

苏联高等学校教学用书

黑色电冶金学

下 册

Ф. П. 耶德森拉尔 著

李传薪 等译



出版者的話

本書根据苏联冶金出版社出版的耶德森拉尔著“黑色电冶金学普通教程”1955年第二版俄文本（Ф. П. Еднерал Электрометаллургия стали и ферросплавов, Общий курс, Второе издание, Металлургияиздат, 1955）譯出。原書經苏联高等教育部审定为高等冶金工业院（校）用教科書。它并可供电爐炼鋼与鉄合金冶炼技术人員参考。

本書中文譯本分兩冊出版。上册內容包括电爐分类、炼鋼电弧爐的机械設備与电气設備、爐衬砌筑、碱性与酸性电弧爐炼鋼法、联合炼鋼法及感应电爐等。下册內容为高級優質鋼的澆注，鉄合金爐，电爐鉄合金生产工艺及金屬还原法等。

此外，書后还附有一篇对本書內容的評論，供大家參考。

本書下册由北京鋼鐵学院电冶教研組李传薪、宋文林、章藝韵、孔祥茂翻譯。

下 册 目 录

第一部分 炼 钢 (續)

第四篇 高級優質鋼的澆鑄	(1)
第十三章 高級優質鋼鋼錠的結構和尺寸。鋼錠模	(2)
鋼錠的結構	(2)
鋼錠和鋼錠模的尺寸	(13)
第十四章 出鋼的準備工作和鋼的澆鑄	(18)
第十五章 澆鑄方法與技術操作	(31)
澆鑄方法	(31)
澆鑄的技術操作	(34)
連續澆注和半連續澆注	(48)
第十六章 高級優質鋼鋼錠的缺陷及其防止方法	(52)
第十七章 軋制或鍛造前鋼錠的準備	(75)
清理方法的選擇	(76)
熔煉檢查	(83)

第二部分 鉄合金生产

第五篇 鉄合金爐	(88)
第十八章 鉄合金爐的機械設備	(88)
爐壳	(88)
電極把持器	(89)
接觸頻板	(90)
懸吊臂	(92)
電極升降機械	(93)
電極升降裝置	(94)
爐子的水冷却	(97)
裝料設備	(98)
軸風和吹風	(102)

出口燒穿器.....	(102)
鉄合金爐的爐衬.....	(107)
第十九章 鉄合金爐的电气設備和爐體尺寸.....	(110)
变压器功率的選擇.....	(110)
爐缸尺寸.....	(111)
电压的选系.....	(112)
电极的直径和心圓.....	(114)
短綫路.....	(115)
自动調整器.....	(121)
第二十章 連續的自熔电极.....	(122)
第二十一章 冶煉生鉄用的封閉式电爐.....	(125)
第六篇 电爐冶煉鉄合金的生产技术.....	(129)
第二十二章 砂鉄生产.....	(130)
砂的物理化学性質.....	(130)
熔煉过程的物理化学原理.....	(134)
熔煉技术和爐况故障.....	(136)
出爐.....	(140)
技术經濟指标.....	(142)
第二十三章 鉻鉄生产.....	(144)
鉻的物理化学性質.....	(144)
鉻鉄的生产方法.....	(146)
高碳鉻鉄的生产.....	(147)
砂鉻合金生产.....	(153)
低碳鉻鉄和微碳鉻鉄的生产.....	(157)
精煉鉻鉄的其他制造方法.....	(163)
鉻鉄的磁碎.....	(165)
第二十四章 錳鉄生产.....	(167)
錳的物理化学性質.....	(167)
高碳錳鉄的生产.....	(168)
砂錳合金的生产.....	(175)
中碳錳鉄的生产.....	(177)
第二十五章 鈳鉄生产.....	(180)
鈳的物理化学性質.....	(180)
由鉄磁鉄矿提取鈳.....	(182)
熔煉过程的物理化学原理.....	(184)

熔炼技术.....	(87)
技术经济指标.....	(87)
防止钒的损失.....	(88)
防止在钒铁中的有害杂质.....	(88)
第二十六章 钨铁生产	(111)
钨的物理化学性质.....	(111)
熔炼技术.....	(112)
第二十七章 安全技术	(130)
第七篇 由氧化物制取金属的金属热还原法	(135)
第二十八章 钛铁生产	(137)
钛的物理化学性质.....	(137)
原材料和熔炼过程的物理化学原理.....	(138)
熔炼前原料的准备.....	(139)
熔炼设备和熔炼技术.....	(141)
钛铁中有害杂质的防止.....	(141)
第二十九章 钼铁生产	(161)
钼的物理化学性质.....	(161)
原料和熔炼过程的物理化学原理.....	(161)
熔炼前原料的准备.....	(163)
熔炼设备和熔炼技术.....	(163)
第三十章 安全技术	(211)
参考文献	(212)
附录	(213)
书评	(223)

第四篇 高級優質鋼的澆鑄

在制得優良鋼錠的複雜而又重要的工作中，鋼的澆鑄是最重要的操作之一。電爐煉鋼車間的生產率是按所產的合格鋼錠來計算的。可以在電爐內煉出非金屬夾雜物和氣體含量少的，脫氧良好，化學成分合格的優質鋼液，但會由於澆鑄不當而毀掉了它。許多冶金界權威認為：正確地進行澆注比冶煉還要困難。出鋼後，當鋼液在盛鋼桶內和鋼錠模內進行凝固時即發生很複雜的過程；此過程在短時間內就結束，因此任何違反操作規程的錯誤和偏差都將無法補救。因此要求領導澆鑄工作的工長具有高超的技術，能隨機應變的本領並通曉保證得到優質鋼錠的條件。在先進的電爐煉鋼車間中，大部分澆注工作是在車間主任的參加下進行的，澆注時用光學高溫計測量鋼液溫度，用秒表測量每個錠模的注滿時間；將測量結果記入鑄錠操作卡片。

高級鋼鋼錠的質量取決於許多因素：出鋼槽、盛鋼桶、鋼錠模之清潔程度；鋼錠模周圍和澆注工段的清潔情況；鋼錠模的形狀與大小；澆注的溫度和速度；鋼錠模的塗料；澆注方法；耐火材料的質量；鋼錠冷卻情況。車間所煉鋼種的成分不一時，需要上述各種因素與鋼的成分相適應。

在所有高級優質鋼鋼種的澆鑄工作中，應普遍而且嚴格遵守的一個條件是：清潔。煉鋼車間全體工作人員的生產好壞首先取決於鋼液所經過的全部設備（從爐子到錠模）的清潔情況以及整個澆錠間的清潔情況，在冶煉中應特別注意使鋼中不含有非金屬夾雜物，因此不允許在澆錠間里把鋼水弄脏。

按技術操作規程，澆錠車或澆錠坑的准备工作包括準備耐火材料、砂子和粘土，清理廢磚和垃圾。必須及時地清除廢物，噴水清掃工段的各部分，將裝配好的錠盤上的孔蓋上，給已塗好塗料的鋼錠模加蓋以防止灰塵落入流鋼道和鋼錠模中。

第十三章 高級優質鋼鋼錠的結構和

尺寸 鋼錠模

鋼錠的結構

高級優質鋼是澆在上大下小并帶有保溫帽的鋼錠模中。圖 138 所示為重 3700 公斤鋼錠的縱剖面之結構，圖 139 所示為重 2.6 噸 1X18H9T 鋼錠的縱剖面結構。一般的結構分成五個帶：由細顆粒等軸晶 6 組成的表面激冷層，柱狀晶帶 8，由無定向等軸晶 5 組成的中心帶，致密顆粒狀結構 9 之沉澱錐帶和縮孔帶 2。各帶之間沒有顯明的界限，各個帶的延伸程度決定于鋼的澆注條件和鋼的成分。

在上一世紀 70—80 年代中，俄國偉大的冶金學家 Л. К. 契爾諾夫在關於鋼的相變與鋼錠結構方面作出了巨大的貢獻。他首次闡述了鋼的結晶情況，描繪了鋼錠中樹枝晶形成的機構，確立了鋼的結晶規律。

鋼錠的組織是在接連不斷的結晶過程以後成形的，開始凝固是在表面最冷的地方，以後擴展到內部，直到鋼錠的中心部分結束。

鋼的結晶決定于兩個因素：即凝固速度和選分結晶，由於選分結晶成分較純的晶体先由鐵、碳、錳、磷、硫和其他元素組成的溶液中析出。

模中鋼液的結晶過程是立刻從模壁附近的許多晶核開始的，由於模壁強烈的吸熱作用而形成表面的等軸晶激冷層，其成分與盛鋼桶中的鋼水成分相同。但因為快速冷卻的時間很短，因此激冷層不厚。

模溫迅速升高，鋼液經鋼錠表面層往外散熱的速度變慢，因此以後鋼液的結晶取決于選擇凝固作用，成分較純的具有較高熔

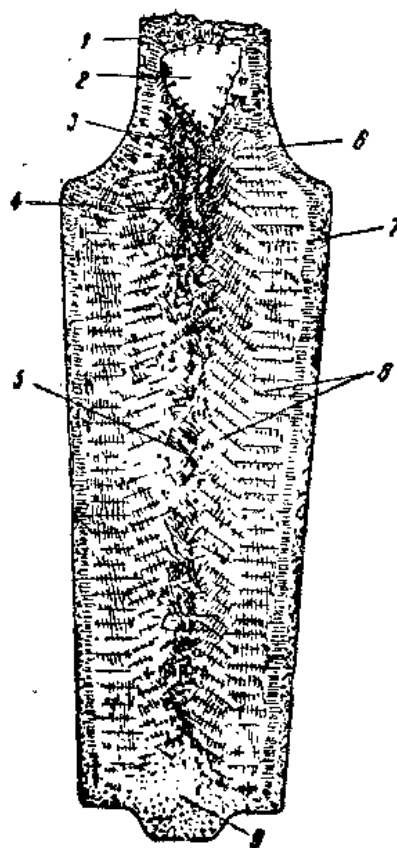


图 138 4吨鋼錠的结构图

1—帽桥；2—气孔；3—气孔与偏析带；4—疏松与偏析带；5—无定向的轴晶带；6—等轴晶表面层；7—垂直于钢锭模壁的小树枝晶；8—大树枝晶—柱状晶带；9—沉积杂质

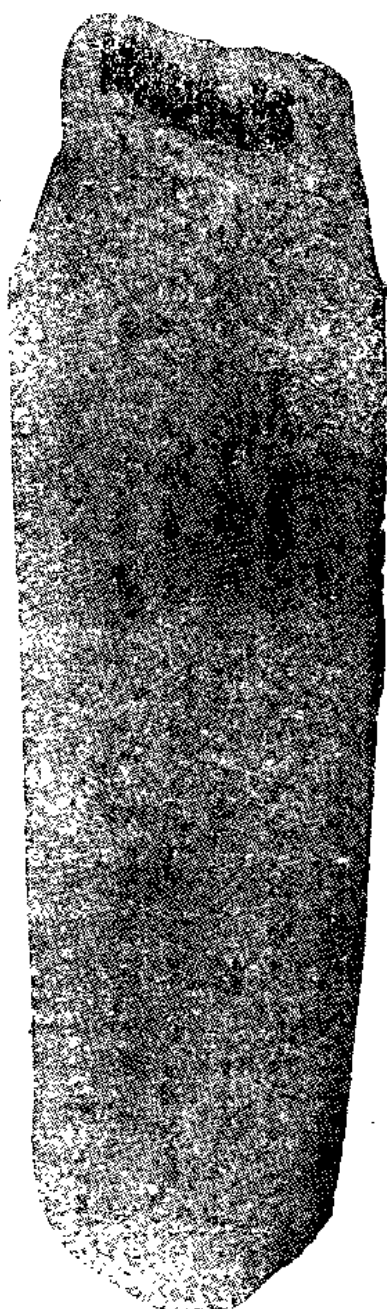


图 139 2.6吨 1X18H9T 鋼錠之縱剖面

点的金屬先凝固。这时沿着晶体的主軸方向开始形成含炭較少的晶架，从这些晶架上又分出与其垂直的晶枝，晶枝上又分出垂直于它的新晶枝。

凝固的結果形成了树枝状的晶体，称之为树枝晶，以后合金元素含量高的以及非金屬夹杂物和气体的鋼液就在树枝晶之間凝固。柱状晶带之树枝晶主軸开始时是垂直于冷却表面即垂直于模壁，以后由于气体和比重較小的非金屬夹杂物向上运动以及鋼液之热对流作用，方向稍偏上端。柱状晶带可能扩展得很大；它决定于适合树枝晶生长時間的长短，浇注时溫度高速度快，則柱状晶大。在合金鋼中由于其导热性差，因此柱状晶带也較大。

在高铬或高镍鋼中当浇注溫度高时，柱状晶带可能延伸到鋼錠中心。

从浇注开始經過一阶段后，因鋼錠的收縮与鋼錠模的膨胀，在鋼錠与鋼錠模之間产生一縫隙，它大大地減慢了鋼錠中热的传出，因此柱状晶停止长大。母液在緩慢的散热条件下結晶。因为模壁冷却作用較弱，因此所形成的結晶軸沒有一定的方向，晶体在各个方向上都可以自由地长大。

鋼液中非金屬夹杂物的数量过多，会增加晶核的数目。鋼錠中心部分的鋼液以較快速度凝固，这是因为数量不多的鋼液有早已凝固的很大的冷却表面之故。因此在鋼錠的中心部分形成了无定向等軸晶。

許多冶金学家認為，鋼錠下部的結晶錐是由于較密实的純的晶体下沉到底部而形成的。B. M. 达吉也夫和B. A. 杜特金对鋼錠下部的結構作了另一种解釋。他們在結晶过程中的不同時間里向注入鋼錠模內的鋼液中加入“示蹤原子”借以記錄鋼液在凝固过程中运动的情形。这时弄清在未形成沉积錐以前的时期中，加入到鋼錠冒口部分的“示蹤原子”，只能向下扩展到鋼錠液体部分的弱高度，不能达到錐形带。因而認為鋼錠下部的錐形带是由于厚的鋼錠模底与錠模下部模壁共同的冷却作用而形成的。鋼錠的凝固速度可近似地用下式計算：

$$X = K\sqrt{\tau};$$

式中：X——在 τ 分鐘時間內凝固層的厚度，厘米；

K——常數，當鋼在生鐵模內凝固時它等於2.6。

鋼錠的樹枝晶結構可以在經過腐蝕後的（例如用25%的硫酸溶液）鋼錠試片上用肉眼看出。圖140為具有顯明的三個晶帶的鋼錠試片。

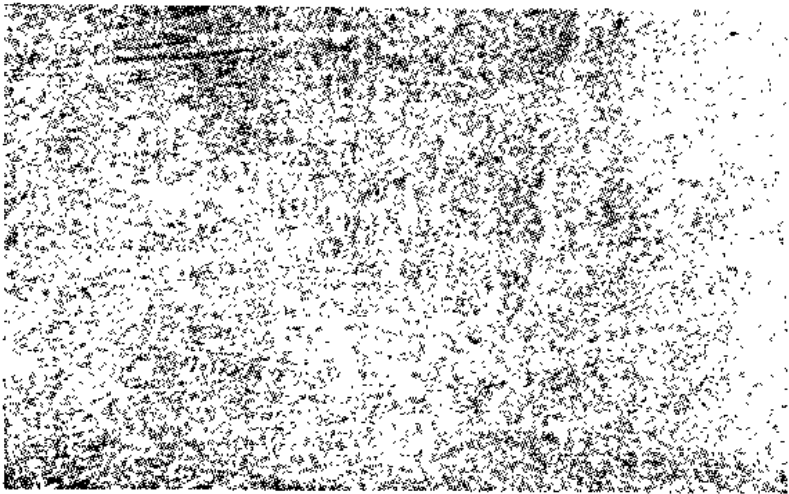


圖 140 鋼錠的樹枝晶結構（腐蝕後的低倍試片）

鋼錠成分的不均勻性 鋼錠不但在結晶結構上有不均勻性，而且鋼中主要成分，非金屬夾雜物和氣體的分布也是有不均勻性的。這種不均勻性在工廠中稱之為偏析。鋼錠中的偏析分為帶狀偏析（粗視偏析）和樹枝晶間偏析（顯微偏析）。大鋼錠有二個帶狀正偏析帶（即其濃度高於平均值）和一個負偏析帶（其濃度低於平均值）（圖141與圖142）。

硫的偏析傾向最大，其次是碳和磷。帶狀偏析產生的原因如下：我們已講過，表面晶粒分折恰好與盛鋼桶內鋼液成分相適應。柱狀晶是由含雜質少的鋼液凝固而成。晶架形成以後，由於金屬在凝固期的收縮，而在樹枝晶間生成間隙，而間隙處將被上

面的或中心区的含有許多易熔化合物的鋼液充填起来（硫化物和磷化物）。

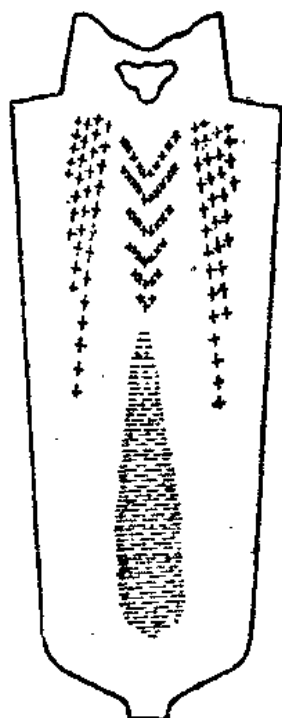


图 141 鋼錠中偏析带示意图
正号表示正偏析带，负号表示负偏析带

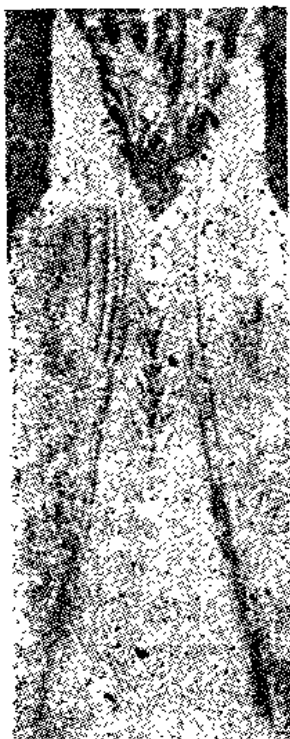


图 142 重10.5吨鋼錠的正偏析

密度比周圍介質小的不純的金屬受有四种力的作用：密度差造成由下而上的力；結晶前沿的移动所形成的把鋼液挤向鋼錠軸心的力；由于收縮而产生的鋼液柱下降，其力的作用方向是由上而下；最后，鋼液往晶間孔隙內充填造成从中心向边界和自上向下的力。由于上述各种力的相互作用，含有杂质的金屬的集聚过程是按复杂的路綫而进行，而凝固了的金屬标记了这集聚过程的情况。

Б.Б.古里亚耶夫認為：在鋼錠的表面帶主要是漂浮力——凡

形偏析；在軸心区主要是鋼液柱的收縮下降——V形偏析。

И形偏析的形成过程尚未搞清。B. M. 达吉也夫根据在小鋼錠上作的实验工作结果提出以下的解释〔8〕。在鋼液与处于二相状态(固相+液相)的鋼长时间的接触情况下，发现其中溶解的杂质有再分配现象，使鋼錠的区域性化学不均匀性得到了发展。这时由于二相区析出碳硫磷而增加了鋼液中这些元素的含量。二相区是由貫穿着孔道互相联通的地区之树枝晶骨架所組成。杂质从富含杂质的晶軸間隙地区向与二相区接触的液体内的扩散过程，主要决定于其間的浓度差。

区域性的化学不均匀性发展的必要条件是：杂质在液相和固相中有不同的溶解度（决定于組成的性質），而且液相与二相区共同存在有相当长的時間，足以进行杂质向液相的扩散过程。

杂质的結晶与扩散过程相互作用引起了周期性的凝固，而形成了鋼錠的周期性的结构。当結晶速度減慢时（散热能力减小）杂质便可更完全地由二相区扩散到液体內，这样就降低了液体的結晶溫度，并且減緩了液体的凝固速度直到完全停止凝固。由于树枝晶軸貫穿富含杂质的液体层伸入鋼錠的内部，而此处鋼液成分尚未改变，因此結晶便加速进行。

关于V形偏析的形成原因，大多数冶金学家認為是由于富含杂质的鋼液因收縮下降而产生的。这偏析带从縮孔的下面开始，向下大約伸展到鋼錠的中部。軸心区的V形偏析是在鋼錠凝固末期形成的，这时在鋼錠上半部的中心部分残留着不多的半凝固状态的鋼液。

一部分富集杂质的鋼液被滯留在树枝晶之間，形成了树枝晶的偏析（簡称为枝晶偏析）。柱状晶的平均成分与鋼液成分相同，用一般的化学分析方法不能发现其中成分的变化，因为电鑽取样时所取的金屬有在晶軸上的，也有在晶軸間的。用硫印法可以显露出枝晶偏析，在加工变形过的金屬样片中在显微镜下是以带状结构出现。

偏析严重地损坏了鋼錠組織的均匀性而在成品上造成許多缺

陷。

各元素偏析程度随钢锭重量的加大、浇注温度与速度的提高，易于产生偏析的杂质在钢中含量的增加而增大。

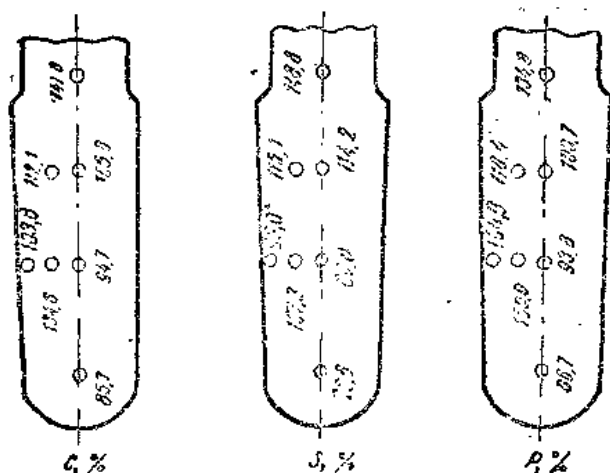


图 143 中等重量的钢锭之碳硫磷分布

中等重量的钢锭（1吨左右）的碳硫磷的分布如图 143 所示。以盛钢桶内的成分取为 100；在取样的点上写下该试样所含成分之相应的百分数。与钢液的最初成分相比，钢锭下部杂质的含量要低些。B.M. 达吉也夫解释为由于杂质在固体和液体铁内溶解度不同，因而杂质由二相区向液相区扩散，使富集杂质低密度较小的金属自下而上地移动。

缩孔与收缩疏松 液体钢的比重比固体钢小，因此在钢凝固时比重便减小，即产生钢的收缩。根据 K.O.A. 薛多脱若的资料，碳素钢的收缩为 3~3.5%，且随着钢液温度的升高而加大，在开始凝固时，钢锭的表面层进行收缩，形成的表面层因收缩作用与钢锭模壁分开，此时钢锭中心仍为液体，随着表面凝固层的增厚，体积的收缩便在钢锭的最后凝固部分生成内部空穴。在带有保温帽的钢锭模内进行浇注时，最后凝固的是头部金属，而缩

孔便在这里形成*。鋼液在鋼錠模內凝固的程序可以用4.5吨40X未完全凝固的鋼錠的縱剖面图來說明，这些鋼錠是 H. Л. 阿格也夫和 B. K. 波罗夫卡在注滿鋼錠模后經過40、60、90及100分鐘把鋼錠翻倒而得（图 144）。应用保溫帽可以保証使縮孔位于在鍛造或軋制过程中要被切去的鋼錠切头部分。

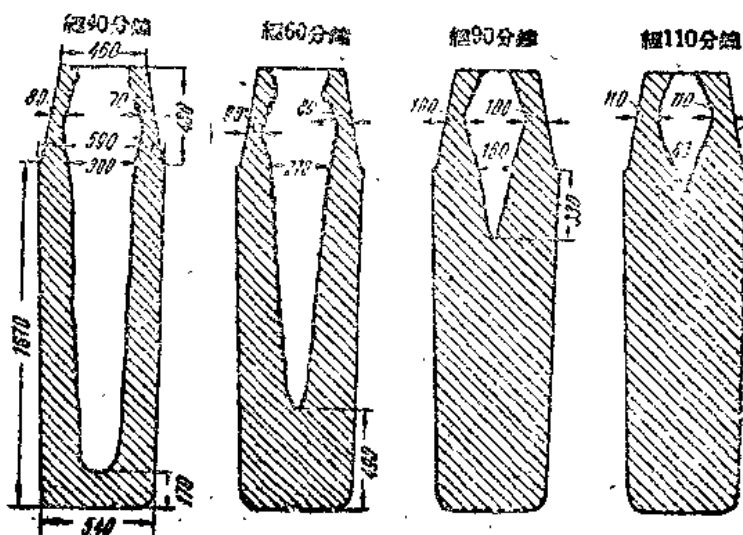


图 144 在結晶过程中傾倒后之鋼錠壳

鑄細長的鋼錠时，若錠高与其中部橫截面直径之比超过2.5~2.7，而錐度小于3%，則在鋼錠軸心部分会发现軸心疏松，它常有坚实的金屬桥与縮孔相隔开。

凝固期中体积的收縮引起金屬液由上而下，由中心向邊緣的移动。随着軸心区鋼液的减少与枝晶之間通道断面的减小，液体金屬的移动发生困难。以后一部分的金屬在凝固时不能去充填所有的收縮孔，因此形成了軸心疏松和枝晶間的疏松。

* K. T. 特魯平观察了縮孔認為是由于鋼錠中鋼液凝固最晚区中在表面硬壳下气体集聚而形成。

疏松可能是由于在温度降低时从溶液中析出的气体集聚而引起的。鋼錠凝固末期，金屬粘度增大，使气体上浮洩入縮孔中更多困难。图 145 所示为沿鋼錠軸向所形成的孔隙情形（1200 公斤的鋼錠在浇注以后 24 分鐘将其傾倒后所得之錠壳）。

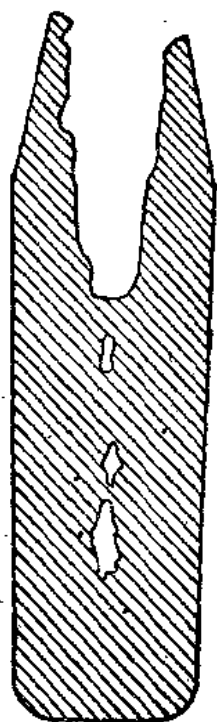


图 145 1200 公斤鋼錠軸心部分的气孔

鋼錠不均匀性的控制 在含大量鉻或鎳，或者大量鉻鎳的鋼中，鋼錠的柱晶区有很大的发展。非金屬夹杂物和气体集聚在柱状晶所形成的界面上，因此晶界面成为鋼錠中的脆弱部分。在鍛造或軋制过程中，鋼錠会沿这些脆弱面而裂开。

前已指出，鋼錠的结构决定于鋼液的选分結晶与結晶速度。对于一定成分的鋼可用控制其冷却速度的方法来控制其結晶过程。为此应改变鋼錠的重量、外形、浇注温度和速度。

在下列条件下，柱晶区扩大：

1. 增加鋼錠重量，因为凝固時間延長了；

2. 提高浇注温度——延長凝固時間，也就是延長了柱状晶无阻碍地生长的時間；

3. 提高浇注速度——較高的浇注速度可使金屬热量相对地增加，因为輻射的热损失与浇注鋼錠模的时间成比例地增加。

据涅尔遜（Nilson）的資料，增加鋼錠模壁厚度可以縮短鋼錠完全凝固所需要的時間。

施于鋼錠模內鋼液的机械作用可阻碍柱晶区的发展，B.B.列尔蒙托夫建議采用振动已注滿鋼液的鋼錠模的方法。在苏联，B.B.列尔蒙托夫的建議曾为 B.H.透茲諾夫成功地采用过。由于振动的結果，在碳素鋼和鉻鋼的鋼錠中設有柱状晶。在国外，列尔

蒙托夫的建議曾为胡尔特格仁 (Hultgren) 所采用。

因为有许多因素对鋼錠的不均匀性起着不同的影响，因此减弱鋼錠的軸心与非軸心的不均匀性是很困难的。如果鋼錠上部液态的保持時間能长一些，而同时加速鋼錠下部的結晶，則和鋼錠凝固末期所产生的收縮有关的軸心的不均匀性即可减小。为了减小非軸心的不均匀性，需要加速鋼錠整个高度上的結晶过程。

为了减小軸心的不均匀性，最好浇注錐度較大的短鋼錠。为了降低非軸心的不均匀性，鋼錠的橫截面应尽可能地小一些。这种鋼錠凝固快，可以防止杂质的析出和轉移。

注入模中的鋼液溫度較高会延长結晶時間和促进偏析的发展。但又因为鋼液溫度过低会引起比偏析更危險的其他缺陷，所以为了减少偏析，应采用加热良好的鋼液，而浇注速度应尽可能地小些。

往沒有完全冷却的模中注鋼时，从偏析的角度来看是有害的；因这种热模子減慢了鋼液热量的传出。

縮孔是高級优质鋼不可避免的缺陷。为提高鋼錠的收得率，必須保証使縮孔位于鋼錠上部的冒口部分（头部）。鋼錠头部的鋼保持液态時間愈长，則縮孔上移的愈高，而鋼錠的質量愈好。可采用下列方法解决此問題：用上大下小的、模壁有較大的傾斜度（錐度較大者）的鋼錠模，采用砌有衬砖并經預热的保溫帽，緩慢地浇注金屬，采用鋁热剂*，用电弧或气体加热鋼錠的头部，用液体渣注入头部或加入木炭粉等等。

縮孔的体积随鋼液溫度的增高而加大，因为这时除了結晶时的体积收縮外，还要附加上液体到开始結晶时的体积变化。緩慢地往鋼錠模中进行浇注可以显著地削弱高溫的影响。

H. F. 斯拉維扬諾夫在1890年試驗成功，并在1895年发表了为提高鋼錠的收得率而用电弧加热来保持鋼錠头部处于液体状态的方案。

* 为防止鋼液中元素的氧化，鋁热剂在使用前必須很好地攪勻。

在高级优质钢錠的生产中应用这种方法获得了极大的经济效益。据“电爐鋼”厂的資料，由于应用电弧加热鋼錠头部，可使鋼錠收得率提高約 6 ~ 8 %。

在許多工厂中，是采用发热剂来加热鋼錠头部，因其中的組成物氧化而放出了大量热量，而且反应产物所形成的渣能保护鋼錠免受空气的冷却作用。以下列出一种加热剂的組成 (%)：

鋁粉.....	28
45%Si的砂鉄.....	5
木炭.....	25
粘土粉.....	30
鋁矾土.....	12

据茲拉托烏斯特工厂的資料，重 3.6 吨的鋼錠其头部溫度降的数值如下：在不加任何东西时，每小时降 300°，填放砂子，为 150°，采用发热剂为 75°。

发热剂通常是在电爐煉鋼車間内准备的。它所用的全部材料应是干燥的細粉末状的。鋁矾土帶入进行氧化反应所需要的氧化鉄。粘土粉或白渣粉是減緩燃烧反应的填充料，因为如果发热剂的組成配得能像火药似的迅速进行燃烧（发火），則所生成的热量不能有效地利用。发热剂正常的消耗量約为 2 公斤/吨。每吨鋼錠的成本提高了 2.5 卢布，但这附加費用可由減少在軋鋼車間中之切头率来抵銷。

用焦炭或木炭充填鋼錠头部时应当小心，因为这易使鋼錠增炭。

即使仅在鋼錠头部有增炭现象，則在应用切头作不氧化法治煉之原料时也会发生困难。

根据 A 吉赫特 (Texter) 及其他人所发表的数据，由于采用天然煤气与氧气混合（煤气与氧之比为 1 : 1.4）燃烧加热鋼錠头部的結果，使鋼錠的收得率增加了 6 ~ 7 %。每吨鋼錠所消耗的氧为 5 ~ 8 立方米。由于采用了此种加热法，鋼錠中沒有縮孔。鋼錠冒口部分的重量減少了二分之一。