

真空在冶金中的应用

苏联科学院通讯院士

A. M. 薩馬林 編輯

科学出版社

76.137

938

苏联科学院巴依科夫冶金研究所

真空在冶金中的应用

(真空在黑色冶金中的应用会议论文集)

A. M. 薩馬林 編輯

王景韜 蔡梅棠 譯

216497/11



АН СССР ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ

им. А. А. БАЙКОВА

ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМА В МЕТАЛЛУРГИИ

(Труды совещания по применению вакуума в черной металлургии)

Ответственный редактор член-корреспондент АН СССР

А. М. САМАРИН

Изд. АН СССР

Москва 1958

內 容 簡 介

本书由在 1956 年苏联科学院所召开的討論真空在黑色冶金中的应用的会议上所作的报告、論文和有关发言組成。內容分三部分:第一部分讲述鋼和合金在真空炉中的熔炼,第二部分討論鋼液和鉄合金在盛鋼桶和鋼錠模中的真空处理,第三部分为純金属和合金的真空冶炼。刊于篇首的薩馬林的文章綜合地論述了真空在冶金中应用的各項問題和它的发展前途。篇末的“決議”总结了在冶金中应用真空的种种优点以后,指出它的发展方向 and 应该加以大力发展,以及为达到此目的所必須采取的相应措施。

讀者对象:冶金工作者,科学研究人員,冶金企业設計人員和冶金工业院校师生。

真 空 在 冶 金 中 的 应 用

А. М. 薩馬林 編輯

王景鵬 蔡梅棠, 譯

*

科學出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版業登記許可證出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960 年 5 月第一版 书号: 2174 字数: 168,000

1960 年 5 月第一次印刷 开本: 787 × 1092 1/32

(京) 0001—1,000 印张: 6 8/27 插圖: 17

定价: 1.05 元

目次

冶金中应用真空的一些問題.....	A. M. 薩馬林	1
-------------------	-----------	---

一、在真空炉中熔炼鋼及合金

在真空炉中熔炼变压器鋼... Г. А. 加尔內克及 A. M. 薩馬林	13
熔炼方法对不銹鋼性能的影响..... P. C. 別利亚科夫	38
真空冶金的若干理論問題..... Л. C. 卡勉涅茨卡婭	53
关于真空熔炼金属和合金的工艺問題..... A. B. 叶米雅舍夫	59
鋁的真空电弧熔炼..... A. C. 斯特洛也夫、 A. M. 伊万諾夫、E. C. 奧夫謝普揚	69
高真空泵和高真空联合設備..... K. A. 薩維恩斯基	74
Ю. Г. 古列維奇在分組会上的发言.....	87
A. A. 奧斯明金在分組会上的发言.....	89
M. A. 舍夫措夫在分組会上的发言.....	91

二、液态鋼和鉄合金在盛鋼桶和鋼錠模中的真空处理

鋼液在盛鋼桶中真空处理和在保护性气氛中的浇鑄..... Л. M. 諾維克	93
“德涅伯罗特殊鋼”工厂对鋼的真空处理和在保护性气氛中浇鑄的試驗..... B. Г. 斯比朗斯基	115
应用真空浇鑄合金鋼的科学研究結果..... K. И. 高斯切夫	125
鑄造重量达到 120 吨的大型鋼錠的真空装置結構..... B. K. 諾維茨基	129
应用真空处理获得无碳鉄鉄和金属錳的致密鑄錠的方法..... C. И. 希特里克、 H. Я. 涅馬尔克、B. И. 尼古拉也夫、M. И. 加西克	134
C. Г. 維索廷在分組会上的发言.....	148

C. П. 扎莫塔也夫在分組会上的发言	151
Ю. А. 舒利切在分組会上的发言	154
Н. Я. 涅馬尔克在分組会上的发言	156

三、在真空中制备纯金属及合金

真空中碳热还原氧化铬的动力学与机构	
..... A. A. 維尔特曼及 A. M. 薩馬林	160
真空法制可鍛性鈮	A. Ю. 波利亚科夫 179
用含碳铬鉄在真空中脱碳法制造无碳铬鉄	
..... C. B. 別佐布拉佐夫	188
B. M. 郝特金在分組会上的发言	197
苏联科学院 A. A. 巴依科夫冶金研究所召开真空在冶金中 的应用會議的決議	198

冶金中应用真空的一些問題

А. М. 薩馬林 (Самарин)

自从在工业实践中推广了鑄鋼生产方法之后，将近两个世紀以来，冶金工作者們探索着各种方法，以保証制出含气体——氧、氫及氮——最少的鋼。

П. П. 阿諾索夫 (Аносов) 特別注意了在鑄錠之前及鑄錠时防止鋼液与空气接触問題，他曾提出一項試驗；在坩堝上裝有一錠模設備，只要把該錠模設備迅速翻傾，鋼液就可經過坩堝底注入錠模中。

阿諾索夫在預热的鋼錠模中涂上脂油，他認為“由于脂油的燃燒放出来的气体可以防止鋼与空气接触。”^[1]

在酸性轉炉炼鋼法发展的最初阶段，加入各种形式的錳使鋼脫氧是唯一获得可进一步精炼产品的合适方法。

Д. К. 契尔諾夫 (Чернов) 記述了鋼錠中形成气泡的原因和机构，寻找了消除这种缺陷的方法，他認為“如果不怕鋼冷却，而且也可以同时保护住鋼不受外界空气氧化，則只要重复数次傾注就可以几乎除淨鋼中所有的气体”^[2]。

改善脫氧过程，利用含氫最少的炉料及应用轉炉吹氧法是現代冶金工作者們获得高質量碳鋼及合金鋼的办法。

应用真空炉在与空气隔絕的空間中进行熔炼过程，自鋼液中抽出溶解的气体这个問題很久以来就受冶金工作者的重視了。Н. П. 契热夫斯基 (Чижевский)^[3]是推广真空炉炼鋼法的热烈拥护者。但是，只有在最近几年，由于真空技术的发展，才可能在工业上利用相当大容积及生产率的真空炉。

現在用的有感应加热炉、电弧炉及电阻真空炉，因为在其他种

结构的炉子中不能炼出许多种金属及合金。其次，可以改良用普通非真空炉所炼出来的金属及合金的质量。

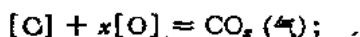
现代喷气技术、无线电、电视设备中及在原子能发电设备中所利用的金属及合金的工业生产是与建立真空冶金有关的。

同时，为了满足现代机械制造及仪器制造中各部门的迅速发展对钢及合金所提出的日益增多的要求，冶金工作者们正在寻找新型的改善现有生产方法的途径。这些探索也是优质钢及合金冶炼上重要任务之一。

主要的注意力仍然是在探索及在工业上推广制造含氧、氮、氢及非金属夹杂物最少的钢及合金的生产方法上。应用真空是最可靠的顺利解决这个问题方法之一。

在炼任何种钢时，钢中溶解的氧含量可以通过应用适当的具有高脱氧能力的元素来降到很低。然而这个方法还不是保证获得低含氧量的可靠方法。脱氧反应产物是脱氧剂元素的氧化物，这些氧化物虽然不溶于液态金属中，但可以成相当数量的独立相存在于钢中。在这种情况下，降低可溶解的氧浓度并不能保证得到含氧量低的钢。脱氧剂元素的氧化物质点留在钢中，换句话说，就是非金属夹杂物留在钢中，会降低钢的质量。如果考虑到脱氧反应是个放热反应，则制出不含非金属夹杂物的钢，在一般的炼钢炉中是一个无法解决的问题。

在一般现在所用的脱氧剂中，只有碳与溶于钢液中的氧作用形成不溶于金属的气态氧化物。反应



的平衡常数

$$K_c = \frac{P_{CO_x}}{[\%C] \times [\%O]}$$

在一定温度与形成的气相(主要是一氧化碳)压力无关，但是考虑到平衡常数是不变的，当该相的压力降低时，自然就引起分母中 $[\%C] \times [\%O]$ 的乘积值同时减小，换句话说，保证碳的脱氧能力提高。这样，应用真空就可以只用碳脱氧来炼钢，即得到不含脱

氧反应产物的鋼。

Г. А. 加尔内克 (Гарнык) (参看28頁) 在研究中确定出在真空炉中炼硅鋼片时, $[\%C] \times [\%O]$ 的乘积变动于 0.00002 到 0.00007 之間, 而在一氧化碳气压力为一大气压及 1600° 时, 該乘积为 0.0020—0.0025. “电炉鋼”厂在 150 公斤电炉中炼变压器鋼是在熔炼室中剩余压力为 1 毫米水銀柱时进行的. 因此, 这样降低一氧化碳压力可以提高碳的脫氧能力将近 100 倍。

如果注意到炼出的变压器鋼含硅在 5% 以下, 則在相当窄的范围内改变 $[\%C] \times [\%O]$ 的乘积即可証明: 在这种条件下碳是比硅更强烈的脫氧剂。

如图 1 所示, 在真空炉中鋼液脫氧的完全程度及速度几乎与脫碳速度成直线关系. 此外, 氧自金属中除掉的速度超过脫碳速度好几倍, 碳及氧自金属中去除的速度不一致可解释为: 一部分氧成硫化物或硅化物状除去, 也可能是在碳浓度低时形成二氧化碳。

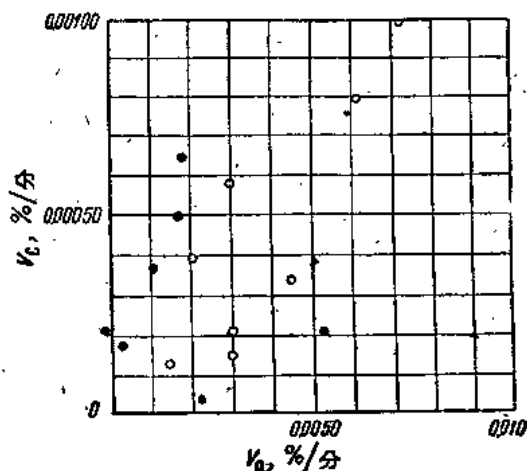


图 1 真空炉中碳及氧含量降低速度間关系:

○——容积 20 公斤的試驗用炉; ●——容积 150 公斤的工厂用炉。

在真空炉熔炼室中氮及氢的分压低使得能够除去溶于鋼液中的这二种气体. 当鋼液脫碳时, 也可以除去氮化物, 因为一氧化碳气泡及鋼液的分界面能吸附悬浮在鋼液中的质点。

因此,在熔炼时采用真空可以保证炼出含氧、氮及氢低的钢来。

真空能可靠地防止钢“重复”氧化。直到最近我们还没有对下列事实给予应有的注意:即在炉中脱氧良好的钢,以后在注入盛钢桶及浇铸于钢锭模中时,在很大的程度上又氧化了。

重复氧化所起的作用很大,可以用图2上的曲线来说明^[4]。可以看出,在20吨的电弧炉中熔炼钢时,在还原期由于重复氧化消耗于脱氧的努力几乎完全抵消了。钢重复氧化的来源一方面是渣及铸钢设备耐火材料质点,另一方面是被空气中的氧氧化。

如果说冶金工作者所关心的是探索制造铸钢设备用衬里的寿命长的耐火材料的话,那末在工厂实际中探索及应用防止钢液重复氧化的方法的重要性也不次于它。

在真空中或在惰性气体中铸钢是一种可靠的防止钢液重复氧化方法。

因此,现在在工业中广泛地推广了用真空感应炉炼钢。新的生产钢的方法在日常实践中得以顺利迅速推广,在很大程度上是取决于冶金炉的设计师、建筑师及冶金工作者的创造性努力。许多与炼钢的冶金原理有关的问题是应该全面加以研究的。

首先应指出在苏联炼钢工业中所应用的真空感应炉是极不完善的,且它至少有了十年的历史。而在国外工厂中使用的有一些真空感应炉其装料及卸出凝固钢锭的工作可以在不破坏熔炼室的真空情况下进行。只要考虑到炉衬材料脱气时所发生的困难就很容易地判断出这种结构的优点了。

图3为一400公斤容积的真空炉,它是用做真空熔炼及真空浇铸用的,它的贮料槽及钢锭室是可以与熔炼室隔离开来的^[5]。

真空金属公司(Vacuum Metals Corp.)的工厂中所建立的“那列斯科”(Нареко)1吨容积真空炉,其装料及卸锭工作也是在不破坏熔炼室的真空的情况下进行的。

寻找适于真空炉中使用的坩埚耐火材料是重要任务之一。只有在液态金属与炉衬之间没有化学作用的情况下,才可能使炼出的钢含杂质最少。

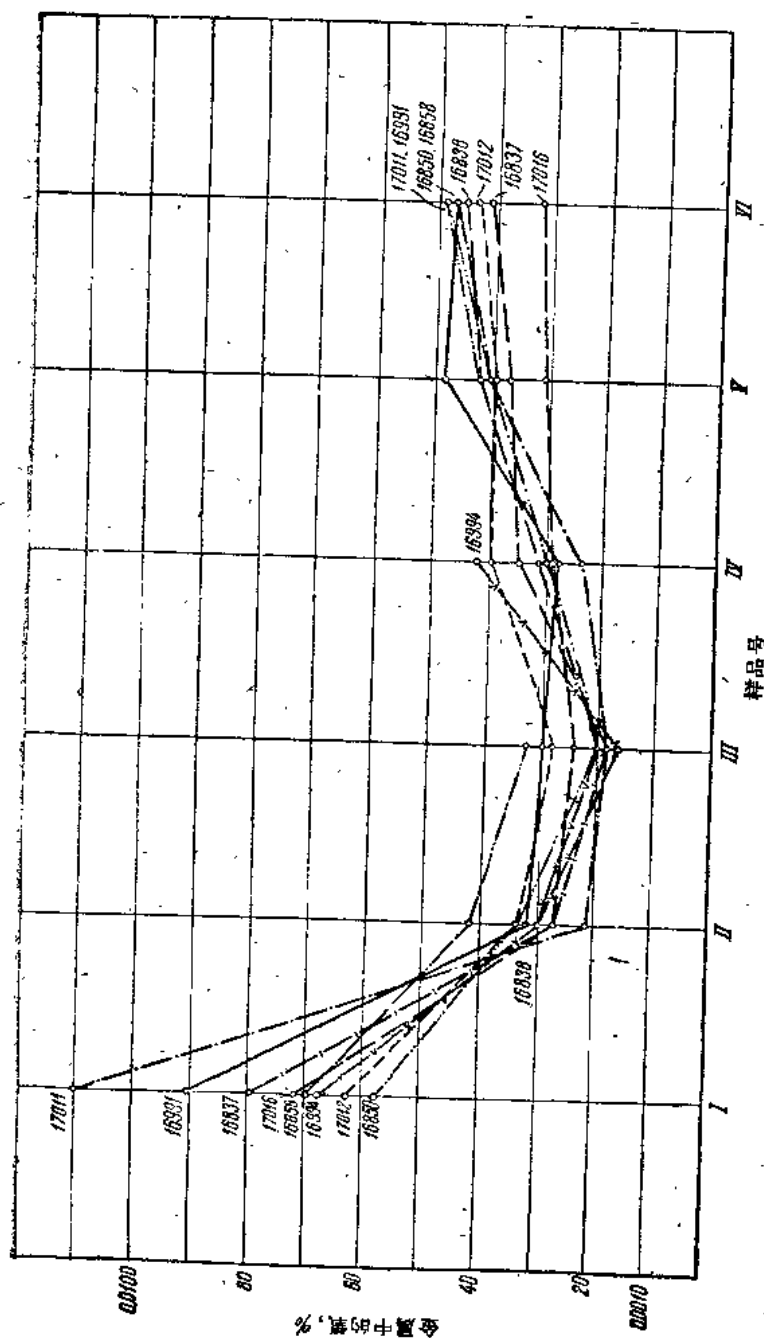


图 2 在熔炼及浇铸过程中金属中的氧含量变化：
 I—扒氧化渣之前取样； II—还原期开始后 1 小时取样； III—最后脱氧后出钢前取样； IV—盛钢桶中取样； V—在
 底板 1 上浇铸的钢锭轧后取样； VI—在底板 5 上浇铸的钢锭轧后取样； VII—在

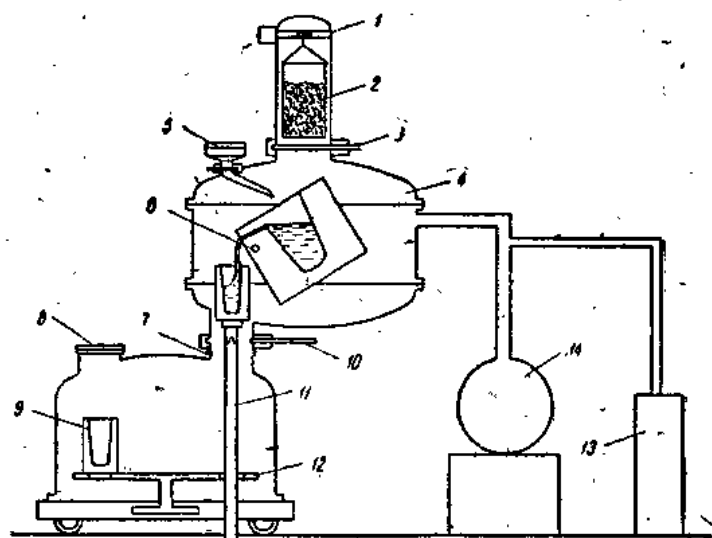


图3 容积400公斤的真空炉^[5]：

1—仪表盘；2—料；3—隔板=500毫米；4—熔炼室；5—給料漏斗；
6—旋轉軸；7—彈簧箱；8—卸錠；9—鋼錠模；10—隔板=700毫米；
11—水力升降機；12—旋轉台；13—初級真空泵；14—擴散泵。

显然，在絕大多數情況下利用氧化鎂制炉衬是不合适的，因为由于这个氧化鎂还原而鎂蒸发出来，氧或形成的氧化物則溶解于金属中。这一点用 P. С. 別利亚科夫(Беляков)的数据(参考41頁)可得到証明。当在真空感应炉中再炼铬鎳不銹鋼时，金属中所含的氧不仅不降低，而且升高数倍。此外，不銹鋼中含氧量的绝对值接近于为 С. В. 別佐布拉佐夫(Безобразов)在当时所测定的这种鋼含氧的饱和限度^[6]。

与探索耐火材料有关的同时还应注意研究制备及应用真空炉中自熔性坩堝(автотигель)的方法。金属在其“自身”中熔炼，不与耐火材料直接接触，无疑地应能保证得到含杂质更少的鋼。在由发电机供电的感应炉中，应用自熔坩堝显然更易进行。

应该广泛地开展真空炉中冶金过程的研究。应该研究去除金属中杂质——碳、硫、磷等的动力学，同时也应确定温度及压力对此过程的影响。为了熔炼高合金鋼及合金，研究金属液在真空炉

中成分的变化和温度、压力及溶液中个别组元浓度间的关系有很重要的意义。这些变化不仅是溶液各组元间、液态金属各组分及耐火材料间的互相反应所引起，而且也由于个别元素的高蒸汽压所引起。图4上为在 $1570-1620^{\circ}$ 及 10^{-4} 毫米水银柱时熔融铁及锰中分离出来的蒸汽凝聚物的成分。可以看出，如果铁中锰含量不超过0.1%，则在凝聚物中主要为铁；然而当锰升高到0.5%时，凝聚物实际上仅由锰组成^[7]。

在确定真空炉中熔炼钢的合理方法时，必需利用金属熔体中个别组元在真空中的行为的研究结果。

在真空炉中熔炼过程中建立检查液态金属的温度及其成份的可靠方法是一个复杂的问题。为了控制熔炼过程必需很好解决这个问题。显然，利用现代的方法及仪器可以顺利地解决这个问题。

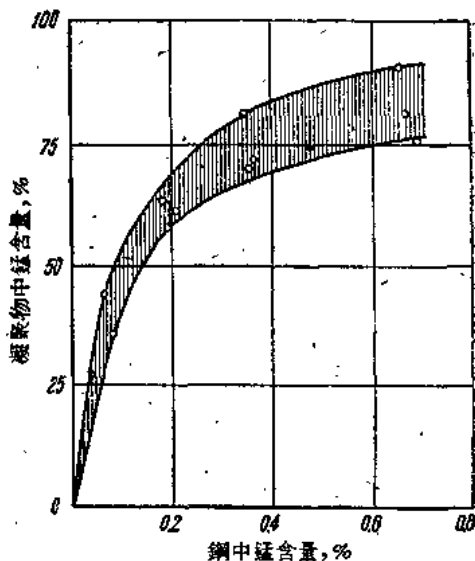


图4 鋼中及凝聚物中錳含量間的关系。

虽然现在真空炉的利用已普遍得多了，真空炉的容量也增大了，但是由于基本设备的复杂及昂贵、并且必需以电能为热源，故还不能在这种炉子里每年生产数万及数十万吨钢。

在寻找更简单的方案中，1941年曾提出过一种新的真空炼钢原理。这个提議的实质就是：在任意冶炼设备中得到的钢液经过真空处理，降低钢中含氧、氮及氢。此时可在保持盛钢桶在特殊的箱中或在把钢浇注入钢锭模中进行真空处理。

諾維克(Л. М. Новик)及耶拿基輔冶金工厂(Енакиевский)的工作人員一道在最近几年內在“德涅伯罗特殊鋼厂”(Днепро-

песталь) 对于上述方法之一进行了工业試驗 (参見 105—108, 122—123 頁)。

在上述工厂中所得到的良好結果指出这个方法在实际炼鋼中广泛应用是合适并且必要的。与之相关的还必需补充一些研究工作,以便通过这些研究結果保証更提高在真空中处理鋼液的效率。

在其他条件不变时,在真空处理时鋼液去氧的程度是决定于去除金属中的一氧化碳的条件有利与否。在 200 吨以上的盛鋼桶中,液压高,很显然这是妨碍气体自鋼液中放出到低压箱中去的。因此,必需在工厂的条件下試驗上述建議之一并利用带有感应綫圈的盛鋼桶。攪拌盛鋼桶中的鋼液是克服高的液压的不良影响的方法之一。自然,在利用有感应綫圈的盛鋼桶时,可以把鋼液在真空中保持更长的時間不用担心它在盛鋼桶内过分冷却。为了攪拌鋼液,在盛鋼桶内可以利用正常頻率的电流。

制造盛鋼桶衬里及鑄棒时用优质耐火材料极为迫需。所有情况下当在盛鋼桶内做鋼的真空处理时可預料到会损坏大量耐火材料。鑄棒圈受渣的侵蝕問題現已妨碍着真空处理鋼液的順利进行。

上述方法仅是获得含气体最少的鋼的第一步,在此生产步骤中的改进可能因鋼液在空气中浇注而化为烏有。因此,也在真空或在惰性气体中实现浇注操作是完全合理的。为这种浇注的简单设备已經研究好了,它可以在我們的冶金工厂中实际应用。

應該指出,我們对这种能显著改善鋼的质量的方法在炼鋼生产中利用得太慢了。而在德国的包胡姆工厂中自 1952 年开始真空法炼出鋼的数量已达 25000 吨^[3]。

真空法可保証在大的工业規模中应用新法生产无碳铬鉄这种在制造各种不銹鋼中广泛应用的合金。如果用硅热还原法不能制出含碳在 0.05% 以下的合金,那么现在用高碳铬鉄在真空中脱碳的方法可以得到含碳在 0.03% 以下的合金。

新的方法不仅提供給予熔炼以前的质量根本不同的铬鉄的可能性,而且还显著地簡化整个生产流程并提高铬的利用率。

利用含碳这样低的铬鉄可以保証能炼出不銹鑄铬鋼,这种鋼

中即使不含有鈦或鈮時，也不會有晶間腐蝕傾向，因為金屬中的含碳量不超過溶解度極限。此外，沒有鈦存在時對於提高這種鋼的抗一般腐蝕性是有利的。

雅庫寧 (А. И. Якунин)^[9] 研究了碳及鈦對於不銹鉻鎳鋼對晶間腐蝕的傾向及對一般腐蝕的抵抗力。

所研究過的鋼的成分列於表 1，含 0.01—0.03% 碳的鋼是用在真空中制出的鉻鐵熔煉的。

表 1 鉻鎳不銹鋼的化學分析 (%)

爐 號	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	Ti	非金屬 夾雜物
3816	0.07	17.90	8.73	0.24	0.33	0.014	—	0.030
3823	0.09	16.36	9.30	0.26	0.42	0.013	—	0.036
3825	0.07	16.67	9.05	0.18	0.41	0.016	—	0.037
4124	0.08	17.48	8.93	0.34	0.41	0.017	—	0.038
4125	0.09	17.91	7.76	0.48	0.66	0.014	—	0.089
3826	0.07	17.50	9.02	0.32	0.47	0.013	0.24	0.046
4056	0.09	17.08	8.70	0.53	0.59	0.016	0.32	0.037
4202	0.02	18.95	8.85	0.69	0.19	0.015	—	0.082
4203	0.03	19.21	8.38	0.57	0.17	0.017	—	0.036
4204	0.02	19.28	8.14	0.71	0.26	0.013	—	0.038
4205	0.01	19.05	8.19	0.61	0.22	0.012	—	0.039
4206	0.01	19.17	8.64	0.71	0.34	0.012	—	0.037

含 0.07—0.09% 碳的鋼在 1100℃ 於水中淬火，含 0.01—0.03% 碳的鋼在 1020℃ 於水中淬火。淬火鋼的回火是在 650℃ 保溫二小時。

晶間腐蝕傾向是用淬火鋼測定的，把試樣先在用 110 克五水硫酸銅、55 厘米³硫酸及 1000 厘米³水配成的溶液中煮沸。含 0.07—0.09% 碳的鋼煮沸的時間要 48 小時，含碳 0.01—0.03% 的鋼要 72 小時。所有各爐鋼在淬火狀態下對於晶間腐蝕都是穩定的，3816、3823、3825、4124 及 4125 爐鋼，也就是含碳高而不含鈦的鋼受晶間腐蝕所破壞。含鈦及不含鈦而含 0.01—0.03% 碳的鋼在退火狀態下對於晶間腐蝕是穩定的。

抵抗一般腐蝕性的測定法是用淬火及回火狀態的鋼在 60% 的硝酸中煮沸四個周期, 每期 25 小時。圖 5 提供了這些測定結果。這裡舉出了每一爐鋼的淬火(+)及回火(-)鋼重量的損失數據。

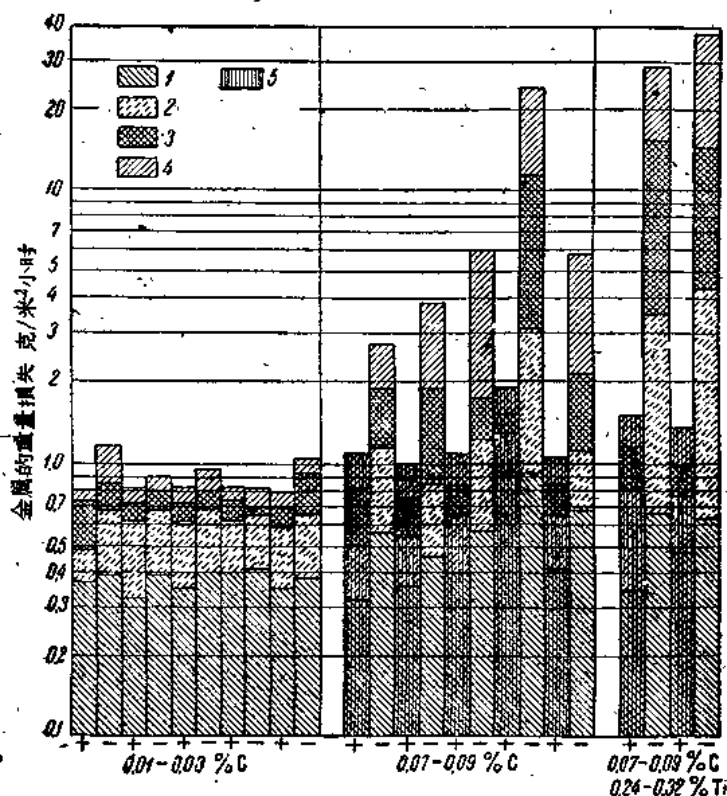


圖 5 碳及鈦對於不銹鋼抗一般腐蝕性的影響(在 60% 的 HNO_3 中煮沸);
 1—在 10 個周期後金屬重量減少; 2—在 2 個周期後金屬重量減少;
 3—在 3 個周期後金屬重量減少; 4—在 4 個周期後金屬重量減少;
 5 — 在 1100°C 淬火; 淬火(+); 淬火後在 650°C 回火 (-)。

所有各爐淬火狀態的鋼都具有相當高的抗一般腐蝕性。然而, 含 0.01—0.03% 碳的鋼的穩定性比含碳高的鋼好些。含鈦的鋼穩定性比含碳量相同但不含鈦的鋼較差。曾觀察到含 0.01—0.03% 碳的鋼, 隨試驗時間增長(周期數增多)而抗一般腐蝕性有一定的上升趨勢。經 100 小時沸騰之後, 這種鋼的表面變黃色, 而

仍很平滑,沒有局部破坏的痕迹,由此可得出:金属沿整个表面的溶解是均匀的。

在回火状态下的抗一般腐蝕性方面,所研究的各种鋼差別很大。在 650°C 回火二小时几乎对于含 $0.01-0.03\%$ 碳的鋼的抗腐蝕性没有什么影响。含 $0.07-0.09\%$ 碳的回火鋼的抗腐蝕性却低得多。在第二周期以后,抗腐蝕性急剧下降。提高含碳量也改变样品破坏的特性——可发现点状腐蝕。含高碳及鈦合金的鋼回火后抗一般腐蝕性最大。回火可引起这种鋼的稳定性下降数倍。由于在鋼回火时碳化鈦的析出而使固溶体的均匀結構被破坏,显然这是含鈦不銹鋼破坏較快的基本原因。

現在已經証明了在真空炉中能用碳还原法制出鉻与鈦。

在黑色冶金中广泛应用真空的問題被拖延了,这不仅是冶金工作者而且也是机械制造工作者的过失。我們不能設想在鋼的生产中新的更完善的方法沒有足够数量的真空裝置而能迅速地被掌

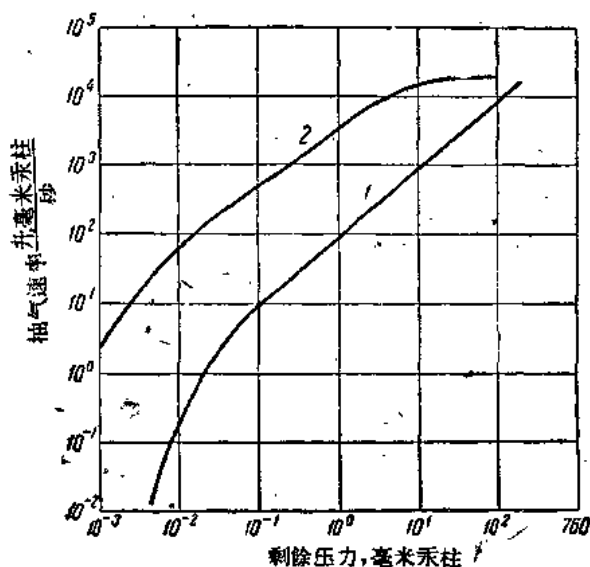


图 6 抽气速率与剩餘压力間关系。
1—BH-6泵; 2—Leybold FG20000 泵。

握。在一系列企业中,例如在“德涅伯罗特殊鋼”厂中所进行的工业試驗就是在缺乏必要的真空泵下进行的。在其他工厂中的设备也同样是缺乏真空泵。

此外,苏联所制的泵比起外国公司所出产的来,功率不够大,这在图 6 中明显地比較出来了。

同样,在我国直到現在还没有組織生产测定金属中气体含量的仪器。在工厂試驗室中缺乏这种仪器,当然就不能研究冶金中与应用真空有关的过程。

在炼鋼过程中广泛利用真空、建筑炉子及結構完善的真空泵、深入地研究真空中的冶金过程,所有这些对于順利地完成苏联共产党第20次代表大会关于尽量扩大真空炼鋼及鑄鋼的指示是很必要的。

参 考 文 献

- [1] П. П. Аносов. О приготовления литей стали. «Горный журнал», 1837, ч. I, книга I.
- [2] Д. К. Чернов. Исследования, относящиеся до структуры литых стальных болванок. «Журнал Русск. металлургич. общ.», 1915, ч. I, № 1.
- [3] Н. П. Чижевский. Вакуум-сталь и ее производство. Материалы конференции по вопросам основных новых направлений в развитии техники производства черных металлов в СССР. М., 1939.
- [4] А. М. Самарин. Теоретические основы раскисления стали. «Труды Научно-технич. общ. черн. металлургии», т. IV, Металлургиздат, 1955, стр. 13—36.
- [5] F. Chesnut. Vacuum melting furnaces. «Metal Progress», 1955 (Nov.), p. 118, 123.
- [6] С. В. Безобразов и А. М. Самарин. Растворимость кислорода в расплавах железа, хрома и никеля. «Изв. АН СССР», ОТН, 1953, № 12.
- [7] В. В. Аверин, Р. А. Карасев, А. Ю. Поляков и А. М. Самарин. Влияние марганца на активность кислорода, растворенного в жидком железе. «Изв. АН СССР», 1956, ОТН, № 3.
- [8] A. Tix. Betriebliche Anwendung der Stahlgasung im Vakuum, besonders bei grossen Schmiedeblocken. «St. u. Eisen», 1956, Bd. 26, S. 61—68.
- [9] А. И. Якунин. Влияние углерода и титана на свойства нержавеющей стали. Моск. ин-т стали. Дипломная работа, 1953.