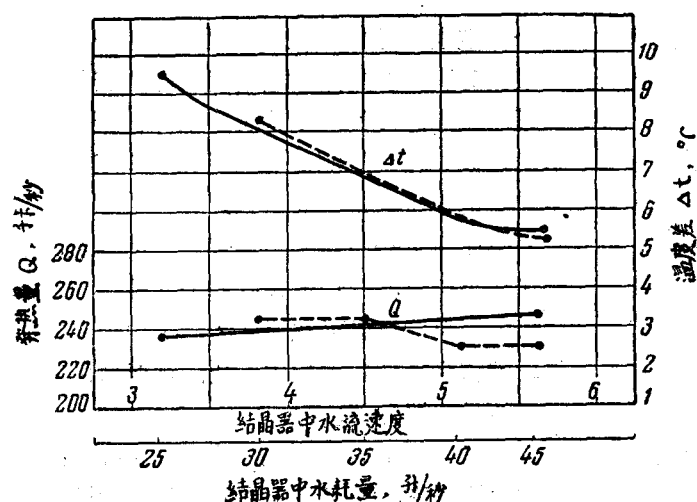


圖4 結晶器中耗水量與散熱量的關係

虛線——金屬溫度1590°；澆鑄速度480公厘／分；實線——金屬溫度1560°；澆鑄速度450公厘／分；

當進行上述之試驗時，結晶器採用了下面的錐度：

$$\text{№12結晶器} \dots \frac{F_H - F_B}{F_H} \cdot 100 = +3.21\%$$

$$\text{№4結晶器} \dots \frac{F_H - F_B}{F_H} \cdot 100 = -0.02\%$$

在兩種情況下，結晶器中的水耗量均為60立升／秒。

分析上述試驗的結果（圖5）指出，單位時間內結晶器散熱量隨着澆鑄速度的提高而增加，澆鑄速度由300增加到800公厘／分時，散熱量提高了110大卡／秒，或是提高了56~68%，但是當澆鑄速度接近於800公厘／分時，散熱量增長的速度逐漸緩慢。

在150×600公厘結晶器中，澆鑄1X18H9T鋼時也得到了近似的數據。隨着澆鑄速度由500增加到1200公厘／分時，結晶器中的散熱量由360提高到567大卡／秒。

由上述試驗數據也可以確定，結晶器工作壁錐度與散熱量的關係：錐度由+3.21%變化到-0.02%，也就是改變3.23%時，散熱量可相應增加30大卡／秒，或增加62800大卡／公尺²小時。散熱強度隨着結晶器工作壁向下收縮的錐度變化而增加的實際作用，可由按公式（2）計算結晶器出口處鑄坯凝固層厚度的結果加以鑑定。鑄坯凝固層厚度隨着錐度由+3.21%變化到-0.02%而增加了12—19%。

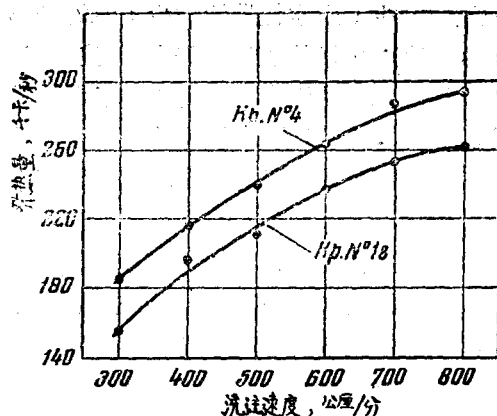
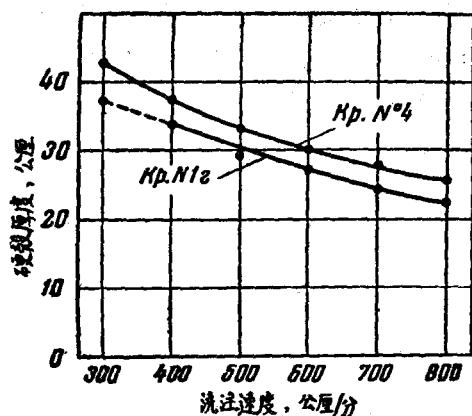


圖5 3號鋼 (CT.3) 澆鑄速度對於結晶器出口處鑄坯凝固層厚度以及結晶器散熱量之影響

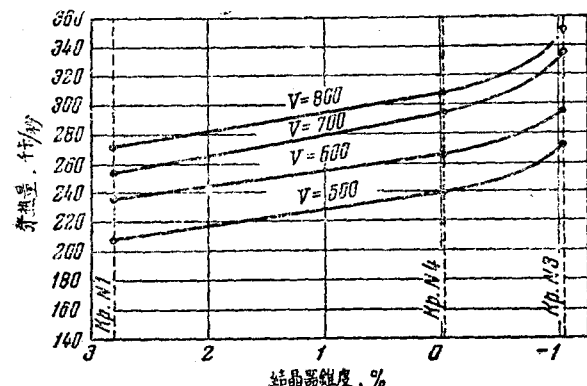


圖6 在不同的澆鑄速度下 (V, 公厘/分) 結晶器中的散熱量與結晶器錐度的關係

在整理用熱工控制儀表測得3號鋼(CT.3)在不同錐度的結晶器中拉坯速度下的澆鑄過程的讀數之后所得到的數據, 很好地証實了此次研究澆鑄速度及結晶器錐度對於結晶器中散熱量影響的試驗結果。

金屬水平面的波動, 以及伴隨凝固層破壞所產生的“懸掛”對於結晶器散熱強度有很大的影響。當“懸掛”時, 在凝固層破裂的地方, 液體金屬與結晶器壁直接接觸, 因而散熱量顯著的增加, 水的加熱溫度亦將增加1.5°到2.0° C。

這樣, 研究結晶器通道中水的流速, 澆鑄速度及錐度對於結晶器散熱強度之影響的資料可以得出: 第一, 結晶器散熱強度與結晶器通道中水的流速無關係; 第二, 結晶器散熱強度

隨着澆鑄速度提高而增加, 並隨着結晶器工作壁由正錐形 (上部面積比下部小) 變為反錐形 (上部斷面大於下部) 而增加。

結晶器工作的熱條件。結晶器工作熱條件的研究是在斷面為150×580公厘, 長度為1400公厘的結晶器中鑄鋼時進行的, 結晶器的銅壁是互相平行的, (錐度等於零) 厚度為10公厘。在銅壁上 (一個寬面, 一個窄面), 安裝了29個康司坦登 (Константан) 合金熱電偶, 16個裝在寬壁上, 13個裝在窄壁上。熱電偶的數量及其沿壁高度上的佈置和安裝的方法的選定, 應能滿意地確定溫度沿着結晶器高度變化的特性 (圖7)。寬面壁上12個熱電偶接點與窄面壁上9個熱電偶接點佈置在距靠近鑄坯這一側的銅壁表面2公厘處。其餘的熱電偶接點則安裝在距靠近冷却水這一側的銅壁表面上1公厘處。熱電偶的讀數是藉助於測量導線用ЭПΠ-09型自動記錄的電子式電位表記錄。

為了測量結晶器壁與鑄坯之間的空隙, 安裝了10個探尺, 探尺與變壓器型之感應傳送器連接。探尺的移動可在傳送器二次中引起電動勢, 其移動數值與電位成正比。電動勢的數值用電測量儀器記錄。

為了測量水的耗量 (結晶器和二次冷却區) 及其加熱溫度, 採用了上述的熱測量設備。

上述的結晶器中鑄鋼過程的測量, 經過相

當的系統整理之后，可以確定沿着結晶器器壁高度上（無論是靠近金屬這一側，或靠近水這一側）溫度的分佈，熱流的分佈，鑄坯凝固層厚度，以及沿結晶器高度上鑄坯表面的溫度。

在這種結晶器上，進行了許多爐3號鋼（CT.3）的澆鑄，澆鑄速度為400公厘/分，結晶器中曾採用了三種耗水量（135；95；75立方公尺/小時，或37.5；26.8和20.8立升/秒，而二次冷卻的耗水量保持不變，均為5立升/公斤，金屬澆鑄溫度為1560—1580°C。

根據試驗的結果可以確定，結晶器上部銅壁的溫度隨着結晶器通道中水流速度的減低而增高。

這種關係，在寬壁上表現得很明顯。但對於窄面壁來講，由於在收縮作用下，鑄坯表面

很早就離開了結晶器壁，所以水的流速變化時窄面壁的溫度變化的影響不大。靠近金屬這一側的銅壁平均溫度，在上部可達到100~120°C，靠近冷却水這一側達到80~90°C。記錄澆鑄過程中結晶器器壁溫度變化儀器的最初圖表指出，溫度常有急烈的波動，波動的幅度達到70—80°，瞬間溫度絕對值達到180—200°C。

可見結晶器銅壁工作的熱條件是十分惡劣的，特別是在結晶器的上部，距寬壁頂端600公厘，和窄壁頂端300公厘一段。溫度劇烈和頻繁的波動能使結晶器壁內發生很大的熱應力，和殘餘變形，而這兩種現象更將引起結晶器器壁的扭歪。器壁的扭歪，特別是橫向的扭歪會給從結晶器中拉坯的工作造成困難。這樣一來，甚至在不大的拉坯速度下鑄坯也要發生“懸掛”。

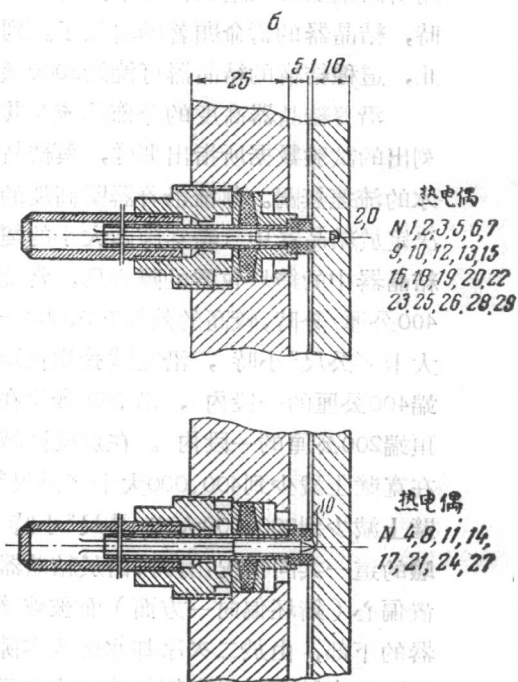
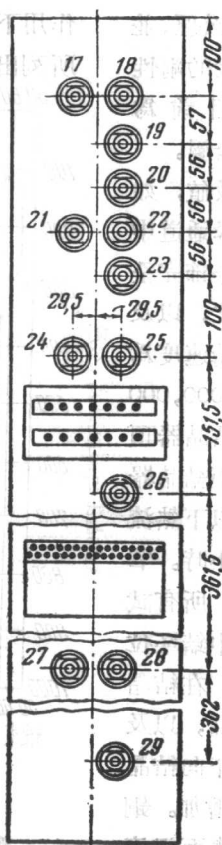
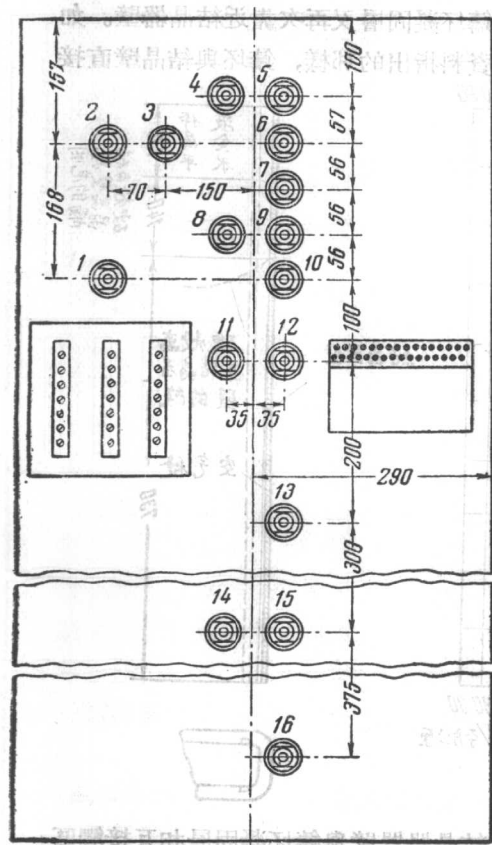


圖7. a.熱電偶在結晶器壁上的配置簡圖 b.熱電偶的安裝圖

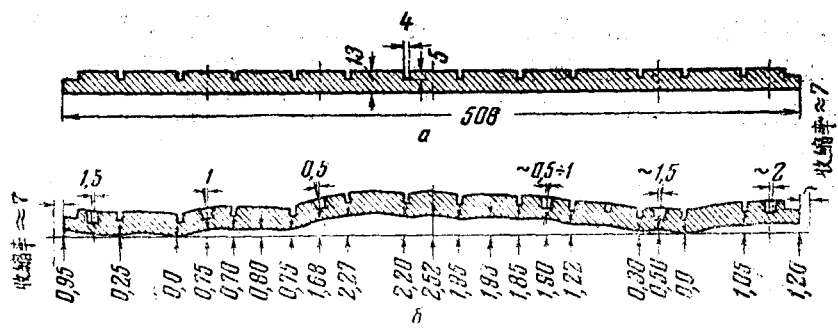


圖8 結晶器寬壁在溫度應力作用下變形

a, 在熱作用以前壁的斷面 b, 在熱作用以後壁的斷面

器壁的扭歪隨着器壁厚度的增加而加劇,此外,還和銅壁與鋼壁的聯接剛性有關(圖8)。當聯接的剛性不夠時,澆鑄過程中銅壁的變形更會破壞銅壁與鋼壁的聯接。連續鑄鋼設備工作的經驗指出,銅壁厚度為10~15公厘,銅壁與鋼壁聯接剛性不夠的結晶器,在澆鑄300~400噸金屬后,就要損壞。銅壁厚度減少到5公厘,並用所謂銅壁嵌入鋼壁內的方法增加聯接的剛性時,結晶器的壽命顯著的增加了。到目前為止,這種結構的結晶器可澆鑄3000噸金屬。

沿着結晶器高度的分佈熱流及其數值,如列出的試驗數據所指出那樣,與結晶器通道中水的流速無關。熱流沿着器壁高度的分佈完全決定於結晶器中氣體空隙區大小的變化,以及結晶器中的鑄坯位置的離心度。當澆鑄速度為400公厘/分時,較高的熱流700,000—1000,000大卡/公尺²小時,沿寬壁發生在距結晶器頂端400公厘的一段內,沿窄壁發生在距結晶器頂端200公厘的一段內。在這些區域以下熱流在寬壁上減少到400,000大卡/公尺²小時。窄壁上減少到300,000大卡/公尺²小時。所有試驗的這一共同情況,有時,由於結晶器中鑄坯位置偏心(鑄坯偏向一方面)而被破壞。在結晶器的下部,由於二次冷却水滲入空隙區,以及鑄坯的赤熱凝固層在鋼靜液壓力作用下向結晶器壁靠近的結果,熱流可以再大大地增加。銅壁溫度、熱流、鑄坯凝固層厚度及其表面溫度等的變化性質,說明鑄坯凝固層在距結晶寬面

頂端400~500公厘處,距窄面頂端150~200公厘處,最后離開結晶器壁。在鑄坯凝固層完全離開結晶器壁之前,由於鋼在從液態變成固態時的收縮作用,而不止一次地出現空隙。但凝固層離開結晶器以后立刻又開始被加熱,因為形成空隙區惡化了熱傳導條件,同時在鋼液靜壓作用下,鑄坯凝固層又再次靠近結晶器壁。如所列出的資料指出的那樣,鑄坯與結晶壁直接

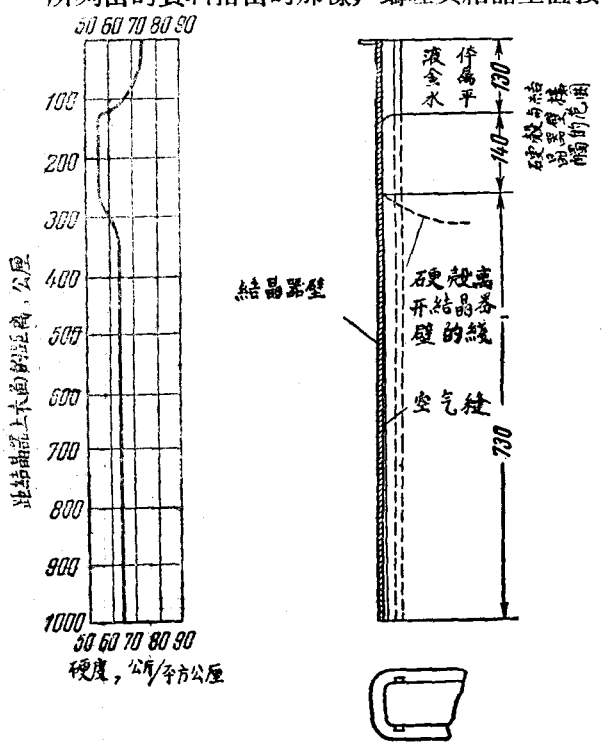
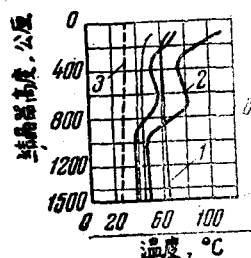
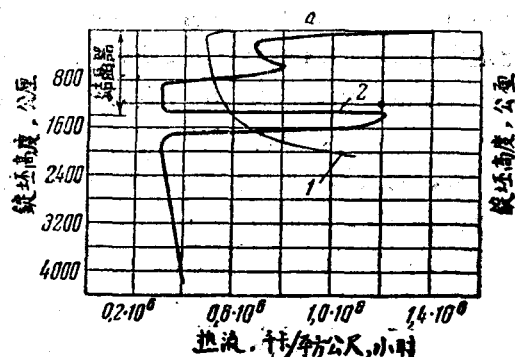


圖9 結晶器器壁與鑄坯凝固層相互接觸區的確定



接觸區域的表面，沿窄壁比沿寬壁小得多，這是由於沿窄面壁的鑄坯凝固層有較大的剛性。

爲了確定直接接觸區的長度曾進行了專門的試驗。在結晶器寬壁和窄壁銜接處，插入經過冷作硬化的銅片（圖9）。澆鑄以後，測量銅片的硬度即可確定：鑄坯與器壁之間的接觸區相當於140~150公厘長度這段內，這個結果與研究沿結晶器高度上熱流和銅壁的溫度的變化等所得到的數據是很符合的。

根據測定澆鑄速度爲700公厘/分和斷面爲 150×500 公厘3號鋼（C T.3）鑄坯中結晶線的結果，對結晶器高度上的熱流分佈，銅壁及凝固層表面的溫度進行了計算（圖10）。計算的數據說明，隨着澆鑄速度的增加，如以上所確定的那樣，熱流的數值將由於總數熱量的增加而增高，鑄坯與結晶器壁直接接觸區距離亦將延長。上述這些數值沿着結晶器高度之佈置情況，與直接測量銅壁溫度所得到之結果是很近似的。

由液體鋼到結晶器冷却水的散熱路線上熱阻的分配的概略計算，可以得到下列結果（系統總熱阻的百分數）

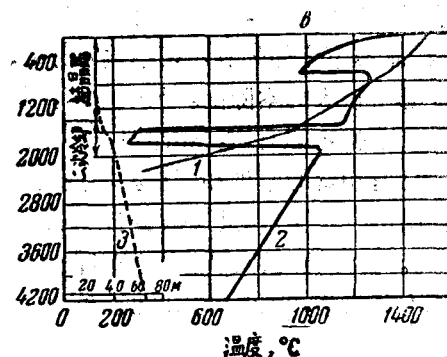


圖10 沿着結晶器高度熱工作條件的變化：

- a——①鑄坯窄壁上的熱流變化，
②鑄坯寬壁上的熱流變化；
b——①結晶器窄壁高度上的溫度變化，
②結晶器寬壁高度上的溫度變化，
③水溫變化；
B——①鑄坯窄面表面溫度變化，
②鑄坯寬面表面溫度變化，
③凝固層厚度變化。

鑄坯	——各部份之熱阻	%
凝固層		26
鑄坯表面	——靠近金屬這一側的銅壁——	71
結晶器銅壁		1
結晶器壁	——水	2
總計		100

這樣，鑄坯表面——銅壁表面這一段的熱阻達到系統總熱阻的70%，這個區段熱阻高的原因是由於結晶器銅壁與鑄坯之間有空隙。所以爲了改善結晶器中鋼水散熱條件，必須降低空隙區的熱阻力。試驗工作指出，爲了達到上述的目的，若用液體物質沿着空隙的高度填實空隙區，是非常危險的，因爲當“懸掛”時，液體金屬會由結晶器中噴出；若用固體物質填實空隙區，是該區段上很難解決結構任務。採用反錐度的結晶器時，散熱量是有所增加的。在這樣情況下，空隙區當然減少了，但還不能完全消除。

於是，試驗的結果說明，鑄坯散失熱量最多

的區段僅在結晶器的上部，大約佔結晶器高度的一半。而結晶器下半部的利用是不夠充分的，因為形成了熱阻很大的空隙區。另一方面，鑄坯凝固的研究數據可以肯定，結晶器上半部的鑄坯凝固層已有相當的厚度和強度。因此將結晶器第一區階的長度由1.5公尺減少至1.0公尺是合理的。長度為1公尺的結晶器不僅可以維持工作應有的安全，而且可以減低銅的消耗以及制造結晶器總的成本。

研究結晶器工作熱條件的結果可以得出下列結論：

1. 結晶器銅壁溫度決定於結晶器通道中水的流速，並隨着水流速度的減低而增加（當金屬澆鑄溫度及澆鑄速度不變時）。

2. 銅壁溫度隨着澆鑄速度的增加而增加。

3. 經過結晶器壁的熱流與結晶器中鑄坯位置的偏心度及澆鑄速度有關。

4. 結晶器與鑄坯之間直接接觸區域的長度，寬壁上為400~600公厘，窄壁上為150—300公厘；並隨着澆鑄速度的增加而增長。

5. 結晶器的長度減少到1公尺是合理的，因為僅在結晶器的上半部散失大量的熱流。結晶器高度減少至1公尺，既可保證工作條件安全，又可以減少制造結晶器的費用。

6. 澆鑄過程中有很急烈的溫度波動，結晶器銅壁的絕對溫度值很高，這會引起結晶器的變形。

7. 在工業上建議採用銅壁厚度為5公厘及銅壁與鋼壁聯接牢固的結晶器結構，以防止銅壁的變形。

對二次冷卻區散熱與澆鑄速度及冷卻強度的關係的研究。在澆鑄厚度為150公厘的3號鋼(CT.3)扁鋼錠時，進行了二次冷卻區散熱強度的研究。利用分段的冷卻水箱使冷卻水以水流狀落到鑄坯上。二次冷卻區總的長度是820公厘。以上述的熱工測量儀表的讀數作為原始數據。

澆鑄速度為500公厘/分並固定不變時，耗水量對散熱強度的影響示於圖11。當每公斤鋼

的耗水量由2.5增加到5立升時，散熱量幾乎成正比地由250增加到480大卡/秒，此后散熱量增加的速度漸減。水量超過6.5—7立升/公斤以後，繼續增加水量，實際上不再有增加散熱強度的效果，而散熱強度仍舊停留在530—540大卡/秒的水平上。

耗水量固定為5升/公斤鋼時，500—800公厘/分的澆鑄速度下關於澆鑄速度對於散熱強度的影響進行了多次研究。研究結果確定，當澆鑄速度由500增加到800公厘/分時，單位時間散熱強度由442增加到552大卡/秒。在同樣的條件下，每公斤鋼散失的熱量由96.4大卡減少到75.7大卡，每立升水帶出之熱由18.1大卡減少到15大卡。

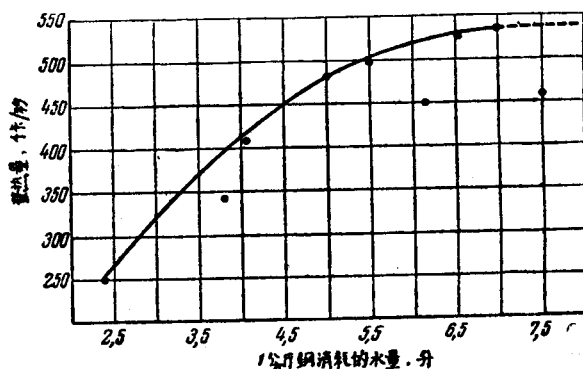


圖11 二次冷卻區水耗量對於散熱強度的影響

此外，曾經在二次冷卻水耗量每秒鐘保持不變，並等於32立升/秒時，澆鑄速度由300變化到900公厘/分的情況下進行了試驗。因此，隨着澆鑄速度增加，每公斤鋼的耗水量(升)所帶走的熱量是減少的。試驗的資料指出(圖12)，當每秒鐘耗水量相同的條件下，澆鑄速度由300提高到900公厘/分時，單位時間散熱強度由387.2增加到665.6大卡/秒。每公斤鋼耗水量由4.0增加到11.6立升/公斤時，1公斤鋼散熱量由80.7增加到141.0大卡/公斤。

這樣，根據所進行試驗的結果可以得出，二次冷卻區的散熱強度比結晶器中的散熱強度大得多。例如，如果澆鑄速度為300—800公厘/

分，結晶器中單位時間散熱量為180—300大卡/秒時，那麼二次冷卻區的散熱量，在同樣鑄速範圍內將達380—650大卡/秒。由於二次冷卻區鑄坯冷卻強度大，故由結晶器抽出後，鑄坯表面溫度降低至200—300°C，這樣沿着凝固層厚度上可能引起比較大的溫度梯度。這就會使得與鑄坯表面不同距離的凝固層產生不均衡的收縮，在鑄坯的橫斷面上，形成內裂縫。當鑄坯軋製成鋼板時，會在鋼板中發生夾層。

為了消除內裂縫，曾經進行了很多工作，在澆鑄過程中在很大範圍內改變二次冷卻區的耗水量及寬壁與窄壁冷卻強度的比。由試驗工作的資料可以確定，為了得到無內裂縫的質量良好的鑄坯，必須大大地減少耗水量（小於1立升/公斤鋼）及保證在較大的長度內均勻的冷卻鑄坯。

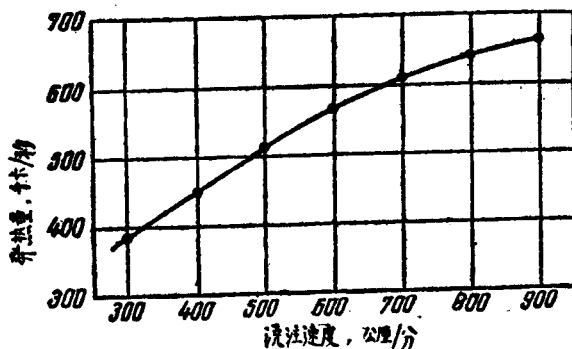


圖12 澆鑄速度對於二次冷卻區散熱量的影響

在分段二次冷卻的情況下，是不可能得到這種條件的。在這種情況下，最小的耗水量是11立升/秒，當澆鑄速度為800公厘/分時（每秒鐘7.33公斤鋼），單位耗水量等於1.5立升/公斤鋼。除此之外，耗水量較低時，當鑄坯由結晶器中抽出後，容易引起鑄坯“膨脹”。因此，曾設計和制造輥子噴霧式二次冷卻，以保證耗水量低於1升/公斤，並由於二次冷卻區的長度增加至2940公厘，用噴嘴供水時，水是霧狀的，並且沿着二次冷卻區整個高度上設有可防止鑄

坯“膨脹”的輥子，而使鑄坯的冷卻比較均勻（圖13）。

總之，二次冷卻區冷卻強度對於鑄坯質量影響的研究工作指出，分段的二次冷卻，由於會產生內裂縫或鑄坯“膨脹”，而不能保證得到優質鑄坯。

採用輥子噴霧式的冷卻時，能在耗水量不大於0.9立升/公斤的條件下，得到無內裂縫的鑄坯。而完整的輥子可防止鑄坯的“膨脹”。

連續鑄坯的熱平衡。為了比較結晶器，二次冷卻區及空氣中冷卻時所散失之熱量，曾經進行了連續鑄坯熱平衡的計算。

為了這個目的，曾進行了澆鑄3號鋼（CT.3）和1X18H9T鋼的試驗，3號鋼鑄坯斷面為150×500公厘，澆鑄速度500和800公厘/分，1X18H9T鋼鑄坯斷面為150×600公厘，澆鑄速度為500、1100、及1200公厘/分。當過熱溫度為80—100°C時，1公斤3號鋼（CT.3）鋼水熱含量為327大卡/公斤，而1X18H9T鋼為330大卡/公斤，結晶器耗水量為43—45立升/秒，二次冷卻區耗水量為5立升/公斤。

3號鋼（CT.3）鑄坯熱平衡計算的結果（圖14）說明，當澆鑄速度由500增加到800公厘/分時，1公斤鑄坯在結晶器中絕對散熱值由322增加到380大卡/秒，二次冷卻散熱絕對值由444增加到552大卡/秒。以全部熱含量為百分數表示的相對散熱值（大卡/公斤），則結晶器中散熱量由20.5減少到16%，二次冷卻散熱量由28.5減少到23%。鑄坯其餘的熱散失，在設備中（在二次冷卻區以下）與設備外的總和，當澆鑄速度為500公厘/分時，為鋼的總熱含量的51%，當澆鑄速度為800公厘/分時，則提高到總含熱量的61%。

結晶器和二次冷卻區水耗量不變時，鑄坯離開二次冷卻區後的溫度，應當是隨着澆鑄速度的增加而提高的。由試驗的資料可以確定，澆鑄速度由500提高到800公厘/分時，離開二次冷卻後的鑄坯溫度由700°提高到850—875°C。

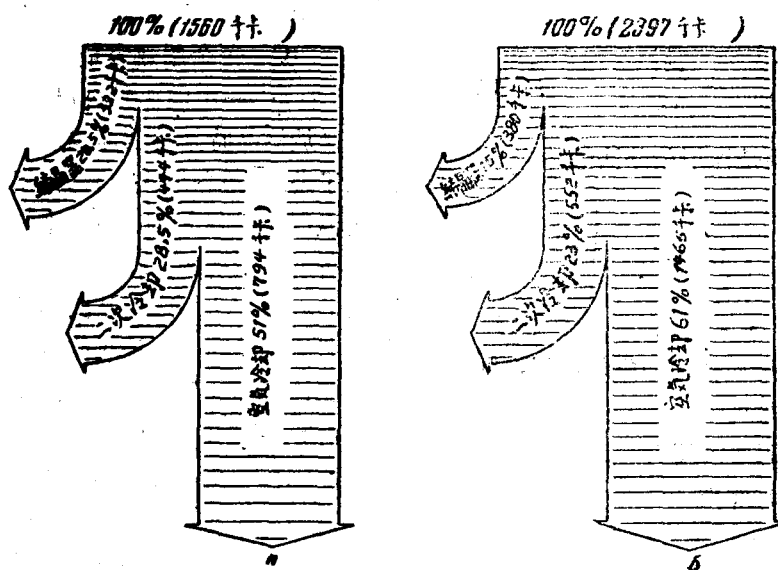


圖14 3號鋼 (CT.3) 連續澆鑄過程的熱平衡

a. 澆鑄速度為500公厘/分；b. 澆鑄速度為800公厘/分

兩種鋼號鑄坯熱平衡計算的結果可以得出下列之結論：

1. 1公斤鋼在二次冷却散失之熱量多於結晶器中的散熱量。

2. 當增加澆鑄速度時，1公斤鋼的散熱溫度，無論在結晶器中或在二次冷却區均減低。

連續鑄鋼的結晶和熱交換的近似計算方法

當研究連續鑄鋼過程中鋼的結晶和熱交換時，從凝固層內溫度成直線分佈出發所得到的計算凝固層厚度的近似方法，具有很大誤差，因為，鑄坯與結晶器之間有很大的熱交換強度，尤其是鑄坯和二次冷却之間有更大的熱交換強度，因此凝固層中的溫度分佈和直線分佈有很大的差別。

連續澆鑄的一些主要問題，如鑄坯表面溫度變化及凝固層中溫度場變化與澆鑄速度，鑄坯斷面形狀及結晶器構造的關係等問題，在許多情況下是無法用已有近似公式很精確解決的。

考慮到凝固層中溫度非直線性的斯梯芬熱傳導基本微分方程將部分解決，由於與熱交換

強度及凝固層厚度有關的結晶速度係數的不定性，以及鑄坯表面固定溫度的假定性，而不可能得到很好的結果。

在連續澆鑄條件下，鋼的結晶速度比較大，而且在比較短的時間中，熱交換強度變化亦很大，故不可能像計算鋼錠模中鋼錠的結晶那樣，採用平均的表面溫度和平均結晶速度係數。

假若認為與鑄坯移動方向垂直斷面上的熱交換是確定的，那麼這種情況就可以在一定程度簡化連續澆鑄時鋼的結晶和熱傳導過程的實驗研究。

結晶器中鑄坯每個斷面的散熱值，可很容易用測量結晶器銅壁溫度的方法來測量。而通過鑄坯表面的熱流是從理論上整理實驗數據的基礎。

因為在鑄坯表面溫度隨時間而變化的情況下，求解熱傳導基本微分方程式是不可能的，所以為了解決所提出的問題（確定溫度場，表面溫度等）必須採用近似的計算方法。

熱傳導的一般理論指出，結晶計算的熱傳

導微分基本方程：

$$\frac{dt}{dr} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

結晶的部分解法是採用積分法〔1〕

$$t = t_{\pi} + (t_k - t_{\pi}) \frac{G\left(\frac{x}{\sqrt{4ar}}\right)}{G\left(\frac{k}{\sqrt{4a}}\right)}, \quad (2)$$

式中 t ——凝固層內任何一點的溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_k ——結晶溫度；

t_{π} ——鑄坯表面溫度；

$G(x)$ ——積分或然率

$$G(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

當解決這些問題時，假定了下列的一些主要情況：物體表面瞬時溫度為 t_{π} ，並繼續保持恆定。

由方程式(2)得知，凝固層的厚度與時間有一定的關係，

假設 $t = t_k$ ， $x = \xi$ （其中 ξ 為凝固層厚度，公尺），則

$$\frac{G\left(\frac{\xi}{\sqrt{4ar}}\right)}{G\left(\frac{k}{\sqrt{4a}}\right)} = 1;$$

$$\text{所以 } \frac{\xi}{\sqrt{4ar}} = \frac{k}{\sqrt{4a}}; \quad \xi = k \sqrt{r}, \quad (3)$$

式中 k ——結晶速度係數，公尺/小時 $^{\frac{1}{2}}$

r ——由結晶開始起的時間，小時，

結晶速度係數，可根據鑄坯表面溫度的不同用超越方程式確定。這個方程式為無因次式：

$$\frac{q_k}{C(t_k - t_{\pi})} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\frac{k^2}{e^{4a}}}{\frac{k}{\sqrt{4a}} G\left(\frac{k}{\sqrt{4a}}\right)}, \quad (4)$$

式中 q_k ——結晶潛熱，大卡/公斤；

C ——金屬熱容量，大卡/公斤 $^{\circ}\text{C}$ ；

a ——導溫係數公尺 2 /小時。

關於結晶時鑄坯表面溫度是固定的假設，限制了公式(2)和公式(3)的應用範圍。當鑄坯表面溫度變化時，熱傳導基本微分方程是不能用分析解法求解的。在這種情況下，利用各種不同的近似方法解決結晶問題，所知道的方法，包括考慮到凝固層溫度成直線分佈〔2,3,4〕及非直線性分佈〔5〕的方法。假設溫度是直線分佈的，計算凝固層厚度的近似方法，僅僅在表面溫度變化在一定的範圍內，才能得到良好的結果。當熱交換強度較大時，凝固層中溫度的分佈，實際上和直線分佈有很大的差別，而近似方法則有很大的誤差。

改進近似的方法是加入一係數，此係數考慮到凝固層中溫度非直線性分佈〔2,3〕，而實際上是乘以金屬的熱容量。當用級數〔6〕，近似求解熱傳導微分基本方程時可以得到比較好的結果，但在這種情況下必須進行相當繁瑣的計算工作。

當熱交換強度很大時，假如已知在鑄坯冷卻的具體情況下，凝固層中溫度分佈是一曲線，則鋼的結晶問題可以得到比較精確的解決。

設溫度場的方程式為： $t = p(x+m)^n$ (5)

其中 P, m, n 為時間的函數。

當 $x = \xi$ 和 $t = t_k$ 時，此方程式可以寫成下列形式

$$t_k = P(\xi + m)^n. \quad (5')$$

方程(5)除以方程(5')，則得：

$$\frac{t}{t_k} = \frac{(x+m)^n}{(\xi+m)^n}$$

或

$$t = \frac{(x+m)^n}{(\xi+m)^n} \cdot t_k. \quad (6)$$

係數 m 及 n 由邊界條件確定，而邊界條件可由鑄坯表面溫度或通過鑄坯表面的熱流來確定。

方程式(5)不是熱傳導微分基本方程的數學解法,但如下面將指出那樣解決邊界條件時,近似解法是與精確的分析解法很符合的。由於所得到的方程式比較簡單,可用以解決有關工程實踐上金屬結晶的各種問題。

當 t_n = 常數線時的條件下,來比較近似解法和精確解法。用無因次式精確解法導出的主要公式,有下列之形式:

$$\frac{\xi}{X} = \frac{k}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{ar}{X^2}}, \quad (7)$$

式中 X ——物體一定的尺寸。

$$\text{設 } \frac{\xi}{X} = \delta; \quad \frac{k}{\sqrt{a}} B; \quad \frac{ar}{X^2} = Fo; \quad \text{則} \\ \delta = B \sqrt{Fo}, \quad (8)$$

式中 B ——結晶速度無因次係數;

Fo ——無因次的時間(福立業規範數)

$$Q_K = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e^{-\left(\frac{1}{2}B\right)^2}}{\frac{1}{2}BG\left(\frac{1}{2}B\right)}, \quad (9)$$

$$Q_K = C \frac{q_K}{(t_K - t_n)}.$$

由公式(9)列出可以得出了 B 與 Q_K 很精確的關係。

現在誘導凝固層中溫度按方程式(6)分佈時的結晶線方程式。

當 t_n = 常數時, m 和 n 與時間無關。結晶線的熱平衡方程式為:

$$r_{q_K} d\xi = \lambda \left| \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=\xi} \cdot dr, \quad (10)$$

式中: r 為結晶時鋼的體積重量,公斤/公尺³

λ 為凝固層的熱傳導,大卡/公尺小時⁰C

將方程式(6)的導數值代入(10)則得

$$r_{q_K} d\xi = \lambda \frac{n(\xi+m)^{n-1}}{(\xi+m)^n} t_K \cdot dr.$$

方程式左右兩端均乘以 $(\xi+m)$ 得:

$$r_{q_K} (\xi+m) d\xi = \lambda n t_K dr. \quad (11)$$

假如鑄坯表面相對溫度為 $\vartheta = \frac{t_n}{t_K}$,則

$x=0, t=t_n$ 時。

由方程式(6)可得出:

$$\vartheta = \frac{m^n}{(\xi+m)^n} \text{ 或且 } \vartheta^{\frac{1}{n}} = \frac{m}{(\xi+m)},$$

$$\text{因此, } m = \frac{\xi \vartheta^{\frac{1}{n}}}{1 - \vartheta^{\frac{1}{n}}}. \quad (12)$$

把 m 值代入(11),整理后得

$$\frac{r_{q_K}}{1 - \vartheta^{\frac{1}{n}}} \cdot \xi d\xi = \lambda n t_K dr. \quad (12')$$

將此方程式進行積分, ξ 的積分極限由 $0 \rightarrow \xi$, tr 的積分極限由 $0 \rightarrow r$,則得:

$$\frac{r_{q_K}}{1 - \vartheta^{\frac{1}{n}}} \int_0^\xi \xi d\xi = \lambda n t_K \int_0^r dr; \quad \frac{r_{q_K}}{1 - \vartheta^{\frac{1}{n}}} \frac{\xi^2}{2} = \lambda n t_K r$$

解有關 ξ 的方程式,得到凝固層厚度與時間的關係。

$$\xi = \sqrt{\frac{2n\lambda t_K (1 - \vartheta^{\frac{1}{n}})}{r_{q_K}}} \sqrt{r}. \quad (13)$$

近似的解法,如精確解法一樣,所得凝固層厚度的數值與時間平方根成正比。

整理上式之后得到無因次方程式,

$$\frac{\xi}{X} = \sqrt{\frac{2nt_K (1 - \vartheta^{\frac{1}{n}})C}{q_K}} \cdot \frac{\lambda}{Cr} \sqrt{\frac{r}{X^2}} \quad (14)$$

$$\text{設, } \frac{\xi}{X} = \delta; \quad \sqrt{\frac{2nt_K C (1 - \vartheta^{\frac{1}{n}})}{q_K}} = B'; \quad (15)$$

$$\text{此時 } \delta = B' \cdot \sqrt{Fo}. \quad (16)$$

因為 t_K, C 和 q_K 為常數,所以公式(9)中的壓 Q_K 僅與 t_n 有關,因而結晶速度的無因次係數 B