

1-1
008-20

大型铸锻件文集

第 20 集

第二重型机器厂技术室情报科编译

第一机械工业部情报所

一九七七年十一月

毛主席语录

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

我们中华民族有同自己的敌人血战到底的气概，有在自力更生的基础上光复旧物的决心，有自立于世界民族之林的能力。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平。

目 录

稀土元素对于优质钢锭性能的影响.....	(1)
用Ca——Si和稀土脱氧对 γ Sn12040碳素钢锭非金属夹杂物分布 影响的比较.....	(15)
真空脱气钢锻造钢锭尾部宏观夹杂的来源.....	(27)
钢锭结晶最初阶段和非金属夹杂形成的条件分析.....	(34)
用中心压实法锻造大型锻件	(38)
用表面快速加热淬火法(差温热处理法)制造大型轧辊	(47)
大型轴类锻钢件的热处理技术与质量	(57)
发电机转子轴的热处理	(72)
汽轮机转子材料的缺口韧性	(81)
大型水轮机叶轮的制造.....	(90)

稀土元素对于优质钢锭性能的影响

石黑守幸, 伊藤雅治, 大须贺立美

1. 绪 言

最近对于高级管道用的钢要求有高韧性和高张力的特性, 特别要求钢板材料在轧制方向成横向上的冲击值要高。

在一般的镇静钢中, 由于 MnS 因热轧而延展, 所以在轧制横向上的冲击值就下降了。为了减低这种钢板的各向异性, 在厚板轧机上也有用横轧的方法的, 但受到板坯和钢板尺寸的限制。从本质上讲, 钢中的含硫量必须低, 因而可使 MnS 减低, 或者, 必须添加如稀土金属等和硫结合力强的元素, 以控制硫化物的形状, 使之在热轧中不致延展。在日本钢管公司福山制铁所中, 按照管道用钢的冲击值规格的要求, 将钢水进行脱硫和稀土金属处理。

在本文中要叙述低硫钢的稀土处理技术和其制品的质量, 以及稀土处理的钢锭的特性和稀土元素的反应性等。

2. 稀土元素处理方法

向钢水添加稀土元素的方法, 虽然可设想出许多种, 但一般常用的是: 加在钢水包内和加在铸型内等两种方法。考虑到稀土元素的物理化学性质, 对这两种方法进行了多次试验,

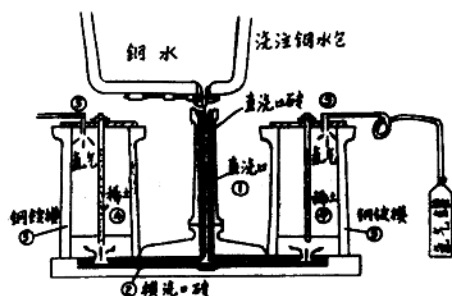


图1 在铸型内添加稀土元素的方法

其结果是: 稀土元素的利用率, 加在钢水包中的情况为22%, 和它相反, 加在铸型中的情况却高至87%。而且, 前一方法因为加过稀土元素的钢水和钢水包, 注口, 浇口砖等相接触, 容易受到污染, 因此采用后一种加到铸型内的方法。

加在铸型内的方法示于图1中。铸锭的方法用下注法, 将钢水经过直浇口①和横浇口②

②而注入铸型③之中。铸入于薄壁钢管内的稀土元素④，在钢水上升的同时，慢慢地溶解了。为了防止稀土元素的氧化，吹入氩气⑤以调节铸型内的气氛。这种在铸型内加稀土元素法的特点如下：

(1) 使用铸入薄壁钢管内的稀土元素和氩气密封，以防止稀土元素的氧化。

(2) 稀土元素均匀地溶入钢水中。

(3) 已加稀土元素的钢水不和耐火材料相接触。

由于这些特点，稀土元素的利用率就高而稳定，钢水的污染少，洁净的钢锭就可以得到了。

3. 试验钢锭的制造

在同一平台上并列着三个30吨扁平的大头向下的钢锭的钢锭模，分别装上稀土元素添加量为0%，0.032%，0.052%的稀土元素棒，将含硫量为0.007%的钢水用下注法注入之，制造出稀土处理的钢锭和没有稀土的钢锭，铸造条件示于表1中。将第一盘上铸出的钢锭，轧成厚板，将第二盘上铸成的钢锭，进行其内质研究。

表1 试验钢锭的铸造条件

钢 种	管道用的65公斤/毫米 ² 高韧性高强度钢								
钢 水 包	C	Sj	Mn	P	S	Nb	Cr	Cu	溶液 sol. Al
分析(%)	0.13	0.20	1.28	0.014	0.007	0.030	0.26	0.05	0.023
浇铸温度 ℃	1555								
钢 锭	下注的，30吨，大头向下扁平钢锭								
稀土添加量 (重量，%)	0.032，0.052								
稀土分析	总 稀 土	Ce		La		Fe		其 他	
(%)	95.9	50		25		3.2		0.9	

(译者注：各稀土的分量和总量相比尚少16.8%，可能是漏掉了Nd，在表2中是有Nd的。)

4. 稀土元素处理的钢锭之特性

图2中以简图的方式表示出稀土元素处理过的钢锭和不含稀土的钢锭的断面研究结果。其特点可以归纳如下：

(1) 未含稀土的钢锭的倒V偏析，在硫印上表示出S的浓的正偏析，但稀土处理过的

钢锭的倒V偏析，则表示出比基体更为淡白。将这部分试样详细研究之后，知道如下所述的，C，P，Mn等和不含稀土的钢锭一样，是正偏析的，但S却几乎不存在。

(2) 在不含稀土的钢锭中，MnS到处都存在，但在稀土处理过的钢锭中，几乎是看不出来。

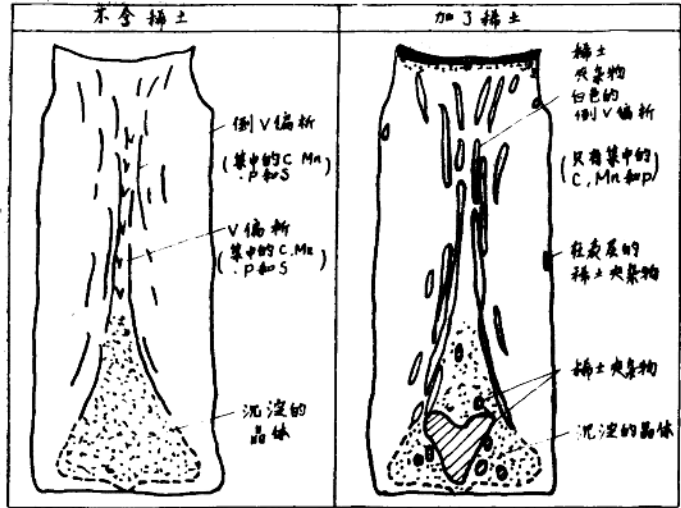
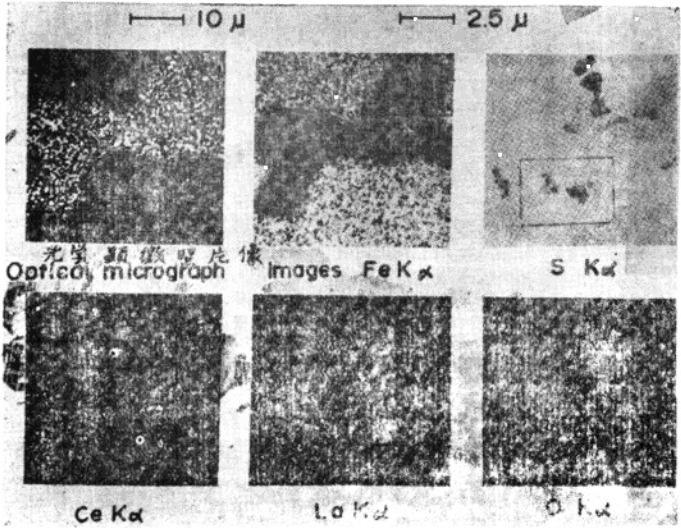


图2 不含稀土的钢锭和稀土处理过的钢锭之间内部质量的比较

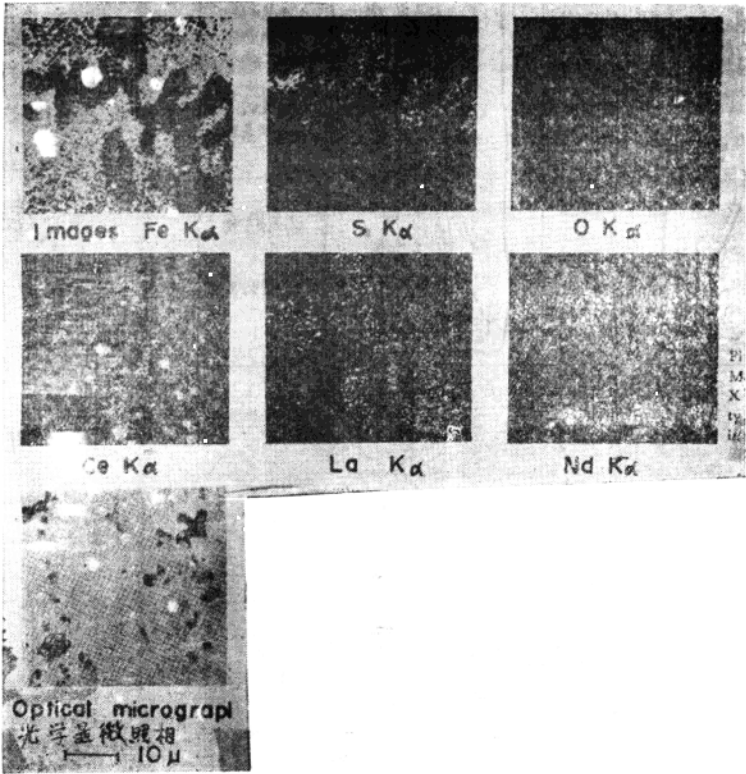
(3) 在稀土处理过的钢锭中，顶部的向下的树枝状晶体部分和底下的沉淀晶体部分内



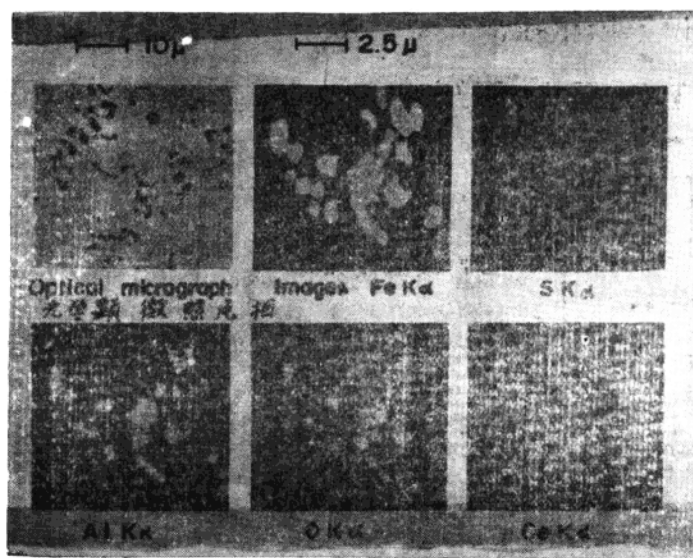
照片1 典型的聚集状稀土夹杂物的显微组织和特性的X-射线象 (用电子探针显微分析法)

存在着聚集状的稀土夹杂物。这些夹杂物如照片1和2所示是稀土的硫化物(RExSy) (RE 代表稀土元素——译者注)和稀土的氧硫化物(RExOySz)，单独存在或伴有少量的 Al_2O_3 。这与没有稀土的钢锭中以 MnS 和 Al_2O_3 为主体的夹杂物(见照片3)完全不同。(译者注：这里所说的照片2和照片3系指英文文本上的照片，在日文本上无此二照片。)

从这些特徵可以看出，加到铸型内的稀土元素，大致全部和 S 、 Al_2O_3 等起反应，形成了 RExSy 和 RExOySz ，这些生成物的一部分被保温剂所吸收而留于钢锭顶上的树枝状晶体部分和肩部中，一部分下沉于底下的沉淀晶体部分中。



照片2 典型的聚集状稀土夹杂物的显微组织和特性的X-射线象
(用电子探针显微分析法)



照片3 Al_2O_3 夹杂物的显微组织和特性的X-射线象(用电子探针显微分析器法)

5. 稀土元素处理过的钢板特性

将钢锭向其纵向进行轧制, 经过控制的轧制后, 在轧成的8毫米厚的板的各位置上取试样, 进行夏氏冲击试验及考察夹杂物和洁净度等。

稀土处理过的钢板的夹杂物中, MnS 非常少, 主要是 RExSy 和 RExOySz 。它们的形状如照片4所示, 从这图可以看出, B型和C型夹杂物在轧制方向的延性是非常小的。

型	典型的照片	成分	钢锭
A		MnS	不含稀土
B		RE(S) RE(OS)	稀土处理过的 (添加0.032%)
C		RE(S) RE(OS)	

— 20μ 横断了SOS线

照片4 钢板中的典型夹杂物

在图3中表示出按钢锭位置的钢板洁净度。在不含稀土的钢板中, 夹杂物主要是A型(MnS)和C型(Al_2O_3)。和它相反, 在稀土处理过的钢板中, 都只有在和钢锭顶部相当的位置上残留少量的A型夹杂物, 大部分都变成了以 RExSy 和 RExOySz 为主体的B型和C

夹杂物。而且，这种钢板的洁净度也改善了。

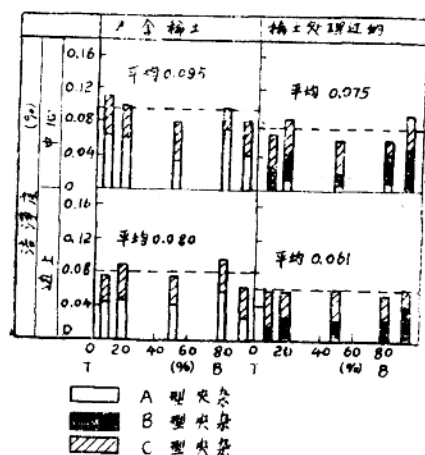


图3 用稀土处理改善钢板的洁净度(硫=0.007%)

图4表示出不含稀土的钢板和经过稀土处理的钢板在轧制方向上和横向上用夏氏试验所得的冲击能。可以看出，稀土处理过的钢板的横向冲击能有显著的提高，这是因为稀土金属的添加而得到了硫化物的形状控制，改善了由于夹杂物所产生的钢板的各向异性。

钢板的冲击能，随着S含量的减低而增加，特别在S含量小于0.10%时效果更为显著。图5表示出低硫区的冲击能以及稀土处理的效果，这是从30吨APIX-60钢的钢锭轧制成的2.7毫米厚钢板的试验结果。从此图中可以清楚地看出，由于稀土处理，冲击能更为提高，但在硫含量极端低的情况这个效果就减低，在硫含量少于0.003%时，稀土处理的效果就没有了。因之，为了改善钢板的轧制横向上的冲击能，必须减低其硫含量，但是硫含量在0.010~0.003%时，冲击能对于硫含量的依存性就大了，因之，为了确保钢板稳定而高的韧性，稀土处理是有效的。

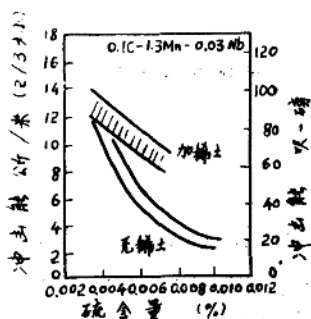


图5 横向冲击能和低硫钢板的硫含量的关系

图6 稀土元素添加量和硫残余量的关系

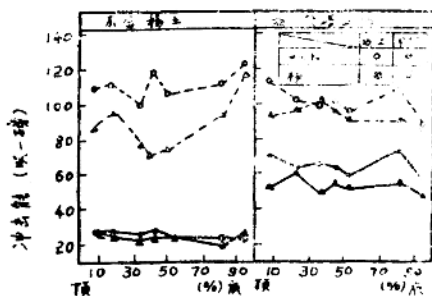
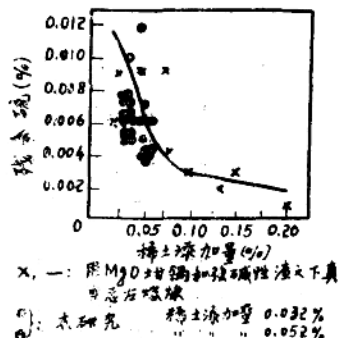


图4 稀土处理对钢板横向冲击能的影响(硫=0.007%)



6. 讨 论

6.1 在钢锭的健全部分中的硫残余量、氧残余量和稀土元素残余量的关系

从切除10%顶部和10%尾部的钢锭健全部分中切取试样，考察其硫残余量、氧残余量、和稀土元素残余量的关系。

在图6中表示出硫残余量和稀土元素添加量之间的关系。在本研究的稀土添加量为0.032%和0.052%的情况下的S残余量，和H. A塔克(Tucker)等(1)使用MgO坩埚在强碱性渣之下真空熔炼的钢水中，添加稀土的硅化物所得的S残余量，极为一致。

在图7中表示钢锭健全部分的稀土残余量和氧残余量的关系。在工业上用稀土可得到的脱氧程度，根据R. J. 利里(R. J. Leary)，如式(1)所决定。

$$[\%REM]^2 [\%O]^3 = 3.5 \times 10^{-11} \quad (\text{在} 1600^\circ\text{C}) \quad (1)$$

(式中的REM代表稀土金属——译者注)。图中的A线即代表此式，本研究的氧残余量很好地处于这条直线上。这样，就S残余量和氧残余量而言，在本研究中的稀土夹杂物的分离，达到了在工业上可以实现的极其良好的程度。

又，图7中的B线表示出工业上可以得到的Al残余量和氧残余量的关系，用稀土金属除氧所得的氧残余量比用铝除氧所得的氧残余量要低，这表示在实际操作中稀土金属的除氧能力比铝要强。

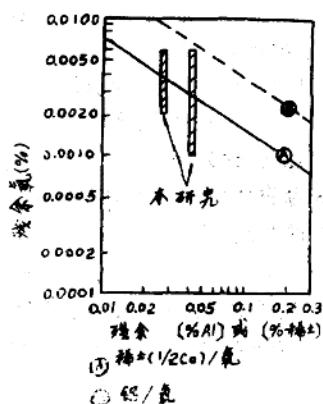


图7 实际的除氧关系

6.2 稀土元素和钢水中的硫和氧的反应平衡

在本研究中，稀土元素的反应生成物主要是 RE_xS_y 和 $RE_xO_yS_z$ ，它们的组成如表2所示变化颇大，要作为单一的相来鉴定是有困难的。而且，即使能做出鉴定，但有关 $RE_xO_yS_z$

的活动性的数据现在也完全不知道。因之，本研究要进行关于硫、氧平衡的考察，是非常困难的。在这里，只限于考察一下在钢锭健全部分中的S残余量、氧残余量，和过去其他研究者所报告的Ce之间的平衡值，到达怎样的水平。

表2 用电子探针显微分析法鉴定的稀土元素夹杂物

	Ce (%)	La (%)	Nd (%)	S (%)	O
RE (OS)	40—50	10—40	10—20	15—40	不能定
RE (S)	25—45	10—35	10—20	10—30	不能定

在图8中表示出本研究中所得的钢锭中Ce残余量和氧残余量之间的关系，和其他研究者所报告的Ce与氧的平衡值进行比较。钢锭内的Ce和氧的关系，在1600℃时，远比W.A. 费希尔 (W.A. Fischer) (3)等所报告的浓度积要小，但和R.J. 费吕汉 (R.J. Fruehan) (4)所报告的在1680℃的结果相接近。

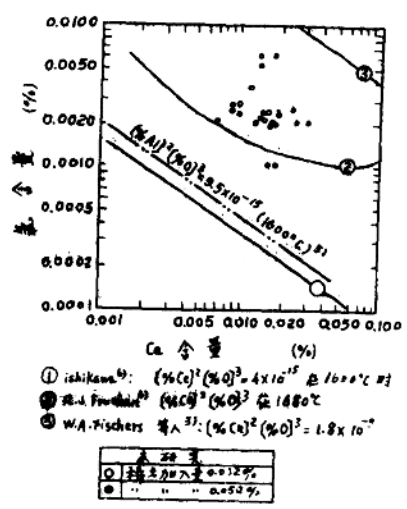


图8 Ce对钢水中的氧溶解度的影响

$$\begin{aligned}
 &[\%Ce]^2 [\%O]^3 = 4 \times 10^{-15} \text{ (在1650℃) } \dots\dots\dots (2) \\
 &[\%Ce]^2 [\%O]^3 = 4 \times 10^{-20} \text{ (在1600℃) } \dots\dots\dots (3) \\
 &[\%Ce]^2 [\%O]^3 = 3 \times 10^{-21} \text{ (在1600℃) } \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

在图9中表示出此钢锭内的Ce残余量和S残余量的关系，并和过去所报告的平衡浓度积作了比较。此钢锭内的浓度积为 $[\%Ce] [\%S] = 7 \times 10^{-5}$ ，是在W.A.费希尔等(3)的

稀土处理过的钢锭中的夹杂物，如前所述，主要是 RE_xSy 和 RE_xOySz 至于 Al_2O_3 的量，和不含稀土的钢锭中的夹杂物比起来，是非常之少的。这表示如W.A. 费希尔等(3)在高Ce浓度的实验中所断定的那样，钢中的 Al_2O_3 粒子被稀土元素还原了。因为在1600℃时，Al的除氧平衡浓度积如图8所示，为 $[\%Al]^2 [\%O]^3 = 9.5 \times 10^{-15}$ (5)，所以在1600℃时的Ce和氧的平衡浓度积至少要比这个数值小。迄今所报告的对此适用的值，有石川(6)求出的(2)式，G. 金尼 (G. Kinne) (7)等求出的(3)式和W. G. 威尔逊 (W. G. Wilson) (8)求出的(4)式。

equal to and lower than the value of (9), much lower than most other products.

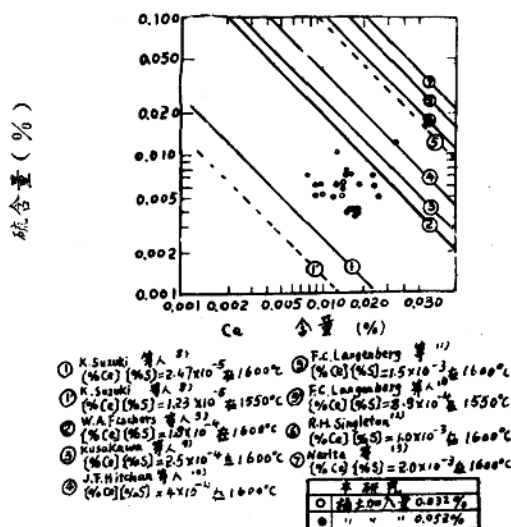


图9 Ce对钢水中的硫溶解度的影响

6.3 稀土夹杂物的上浮分离和向沉淀带的积集

稀土夹杂物 RE_xS_y 和 $RE_xO_yS_z$ 的真比重为 5~7, 比 Al_2O_3 的 ($\rho \approx 4$) 和 SiO_2 的 ($\rho \approx 2.5$) 都要大。过去, 关于球状夹杂物的上浮分离是用斯多克斯 (Stokes) 法则来研究的, 但因为稀土夹杂物和 Al_2O_3 一样, 是呈聚集状的, 所以用 J. H. 德里 (15) (J. H. Derry), 浅野, 中野 (16) 等人的处理方法来计算上浮速度。即, 因为聚集状的夹杂物在钢水中以三次元的方式连结成一群, 所以认为将这个群作为一个单位以大的代表直径向上浮起, 聚集物的密度 ρ_c 以 (5) 式表示之。

$$\rho_c = \rho \cdot \epsilon + \rho_{\text{夹杂物}} (1 - \epsilon) \quad (5)$$

式中 $\rho_{\text{夹杂物}}$: 夹杂物的真比重

ϵ : 在聚集物内钢水所占的比例 (0.97)

ρ : 钢水的密度 (7.1 克/厘米³)

表 3 中表示出在静止钢水中上浮速度的计算结果。

在稀土夹杂物的平均直径为 500 μ 的情况下, 其上浮速度约为同一平均直径的 Al_2O_3 聚集物上浮速度的 1/3。这就是说, 约要化 40 分钟才能通过 30 吨钢锭的高度 2.4 米而上浮, 可见上浮分离是不容易的。

表 3

聚集状夹杂物的上浮速度

聚集物的大小, (μ)	50	100	300	500	1000	3000	5000
$V_{\text{稀土夹杂物, (厘米/秒)}}$	4×10^{-4}	4×10^{-3}	4×10^{-2}	10^{-1}	3×10^{-1}	1.1	1.9
$V_{\text{Al}_2\text{O}_3, \text{(厘米/秒)}}$	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	3×10^{-1}	6×10^{-1}	2.3	4.0

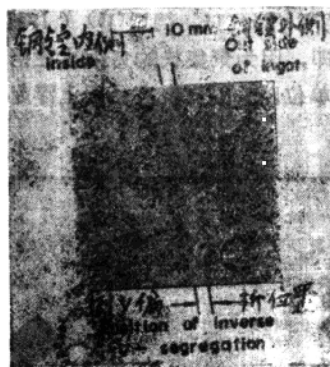
在镇静钢凝固时, 由于热对流在凝固层前面发生下降流, 它的流速, 根据森等(17)的报告为10~100厘米/分, 根据罗曼诺夫(Romanov)等(18)的报告为165厘米/分。从表3计算, 即使平均直径为1厘米的稀土夹杂物, 上浮速度也只有18厘米/分, 比其下降速度要小, 因之可以充分认为它向凝固前面存在的夹杂物的下方移动。

又, 钢的晶体不断地下沉(19)至钢锭的沉淀晶体部分中, 捕集了在上浮途中的稀土夹杂物, 这就是在沉淀晶体部分中积聚稀土夹杂物的一个原因。

樱谷等(20)曾对高强度钢做了稀土处理, 作为防止稀土夹杂物向沉淀晶体部分积聚的条件, 曾发现在 $[\% \text{REM}] / [\% \text{S}] \geq 2.7$ 时, $[\% \text{REM}] [\% \text{S}] (=K_{\text{REM}}) \leq (1.0 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 。

又, 江见等(21), 因为沉淀带的集积为条状生成物, 以及 K_{REM} 的值接近于CeS的溶解度积, 所以认为将在铸型壁相平行的凝固前面中因过饱和而产生的 $\text{REM} \cdot \text{S}$ 的周期结晶, 和由于结晶出来的 $\text{REM} \cdot \text{S}$ 的热对流而产生的向沉淀晶体带的移动堆积, 二者结合起来, 可以说明稀土夹杂物向沉淀晶体带的积集。

6.4 稀土处理过的钢锭的倒V偏析的特徵及其形成机理



照片5 稀土处理过的钢锭的倒V偏析的一例(硫印)

6.4.1 稀土处理过的钢锭的倒V偏析的特徵

在照片5中表示出稀土处理过的钢锭的倒V偏析的硫印。倒V偏析是在硫印上淡白的地方。这部分的化学成分如表4所示, C, Mn, P等和不含稀土的钢锭相同是正偏析, 但S是负偏析。

为了求出倒V偏析的正确浓度, 根据电子探针显微分析器法进行线分析, 其结果示于图10中。因为S的浓度比电子探针显微分析器法的检测限度更低, 所以不能分析, 但C, Mn, P等, 着眼

于不含稀土的钢锭的倒V偏析区的夹杂物，也用显微镜进行观察。在倒V偏析以外的地方，有无数的稀土夹杂物以被树枝状晶体捕集的形式存在着，但在倒V偏析区中，只有少量微细的稀土夹杂物存在，几乎看不出来。

表 4 倒V偏析的化学分析(%)

元	素	C	Mn	P	S
稀土处理过的	倒 V	0.15	1.38	0.023	0.002
	基 体	0.13	1.30	0.014	0.006
未经稀土处理的	倒 V	0.15	1.36	0.030	0.012
	基 体	0.13	1.28	0.014	0.006

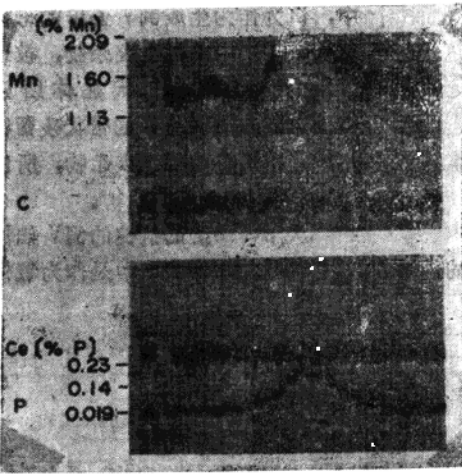


图10 用电子探针显微分析器法作出的倒V偏析的线分析

将这些结果综合起来，可以得出，在稀土处理过的钢锭的倒V偏析中，C、Mn、P等是和不含稀土的钢锭的倒V偏析同程度的正偏析，但S则为比倒V偏析的周围更低的负偏析，而这个浓度差是因为在倒V偏析区中的稀土夹杂物之量比倒V偏析区以外的地方显著地少之故。

这一事实，在讨论钢锭倒V偏析的形成机理上，认为是一个重要的事项。

6.4.2 倒V偏析的形成机理

在镇静钢凝固时，这个凝固迁移层形成有一定宽度的凝固进行区，同时向树枝状晶体进展(22)。在迁移层的内部树枝状晶体形成网络状结构，在这个网络的间隙中，残留着未凝固的钢水，在

这个残留钢水中，形成了C、Mn、P、S等的微细偏析。又，这个残留钢水能够在凝固迁移层中的网络之间移动(23)。

在这样的凝固迁移层内部，在成长过程中的树枝状晶体之间所产生的液化残留钢水的一部分，因和周围的比重不一样，从网络状的树枝状晶体的间隙中浸析出来，开始上浮，和其上方的其他浓化钢水合流而向钢锭中心斜上方发展，因而生成倒V偏析(24)。

在不含稀土的钢锭中，钢水中的S，和C、Mn、P一样，以溶解状态存在于钢水中，所以在树枝状晶体成长的同时，就进入树枝之间的残留钢水而浓化了。因之，在由于树枝间残

留钢水合流而成长起来的倒V偏析中，S和C、Mn、P等一样也浓化了，在凝固的末期以MnS的形式析出，所以在倒V偏析中，S和C、Mn、P等一样，是呈正偏析的。

在稀土处理过的钢锭中，C、Mn、P等溶解于钢水中，所以和不含稀土的钢锭有同样的行动，但是S在倒V偏析生成之前，即作为钢水中的稀土夹杂物而析出。而且，因为稀土夹杂物形成了聚集状，在图11所示的凝固迁移层内，随着树枝状晶体的成长，被捕集于网络状的

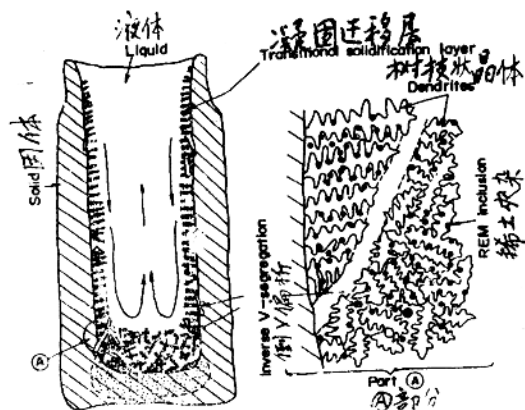


图11 稀土处理过的钢锭的凝固之简图

树枝晶体的树枝内，所以认为在树枝状晶体的间隙中生成的残留钢水中，自由活动的稀土夹杂物几乎是不存在的。所以在由于残留钢水合流而成长的倒V偏析中，稀土夹杂物几乎是不存在的。另一方面，在凝固终了时有大量的稀土夹杂物残留于树枝状晶体上。

这样，在稀土处理过的钢锭中，认为作为生成倒V偏析的母体的残留钢水中的稀土夹杂物，被迁移层内网络状的树枝状晶体所过滤，因而在成长起来的带状残留钢水中几乎不存在稀土夹杂物，所以S在倒V偏析中呈负偏析。

从不含稀土的钢锭的倒V偏析中氧是负偏析这一事实(24)，也能容易理解上述的想法的。(氧在大部分钢水中是作为氧化物的夹杂物而析出的。)

7. 结 论

为了制造优质高强度钢，将稀土元素加入了铸型内低硫区(0.007%)的钢水中，考察了这样制造出来的30吨大头向下的钢锭(稀土添加量为0.032和0.052%)的内部质量和轧制成的钢板的性能，并且研究了稀土处理过的钢锭的特性和稀土的反应性，得出了如下的结论。

(1) 镇静钢中的MnS，由于稀土处理，变成了在热轧中不易变形的稀土硫化物和稀土氧硫化物，因而硫化物的形状控制可完全达到了。其结果，大幅度地改善了钢板的横向冲击能。而且也改善了钢锭健全部份的洁净度。

(2) 稀土元素比铝有更大的除氧能力。

(3) 稀土夹杂物是成聚集状的，由于其比重为5~7，比较大，所以上浮分离有困难，因此容易集积于钢锭的沉淀晶体部。但是用本方法所制造的钢锭的健全部分中残余稀

土, 残余氧和残余硫的关系为 $[\%REM]^2 [\%O]^3 = 3.5 \times 10^{-11}$ 和 $[\%Ce] [\%S] = 7.5 \times 10^{-5}$, 这表明稀土夹杂物的分离已达到工业上极其良好的程度。

(4) 在稀土处理过的钢锭的倒V偏析中, C、Mn、P等, 和不含稀土的钢锭相同, 都呈正偏析, 但S则呈负偏析, 在硫印上倒V偏析区比周围要淡白些。

S呈负偏析的理由如下: 由于稀土处理, S作为钢水中的稀土夹杂物而析出, 在凝固过程中被凝固迁移层内网络状的树枝状晶体的树枝所捕集, 因之在构成倒V偏析的未凝固残留钢水中, 几乎不存在硫了。

参 考 文 献

- 1) H. A. Tucker, R. T. Coulehan, and W. C. Wilson; U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, R. I. 7153, June, 1968
- 2) R. J. Leary, et al; U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines R. I. 7091, March 1968, P. 28
- 3) W. A. Fischer and H. Bertram; Arch. Eisenhüttenw., 44 (1973) 2, P. 78
- 4) R. J. Fruehan; Met. Trans, 5 (1974) 2, P. 347
- 5) 制钢反应的推荐平衡值, 日本学振振兴会编 (1968) P. 56 [日刊工业]
- 6) 石川: 东北大学硕士论文 (1970)
- 7) G. Kinne, A. F. Vishkarev, and V. I. Yavoiski; Izv. VUZov, Cher. Met. (1963) 5, P. 65
- 8) W. G. Wilson, et al; J. Metals, 26 (1974) 5, P. 14
- 9) 铃木, 原田, 江岛, 三本木: 铁与钢, 60 (1974) 11, P. 97
- 10) 草川等: 铁与钢, 51 (1965), P. 1987
- 11) J. F. W. Fitchan, et al; Report. Inst. Recherches Siderurgie (1963)
- 12) F. C. Langenberg and J. Chipman; Trans. Met. Soc. AIME, 212 (1958) P. 290
- 13) R. H. Singleton; Trans. Met. Soc. AIME, 215 (1959), P. 675
- 14) 成田等: 铁与钢, 50 (1964), P. 2011
- 15) J. H. Perry; Chemical Engineers Handbook (1950) [McGraw-Hill Book Co. Inc/好学社]
- 16) 浅野, 中野: 铁与钢, 52 (1971) 13, P. 89
- 17) 森等: 铁与钢, 52 (1966) 3, P. 419
- 18) A. A. Romanov, et al; Fiz-Khim. Teplofiz. Prots. Krist. Stal Slitkov (1967), P. 133
- 19) Report on the Hetrogeneity of Steel Ingots, JISI, 113 (1966) P. 39
- 20) 櫻谷等: 铁与钢, 59 (1973) S449
- 21) 江见, 垣生: 第11回凝固部会资料

22) 荻原, 高桥: 日本金属学会志, 5 (1966) 1, P.571

23) 荻原, 高桥: 铁与钢, 53 (1967) 2, P.76

24) 成田, 谷口: 铁与钢, 56 (1970) 2, P.76

[译自“铁与钢” Vol. 62, No.7 (1976年第7期, P.827—835

其中照片按“日本钢铁协会会报”1976年第7期补充。]