

唐鋼译丛

唐山钢铁公司钢研所情报组

一九八一年十一月

目 录

半镇静钢锭的成型和结构.....	张盖楚译 (1)
半镇静钢锭凝固时收缩的进展.....	王海之译 (11)
具有封闭缩孔钢锭的生产.....	王海之译 (14)
顶吹转炉炼钢的STB法.....	刘贵富译 (16)
转炉复合吹炼法的实验.....	李 莉译 (30)
顶底复合吹炼法 (LD—OTB 法) 的实验.....	李 莉译 (31)
钢的冷却和凝固过程中产生脱氧的原因和作用.....	刘国杰译 (32)
炉渣中金属液滴脱碳速度的实验研究.....	王海之译 (48)
钢水中加铝方法的改进.....	李 莉译 (51)
铁水的吸氧速度.....	刘国杰译 (53)
硅对铁素体——珠光体钢脆断的影响.....	刘国杰译 (63)
合金钢中 γ — α 转变的近期研究.....	钱家骥译 (70)
均热炉中一种减少燃料消耗的加热方法——反L型加热法.....	刘贵富译 (77)
《关于钢坯的喷流预热装置》.....	刘梁山译 (92)
在炉底设有出钢口的电弧炉的开发和操作情况.....	刘梁山译 (101)

6852/16



A 659017

半镇静钢锭的成型和结构*

所进行的研究制定了钢锭浇铸的合理工艺，并确定了半镇静钢正常钢锭的成型条件。

许多著作中指出，半镇静钢理想钢锭的特点是没有皮下气泡和明显的缩孔。

但是，正如一些参考文献所指出的，在实践中要在低浇速下浇出这种结构的半镇静钢锭是很困难的。

钢锭的成型过程。浇铸半镇静钢正常钢锭的主要条件，是在注满钢锭模和钢水液面形成凝固壳后，气体从钢锭内急剧地冒出，气体的这种急剧冒出可以补偿金属的自然收缩。在钢锭头部的成型过程中，气体未完全析出将导致形成集中的并与大气未完全隔绝的缩孔，且造成增大切头率。因此，这是违反生产半镇静钢的主要目的的。

如果脱氧度达到足以使钢锭头部形成合理结构的程度，则往钢锭模中注入钢液时不可避免地产生气体（这种气体形成过程呈现为微弱的冒花现象），而在气体形成的强度很小和沿结晶线没有钢液的流动时，可能产生皮下气泡。如果这些气泡位于钢锭表面附近及气泡尺寸很小，则在钢锭加热和轧制时它们通常可以随氧化皮一起被消除，而轧材表面不会产生气泡破裂所引起的缺陷。随着半镇静钢脱氧度的降低，为提高气体析出强度和消除皮下气泡创造越来越有利的条件，因而导致无气泡表皮层的厚度和蜂窝气泡长度增加，结果蜂窝气泡不能随氧化皮一起被消除，且成为钢锭轧制时产生缺陷的原因。

当半镇静钢的脱氧度降低很多时，从开始往钢锭模内注入钢液时起，碳与氧相互作用的反应便有很大发展，以致我们所观察到的不是钢液冒花现象，而是微弱的沸腾。此时，形成相当厚的无气泡表皮层和半镇静钢锭表皮区的结构与过度脱氧的沸腾钢锭结构相类似。此时如果无气泡表皮层的厚度超过 5~6 毫米，则在均热炉内加热的弱氧化工作制下，气泡不致破裂，因而轧材表面不会产生由于气泡破裂而形成的缺点。

增大这种低脱氧度半镇静钢的浇速，只能产生不利的作用（对于沸腾钢也是如此），这是因为无气泡表皮层的厚度减小。所以采用下铸法浇铸这种半镇静钢是有利的。但是，业已证明，这种低脱氧度钢锭与正常脱氧钢锭相比，其轧制产品的机械性能指标较低和均质性较差。因此，只有改为浇铸沸腾钢时，这种低速浇铸工艺才是可取的。与沸腾钢相比，这种脱氧度的半镇静钢成分的均质性和机械性能指标都较高。

正常脱氧半镇静钢锭的小尺寸气泡或者位于表面附近，或者完全没有这种气泡（高浇速时）。只有在钢锭模内壁旁的钢液开始结晶的条件下脱碳反应不发展，或者这一反应与气泡排出同时进行，才可能形成无气泡的表皮层（沸腾后的表皮层）。

如果脱碳反应不能立即进行，则半镇静钢的脱氧度愈大，由于选份结晶发展的结果气体开始形成愈迟和气泡距离钢锭表面愈远。然而这与研究结果相反，因此，唯一可能的解释

* 本文系俄文《半镇静钢》一书的第六章一译者

是：随着半镇静钢脱氧度的增大，无气泡表皮层的厚度和皮下气泡的尺寸减小，并可断定，往钢锭模内开始注入钢液后，半镇静钢内析出气体的反应也立即开始。

但是，如果注入钢锭模内的半镇静钢液的含氧量低于在大气压下与碳的平衡量，则必须协调起来，以使钢液与钢锭模开始接触后，双相区的氧和碳浓度的增长过程立即开始，且这种增长速度进行很快，能立即为脱碳反应过程的进行创造条件。

根据公认的偏析理论（这种理论的基础是认为固相和液相中的杂质具有不同溶解度），在结晶过程中，钢中元素的浓度值是变化的。元素最大浓度与最小浓度之差（这种浓度差能表明钢锭化学不均质性的程度），是由平衡图上的液固相线的位置及液态溶液中的偏析元素的再分配速度决定的。固液相线间的张口愈大和液相结晶时的流动进行得愈强烈，则钢锭的化学不均质性愈大。当液相不流动时，仅仅靠扩散再分配而使杂质从富集层移入液相中，此时扩散再分配的强度是不大的，比对流或因气体析出而产生搅动时的再分配强度要小许多倍。当钢液以极微弱的气体析出（半镇静钢）或无可见的气体析出（镇静钢）而凝固时，则接近上述扩散型情况，且钢锭具有相当均匀的成分；当气体强烈地析出（沸腾钢）时，则将达到最大的不均质性。当没有沸腾现象时，半镇静钢锭头部冷却而迅速形成凝固顶壳，且形成凝固顶壳后，钢液便在封闭的体积内进行结晶和钢液停止接触大气中的氧。在这种条件下，钢液进一步结晶所呈现的特点是液相运动更微弱。因此，半镇静钢锭中的杂质的偏析无多大发展，且这种钢锭的化学不均质性与镇静钢的化学不均质性相差不大。

如果把半镇静钢锭的结晶视为未经受机械搅拌的液相凝固过程，则相界面上的杂质浓度增大和固态晶体中的杂质含量也相应地增加，于是这一过程将继续下去，一直到所形成的固相中的杂质浓度达到进入钢锭模中的钢液内的杂质含量为止。最早形成的晶体的成分将是 $C_E = K_0 \cdot C_L$ ，式中 K_0 是杂质的平衡分布系数， C_L 是钢液成分。在这种情况下，将有数量与 $(C_L - C_E)$ 成比例的杂质从固相中分离。由于分离的杂质的扩散过程进行得很缓慢，所以杂质来不及扩散到液相体积内，且固相界面上的杂质浓度将增大到一个新值 C'_L 。相界面上的杂质浓度增大将导致以后的晶体中的杂质含量也增高，这种增高了杂质含量的晶体的成分将是 $C_S = K_0 \cdot C'_L > C_E$ 。此时，将有数量与 $(C'_L - C_S)$ 成比例的杂质分离，且在这种情况下，杂质将蓄积在相界面的前面并增大浓度梯度。此时，相界面上的杂质浓度增大和固态晶体中的杂质含量相应地增加的过程将继续下去，一直到所形成的晶体中的杂质浓度达到 $C_S = K_0 \cdot C'_L = C_L$ 为止。晶体中的杂质达到这一浓度后，固相成分将相应于钢包中的钢水成分，且 C'_L 值变为一常数： $C'_L = C_L / K_0$ 。因此，在钢液开始结晶期内，固相成分将按照图 1 所示的曲线变化。

当相界面上的液相内的杂质具有稳定浓度后，凝固层的厚度可按式确定：

$$X = D / (K_0 \cdot f),$$

式中 D ——杂质扩散系数；

f ——凝固速度。

利用文献中的数据和关系曲线进行计算表明，在形成厚为 0.6~1.2 毫米的凝固层后所采取的条件下，偏析的结果在相界面上达到碳和氧的最大稳定浓度。

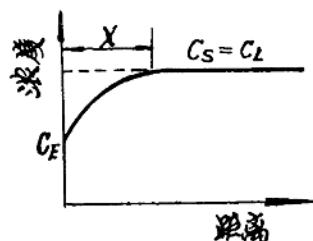


图 1 固相中的杂质浓度随钢液结晶进程而变化的情况

上述计算结果仅具有质量意义，因为往钢锭模中注入钢液时，对钢流进行机械搅动的结果，杂质的有效分布系数 (K_{Φ}) 将大于平衡分布系数 (K_0)。此外，随着氧浓度的增大，在锰和硅的氧化反应过程中也消耗氧。因此，在实际条件下，相界面上的氧的最大浓度将低于计算浓度（但是，在一个很短的时间间隔内也达到计算的最大浓度）。

由此可知，半镇静钢的偏析过程进行的结果，当钢液与钢锭模接触后，实际上为气体立即析出创造条件。

研究往钢锭模中注入钢液的气体析出过程时，应考虑两个主要因素的影响：两相区液态熔体中的杂质浓度的增大和钢水静压力的增高。

为了使气泡增长，气态核心中的一氧化碳、氢和氮的分压力之和应超过外部压力，外部压力主要根据大气压力和钢水静压力之和来确定：

$$P_{CO} + P_{H_2} + P_{N_2} > 1 + HY + 2\sigma/\gamma,$$

式中 P_{CO} 、 P_{H_2} 、 P_{N_2} ——气态核心中的一氧化碳、氢和氮的分压力；

H ——钢水液柱距气泡形成带以上的高度；

γ ——钢水密度；

σ ——表面张力系数；

γ ——核心半径；

$2\sigma/\gamma$ ——毛细压力。

往钢锭模内注入钢液的过程中液柱高度取决于浇铸速度：

$$H = V_{\text{разл}} \cdot \eta,$$

式中 $V_{\text{разл}}$ ——浇铸速度；

η ——浇铸时间。

综上所述，可以得出下述结论：钢中的氧、氮、氢的浓度愈大（在一定的含碳量下）和浇速愈小，往钢锭模中注入钢液时，气泡形成时埋藏的深度和气泡尺寸愈大。

由于钢锭头部的钢水静压力减少，气体析出强度增大。在钢锭顶端附近，反应区实际上无钢水静压力，且总压力与大气压力相差也不大，因此，在半镇静钢锭的最上部通常总是有较大尺寸的蜂窝气泡。

随着钢液逐步注满钢锭模，钢锭模下部的气体形成条件变坏。由于下述两种原因之一，气泡可能完全停止增长：气泡增长速度迅速减少，减少的速度比结晶线的推进速度要快得多，且气泡与液相之间被金属固相隔离；钢水静压力达到临界值的结果，气体停止析出。因此，在每一具体情况下，气泡尺寸取决于结晶速度、气泡增长速度（钢液氧化度和气体饱和度）和钢水静压力增大速度（浇速）之间的关系。

当钢锭头部（此处的钢水静压力最小）凝固时，为气体析出和气泡形成创造最有利的条件。因此，金属《桥》的特点是大量积聚竖直方向的气泡。气泡增长和重力作用的结果，在金属《桥》中的气泡形成处液相被从两相区排挤出来，于是可以促使钢锭中的液态金属水平提高、枝状结晶的凝固前沿与液相保持接触，且金属《桥》厚度增加。此外，收缩过程的发展和钢液被熔析的硅和锰定期脱氧（硅锰的脱氧能力与系统中的压力无关）所引起的效果都是与上述作用反方向。

如果在半镇静钢锭头部顶盖形成的最初期间，气体析出的压力高于大气压，则顶盖变

形，钢锭头部变为凸面。浇铸未完全脱氧的半镇静钢时，气体较急剧地形成，且钢水液面形成的顶层可能在气体压力下破裂。在这种情况下，钢锭的密闭性破坏。此时，不仅位于头部部位上的蜂窝气泡，而且下部的蜂窝气泡都可能增长。上表皮层破裂停止后，未完全脱氧的半镇静钢锭与正常脱氧钢锭一样还能形成金属《桥》。

当半镇静钢过度脱氧时，气体形成的强度不足以使液相与金属顶盖保持接触，结果在早期凝固阶段，液态金属就与顶盖脱离，当顶盖不能对抗大气压力时，顶盖将弯曲而形成凹面。在这种情况下不能保证产生可靠的金属《桥》，所以通常不可避免地形成与大气隔绝不良的集中缩孔。

根据文献资料，当钢液脱氧度降低时，半镇静钢锭集中缩孔的体积大大地减小。例如，在高度脱氧、正常脱氧和未完全脱氧的钢锭中，其集中缩孔的体积分别为2.5%、2.0%和0.4%（镇静钢为3%）。

正常脱氧的大型半镇静钢锭的集中缩孔，比小型钢锭中的集中缩孔小，看来这是由于大型钢锭凝固时钢水液相水平面较缓慢地下降所致。

试验表明，当浇速很大时，半镇静钢锭头部形状可能变为凹面，而这种钢采用普通浇速时，钢锭头部将变为凸面。如果在普通浇速下钢锭头部出现凹面，则说明钢液过度脱氧，且通常伴随产生较薄的金属《桥》和集中的缩孔，而此时在高浇速下则没有这种现象。

注速愈高，往钢锭模中注入钢液终了时凝固金属层的厚度愈薄。因此，提高浇速可以加快注满钢锭模后的钢液结晶速度，因而缩孔形成的速度不能与补偿它的气体析出强度的增加相匹配。此时，由于钢液二次氧化作用较小，气体析出强度甚至稍有降低，所以高浇速浇铸时，钢液中的硅含量稍高和氧含量较低。根据这种现象就可说明高浇速浇铸正常脱氧的半镇静钢时钢锭头部形成凹面的原因。

我们曾对注满模后钢水的不同时间的结晶速度与注速的关系进行过计算，计算结果表明（图2），经5分钟后，结晶速度的差异实际上已消失，因此，可以确定收缩速度（钢水液相水平下降）与气体析出强度之间的正常关系。结果，虽然钢锭头部存在凹面，但缩孔上面的金属《桥》厚度和结构以及缩孔形状无变化。在高浇速下浇出的头部为凹面的这种半镇静钢锭，与普通浇速下浇出的类似钢锭不同点，是后者头部存在凹面表明钢液过度脱氧和在钢锭的整个结晶期间气体析出落后于收缩过程。

预计的情况应该是：在高浇速下浇铸时，往钢锭模内注入钢液期中由于凝固的钢液体积减小，缩孔或抵消缩孔的气泡的体积必然增大。但是，并未发现这种现象，因为钢锭头部的表面形状变化过程往相反的方向发展—由凸面变为凹面。所进行的计算和试验得出的数据表明，上述因素相互作用的结果，半镇静钢锭的缩孔体积实际上与浇速无关。

随着正常脱氧和特别未完全脱氧半镇静钢的浇速从0.5~0.6米/分钟提高到4~4.5米/分钟，钢锭的封顶速度加快，因为钢液在钢锭模内的冒花时间缩短，瘤疤和针孔的数量减少或

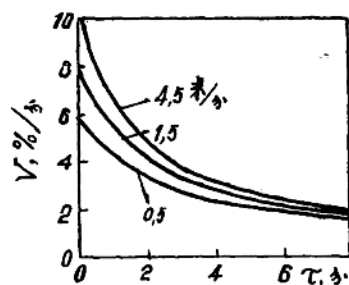


图2 钢锭模注满钢液后钢锭的体积凝固速度在不同时间内的变化（曲线上的数字表明浇速）

者完全消失。

显而易见，这说明浇速增高时半镇静钢的化学不均质性有某些降低（表1）。

缩孔密封性的研究。研究半镇静钢锭中的金属《桥》的透气性问题，对于炼钢实践是很有意义的。

计算表明，凝固的钢锭冷却时，虽然钢中的氢进入缩孔内，但缩孔中的气体压力降低，甚至低于大气压，其原因是气体的体积收缩系数大于硬钢的体积收缩系数。结果，当产生透气的金属《桥》时，在钢锭凝固和加热的情况下，大气中的氧和炉气可能进入缩孔中，因此，缩孔壁氧化而造成轧制时缩孔不能愈合和轧材上分层。

最初，曾在刨床上加工一系列正常脱氧（钢锭模内的钢液冒花时间为15~35秒）和未完全脱氧（冒花时间为60~200秒）的3пс号半镇静钢钢锭。此时，整块钢锭加工到缩孔破裂，然后再加工到纵向轴线。所有钢锭上的金属《桥》的气泡和缩孔都有光洁的内壁（无氧化痕迹）。

表 1 钢锭的化学不均质性程度与浇速的关系

熔炼编号	浇 速 米/分钟	下列元素平均含量， %			变换系数，%			扩散范围*，%		
		C	S	P	C	S	P	C	S	P
1	0.6	0.24	0.026	0.011	22.4	31.9	17.8	137.8	191.0	75.1
	4.0	0.24	0.024	0.012	16.9	25.4	11.8	100.8	153.8	59.3
2	0.6	0.21	0.027	0.007	19.7	22.8	20.9	107.4	128.2	114.2
	4.0	0.22	0.026	0.007	13.3	19.4	16.8	81.8	106.9	82.5
3	0.6	0.22	0.026	0.011	14.6	17.0	17.7	91.7	149.3	88.8
	4.0	0.23	0.026	0.010	12.5	14.8	13.4	82.2	121.1	70.9
5	0.5	0.29	0.037	0.042	19.8	28.0	22.8	131.1	186.5	157.2
	1.5	0.27	0.038	0.047	14.5	23.0	20.6	69.9	179.1	127.0
	4.4	0.27	0.038	0.045	9.8	21.3	19.8	72.9	158.0	122.0

* 最大负偏析度和最大正偏析度之和。

进行较详细的研究表明，缩孔内壁具有未氧化的粗糙表面，这个表面上有明显的枝晶组织及交替的（每隔3~5毫米）水平凸部和凹部（图3）

后来我们又检验不同脱氧度的半镇静钢锭在均热炉内加热时缩孔密封性的完好程度。为此，曾在克利沃罗什钢铁厂对3пс号半镇静钢进行转炉冶炼脱氧试验，加入钢包中的硅锰合金从5.3公斤/吨（根据所采用的工艺）减少到4.2公斤/吨。出炉钢温为1600℃。采取上铸法浇铸，浇速为1.2~1.8米/分钟，钢锭重为8.4吨。根据浇铸进程调节脱

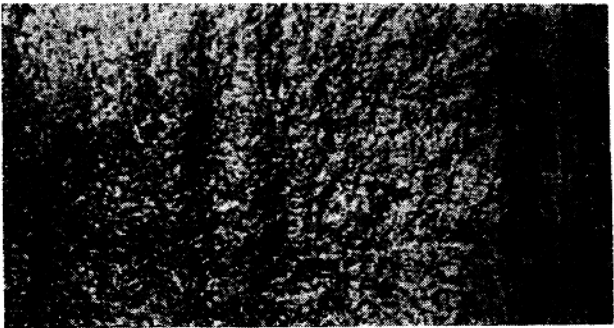


图 3 3пс号半镇静钢锭上的缩孔内壁形状

氧度，调节的办法是往钢锭模内加入不同数量的铝（一直加入到100克/吨）。在这种情况下，曾浇出一系列不同脱氧度的半镇静钢锭。为了进行研究，选取了未完全脱氧、正常脱氧和高度脱氧的典型钢锭（每种选两个，表2）。

表2 不同脱氧度钢的研究结果

钢锭编号	钢锭模内的铝消耗量克/吨	关闭塞棒后模内钢液冒花时间，秒	钢锭头部表面形状	模内取样的化学成分，%			
				C	Mn	Si	O
1、2	—	85	凸面，有大蜂窝和瘤疤	0.18	0.52	0.048	0.013
3、4	30	35	平面	0.19	0.53	0.050	0.010
5、6	100	—	凹面	0.19	0.52	0.053	0.006

首先按照规定的热工制度将钢锭放在初轧机的均热炉内加热，然后使其冷却到室温。在所有冷却后的钢锭上发现有一层厚为2~3毫米的氧化皮。将1号和2号（表2）未完全脱氧钢锭头部侧面的氧化皮除掉后（除掉70%以上高度部位的氧化皮），露出直径为1~2毫米的蜂窝状孔眼，而在钢锭头部表面上（金属《桥》带内）及侧面的中部和下部，上述孔眼的直径不超过1毫米。对孔眼进行测定表明，钢锭下部和中部的蜂窝气泡长度不超过10毫米，上部的气泡长度不超过60毫米，而金属《桥》内的气泡长度则不超过5毫米。对于3号和4号正常脱氧钢锭来说，仅在侧面离顶端10%以内的部位上和上部端面上发现蜂窝气泡形成的孔眼，且其直径分别不超过1.5和0.5毫米，长度分别不超过15和3毫米。5号和6号高度脱氧半镇静钢锭的侧面为致密的表面，在其端部发现裂纹，而在其中的一个钢锭上还发现与缩孔相连的直径为30毫米、深度达200毫米的孔眼。

对钢锭缩孔的密封性，曾借助于特种装置（图4）进行过研究。

在每一钢锭距顶端250~300毫米的距离上沿一个结晶平面的纵轴钻直径20毫米的孔眼，此孔眼使缩孔与大气相通。在钻孔处装焊接的T形管（带压力表）和橡皮管，从工厂主管道来的氧在7~10大气压下通过这种管子进入缩孔。当缩孔内达到一定的压力（用压力表测定）后，便将这种供氧系统与主管道断开，使缩孔密闭并保持5~6小时进行观察。结果发现正常脱氧和未完全脱氧钢锭中的气压未降低，而与此同时，过度脱氧半镇静钢锭的缩孔在停止送入氧后立即发生漏气现象（通过金属《桥》上未致密的部位漏出）。

为了确定缩孔体积和进一步检验金属《桥》的密封性，断开送氧装置后，往所钻的孔眼

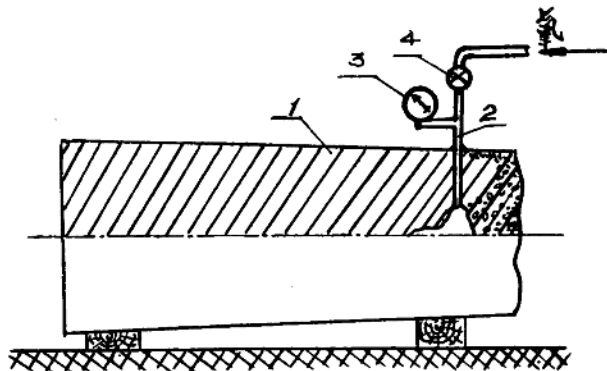


图4 确定半镇静钢锭缩孔气密性的特种装置的流程
1—钢锭；2—连管（直径20毫米）；3—气压表（0~20公斤力/毫米²）；4—双向旋塞（3/4）

内注入煤油。结果表明，正常脱氧和未完全脱氧半镇静钢锭的缩孔体积为5~7升，即占钢锭体积的0.4~0.6%。上述钢锭头部用白粉涂抹的端面和侧面未发现漏油现象。而在过度脱氧的钢锭上，往钻孔内曾注入15~19升煤油，注入后，金属《桥》上的孔眼便开始急剧地冒油。

因此，研究表明，在正常脱氧和未完全脱氧的半镇静钢锭上，可以保证缩孔不受大气和炉气中氧的氧化作用。而过度脱氧的半镇静钢锭上，根据一些文献所发表的资料，缩孔具有氧化的内壁。

由于高度脱氧钢锭的金属《桥》具有透气性，所以熔炼半镇静钢时应采取防止过度脱氧的工艺。

枝晶组织和非金属夹杂物。对12吨半镇静钢和镇静钢锭的纵轴酸蚀试片进行研究所得出的成分列于表3中。

表3 所研究钢锭的成分

冶炼编号	钢 种 类	元素平均含量，%				
		C	Mn	Si	S	P
1	半镇静钢	0.19	0.47	0.10	0.026	0.029
2	半镇静钢	0.18	1.09	0.07	0.034	0.014
3	镇静钢	0.17	0.48	0.16	0.037	0.008

钢锭可分为下述结构组织：表层组织——粗大柱状枝晶体；粗大的紊乱枝晶体和等轴晶体（图5）。上述结构组织带的宽度沿钢锭高度有规则地变化。钢锭底部和侧面整个纵向有宽为10~50毫米的表面分层带，此分层带由平行于钢锭表面的交替的暗色和亮色带所组成。随着由钢锭底部往头部推移，此分层带的宽度逐渐减小，至浇口附近便没有分层带。粗大的柱状枝晶体直接从表面起长出。

柱状枝晶体的主枝被垂直于钢锭表面的垂直线向上成8~25°角断开。这就证明半镇静钢和镇静钢凝固钢锭表面的对流方向（自上而下）具有同样特性。

在半镇静钢和镇静钢钢锭上，沿钢锭高度的柱状枝晶体带的总宽度变化很小，通常为55~100毫米。此时，紊乱枝晶体带的宽度减小（由160~200毫米减小到80~120毫米），而所有钢锭从头部到底部的等轴晶体带的宽度则增大（由95~130毫米增大到160~170毫米，至钢锭的轴线）。轴线外的不规则的线带通常位于等轴晶体带的始端。

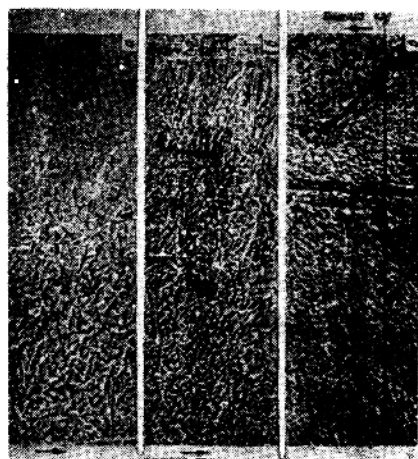


图5 半镇静钢（a—1号冶炼；b—2号冶炼）和镇静钢（c—3号冶炼）钢锭距顶端50~53%的水平剖线上的枝晶组织

研究表明,半镇静钢和镇静钢钢锭中的非金属夹杂物的性质相同。进行金相检验证明,所有钢锭中的夹杂物主要有两种:硫化物和氧化物。绝大多数硫化物和氧化物为圆形和椭圆形(图6的a、б、д、e)。也经常遇到硫化物为拉长的形状和薄膜状(图6的в、г)。在显微镜下观察时,硫化物的颜色为黄色(主要是FeS)到亮灰色(MnS含量高时)。在钢锭的中心轴处结晶带往往发现极细小的点状硫化物。

大多数单相球状氧化物夹杂物(蔷薇辉石 $MnSiO_3$)为暗灰色和透明色。我们所研究的钢锭的特点是具有大量分层氧化物夹杂物。在这种半透明和透明的氧化基中,下述氧化物夹杂物呈枝晶状物质出现:方英石(SiO_2)、富氏体(FeO)和铁橄榄石($FeO \cdot SiO_2$)。此外,也有硫化物($MnS \cdot FeS$,见图6д、e)。

所有圆形和椭圆形氧化物具有相界为粗糙表面的灰色硫化物薄膜(图6а、б)。因此,经常难于分清氧化物与硫化物。

曾在增大210倍($\times 210$)的条件下计算过非金属夹杂物的数量。计算区间是从距表面10毫米处开始选取的,一直到钢锭轴为止,每经20毫米算一区间。在每一区间内为40个点确定了硫化物夹杂物和氧化物夹杂物的数量和尺寸(直径或换算后的直径)。根据这些数据还计算了每1毫米²面积上的非金属夹杂物平均数量及其体积的百分数。进行研究时还考虑了尺寸在3微米以上的所有内在夹杂物。

在钢锭的表层上发现大量(达165个/毫米²)极细的夹杂物(直径为1~2微米)。显而易见,这是凝固初期快速结晶引起的。随着离表面愈远,夹杂物的尺寸增大,而数量则显著减少(图7~10)。在钢锭下部三分之一的中心轴处结晶带内有最大的氧化物夹杂物(40~60微米及以上)。

钢锭头部的硫化物相与氧化物相数量之比大大地超过钢锭底部的这一比值。

在非金属夹杂物的分布曲线上通常有两个最大值:在柱状枝晶体带的终端和细小的等轴晶带的首端。对于各种水平面来说,曲线上的其他最大值(图8和图10)相应于钢锭轴线外的不均质性的线,在那里发现硫化物数量极急剧地增加。

图7~10示出所有钢锭底部(距顶部98~100%的距离上)沿横向的夹杂物数量和体积百分比的特殊变化特性。

图10所示数据表明,半镇静钢锭中的氧化物体积百分比稍高于镇静钢锭。但是,镇静钢中的非金属夹杂物总含量甚至高于半镇静钢。显而易见,这是由于镇静钢中的含硫量(0.037%)比半镇静钢(0.026~0.034%)高而引起的。



图6 镇静钢和半镇静钢钢锭的非金属夹杂物形状

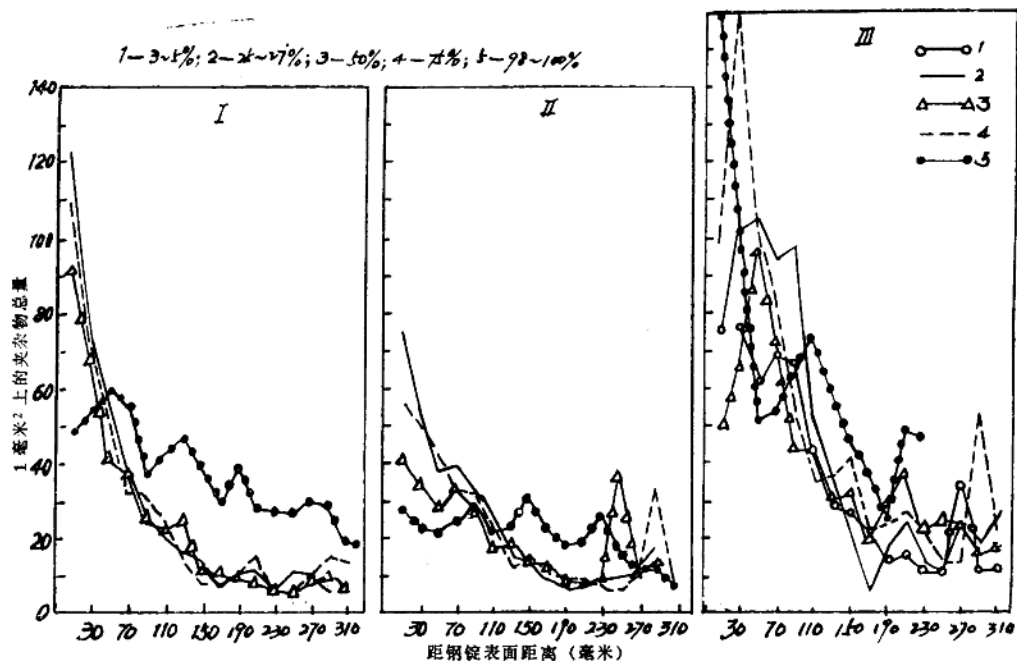


图7 半镇静钢锭(I、II)和镇静钢钢锭(III)距头部不同水平面上的非金属夹杂物的分布情况

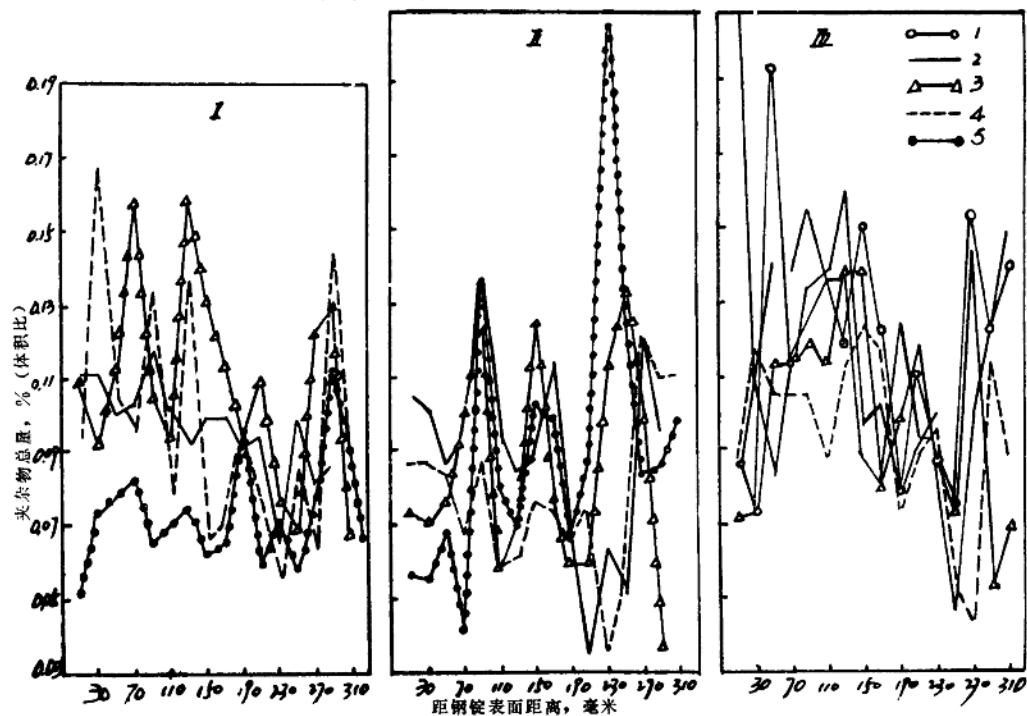


图8 半镇静钢锭和镇静钢锭非金属夹杂物的总体积百分比 (图例与图7相同)

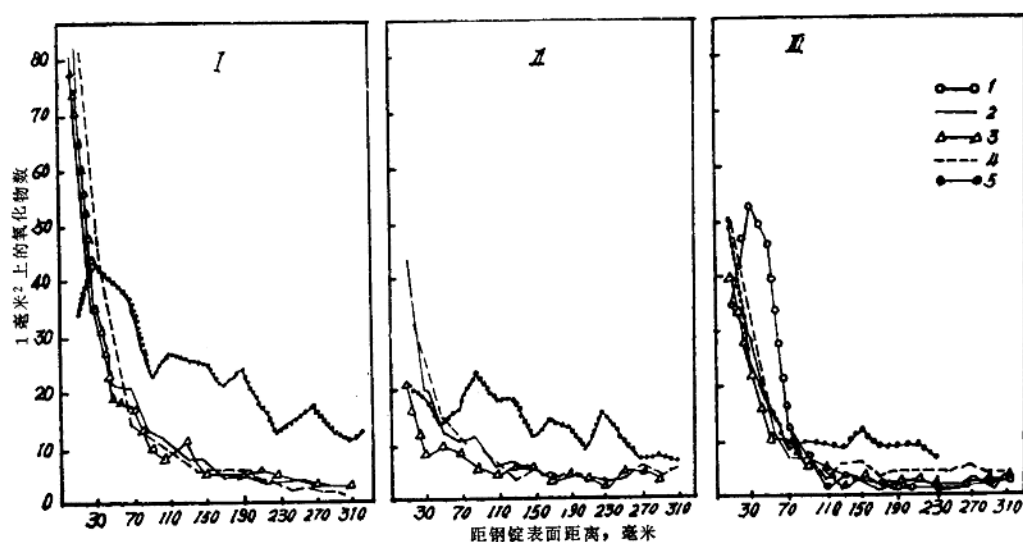


图9 半镇静钢锭和镇静钢锭的氧化物分布情况 (图例与图7相同)

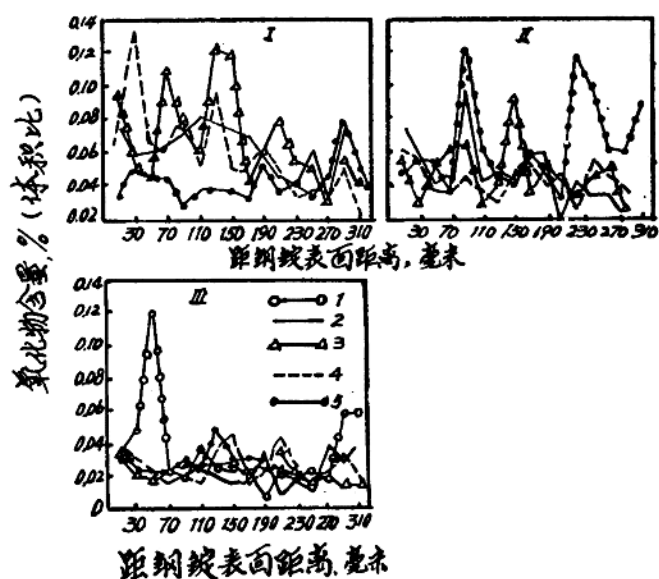


图10 半镇静钢锭和镇静钢锭的氧化物体积百分比
(图例与图7相同)

所研究的半镇静钢锭和镇静钢锭的特点, 是非金属夹杂物的含量很不一致。

张益楚 译 王海之 校

半镇静钢钢锭凝固时收缩的进展

E、A、卡扎阔夫 H、N、列夫托夫

为了得到优质的，即所谓的半镇静钢的“平衡”钢锭，必须保证具备下述条件，即在结晶时钢锭中发生的气体与其收缩在一定程度上应彼此相互抵消。因此，对这些过程的研究具有科学上和实践上的意义。

本文试图对矩形断面半镇静钢钢锭的结晶过程中的收缩进行计算。为便于计算作了如下假设：金属的凝固是一层层地并平行于钢锭的表面进行的；仅仅是讨论凝固收缩；液态金属的迁移是瞬间的和通行无阻力的。

在上述假设基础上研究了如下三种凝固模型。

1. 钢锭没有气泡生成，且从侧壁进行凝固；假设凝固层体积收缩的值与该情况下产生的缩孔体积相等，得到的微分方程如下：

$$\frac{ds}{s} \alpha = \frac{dh}{h} \quad (1)$$

在相应的原始条件下解上式，得出：

$$h = H_0 \left(\frac{s}{s_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中 h —已凝固钢锭中的液态部分的高度；

s —已凝固钢锭中的液态部分的横截面积（ h 高度上的横截面）。

$H_0 S_0$ —钢锭的原始高度和横截面积。

α —收缩系数。

2. 钢锭无气体生成，且从侧壁和底面凝固；钢锭凝固的示意图如图1所示。

在 $d\tau$ 时间内，从钢锭侧面凝固了的金属面积用 dS_{mB} 表示，从底面凝固的厚度用 dz 表示。由于在同时间内，金属的液面因收缩而使水平下面降了 dh ，则凝固层形成的体积为：

$$dV_{\text{mB}} = dS_{\text{mB}} \cdot h + S_{\text{ж}} \cdot dz \quad (3)$$

此体积相当于消耗了液态金属同样的体积还要加上为了补偿收缩所必须补充的那部分体积。也和第一种情况一样，假设体积收缩的值与初步形成的缩孔体积一样，则可写成如下方程式：

$$S_{\text{ж}} dh = \alpha (dS_{\text{mB}} \cdot h + S_{\text{ж}} \cdot dz) \quad (4)$$

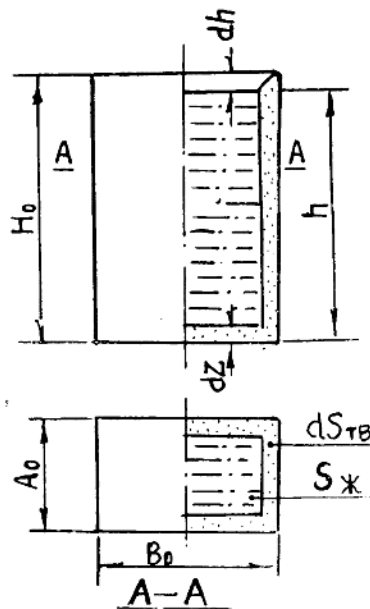


图1 钢锭凝固计算示意图

因为 $dS_{\text{вв}} = -dS_{\text{ж}}$, 则方程 (4) 又可以写成:

$$S_{\text{ж}}dh = \alpha S_{\text{ж}}dz - \alpha h dS_{\text{ж}} \quad (5)$$

下文在表示液体截面积时, 将脚注 «ж» 省略了, 以 S 来标示已凝固钢锭中的液态部分截面积, 经变换后得出如下方程式:

$$\frac{ds}{s} - \frac{dz}{h} + \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{\alpha} = 0 \quad (6)$$

方程式 (6) 乃是 $\Pi\Phi a\phi\phi$ 方程式, 复验表明: 这个方程式不能对单一比值求积分, 它的求解还必须消去变量 S 或 Z 的其中之一。

钢锭凝固层的厚度表示如下:

从钢锭宽面的边界起:

$$x = k_1 \sqrt{\tau} + \delta_1 \quad (7)$$

从钢锭窄面的边界起:

$$y = k_2 \sqrt{\tau} + \delta_2 \quad (8)$$

从钢锭底面的边界起:

$$z = k_3 \sqrt{\tau} + \delta_3 \quad (9)$$

钢锭的液态部分的横截面积可以下式求出:

$$S = (A_0 - 2x)(B_0 - 2y) \quad (10)$$

将方程式 (7) (8) 代入 (10) 式则:

$$S = A_1 \tau + A_2 \sqrt{\tau} + A_3 \quad (11)$$

式中 $A_1 = 4k_1k_2$; $A_2 = 4\delta_1k_2 + 4\delta_2k_1 - 2A_0k_2 - 2B_0k_1$;

$$A_3 = A_0B_0 + 4\delta_1\delta_2 - 2A_0\delta_2 - 2B_0\delta_1$$

由方程式 (9) 和 (11) 可见, 用 z 表示 s 是比较简单的, 代入后得出:

$$S = A_1 \left(\frac{Z - \delta_3^2}{k_3} \right)^2 + A_2 \cdot \frac{Z - \delta_3}{k_3} + A_3 \quad (12)$$

$$\text{或者 } S = A_4 z^2 - A_5 z + A_6 \quad (13)$$

$$\text{式中 } A_4 = \frac{A_1}{k_3^2}, \quad A_6 = \frac{2A_1\delta_3^2}{k_3^2} - \frac{A_2}{k_3},$$

$$A_5 = A_3 + \frac{A_1\delta_3^2}{k_3^2} - \frac{A_2\delta_3}{k_3}。$$

将 (13) 式对变量 z 进行微分得:

$$\frac{ds}{dz} = 2A_4 z - A_5 \quad (14)$$

方程式 (6) 可以变换成这样的形式:

$$\frac{-dh}{dZ} = \frac{\alpha}{s} \frac{ds}{dZ} - \alpha \quad (15)$$

将方程式 (13) 和 (14) 代入 (15) 得出下式:

$$\frac{-dh}{dZ} = \frac{\alpha (2A_4 Z - A_5) \cdot h}{A_4 Z^2 - A_5 Z + A_6} \quad (16)$$

后者是一个线性微分方程, 其解有如下的形式:

$$h = (A_4 Z^2 - A_5 Z + A_6)^a \left[-\alpha(A_7 Z + \frac{A_8}{2} Z^2 + \frac{A_9}{6} Z^3) + \text{常数} \right] \quad (17)$$

式中: $A_7 = A_6^{-\alpha}$, $A_8 = \alpha A_6^{-(\alpha+1)} \times A_5$

$$A_9 = \alpha(\alpha+1)A_6^{-(\alpha+2)} \times (-A_5)^2 - \alpha A_6^{-(\alpha+1)} \times 2A_4$$

方程式(17)能计算出在给定凝固条件下钢的收缩, 即凝固收缩与从钢锭底面已凝固金属的厚度有关; 同时考虑到式(13)得出:

$$h = S^a \left[-\alpha(A_7 Z + \frac{A_8}{2} Z^2 + \frac{A_9}{6} Z^3) + \text{常数} \right] \quad (18)$$

A_7, A_8, A_9 的大小可通过方程式(7—9)的凝固系数和钢锭的几何尺寸反映出来。

通过垂直的和水平的探测^[1]曾测出了三号半镇静钢19吨钢锭凝固的动力学试验数据:

结晶方程中的系数

凝固时间(分)	k_1 毫米/分 ^{1/2}	δ_1	k_2	δ_2	k_3	δ_3
$0 < \tau < 20$	34.8	-42.0	34.8	-42.0	47.0	-91.0
$20 < \tau < 80$	24.6	9.0	24.6	9.0	47.0	-91.0
$80 < \tau$	24.6	9.0	36.0	-98.0	47.0	-91.0

通过计算, 未知的 $A_7 \sim A_9$ 的值得出其为: $A_7 = 0.745 \sim 0.748$ $A_8 = (5.5 \sim 7.2) \cdot 10^{-4}$

$$A_9 = (1.1 \sim 2.2) \cdot 10^{-5}$$

A_8, A_9 的值是很小的, 因而对于用它们作实际计算时忽略不计则方程式(18)变换为:

$$h = S^a (\text{常数} - \alpha \cdot A_7 Z) \quad (19)$$

由原始条件可确定积分常数, 当 $Z_0 = 0$ $h = H_0$, $S = S_0$

$$h = S^a \left(\frac{H_0}{S_0^a} - \alpha A_7 Z \right) \quad (20)$$

方程式(20)与方程式(2)是类似的。但是方程式(2)系只考虑了从侧壁结晶得出的, 而后者(式20)则出现了新的一项, 即考虑了从模子底部已凝固金属对收缩的影响。

按方程式(20)并考虑到结晶动力学的一些试验数据, 能够计算出长方形和正方形截面的钢锭的凝固收缩。但在计算沸腾钢和半镇静钢钢锭的收缩时还必须考虑到有气体生成的影响。

3. 考虑半镇静钢钢锭中有气体生成条件下金属的收缩:

通过对试验钢锭的宏观组织的检验及其头部气泡带的研究表明: 在进行半镇静钢钢锭的收缩计算时, 应该考虑长形气泡的影响。由于金属的收缩被形成的蜂窝(或长形)气泡所抵消, 计算公式中要考虑到以下补充项:

$$h = S^a \left(\frac{H_0}{S_0^a} - \alpha A_7 Z \right) + \frac{V_{cn}}{A} \quad (21)$$

式中: V_{cn} —计算出来的长形气泡的生成体积计算方法见作者在前篇论文^[2]中提出的方

法。根据方程式 (2) (20) 和 (21) 进行了收缩计算。其计算结果分别示如图 (2)。

在同一图中还表示出通过对钢锭的探测而获得的有关收缩的试验数据。曲线 2 和 3 自凝固开始后经过 7~8 分钟重合在一起, 即此时长形气泡带的形成已经结束。这些实验数是结晶前 30 分钟测得的。这些数据较之计算值低, 这大概是因为钢锭硬壳穿孔后, 由于其内部压力减少, 而发生了新的气体生成, 结果使液态金属的水平面略有提高所致。

由方程式 (21) 计算潜入钢锭本体内部的缩孔深度为 68 厘米, 计算值与实测值的数据是很吻合的。通过对 3 号半 18 锰半和 08 半钢号共五个 19 吨试验钢锭宏观组织的研究表明, 潜入钢锭本体的缩孔深度为 64~73 厘米。

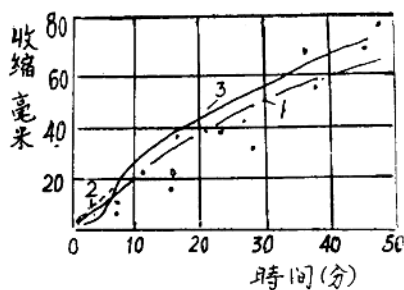


图 2 19 吨 3 号半镇静钢锭凝固时的收缩

1. 仅从侧壁凝固
2. 考虑了从底部凝固
3. 考虑长形气泡的影响 1~3 计算数据实验数据

译自〔苏〕《高教通讯》黑色冶金 1979.7

王海之 译 刘应妙 校

具有封闭缩孔钢锭的生产

合格轧材的产量, 主要取决于钢锭的切头率。轧制镇静钢锭时, 若钢锭采用上大下小冒口戴有保温帽的钢锭模浇注, 其切头率达 14~16%; 采用上下大小挂有绝热板的钢锭模浇注, 则其切头率减少到 10~12%。

钢锭之所以需要切头, 是因为必须消除缩孔。由于带保温帽的钢锭热中心是变动的, 所以缩孔特别集中。镇静钢锭的这种成型工艺是不合理的, 因为缩孔的实际体积等于 3.5% 时, 折合的金属废料则达 9~14%。所以在轧制时能使缩孔轧合的铸锭工艺是很有发展前途的。

使钢锭具有封闭缩孔的制锭工艺已经问世, 这种工艺规定钢锭脱模后将其翻转 180°。库兹涅茨钢铁公司按这种工艺每年浇注 10 万多吨钢。这种钢锭的切头率为 8%。但是, 应当指出, 这种工艺的严重缺点是其应用范围极有限, 因为只有当钢锭总压下量大于 99% 时缩孔才能很好地轧合。

西西伯利亚冶金厂为了弄清轧制时影响封闭缩孔轧合的原因, 研究了缩孔形态及其中的气态介质存在的情况。结果表明, 缩孔实际上具有一定体积, 通常波动于 26~32 升之间, 缩孔内壁呈纯净的银白色, 凉锭缩孔内的气体压力为 50 千帕斯卡左右。

气相中含有 90% 的 H_2 、6~7% 的 N_2 、3~4% CO 和 CH_4 。分析表明, 缩孔中的气体

介质具有很大的还原势，这就保证缩孔具有纯净的不被氧化的内壁，因而可以认为：缩孔不能轧合的原因可能是轧制过程中，当缩孔体积减小时，气体具有反压力所致。这一点被实际观测所证实，观测结果发现，在较完全脱氧和较致密的钢锭中，其缩孔是很难轧合的。实际上，气体仅以下列方式，即沿缩孔内壁周围的气孔分散而排出的。在轧制中气体实际上不能溶解于固态金属中。

计算表明，在轧制过程中，要溶解气体，应变处的气体压力在一秒钟内应达到540百万帕斯卡，而在40秒内则必须达到150百万帕斯卡。

因此，在较低的总压下量时，为保证缩孔可靠地紧密轧合，只有在轧制时用分散缩孔的方法才能消除气体的反压力。此时，为了提高缩孔的分散几率，最好沿整个钢锭分散缩孔。

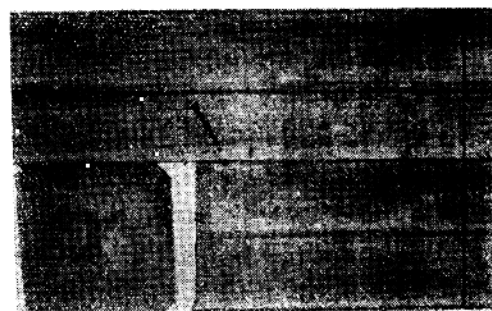
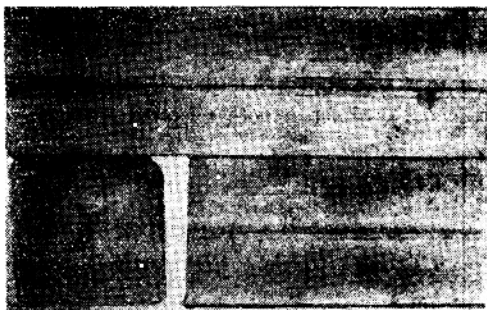
通过实验研究，制定了生产重为10.5吨镇静钢钢锭的新工艺(不改变冶炼和浇注工艺)。此时，钢锭翻倒的角度从 180° 减少到 $92\sim 97^\circ$ 。浇完后经30~80分钟将钢锭翻倒。

在这种情况下，可以产生分散的和向钢锭边缘移动的封闭缩孔，这种缩孔在钢锭轧制中是有利的。在轧机的剪切机上清理钢坯时，就可将缩孔分散。根据试验工艺轧制了2万吨5号钢和35锰硅钢材，周期断面为28号边长为25~100毫米厚的角钢；直径为30毫米的圆钢和边长为80毫米的方坯。试验锭先由初轧机轧成边长为350毫米的方坯，而后再进入连轧机。试验锭的切头为3~3.5%，切尾为4.5~5%。

对轧材进行研究表明，得到了令人满意的低倍组织（见照片）和缩孔达到了良好轧合。

对轧合的可靠性曾进行专门的断裂力学试验，试样是从具有明显缩孔部位截取的。从坯子的横截面的中心和边缘处制备断裂试样，中心部位和边缘部位的试样相互垂直。试验结果表明，在边长为80毫米的方坯中缩孔的轧合是良好的。

因此，对试验工艺的考查证明，镇静钢钢锭的成材率提高8%，而轧材的质量完全合乎要求。本试验工艺已被推广应用。



照片 边长80毫米的方坯的低倍组织
上面：有封闭缩孔的 下面：无封闭缩孔的。

译自〔苏〕《冶金工作者》1979年10月刊。

(王海之 译 张盖楚 校)