

真空熔炼

顾德麟 等译



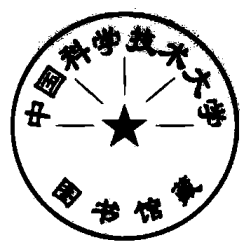
上海科学技术出版社

76.137
A85

真空熔炼

顾德驥 陈 涌 譯
潘健武 尤云龙

3k4 97/56



上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书选译近年来国外发表的有关真空熔炼的 16 篇文章,包括真空感应熔炼、真空自耗电极熔炼以及最新的电子轰击熔炼的工艺,对真空熔炼所需的设备、电源控制、真空泵选择以及合金的质量等也作了扼要的介紹。

本书可供冶金方面的技术人員和科学研究工作者参考。

真 空 熔 炼

顾德骥 陈 通 譯
潘健武 尤云龙

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 10/32 字数 167,000

1962 年 5 月第 1 版 1962 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—2,500

統一书号: 15119·1663

定 价: (十二) 0.92 元

前 言

随着科学技术的不断发展,对金属材料的质量要求也愈来愈高。真空熔炼具有使气体充分脱除和杂质在真空下挥发等优点,能使金属材料的纯洁度大大提高,使材料的质量有很大的改善。同时由于电弧在真空下的作用,使许多难以熔炼的金属也能进行熔炼,这就增加了许多新的金属材料。因此真空熔炼在冶金工业中占有很重要的地位。

近年来,世界各国在真空熔炼方面取得了不少成就,在生产上已经大量采用真空感应熔炼、真空自耗电极熔炼,最近又发展了电子轰击熔炼的方法。真空熔炼的应用范围也日趋广泛。

本书选译了国外期刊中有关真空熔炼技术方面的 16 篇文章,内容力求完整和切合实用,使读者对目前世界各国在真空熔炼方面取得的成就、发展趋势以及真空熔炼中的主要问题有所了解。因此除了介绍真空感应熔炼、真空自耗电极熔炼和电子轰击熔炼等熔炼方法以外,还介绍了设备和炉衬材料的选择以及合金的质量等问题。所选译的文章一般偏重于实际生产或试验的操作经验,对真空熔炼的理论问题如热力学、动力学等则较少涉及。这些文章可以帮助从事真空熔炼操作的技术人员更好地控制电极系统、选择合适的真空泵及真空感应炉的炉衬材料,提高熔炼的真空度和掌握真空熔炼技术。

由于译者水平有限,在内容的选择和译文方面可能还有不妥之处,希读者批评指正。

译 者

1982 年 2 月于上海

65897

目 录

前言

真空感应熔炼	1
镍基合金在真空中的熔炼与浇铸	10
真空熔炼与浇铸用的耐火材料	19
欧洲电弧熔炼概况	27
真空电弧熔炼钛和锆在西德的发展	41
难熔金属在真空电弧炉内的熔炼	70
高温合金的真空自耗电极再熔炼	78
真空自耗电弧炉熔炼的几个问题	87
真空电弧炉电源的选择及电极升降的控制方法	94
真空熔炼特殊钢的质量和性能	110
电子轰击熔炼技术	126
电子轰击熔炼的效果和应用	141
真空冶金抽气系统的选择	156
高效率的机械增压泵	175
罗茨真空泵的设计与应用	180
新型高生产率的油蒸气喷射增压泵	192

真空感应熔炼

— F. N. 达馬拉 等 —

一、大型真空炉的设备

不論真空感应熔炼炉的大小怎样，其主要设备都具有以下几項：

1. 熔炼炉与供电系統；
2. 錠模与炉膛；
3. 真空室；
4. 真空系統；
5. 輔助設備。

現在所制造的 1 吨炉的基本操作原理和设备与实验室的 6.8 公斤的試驗炉并无区别。

1. 熔炼炉与供电系統

对于真空熔炼最合适的是高频感应加热，因为它容易控制熔化速度和金属的温度。通常真空感应炉的设计与空气熔炼的感应炉相似，唯一的不同是它的线圈电压很少有超过 400 伏的。电压要保持这样低主要是为了防止电量与打弧，这种情况会在压力为 10~500 微米的未經絕緣的线圈上发生。但是当炉子容量变大时，需要較高的熔化功率，势必要增加线圈电流，这样在 400 伏时原线圈就显得不合适了。現在设计的 2.3 吨电炉采用 800 伏和 1100 瓩的熔化功率。这种炉子的线圈是用垂直的磁性支撑包围起来。这些支撑压紧线圈形成了剛体的支架。同时这种支撑也构成了磁力线在炉料外面的通路，使带磁性的材料貼近线圈而不会发生线

圈过热的危险。对这种大型的炉子，选择电力必须很小心，如以坩埚内径为 635 毫米的 2.3 吨炉来说，在热效应最高时其合适的频率约为 900 周/秒。为了加速熔体与真空之间的反应，最好能使熔体产生强有力的搅拌。在不使熔体过热的情况下，由 900 周/秒产生的搅拌作用不能满足熔体充分搅拌的要求。最理想的条件是搅拌速度的改变可以不受加热速度的限制，这样可以使熔体的温度保持在固定值，而使搅拌速度能满足最大效应的要求。1 吨和 2.3 吨的电炉曾采用了双重的频率系统，在 1100 瓩、900 周/秒的加热功率之外，再加上一个低频发电机供给 800 仟伏安、30 周/秒功率，以造成搅拌作用。低频输入与加热线圈无关。在 1 吨炉料中加入 3% 铝和 3% 钛有 1 分钟的时间即能得到充分的混合。由于采用了这种合适的搅拌技术以后，脱气的时间也大大缩短了。

坩埚的寿命也是值得关心的一个问题。现在最广泛地用于真空感应熔炼的耐火材料是 70% 氧化镁和 30% 氧化铝。在小于 137 公斤的小型炉子中，坩埚寿命一般达 50 炉以上。随着炉容量的增加，炉衬寿命相应地降低。经过研究认为，炉衬寿命的长短不仅取决于材料的选择，而且与颗粒配比、捶打方法以及未烧结炉衬的加热等因素有关。

2. 錠模与炉膛

在真空条件下浇注所用的錠模与普通冶炼工厂里应用的很相似，但是因为散热条件有了不同，所以热帽部分的模型改成了耐火材料的。这种情况与电弧熔炼中的热帽部分略有不同。

此外，真空炉中安放錠模的炉膛容积是很重要的一個問題。在最初的設計中很少考慮到這一點，以致不能隨產品尺寸不同而隨時改變模型大小。後來在設計中作了相應的改進，一般設置了具有真空活門的隧道式的澆注室，使鋼錠模能夠在不破壞真空的條件下移位、傾注和取出來。2.3 噸爐子的錠模室與熔煉爐身是完全分開的，它的直徑為 2438 毫米，能够使不同大小的錠模安置到

澆注位置上。如果澆注后不准备脫模，就可利用一个轉台将其余的模子轉到鋼流澆注的位置。这个錠模室可以与熔煉室隔开，并且有一套真空系統能使鋼錠长期在真空下凝固，也能在炉內加料时安放新的錠模。錠模是用一个水力压送机将它送到預定位置，再把錠模桌盘的底盖升高而进入熔煉室內。

3. 真 空 室

真空室要求能安放熔煉金属、坩堝、錠模和其他設備，并随着炉子大小和使用要求而改变。小型电炉可以密封在一个具有可移动的頂盖的垂直容器中。当炉子变大特别是作为生产应用时，垂直容器就不适用了；現在最新的容量大于 137 公斤的炉子密封在水平容器中，这就使安放所有的内部設備更方便了。0.9 吨炉的真空室直徑約为 3657 毫米，較大的炉子要求更大的真空室。2.3 吨炉子是用两个以真空閥門分开的真空室，一个作为熔煉室，一个作为錠模室，可以分別控制各室的真空度。

4. 真 空 系 統

真空系統需要抽除的气体来源如下：

- (1) 在标准条件下真空容器內所固有的空气；
- (2) 从容器壁、耐火材料等处来的空气；
- (3) 炉料中熔解的气体；
- (4) 氧化物在真空下还原所形成的气体；
- (5) 从炉外漏进去的气体。

真空系統的設計必須保証在較广的压力範圍內都能抽除这些气体，它要求两种基本的真空泵：一种是机械泵能使压力从大气压下降到約 200 微米，在 200 微米以下它就要失去效用。一种是油扩散泵应設計在 1~200 微米时能具有最高的抽气速率，以便在这样的低压下能使气体全部除去。現在已能制造一种在 0.9 吨炉內抽去气体的单級泵，但对 2.3 吨炉來說，則稍有不同，一般采用多級的小型泵复合連接来代替 1 只或 2 只大容量泵。2.3 吨炉

的真空系統包括 12 只直徑 406 毫米的扩散泵,并用 4 只罗茨泵和机械泵連接起来。这系統的容量足够在 7 分钟內將容器抽空到 10 微米压力下,并除去金属熔化时所排出的气体,使真空室压力不超过 10 微米,而在澆注时全部熔炼室压力可以抽到 1 微米左右。

5. 輔助設備

輔助設備包括补加料装置、取样器、测温装置、控制系統等。在真空炉中补加料装置是很重要的,其作用在于熔炼时可以往炉內坩堝中补加材料以控制质量。它包括两个主要部分:(1)料缶系統,在炉內可以使料落到落料槽內;(2)真空活門,可以使料进入熔体。2.3 吨炉子的真空活門机构可以装载 1.1 吨金属料在十二个格子內,每一料格中的料可以用不同的速度通过螺旋給料器加入炉內坩堝中。这种装置可以保証在不破坏真空的条件下按照需要来調整和补加材料。几公斤的小量的料可以通过坩堝上的一个真空活門随时加入。

二、真空感应熔炼的原理

真空感应熔炼可以很正确地控制化学成分(包括合金元素和杂质),这主要是由于有以下的可能性:

1. 熔体与外界隔絕可以作为热力学系統来处理,真空感应熔炼能防止由于外面的气体侵入熔体而造成气体沾污;
2. 能够控制系統內的压力;
3. 能够攪拌熔体;
4. 有充分的时间使精炼反应进行完全。

因为真空感应熔炼可以防止熔体与外面的氧与氮接触,所以能避免气体的沾污。由于它是在低压力下进行熔炼的,比在空气中反应更完全、迅速。感应攪拌的作用是使熔体成分均匀,同时将反应物帶到熔体与真空的交界处,使反应进行得更迅速、完全。

真空感应熔炼中最主要的脫氧反应是 $C + O = CO$ 。压力对于碳-氧平衡产物的影响是很大的。例如根据理論在 $1600^{\circ}C$ 时,1%

碳鋼中的平衡氧濃度：当一氧化碳压力为 1 大气压时为 0.005%，当一氧化碳压力为 0.01 毫米时变到 6×10^{-8} %。真空感应熔炼时很容易达到 0.01 毫米的压力，虽然并不能真正达到这样低的含氧水平（因为实际上不是純粹的热力学状态），但是也不能认为現在实际达到的含氧水平是最低的。这种反应方式也可以应用于能形成揮发物的其他元素的去除上。軸承鎳合金中的脫硫反应如图 1 所示，这也表明了真空感应熔炼的精炼时所达到的另一个效果。从图 1 可見，对于 2.7 公斤的 80-20 鎳-鈷合金，只要 60 分钟就可以使硫从 0.03% 降低到 0.005%。

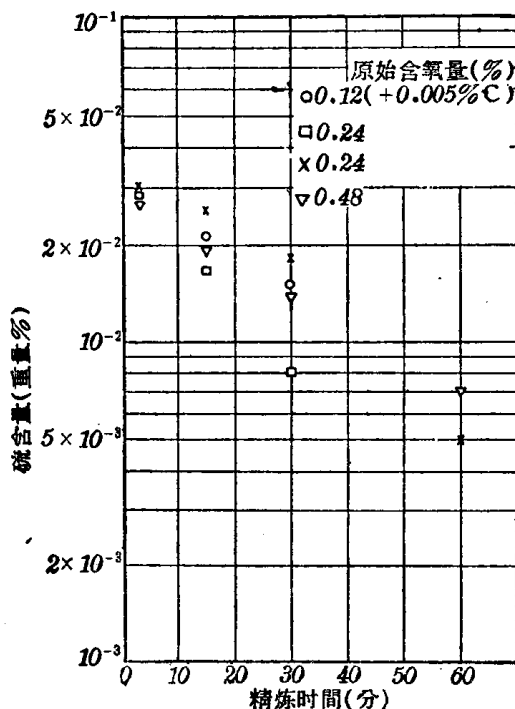


图 1 80-20 Ni-Co 合金在真空中的脫硫

脫氧反应分两步进行：即在熔体-真空交界面发生一氧化碳的沸騰和去除。可以相信第二个反应（一氧化碳的去除）的速度受到碳或氧經過熔体向交界面扩散的限制。当含氧量很低时，熔体就会还原坩埚中的氧化物。按照这样的循环，氧进入熔体同时又从

熔体中发散出来。

近来, 麦克林研究了脱氧反应的理論动力学, 并从他进行的控制脱氧反应速度的模型研究中作了推断。根据他的研究认为, 产生多核的沸騰时, 当核心位置的沸騰蒸气分压力低于金属压头和容器压力的总和时, 沸騰就会停止。这样, 沸騰将首先在熔体的底部停止。实际上沸騰的停止是很迅速的。沸騰首先在活动的和不活动的生核位置, 然后很快地进入熔体的頂部。在脱氧时, 金属中氧的主要損失就基于沸騰。但是在脱氧的第二阶段 (即一氧化碳的去除) 时, 感应搅拌的作用繼續将熔体带到熔体-真空的中間界面。根据麦克林氏模型, 杂质是通过移动的熔化金属层进入中間界面再扩散到真空中而被泵排除。在真空感应熔炼的精炼阶段需要充分的时间, 但在其他的真空熔炼过程中却不需要。曾計算过低碳純鉄在精炼阶段的脱氧速度, 使氧含量从 0.02% 降到 0.002% 大約需要 30 分钟, 可以认为杂质的扩散将需要更长的精炼时间。

麦克林論断了真空感应熔炼鋼的碳-氧产物不仅是热力学参数而且也是动力学参数。这一推論推翻了摩尔的假定, 即坩埚是氧的来源, 当金属中氧变得很低时坩埚就会輸送氧到金属内。可以认为在任何含碳量时, 氧可以达到一个稳定的状态, 即在这时脱氧速度与氧化速度相当 (氧由坩埚供給)。按照麦克林的論断, 碳和稳定状态时的氧的产物不是一个常数 (即使用活度計算); 但是可以推論出超过一定的碳含量时, 氧的濃度接近一个常数, 这数值决定于坩埚、熔池大小以及熔体中氧和坩埚耐火材料的金属組分的扩散。图 2 表示这种論断和实验室内得到的純鉄含碳和氧的数据之間的比較。从图 2 可見, 正如麦克林所指出的, 在含碳量高时最小含氧量是常数。为了进行比较, 把根据启普曼的热力学数据計算的一氧化碳压力为 7.6 和 2.9 毫米汞柱时的平衡曲线用虛綫表示。图下面的虛綫相当于碳-氧平衡在 0.01 毫米汞柱压力时的情况。按照这样, 可以在真空下获得大量的电气工业用的含碳和氧小于 0.0005% 的高純鉄, 也可以用熔融的氧化鎂坩埚来生产含碳

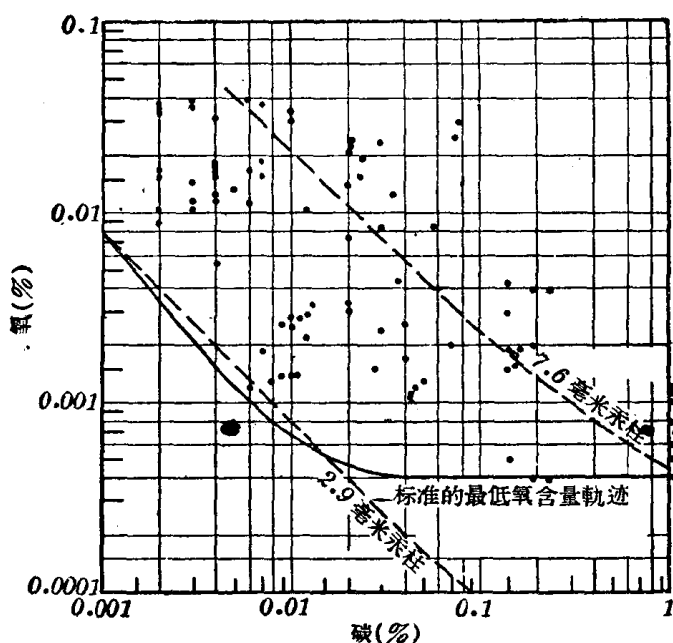


图2 在镁质坩埚中真空熔炼的纯铁中的碳-氧含量

和氧小于0.002%的小容量金属。

在真空感应熔炼过程中,某些在空气熔炼中作为脱氧剂的元素如硅、锰等失去了作用。例如熔体在真空度10微米下沸腾很活跃时,即使向熔池加入硅还是继续沸腾。氧化铝虽不易被还原,但在镍基合金中长期保持在1500°C高温、10微米压力下也会被还原。这就可以解释为什么在普通的真空感应熔炼的金属中没有硅酸盐夹杂,而另一方面发现在真空感应熔炼的材料中还会被沾污。如果不注意精炼(例如在沸腾刚停止将要出钢时加入铝),则钢锭会发生严重沾污,因为这些锭都较小且没有充分时间使氧化物上浮。所以真空感应熔炼不是一种万能的方法,但是它可以更完善地控制熔炼过程。产品的质量主要取决于精炼操作的完善程度。

在真空感应熔炼中精炼的另一个作用是低熔点杂质(如铅、砷和铋等)的挥发。这些元素的挥发在很大程度上改善了质量。

另一个重要的优点是这种熔炼方法能正确地控制化学成分,

一炉金属可以通过多次熔炼达到很狭的成分范围,但是由于少数合金元素如铬和锰在真空下迅速挥发,因而需要补加这些元素。

三、真空感应熔炼的应用

由于上述优点,真空感应熔炼可以用于生产下列产品:

1. 含有活泼元素的合金;
2. “极纯”的金属和合金;
3. 需要极其严格控制成分的合金。

对含有活泼元素的合金来说,曾发现真空感应熔炼对生产含有铝、钛、硼、铈、铌、钽、锆、钨和钼元素的合金有好处。例如几乎所有的沉淀硬化的镍基高温合金中都含有钛和铝。采用真空感应熔炼对惠司泊洛衣合金持久强度性能的改善,可从图3所示的与1952年空气中熔炼的同一材料的比较中看出。采用真空感应熔炼可以提高镍基合金中的钛和铝含量,这样由于沉淀硬化元素的影响将增加高温强化作用。琼斯曾经讨论了镍基合金中含氧量与持久寿命的关系,如图4所示。按照图4的曲线,当含氧量降低到约0.004%时,持久寿命显著增加。

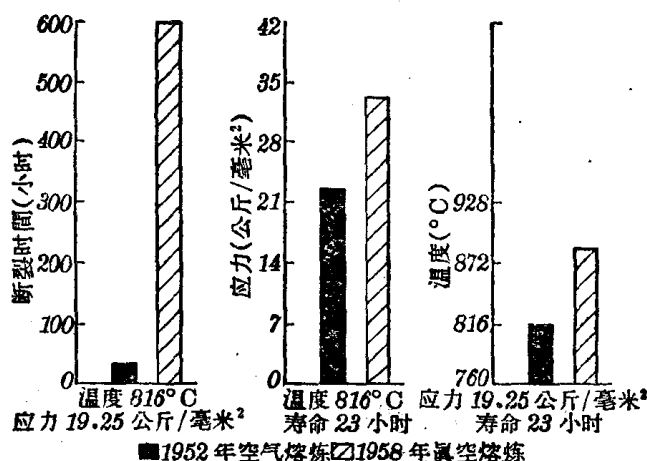


图3 1952年在空气中熔炼的惠司泊洛衣合金与
1958年真空熔炼的合金比较

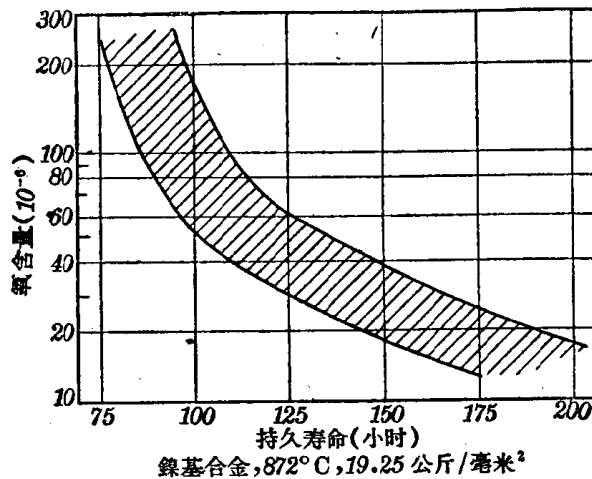


图4 最终含氧量对于镍基高温合金持久性能的影响

含氧量不仅对含活泼元素的合金的高温强度有很大的影响；而且与合金的可加工性、塑性、塑性与脆性之间的转变温度、电磁性能等有极大的关系，同时不仅是氧，合金中其他的相间活泼元素如氮、碳等都与之有关。硼对机械性能的作用尤其明显，长久以来，就知道硼对空气中熔炼的合金性能的影响，但是在真空感应熔炼时合金中硼的效果将更容易控制，因为硼能与氧强烈地结合，而氧在加硼以前已经去除了。根据福立曼等的实验，在惠司泊洛衣合金中只要加入 0.0015% 的硼，就足以使持久寿命提高一倍。近来许多合金已能控制硼的含量在 $\pm 0.0005\%$ 内，从而使合金具有良好的持久性能。

可以预计，采用真空熔炼在新的年代里将生产出许多新的合金。

(顾德骥节译自英国“钢铁学会志”)

1959 年第 3 期第 266~275 页，潘健武校)



鎳基合金在真空中的熔煉和澆鑄

——Н. Н. 祖泊林 B. M. 阿莫寧哥 И. С. 鮑爾高夫——

在熔煉室容量為 400 升的真空爐中，我們對重量為 5 公斤、假設牌號 A 和 B 的耐熱合金進行了冶煉、澆鑄和再熔煉。

帶有前置真空泵 BH-1、生產率為 2500 升/秒的油增壓泵，可以使真空熔煉室的工作壓力達到 $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ 毫米汞柱。

重量大於 5 公斤的試驗合金，是在以下的抽氣設備中進行冶煉的：即其生產率為 20000 升/秒的 M-20 擴散泵、生產率為 200 升/秒的增壓泵以及 BH-4 和 BH-1 前置真空泵。

在冶煉和再熔煉合金 A 時採用了新料，由於在真空熔煉室中沒有加料器，因此全部爐料是一次加進剛玉坩堝中的。當熔煉後的合金由坩堝倒入鋼錠模時，為了不使渣子流入鋼錠模中，採用了下鑄法。鋼液的溫度是用鎢鉬熱電偶測定的。合金澆入加熱到 200°C 左右的鑄鐵錠模內。

合金 A 和 B 是在剛玉坩堝中冶煉和再熔煉的，這種坩堝是由全蘇耐火材料科學研究所的哈爾科夫耐火材料廠用壓制和鑄造的方法製成的。壓制坩堝經 1600°C 焙燒後其氣孔率達 25%，而鑄造坩堝經 1800°C 焙燒後其氣孔率則不大於 1.5%。壓制坩堝的熱穩定性比鑄造坩堝好，但在很大程度上會被液態金屬侵蝕，而鑄造坩堝在抗液態金屬的侵蝕方面顯得較為優越。

試驗證明，含有 1% 二氧化鈦和氣孔率大於 5% 的壓制剛玉坩堝，在高真空條件下是不適宜用來冶煉耐熱合金的，因為它會增加合金中的含氧量。液態合金在這些坩堝中的保持時間與降低合金的持久強度及衝擊韌性成正比。

研究工作者曾確定：鉻和鋁的蒸發將隨着真空度的提高而增

加；而碳的氧化性，在压力为 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-5}$ 毫米汞柱范围内，与真空度的高低无关(表 1)。

表 1 真空冶炼时合金成分浓度的减少量(百分率/小时)

合金成分	残余压力(毫米汞柱)		
	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-5}
铬	0.2	—	0.5
铝	2.0	3.5	4.5
碳	9.0	9.0	9.0

当钢液在坩埚中保持的时间缩短到 10~15 分钟时，成分浓度的变化将不超过化学分析的误差范围。

在含有二氧化钛的坩埚中冶炼合金时，在金属中发现有钛的杂质。此外，在合金内硅的浓度也有所增加，这主要是由于坩埚材料中含有 1.16% 二氧化硅的缘故。在真空电阻炉中加热时，合金 A 和 B 中其他元素的含量实际上不发生变化。

在真空电阻炉中用纯料冶炼合金 B 时，它没有感应搅拌的作用，而且机械搅拌的作用也是很不够的，因此很难获得化学成分均匀的合金，特别是合金中的铝、钨和钛元素很难获得均匀。

以上实验指出，在真空度小于 10^{-5} 毫米汞柱时，可以炼出含碳量合格的合金。碳元素的烧损通常不超过合金中总含量的 20~25%。

合金成品中的含铬量平均比计算加入量要减少 10% (也就是说铬的烧损为 10%)。合金 B 中所得的其他元素含量在再熔炼时与计算加入量相同。当采用压制的刚玉坩埚冶炼合金时，由于液态金属同坩埚材料相互作用的结果，所以未能很好地掌握铝和钛的变化情况。合金在真空下冶炼时，硅的含量有些降低(烧损)，锰蒸发到痕迹，含硫量降低了 20~30%，磷的含量在个别炉号中下降到 30~40%。

表 2 为真空冶炼对合金机械性能的影响。

表2 真空冶炼对合金机械性能的影响

合金在真空中保持的时间 (分)	浇注温度 (°C)	持久强度 (小时)	冲击韧性 (公斤·米/厘米 ²)
10	1400	47~48	5.0~5.2
10	1400	31~42	5.0~5.2
10	1600	31~62	3.7~4.6
180	1600	32~39	4.5~5.0
20	1400	38	4.4~5.0
10	1400	37	4.4
10	1400	—	3.5~4.4
10	1400	21~34	5.25
10	1400	25~43	3.5~5.25

由9炉真空冶炼合金的试验结果指出,其持久强度(当温度大于900°C和应力为15公斤/毫米时)波动在21~62小时之间,平均为38小时,而冲击韧性波动在3.5~5.25公斤·米/厘米²之间,平均为4.6公斤·米/厘米²。该合金在空气中冶炼时(指第一次冶炼的合金),其结果为:持久强度波动在25~48小时之间,平均为29小时,而冲击韧性平均为2.5公斤·米/厘米²。因此,此合金在真空度为 $3 \cdot 10^{-5}$ 毫米汞柱下经过再熔炼后,其冲击韧性提高了84%,持久强度提高了34%。

必须指出,表2的数据是成品合金在铸造的刚玉坩埚中冶炼并镇静10分钟后取样检验而得到的结果。其中只有一炉在1400°C下镇静了3小时,而在出钢前4分钟,这炉的冶炼温度升高到1600°C。没有发现液态合金对坩埚炉壁的侵蚀现象。所有炉号的成分都是合格的,而且含气量(氧、氢和氮)也有所降低。

真空度对合金性能的影响示于图1,由图中可以看出:真空再熔炼的合金,比原始合金(空气中冶炼的相同牌号的合金)具有较高的持久强度和冲击韧性。

由两炉真空熔炼和一炉在空气中熔炼的合金的比较数据指出(表3):在真空下熔炼的合金具有较高的塑性——断面收缩率提高了55%、延伸率提高了32%,但是其强度性能则无变化。