·技术探讨·

攀钢生产半镇静钢的可行性探讨

杨素波　韦世通

（攀枝花钢铁研究院　攀枝花钢铁公司）

前言

半镇静钢也称平衡钢，因其钢水的〔O〕接近于C-O平衡的含量而得名。半镇静钢的钢锭结构与沸腾钢相近，但偏析小，其性能与镇静钢相当。用半镇静钢代替镇静钢，切头率低，钢坯收得率高7%～10%，而且可节约Fe-Si，金属铝等脱氧剂1/2～1/3左右。用半镇静钢代替沸腾钢，由于偏析较小和轧制废品减少，成材率可接近沸腾钢。再者，半镇静钢无须人工封顶，注后的静止时间可以缩短，且适用于快速浇注，使铸锭生产能力提高，具有很高的经济效益。

由于半镇静钢的上述优点，其生产和使用在国外得到了迅速发展。世界主要产钢国的半镇静钢比例已由30年代的不足1%增加到现在的30%。半镇静钢的品种也形成了碳素钢和低合金钢系列[1]。在0.05%～0.9%C，Mn≯1.5%的成份范围内，均可生产半镇静钢。半镇静钢可轧制成薄板、中板、型材及线材，广泛用于建筑、桥梁、造船、锅炉、农机、汽车、钢轨及管道等领域，半镇静钢还广泛用于矿山支柱用钢[1]。

我国半镇静钢的研制和生产起步较晚。从60年代起开始研制，但发展速度缓慢，目前全国半镇静钢产量还达不到钢总产量的1%。武钢是我国生产半镇静钢较为成功的企业，其试制的B3b，B5b半镇静钢已于1986年前后相继成功并投入生产[2,3]。但是，与世界工业化国家相比，我国半镇静钢的研制与生产仍处于非常落后的水平。究其原因主要有：①我国的钢铁企业对炼钢终点及脱氧的控制水平还比较落后，达不到半镇静钢要求氧含量范围很窄的控制水平；②钢液定氧等检测手段的在线应用没有完善；③钢水浇注的控制、快速上注等技术在国内许多钢厂尚未应用。很显然，技术进步对半镇静钢的研制和推广起着十分重要的作用。

目前，我国钢产量中约80%仍采用模铸，综合成材率与日本等发达的工业化国家相比，还有一定差距。攀钢近年来通过技术攻关，钢锭成坯率、成材率虽有一定的提高，但还相当低，见表1。如果生产产量为镇静钢10%的半镇静钢来代替部分镇静钢，即使成坯率仅按提高5%计算，镇静钢的成坯率也提高0.5%以上。再加上铁合金、耐火材料等消耗降低，其经济效益是十分显著的。

1　半镇静钢工艺及理论简述

1.1　半镇静钢的生产工艺

用转炉生产的半镇静钢，炉前按沸腾钢进行冶炼，出钢时向罐内加入硅、锰等合金进行脱氧及合金化。脱氧剂用量根据炉前终点C，O及冶炼钢号严格控制。采用上注或下注法快速注于沸腾钢钢锭模内，为实现快注以保证半镇静钢锭结构及质量，目前国外多采用上注法，上注法的锭模内侧必须喷涂涂料及安放防溅筒。

半钢成坯(材)率指标（%） 表1

年份		1988年	1989年	1990年	备注
成坯率 锭→坯	沸腾钢	94.33	94.82	94.46	日本1983年综合成材率（锭→材）为95～96%[4]
	镇静钢	85.05	85.54	86.88	
	综合	88.08	89.27	90.37	
综合成材率（锭→材）		82.06	81.52	83.56	

半镇静钢的均热及开坯按沸腾钢技术规程进行。

1.2 半镇静钢的脱氧及合金化

1.2.1 半镇静钢的适宜氧含量

脱氧是半镇静钢生产中一项技术性强的工艺操作，其目的是获得生产半镇静钢所要求的氧含量。从理论上来说，半镇静钢适宜的氧含量，是要求在浇注过程中钢液不沸腾，只在模内出现微弱火花，钢锭内所形成的气泡的总体积能接近钢锭凝固时收缩的体积，消除或最大限度地减少缩孔，使切头率降低。实际生产中，钢液中〔O〕接近但又略低于C-O平衡氧值被认为是半镇静钢的适宜氧含量。如脱氧过度，氧含量偏低，则易形成过大的缩孔，钢坯收得率低；如脱氧不足，氧含量偏高，则偏析大，机械性能不稳定，且钢锭上部的表皮气泡长度及宽度增加，气泡的范围也扩大。

半镇静钢的适宜氧含量如图1～2所示[5,6]，图中的虚线为C-O平衡曲线。半镇静钢的O，C，温度与钢锭结构的关系见图3[7]。由图1～2不难看出，半镇静钢适宜的氧含量接近但低于C-O平衡的含量。

图1及图2中K_2曲线的方程分别为（设$f_{O}^{-}\approx 1$）：

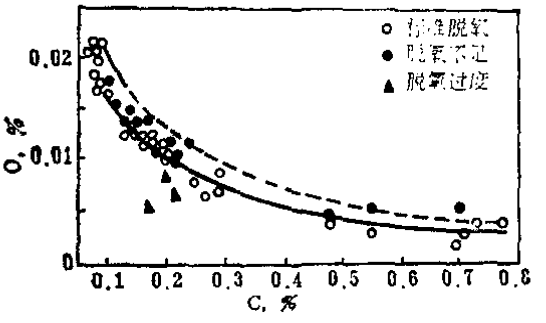

图1 转炉半镇静钢的碳氧关系

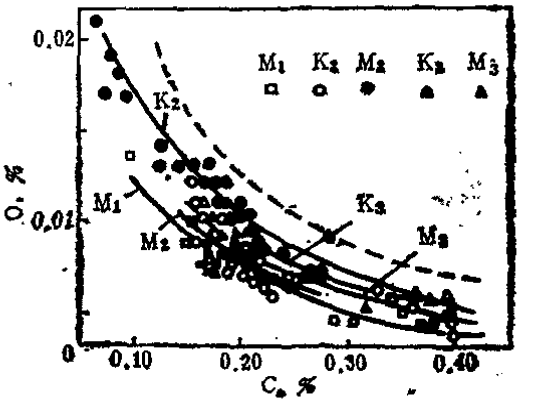

图2 半镇静钢适宜氧浓度

K_2, K_3—转炉冶炼； M_1, M_2, M_3—平炉冶炼

$$a_{(O)}=\frac{0.0012}{[C]}+0.002 \qquad (1)$$

$$a_{(O)}=\frac{0.000802}{[C]}+0.0056 \qquad (2)$$

利用（1）式，即可得出半镇静钢适宜氧与碳氧平衡的氧之差值$\Delta a_{(O)}$与〔C〕的关系：

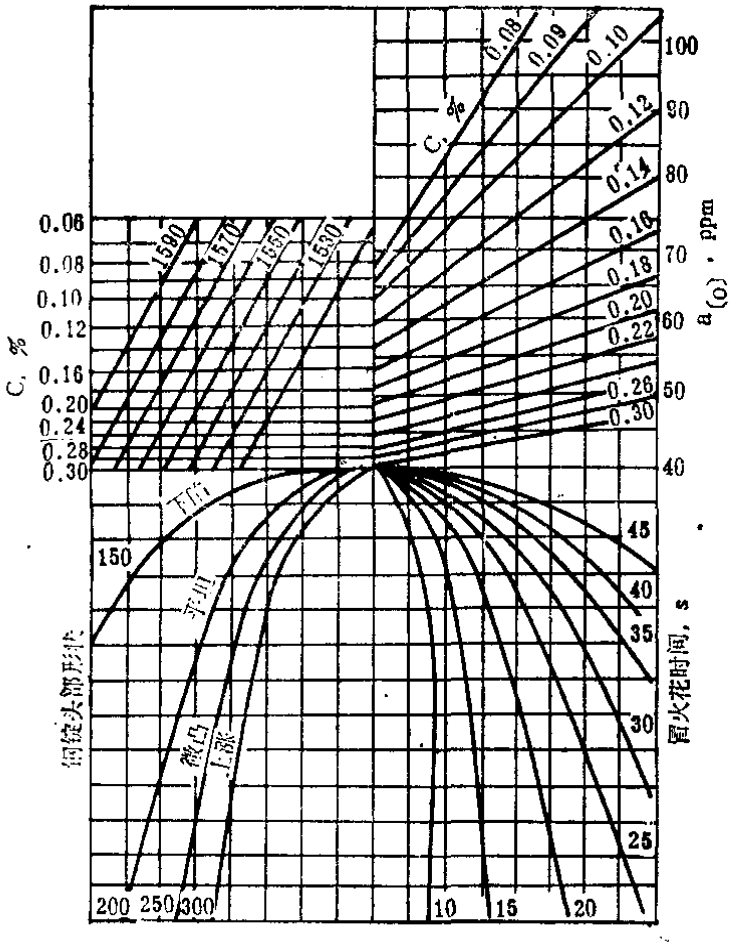

图3　半镇静钢a(o)控制

$$\Delta a_{(o)} = \frac{0.001}{[C]} - 0.002 \qquad (3)$$

可见低、中碳半镇静钢（C＜0.5%），只用碳来控制氧含量是不能获得适宜的氧含量的。

1.2.2　半镇静钢Si，Mn的控制

实际上，由于半镇静钢中的Si，Mn都不低，钢中〔O〕还受〔Si〕、〔Mn〕的控制。现利用文献〔8〕推荐的数据，计算出O-Si-Mn系的平衡关系并绘制成图 4。图 4 表明，a(o)随钢中〔Si〕、〔Mn〕的增加而降低，且〔Mn〕越高时，a(o)随〔Si〕的变化就越窄。因此，适当提高半镇静钢的锰含量对获得半镇静钢的稳定氧含量是有益的。

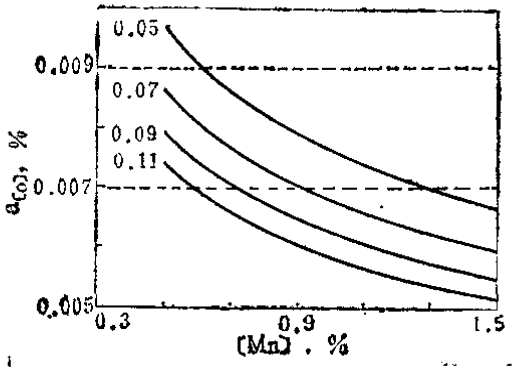

图4　O-Mn-Si系平衡图
（曲线左侧的数字为钢中Si%含量）

在半镇静钢的Si，Mn成分范围内，Si，Mn的脱氧产物为液态的硅酸锰[9]。因此，借助文献〔8〕推荐的数据，可导出半镇静钢中C，Si，Mn之间的关系式：

$$[Si]=\frac{K}{[Mn]\cdot a^{3}_{(O)}} \quad (4)$$

式中，常数K = 1～3.5×10⁻⁸，结合（1）式即得半镇静钢的Si，Mn与C的经验式：

$$[Si]=\frac{K[C]^{3}}{[Mn]\ (0.0012+0.002[C])^{3}} \quad (5)$$

（5）式可用来对半镇静钢进行成份设计和控制。以下是苏联西西伯利亚冶金公司半镇静钢工业生产统计出的经验式（Si，Mn脱氧，钢包吹Ar）[10]：

$$\lg[Si]\cdot a^{2}_{(O)}=-\frac{38863}{T}+15.75 \quad (6)$$

r = 0.921，S = 26.5

$$[Mn]=2.787[Si]+0.352 \quad (7)$$

r = 0.897，S = 12.1

但是，在仅用Si，Mn脱氧的半镇静钢，钢中氧并未达到平衡。笔者根据包内定氧结果与理论计算的平衡氧进行了比较，见图5。图5表明，脱氧后钢中$a_{[O]}$普遍高于平衡值。

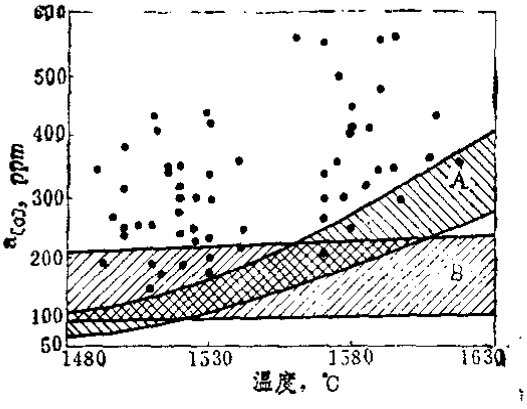

图5 沸腾钢（Q235-F）脱氧后实际氧活度与平衡氧活度之间的关系

A为Si-Mn-O系中的平衡氧区

B为C-O系中的平衡氧区

按冶金动力学的观点，沉淀脱氧后氧含量仍偏离平衡值，是因为沉淀脱氧反应速度受产物的聚结、长大和排除环节所限制。而残留于钢中的脱氧产物的浓度可被认为近似地遵循如下规律[11]：

$$C=C^{*}_{0}e^{-Kt} \quad (8)$$

式中，C，C^{*}_{0}分别为钢液中脱氧产物t时刻的浓度和初始浓度。K为常数，其值与脱氧剂类型、钢液流动状态等有关。由（8）式可以导出脱氧产物在钢液中的平均停留时间[12]：

$$\bar{t}=\frac{1}{K} \quad (9)$$

K值越大，则从（8）、（9）式可知脱氧产物排除的速度就越大，氧的控制也就越准确。因此，为使半镇静钢脱氧后钢中的氧降至要求的范围，必须改善产物长大及排除的动力学条件，即增大K值。

1.2.3 钢包吹氩调整，稳定钢的氧化性

为了使钢中氧降至规定范围，传统的作法是向包内加入一定量的铝脱氧。但由于铝比重小，收得率很不稳定，钢中氧由铝脱除的比例也不稳定，脱氧度很难掌握。钢包吹Ar能改善钢中脱氧产物长大排除的动力学条件，增大脱氧产物间的相互碰撞、聚结、长大和排除的速度，即增大K值，从而达到准确控制脱氧度的目的，苏联西西伯利亚冶金公司采用钢包吹氩处理沸腾钢和半镇静钢，各钢号在吹氩后氧变化与吹氩时间的关系如图6所示[10]，试验表明，经钢包吹Ar的炉次，氧活度控制在最佳范围，A3b经吹氩后，废品减少1.2～2.1倍。从图6还可知，吹Ar前钢中$a_{[O]}$越高，则$\Delta a_{[O]}$越大；对于沸腾钢和半镇静钢，吹Ar时间超过7 min时，钢中$a_{[O]}$变化不大。

1.3 注温注速的控制

大量的生产结果表明，半镇静钢钢锭质量与注温注速密切相关。浇注速度越大，表皮气泡就越少，缩孔发生率也越低。文献[13]指出，当注速由0.6m/min提高到1.6～4.0m/min时，最大切头率由

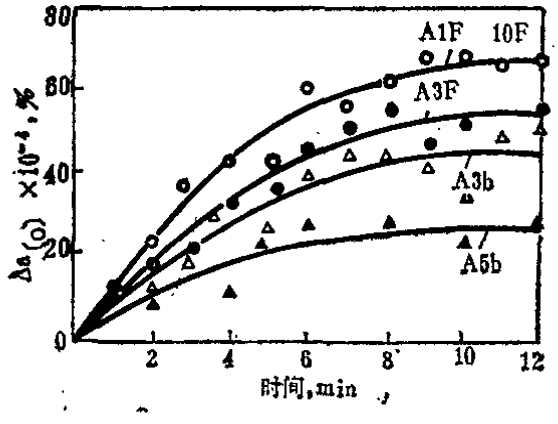

图6　氧活度降低与吹氩时间的关系曲线（喷嘴前的压力为0.4～0.8MPa）

8.6%降到4.1%。武钢的试验结果也表明，当注速由0.35m/min（下注）提高到1.4～4.90m/min（上注）时，轧后废品率由5.58%下降到3.67%[2,3]。由此可见，提高浇注速度（低温快注）是保证半镇静钢质量及成坯率的重要途径。

低温是快注的条件。在保证正常浇注的前提下，半镇静钢的浇注温度应尽可能低。在实际生产中，如出钢温度过高，可用小块废钢进行调整。

在浇注方法上，越来越多的厂家都采用了上注法。首先，上注最易实现快速浇注，且可调的注速范围较宽，可在浇注过程中根据脱氧度及注温，随时调整注速。其次，上注能提高模铸的生产能力，且可省去中注管、汤道砖等，不仅可降低成本，还减轻了劳动强度。再者，上注时所引起的模内钢液搅动，使凝固界面的表皮气泡受到洗刷，因而有利于减少皮下气泡废品。即使采用同一注速，上注的表皮气泡也要比下注法低得多。上注应具备的条件是，①能在浇注条件下，连续开闭达20次以上无故障的滑动水口及水口滑板，以保证上注正常进行；②具备钢锭模机械清扫手段；③钢锭模涂料、底板涂料及相应的喷涂机。

2　攀钢生产半镇静钢的可行性

攀钢曾于1983～1984年间进行过半镇静钢冶炼试验[14]，成坯率最高的炉次达到95.36%，小方坯的平均成坯率为89.87%，远高于目前镇静钢的水平。但由于当时的冶炼条件、测定手段及浇注条件所限，没有进一步试验。随着攀钢近年来的技术进步，冶炼工艺不断改进和完善，研制和生产半镇静钢的时机日趋成熟。

2.1　炉前冶炼工艺条件的改善

保证炉前冶炼终点控制准确、稳定，是半镇静钢生产的前提。笔者根据近年来定氧结果，对攀钢120t转炉终点氧活度与[C]、[S]、温度(t,℃)、拉碳次数(n)等，作了多元非线性回归分析，得出如下关系式：

$$a_{(O)_f} = -4467 + 22.2/[C]_f + 3.0(t)_f + 25.3\frac{[C]_b - [C]_f}{[C]_f} + 271.8\frac{[S]_b - [S]_f}{[S]_f} + 1573\frac{[S]_b - [S]_f}{[S]_f} \times \frac{(t)_f - (t)_b}{(t)_f} n \quad (10)$$

$r = 0.80, F = 48.18 > F(5/136) = 2.30$

式中，脚标f表示终点，b表示拉碳。上式表明冶炼温度、脱硫负荷、拉碳次数对氧活度都有影响，但脱硫负荷的影响最大。拉碳时硫越高、温度越低、拉碳次数越多，则终点钢液氧活度就越高。前些年，由于铁水硫高，转炉脱硫负荷过重，加之造渣剂质量不稳定，造渣剂的用量偏多，这就使得攀钢转炉炼钢本来热能不足的状况进一步恶化。为了确保必须的出钢温度，不得不在拉碳后采取高枪位烧铁的办法来提温，造成低吹(C≤0.05%)炉次增多，致使钢水的终点氧含量过高且不稳定，波动很大（图7）[15]。显然，在这样的冶炼条件下，要准确控制钢包内氧含量是很困难的。

从1990年四季度开始，随着攀钢4号

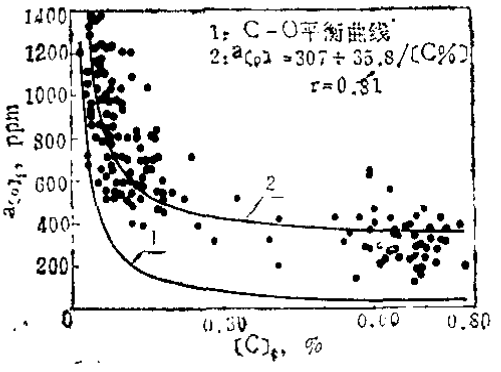

图7 攀钢120t转炉炼钢的C-O关系图

高炉生产日渐正常，高炉利用系数已达1.60，铁水质量也有所改善。铁水炉外脱硫已用于在线生产，脱硫车间正在紧张建设，投产后将有80%的高炉铁水经过脱硫处理。因此，入炉铁水（半钢）的硫含量有所降低（见表2）。1990年12月脱硫铁水调查结果列于表3[16]。从表2～3可知，1990年入炉铁水条件有所改善，特别是经炉外脱硫处理后，铁水〔S〕控制在0.031%左右，大大减轻了转炉脱硫负荷，同时铁水温度也有所好转。另一方面，转炉加无烟煤及双流道氧枪的顶底复合吹炼，即二次燃烧技术等科研成果的推广应用，对于提高拉碳温度的合格率，减少补吹时的吊枪烧铁等将起到积极的作用。脱硫负荷减轻，温度问题也将得到改善，根据（10）式不难作出推测，攀钢终点钢的氧含量将有较大幅度的降低，半镇静钢氧含量的准确控制将易于实现。

2.2 钢液氧含量测定手段已经备具

准确测定钢液的氧活度，摸清钢液脱氧的变化规律，从而准确地控制脱氧度，是半镇静钢生产的重要手段。近两年来，在北京科技大学的积极配合下，攀钢钢研院和炼钢厂对炼钢生产各工序氧含量及其变化规律进行了300炉的测定、调查研究[15]。不仅找出了攀钢炼钢生产中钢液氧活度的变化规律，而且也掌握了定氧的技术。这就为准确控制钢中氧含量，跟踪和了解半镇静钢生产各工艺环节的氧含量打下了基础。

历年入转炉铁水硫含量对比 表2

年度	1987	1988	1989	1990
铁水(S), %	0.078	0.080	0.079	0.068

脱硫铁水（半钢）质量 表3

项目	铁水(S), %		入炉温度
	脱硫前	脱硫后	℃
1990年12月	0.049～0.088	0.021～0.048	1260～1335
	0.066	0.031	1298.5
1990年上半年	>0.070		<1275

2.3 具备半镇静钢包内吹氩处理的条件

用钢包吹氩法处理沸腾钢或半镇静钢，要求钢包上部有较大的剩余空间，以防吹氩过程中向外溢出钢水。攀钢为满足扩容的需要，将钢包由135t改为160t。这样，即使出钢量为150t，仍有10t的剩余空间，可满足半镇静钢或沸腾钢吹氩的需要。

2.4 快速上注的条件日趋成熟

钢锭模清扫及锭模内侧和底板喷涂涂料是保证上注锭表面质量的重要手段。攀钢正着手锭模清扫机的设计与安装工作，锭模及底板涂料及其喷涂机的研制工作也在进行。随着这两个系统的建成和使用，上注半镇静钢钢锭的表面质量是能得到保证的。

另一方面，攀钢已决定采用“501”型滑动水口机构。这种机构可保证滑板在浇注状态下开闭动作30～40次，漏钢率小于2‰，完全能满足半镇静钢上注的要求。

从以上的分析可以看出，无论是炉前

冶炼工艺条件、脱氧度的测定与控制还是上注工艺条件，攀钢已具备或即将具备半镇静钢研制所必须的条件。

3　几点建议

（1）生产半镇静钢是提高模铸钢的综合成材率（成坯率）的主要且有效的方法之一，对提高一个钢铁企业的经济效益具有极其重要的意义。据我们测算，每年生产10万吨的半镇静钢来代替镇静钢，即可为公司创经济效益200万元/年以上。正因为如此，即使在连铸比已经很高的日本，仍十分重视发展半镇静钢生产[1]。每当连铸机检修时，他们就用模铸大量生产半镇静钢，不会因连铸机停产检修而影响钢产量和成坯率。因此建议公司在抓连铸系统建设的同时，积极组织技术力量，开展半镇静钢的试制和生产。

（2）目前是开展半镇静钢试制和推广的好时机，各方面的条件或是已经具备，或是即将具备，只要各有关部门共同努力，进行认真细致的准备和研究工作，半镇静钢试制就一定能获得成功。

（3）根据理论计算和国内外的生产经验，BY5b钢较BY3b等含碳量较低的半镇静钢更易控制脱氧度。因此，在制定和开展试验研究时，建议把BY4b，BY5b作为首批试验钢号。在掌握了BY4b，BY5b的生产工艺之后，再研制其他钢号的半镇静钢。

参 考 文 献

〔1〕傅师曾，《钢铁研究》，1989（2），3～6
〔2〕《武钢快速上注工艺技术鉴定资料汇编（1）》，武汉钢铁公司，1986年
〔3〕《武钢半镇静钢B3b快速上注工艺》，武汉钢铁公司，1988年
〔4〕康元秉等，《提高钢的成材率》（冶金部内部出版发行），1984年
〔5〕Шиеров Я А等，《Сталь》1973（12），1086～1090
〔6〕傅师曾，《半镇静钢》，冶金工业出版社，1982年
〔7〕蔡开科，《浇注与凝固》，冶金工业出版社，1987年
〔8〕赵玉祥等，《全国第六届冶金物理化学会议论文集》，1986年
〔9〕Hideto等，《Trans.ISIJ》，1976，16(2)，115～121
〔10〕Гатьперин Г С等，《Сталь》，1989(6)，627～28
〔11〕Kyoji等，《Trans.ISIJ》，1975，15（10），522～529
〔12〕隋智通等，《全国第五届冶金物理化学会议论文集》，1984年
〔13〕Шиеров Я А等，《Сталь》，1974（2），118～122
〔14〕郝志公等，攀钢半镇静钢试验总结（攀枝花钢铁研究院内部资料），1985年
〔15〕黎之政，攀钢脱氧工艺检查及合理脱氧制度的建立课题总结（攀枝花钢铁研究院内部资料），1990年
〔16〕杜德信，攀钢脱硫铁水提钒及半钢少渣炼钢试验小结（攀枝花钢铁研究院内部资料），1990年

（上接第61页）

然后利用六次甲基四胺改善了铅的碘化物催化波进行测定，操作简便、快速，精密度和准确度都较高，其标准偏差为$x\times10^{-5}$。微量铜对铅的测定有干扰，可采用萃取分离的办法加以消除。萃取有机相随称样量的增加可适当提高到50mL为宜。

参 考 文 献

〔1〕本钢钢研所，铁精矿中痕量Pb，Sn，Bi，Se，Te示波极谱测定（内部资料）
〔2〕郑玲娟，《冶金分析》，1987（6），27
〔3〕张进才，《理化检验》（化学分册），1983，19（1），25
〔4〕张进才，《冶金分析与测试》，1983（6），354