

[美] S·L·凯斯 K·R·范·郝恩 合著

天津大学金属学热处理教研室 译

钢铁中的铝

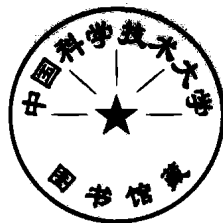
中国工业出版社

76.2
634

钢 铁 中 的 铝

[美] S·L·凯斯 K·R·范·郝恩 合著

天津大学金属学热处理教研室 译



中国工业出版社

本书系根据美国纽约 John Wiley & Sons, Inc. 出版公司出版的, S. L. 凯斯 (Case) 和 K. R. 范·郝恩 (Van Horn) 合著的 “Aluminum in Iron and Steel” 一书译出。在翻译过程中还参考了该书的俄译本。

书中评述了有关铝在钢铁中的应用的大量文献资料。详尽地论述了钢中加铝脱氧的原理以及铝对钢中夹杂物、奥氏体晶粒度、钢的时效以及切口敏感性的影响。此外, 还讨论了铝作为合金元素在不起皮钢、永久磁铁、渗氮钢中的应用以及用作钢的表面耐蚀覆盖层的原理。

为了便于读者了解本书价值, 书中附有俄译本序言。

本书主要供冶金厂和机械厂从事生产与研究的工程技术人员阅读, 亦可供大专学校有关专业学生参考。

Samuel L. Case Kent R. Van Horn
ALUMINUM IN IRON AND STEEL
PUBLISHED FOR THE ENGINEERING FOUNDATION
BY
JOHN WILEY & SONS, INC., NEW YORK
CHAPMAN & HALL, LTD., LONDON

* * *

钢铁中的铝

天津大学金属学热处理教研室 译

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊编辑室编辑 (北京灯市口71号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $14 \frac{1}{8}$ · 字数 314,000

1965年4月北京第一版·1965年4月北京第一次印刷

印数0001—3,690·定价(科六) 2.10元

*

统一书号: 15165·3431 (冶金-558)

原 序

当鉄合金研究在第二次世界大战期間中断了四年以后，在1946年又重新恢复的时候，鉄合金委员会担负了双重的任务：修改和編完已部分完成的“鋼鉄中的合金元素——镍和錳”的初稿，和准备編写有关一些被选定元素的专题論著；在1930~1942年鉄合金研究的活跃时期，这些元素沒有受到应有的重視，但是后来发现，这些元素在鋼鉄冶金方面具有新的重要作用。鋁便是其中之一。

在本世紀三十年代期間，当鋁被用作鋼液的脫氧剂时，关于鋁所起作用的冶金理論研究进展很慢，但在战争时期和战后几年这方面的进展則很快。起初，鋁主要是用来鎮靜过度氧化的鋼液，并且常把它看成是掩飾不正常熔炼操作的有效手段。就在第二次世界大战前不久，大量实验和生产数据証明，作为一种脫氧剂，鋁在控制鋼的晶粒度方面很有成效，并能阻止鋼的时效，而且通常还能降低鋼在低溫时的切口脆性。这些发现終于导至把鋁正式加入到許多种碳鋼和合金鋼中，以利用它对鋼的組織和性能的有益影响。而与它以前用作脫氧剂有关的坏名声現在則完全消失了。本书的第一部份簡述了一些文献資料，借以說明作为一种脫氧剂加往鋼液中的少量（对每一炉鋼来說是少量，但就全部鎮靜鋼的产量來說則为大量）鋁的良好影响。

本书的第二部分介紹有关鋁作为鋼鉄中合金元素所起作用的一些資料。該元素的較少部分用作耐热合金、磁性合金和渗氮鋼的重要組份已有相当时期了。在这些重要类型的合金中，鋁的优点已經得到了广泛的承认。鋁作为工业鉄及低碳鋼防腐覆盖层的有效作用，早在鋼鉄工业用它来作为有效的脫氧剂以前許多年，就已經知道了。

IV

本书的初稿写于 1947 和 1948 年，并在 1949 年春和夏经过这方面专家的审阅和修改。在严格的审阅过程中感觉到关于铝在夹杂的形成、晶粒大小、切口敏感性和时效等方面作用的讨论还嫌太少。伯恩斯 (R. S. Burns)、埃普斯坦 (S. Epstein)、肯洋 (R. L. Kenyon)、密勒 (R. F. Miller)、西斯考 (F. T. Sisco) 和本书的作者所组成的委员会被指定来研究这件事情，并且在 1949 年 9 月，委员会建议把这些论题加以扩大，以包括对现象本身的基础理论的阐述。因而，前七章全部重新改写，而本书的后半部，即铝作为合金元素的部分也有所修改，并补充了在重新编写第一部分期间所发表的一些资料。

为完成本书的定稿而参考的文献极其广泛，不只限于冶金方面的杂志；因此在删去了不可避免的重叠部分以后，还不得不作某些选择。虽然如此，本书还是包括了 341 篇参考文献。

对所使用的单位还须加以说明，和第一套丛书一样，温度是摄氏与华氏同时注明^①，在性能的讨论方面采用了美国材料试验协会、美国机械工程师协会和美国标准协会等单位的建议。

最后，须就某些铜版的质量稍加说明。当铝作为脱氧剂加入到钢液时，反应产物的本性(高度弥散、产生复合物等等)注定，要想获得反差性十分满意的显微照片以制出清晰的铜版是比较困难的；再加上有时候必须从另一铜版图，尤其是印在质地很差的纸上的图(因为原版找不到)来制版，虽然制版者尽其所能应用了一切现代技术，而结果还是与理想相差很远。本书中的图片尽管不够完善，但还是希望能有助于阐明本书的内容。

佛·特·西斯考

1953 年 4 月于纽约

① 中译本中大部份只采用了摄氏温度单位。——编者

俄譯本序言

鑑于目前鋁在黑色冶金方面有着重要的意义，因而 S. L. 凱斯和 K. R. 范·郝恩著“鋼鉄中的鋁”一書俄譯本的出現是值得庆賀的。這本書是新編的鉄合金叢書中的第一本專著，這套叢書由 F. 西斯考主編，并由鉄合金委員會出版。

自从稳定的无时效鋼出現以來，人們對於鋁在黑色冶金中所起作用的看法有了很大的改变。在此以前认为，鋁的加入只不过是供过度氧化的鋼液进行完全脫氧的一种手段。但随后逐漸清楚地認識到，用鋁处理鋼液对鋼的时效特性、晶粒度和脆性断裂的敏感性都有深刻的影响，而且此时不仅鋁和氧的相互作用有着重大的意义，同时鋁和鋼中氮的作用也同样具有重大的影响。因此鋁不仅是脫氧剂，而且也是有利于鋼脫气的元素。只有当和鋼中的氧及氮化合之后，鋁才能起真正的合金元素的作用。本書的內容和各个章节即按此情况編成。

本書的第一部分綜述大量文献資料，借以說明，作为脫氧剂和除气剂往鋼液中加入少量鋁的影响。在闡述鋼用鋁脫氧的原理的各章之后，又討論了加鋁对奧氏体晶粒度、脆性破坏的敏感性、鋼的时效等方面的影响，以及与此有关的关于金属进一步加工的建議。

書中有專門一節討論鋁的加入对鋼中的氧化物、硫化物以及氮化物夹杂的影响。

本書的第二部分涉及鋁作为合金元素影响的有关方面（組織、二元和复杂的鉄鋁合金的生产；作为合金元素，鋁对耐热合金、永磁合金和滲氮鋼的影响等等），最后討論鋁作为低碳鋼防腐覆盖层应用的有效性。

VI

书中共援引了 341 篇文献，其中包括 1930 年以前的 37 篇和 1930~1952 年之间的 304 篇。

这本专著无疑会受到苏联冶金工作者的重视。

工程师 А.И.密涅尔

目 录

原序

俄譯本序言

第一部份 铝在钢铁脱氧方面的应用

第一章	鋼液的加鋁脫氧	1
第二章	加鋁脫氧鋼中的氧化物夹杂	17
第三章	用鋁脫氧鋼中的硫化物和氮化物夹杂	52
第四章	鋁在控制奧氏体晶粒度方面所起的作用	87
第五章	鋁对鋼的切口敏感性及其有关性能的影响	131
第六章	鋁对鋼时效的影响	172
第七章	鋁作为脫氧剂使用所引起的一些其它影响	220

第二部份 铝在合金钢方面的应用

第八章	二元及多元鉄鋁合金的組織	259
第九章	簡單和复杂的鉄鋁合金的制造	273
第十章	鋁在耐熱合金中的应用	290
第十一章	鋁在永磁合金中的应用	326
第十二章	鋁在滲氮鋼中的作用	344
第十三章	鋼的覆鋁	371
第十四章	鋁在鋼鉄合金化方面的其它应用	398
参考文献		421

第一部份 鋁在鋼鐵脫氧方面的应用

第 一 章

鋼液的加鋁脫氧

加鋁脫氧的热力学—加鋁的方法—不同鋼

种用鋁脫氧的操作方法—总结。

鋁作为鋼中脫氧剂开始是暗地里在平炉和电炉熔炼工厂中使用的。多年以来，它被秘密地用作过度氧化鋼水的矫正剂，它的使用被认为是一种簡便的补救办法，实則是掩飾不正常的熔炼操作。直到1930年，德国鐵路規章还禁止在制造軌道鋼时使用鋁，而在1934年斯道頓 (Stoughton) [89] 也曾說：“在盛鋼桶里通常加入硅，如果許可的話也可以加鋁”。这种說法反映了欧美許多著名鋼鐵用戶的态度。“不洁鋼”，“混合”晶粒組織和縮管傾向过大經常同用鋁作为最后脫氧剂有关。通常认为，正規炼鋼根本不需要这样处理；而加鋁事实上就被看成是鋼的质量低劣的証明。

根据美国鋼鐵学会1941年的統計[186]，在第二次世界大战前不久，美国在鋼水脫氧方面的用鋁量平均每吨鋼約为325克^①，即从高碳鋼的每吨250克到深拉鋼的每吨2仟克。这反映了二次世界大战前十年期間用鋁脫氧的状况发生了显著的改变。从1940年以来，鋁的用量已显著增加，到1952年已接近于每吨鋼錠400克^②。

1927年 Izett 鋼的出現便是在炼鋼过程中使用鋁以期获得良

① 請讀者注意：此处以及以后的磅-克换算均參照俄譯文按1磅=500克比率进行的，而一般1磅是等于453克。——編者

② C.M. 帕克尔 (Parker) 1952年1月31日私人通信，1950年的用鋁量約为：碳鋼每吨325克，合金鋼每吨885克。

好的机械性能的首次成功的尝试。虽然Izett钢是德国的成就，但美国在研究铝脱氧的原理及其影响，控制晶粒度等方面作过不少努力。在这方面提出过大量技术论文，麦克奎德 (McQuaid) [98] 在1935年坎贝尔 (Campbell) 纪念演讲会上的报告达到了这方面的顶点，并且用铝进行脱氧在美国很快就成为通常的操作了。

在英国和欧洲大陆曾不大愿意承认用铝脱氧在炼钢操作上是先进的，直到1936年斯维因登 (Swinden) 和波尔索维尔 (Bolsover) 才发表了有关这个问题的第一篇重要论文[111]。这两位作者在序言里写道：“关于控制本质晶粒度的问题，多年来已成为许多技术文献，特别是美国技术文献中的普遍课题。然而，在作者看来，它还没有受到应有的重视。它无疑值得重视。其原因，无疑是由于在英国实际上还没有发表过实际的实验数据，在有些地方对此还表示极大的怀疑”。

直到1936年这种怀疑在英国还很强烈，这在斯维因登和波尔索维尔文章的讨论中已经得到证明，特别是哈特菲尔德 (W.H. Hatfield)，他说：“在设菲尔德 (Sheffield) ①，人们总认为往钢中加铝是不懂得炼钢学的人一种不良手段。换句话说，如果一个炼钢者只有用大量的铝才能炼出质量好的钢，那么他就是不称职者”。

自从1930年以来，美国集累了大量关于铝作为脱氧剂对晶粒度的控制和时效影响的实验和操作数据，有成效地克服了过去的反对在炼钢时使用铝的偏见。结果，绝大多数钢种，无论是用来浇注钢锭或是浇成铸件，都广泛地采用加铝使钢水脱氧的操作。

在铸钢中加铝的主要原因是消除针孔气泡，这种气泡在用湿砂型浇铸的用硅脱氧的钢铸件中是很普遍的。为了完全防止这种针孔气泡而加入大量的铝可能造成硫化物夹杂沿晶界分布，而这是我们所不希望的。为了防止针孔气泡和不希望有的晶界脆化，现在认为加入过量的铝以保证产生危害性较小的大块夹杂是适宜

① 英国一大城市名。——校者

的。

在金属模中浇注的鍛鋼不易产生針孔气泡，即使产生，这种气泡在热轧时也会被焊合起来。因此，鍛鋼的含鋁量——如果鋁是用来脱氧而不是控制晶粒度——一般要比鑄鋼低。

用铝脱氧的热力学 直到1950年前后，被广泛接受的有关鋁脱氧能力的数值还是启普曼 (Chipman) [76] 根据热力学导出的数值。这些数值如图 1 所示。其中和剩余金属鋁(剩余鋁在0.001—0.1%范围内)呈平衡的鋼中 FeO 含量已經被計算出来。

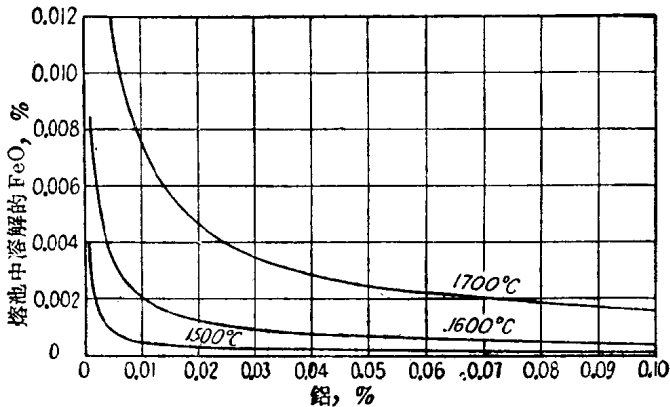


图 1 熔池中氧化鉄含量与加鋁量之間的关系。启普曼 [76]

启普曼 [76] 在进行这种热力学計算时采用了最可靠的有关生成热、热容量和 Al_2O_3 熵变的数据，同时还計算了脱氧反应 $2\text{Al} + 3\text{FeO} = \text{Al}_2\text{O}_3$ 的平衡常数，計算时曾假設在該反应中溶于鉄水中的鋁和氧同純固态 Al_2O_3 呈平衡。

万殊普 (Wentrup) 和希伯尔 (Hieber) [158] 在后来的研究中应用实验方法計算鋼液用鋁脱氧时的平衡常数 $K = [\text{Al}]^2 \cdot [\text{O}]^3$ 。这种計算以实验熔池中的总氧量和鋁量的化学分析为依据，計算出的常数表明，鋁的脱氧能力較之启普曼根据物理常数所計算出的数值要低很多。

在討論所得到的实验数据时，启普曼注意到万殊普和希伯尔

沒有把溶解于熔池中的鋁和存在于 Al_2O_3 悬浮质点中的鋁加以区分；他还指出：“分析含量极少的这些元素的分析方法的准确性还不足以使由实验所确定的常数像计算所得的数值那样可靠”。

赫尔梯 (Hilty) 和克拉夫斯 (Crafts) [316] 在 1950 年曾报告有关鋁脫氧問題的詳細研究結果。实验熔炼是在泰勒 (Taylor) 和启普曼 [212] 所描述的迴轉坩堝炉内进行的。炉子的轉动可以防止炉渣与坩堝作用而改变成分。离心力使鋼水表面下凹成一个液体金属杯，炉渣浮于其中而不致于同坩堝相接触。

实验熔炼时用电解鉄作为炉料，并用氩气作保护气氛。实验测定了 1550、1600、1650°C 时氧的等溫溶解度，所有溫度都是用装于石英保护管内并經常加以校正的鉑/鉑-鎳热电偶测量的。

为了防止分析試样在冷却和凝固的过程中发生非金属相的析出和集聚，赫尔梯和克拉夫斯也曾采用泰勒和启普曼 [212] 所描述的取样装置。它主要是一个孔小壁厚的銅制吸管，可以使試样以极高的速度凝固。从图 2 和图 3 可以明显地看出，这种方法几乎完全抑制了非金属夹杂的析出。图 2 表明，在含 0.066% 鋁和 0.015% 氧的鋼液中，所取的試样經快速冷却以后几乎完全沒有非金属夹杂；而图 3 表明同一試样在 1400°C 退火 1 小时后有非金属夹杂物析出。两张显微照片都是在放大 2000 倍时摄制的。

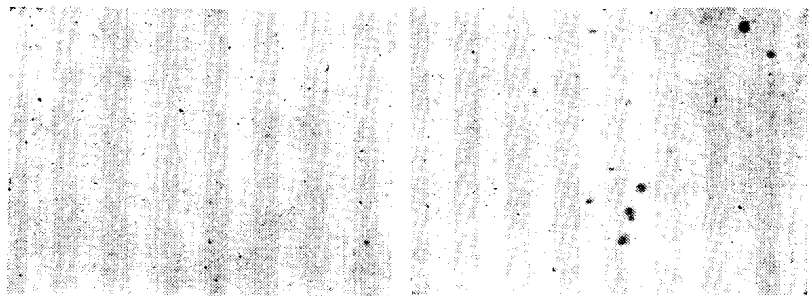


图 2 从含 0.066% 鋁和 0.015% 氧的鋼液中取出的泰勒試样中的夹杂。未浸蝕； $\times 2000$ 。赫尔梯和克拉夫斯 [316]

图 3 和图 2 相同的試样在 1400°C 退火 1 小时以后有明显的夹杂析出。未浸蝕； $\times 2000$ 。作者同上

表 1 在迴轉式氧化鋁坩堝炉內对液体鉄中鋁 氧平衡研究的結果①

坩号	溫度		含量 %		坩号	溫度		含量 %		坩号	溫度		含量 %	
	°C		Al	O ₂		°C		Al	O ₂		°C		Al	O ₂
A—1	1550	0.082	0.003 ₇		A—7	1598	0.33	0.002 ₂		A—10	1600	0.001 ₇	0.092	
	1604	0.006 ₅	0.040			1596	0.25	0.005 ₄			1600	0.001 ₇	0.074	
	1649	0.010	0.064			1601	0.27	0.001 ₉			1600	0.002 ₁	0.068	
	1550	0.001 ₃	0.070			1598	0.20	0.002 ₄			1600	0.002 ₀	0.066	
A—2	1599				A—8	1600	0.19	0.003 ₀		A—11	1600	0.001 ₇	0.067	
	1600	0.002 ₅	0.081			1600	0.16	0.007 ₂			1598	0.001 ₆	0.075	
	1597	0.001 ₄	0.082			1598	0.17	0.005 ₅			1600	0.001 ₅	0.080	
	1648	0.001 ₆	0.101			1602	0.12	0.005 ₅			1550	0.001 ₀	0.070	
A—3	1598	0.67	0.002 ₉		A—9	1596	0.087	0.004 ₁		A—12	1549	0.001 ₅	0.059	
	1599	0.59	0.002 ₁			1603	0.78	0.001 ₀			1550	0.001 ₇	0.054	
	1602	0.58	0.002 ₅			1598	0.68	0.001 ₁			1550	0.001 ₂	0.062	
	1600	0.48	0.002 ₆			1605	0.55	0.001 ₃			1550	0.001 ₂	0.067	
A—4	1599	0.40	0.002 ₃		A—10	1601	0.57	0.001 ₅		A—13	1550	0.001 ₇	0.073	
	1656	0.002 ₇	0.128			1602	0.47	0.002 ₄			1551	0.42	0.001 ₅	
	1657	0.001 ₇	0.109			1596	0.52	0.000 ₉			1553	0.44	0.001 ₈	
	1658	0.002 ₃	0.149			1650	0.21	0.008 ₄			1553	0.46	0.002 ₂	
A—5	1658	0.001 ₁	0.114		A—11	1598	0.15	0.012 ₀		A—14	1548	0.35	0.001 ₀	
	1649	0.001 ₂	0.153			1600	0.12	0.010 ₅			1549	0.23	0.001 ₁	
	1647	0.005 ₃	0.095			1600	0.11	0.008 ₆			1553	0.22	0.001 ₇	
	1653	0.007 ₉	0.107			1604	0.099	0.006 ₀			1545	0.21	0.001 ₂	
A—6	1598	0.14	0.007 ₅		A—12	1600	0.086	0.004 ₇		A—15	1551	0.21	0.003 ₄	
	1598	0.010 ₆	0.030			1600	0.075	0.005 ₃			1654	0.24	0.011	
	1600	0.002 ₃	0.064			1600	0.047	0.009 ₂			1649	0.40	0.004 ₀	
	1600	0.001 ₁	0.066			1600	0.008 ₈	0.027 ₀			1650	0.31	0.010 ₀	
A—7	1598	0.001	0.084		A—13	1604	0.002 ₃	0.050 ₀		A—16	1651	0.27	0.006 ₅	
	1605	0.002 ₁	0.076			1598	0.002 ₁	0.082			1653	0.28	0.005 ₇	
	1599	0.001 ₉	0.117			1600	0.003 ₃	0.087			1649	0.26	0.009 ₄	
	1601	0.001 ₄	0.071			1600	0.002 ₀	0.073			1677	0.002 ₀	0.172	
A—8	1601	0.001 ₈	0.102		A—14	1600	0.001 ₇	0.072		A—17	1646	0.001 ₀	0.183	
	1595	0.003 ₃	0.065			1600	0.001 ₉	0.076						
	1595	0.002 ₇	0.067											
	1605	0.002 ₉	0.056											

① 赫尔梯和克拉夫斯的数据^[316]。研究是在氧化鋁迴轉坩堝炉內进行的。

在作試样的化学分析时，被测定的是总鋁量，因为（如图 2 所示）試样中全部鋁在取样时都完全溶解于液体金属中。鋁的测定是采用极灵敏的光譜分析法，以鋁为指示剂并用銅鉄（cupfer-ron）試剂除去鉄和其他干涉元素而得到的。这种分析方法的誤差不超百万分之一，并且可以重現。

氧的分析則采用常用的真空熔化法，分析結果的誤差在 $\pm 0.001\%$ 以內。分析炉渣試样时用X-射綫粉末衍射法（即德拜-謝乐法），以鉻的标識X-射綫作为光源，在衍射花样上鉄的綫条可以不管。

赫尔梯和克拉夫斯^[316]所得的鋁-氧在鉄液中平衡的實驗結果汇集于表 1 中。由这些数据作出的氧-鋁等溫平衡曲綫則如图 4 所示。

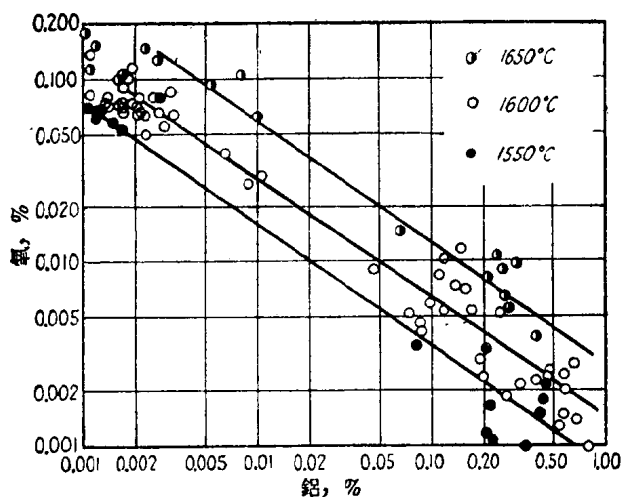


图 4 氧在含鋁的液体鉄中的溶解度。赫尔梯和克拉夫斯^[316]

根据炉渣試样的 X-射綫分析以及鉄水和氧化鋁坩堝的反应产物可以推断，純固态 Al_2O_3 不能和含氧的鉄水共存，并且氧在含鋁量为一般炼鋼浓度范围内的鉄水中的溶解度，由于含氧化鉄相的形成而受到限制。当含鋁量較低时，炉渣是由大約 2/3 的鉄

鋁尖晶石（鐵鋁尖晶石— $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）和大約 1/3 的氧化鐵（維氏體— FeO ）所組成的。當含鋁量超過 0.10% 時，非金屬相即為鐵鋁尖晶石和氧化鋁的混合物。

在圖 5 中，將赫爾梯和克拉夫斯的用鋁脫氧的曲線同萬殊普和希伯爾^[158]所獲得的數據作了比較；而在圖 6 中，將赫爾梯和克拉夫斯 1600°C 的用鋁脫氧曲線和啟普曼^[215]在同一溫度下計算所得的曲線也作了對比。很显然，赫爾梯和克拉夫斯由實驗所得的數值表明，氧的溶解度大約比萬殊普和希伯爾的實驗結果要大三倍，而比啟普曼根據熱力學數據計算出的數值要大 100 倍左右。

在圖 5 中這兩種實驗數據之間的差別較小，關於這一點可作這樣的解釋：萬殊普和希伯爾試樣的凝固速度相當慢，而且溫度是用目測光學高溫計測量的，準確性較低。在這兩種數據中，無疑赫爾梯和克拉夫斯的數據更為可靠。赫爾梯和克拉夫斯的實驗數據和啟普曼的計算結果相差竟達 100 倍就很難解釋了。啟普曼^[296]認為熱力學的計算只是給出溶解於鐵水中的氧的活度而不是濃度，而且在 Fe-Al-O 系中氧在金屬相內的活度系數可能遠小於 1。這可歸因於合金元素和氧分享電子的能力^①，正如同周圍的鐵原子一樣束縛了氧，因而降低了氧的活度。其总的效果和實際上只存在有少量氧時的情況相同。根據這一理由，一個元素的脫氧能力不能只在脫氧圖上用一條曲線來表示，必須用兩條曲線：一條曲線表示氧的活度，另一條則表示其濃度。這兩條曲線究竟用那一條，則要看我們所要知道的是在脫氧後還有多少剩餘氧存在，還是這些剩餘氧的行為（特性）如何。

氧的活度隨鐵水中含鋁量的增加所發生的變化，能否很好地說明圖 6 中實驗和理論脫氧曲線的百倍之差（特別是在剩餘鋁含量低的範圍內）還成問題。根據不同含鋁量而作出的氧的假想活度系數曲線（圖 7）與圖 6 所示的兩條相互平行而且不在含鋁量為零處（即原點）相交的脫氧曲線不一致。根據赫爾梯和克拉夫

① 這表示合金元素和氧之間的化學親和力。——校注

斯的研究，对实验和理论（计算所得）脱氧曲线之间的这种差别（图6）作了另一种解释，他们认为在实验熔炼时炉渣并不是纯 Al_2O_3 ，像启普曼在计算时所假定的那样。氧和铝的平衡在氧的活度比纯 Al_2O_3 要高的一些相中容易达到，这些相在低铝钢水中

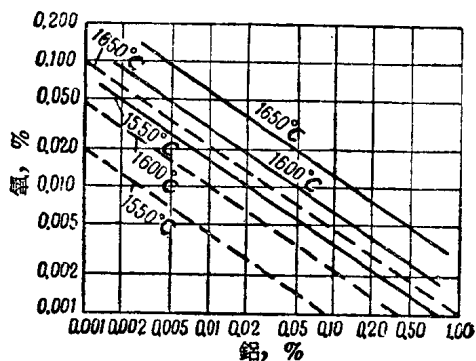


图5 两种实验铝脱氧曲线的比较。赫尔梯和克拉夫斯〔316〕
实线—赫尔梯和克拉夫斯的实验结果；虚线—万殊普
和希伯尔的实验结果

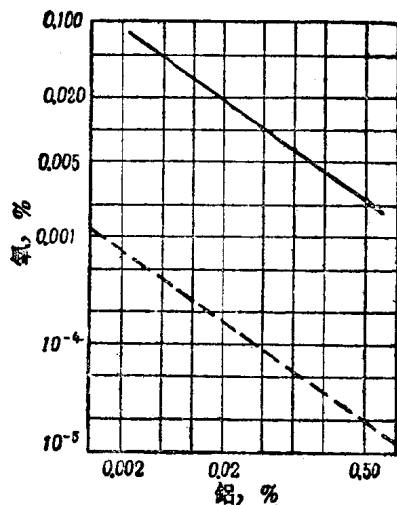


图6 在1600°C时用铝脱氧的实验曲线和计算曲线的比较。赫尔梯和克拉夫斯〔316〕

为鉄鋁尖晶石和氧化鉄的混合物，在剩余鋁含量达 0.1% 时为尖晶石和氧化鉄的混合物。

赫尔梯和克拉夫斯对实验熔炼平衡的研究在鋼的脱氧方面具有很大的实际意义，此时硅同錳的含量均保持在一般炼鋼的水平，近乎常数，而只变更鋁的含量。这一部分研究只限于 1600°C 附近。从图 8、9、10 所示的氧的溶解度数据可以看出，硅对鋁脱氧的影响是很小的，而錳虽則是一个很弱的脱氧剂，但如和鋁同时并用，則可以使鋁的脱氧能力大为增加。例如，在高純鉄的熔池中，0.05% 的剩余鋁同 0.010% 氧呈平衡。然而，在含錳約 0.45% 的熔池中，0.05% 的剩余鋁和仅仅只有 0.003% 的氧保持平衡。当錳的含量增至約 0.65% 时，和 0.05% 鋁呈平衡的氧即降至 0.002% 以下。这些結果表明，0.50% 錳降低氧在用鋁脱氧的鋼中溶解度約 75%。

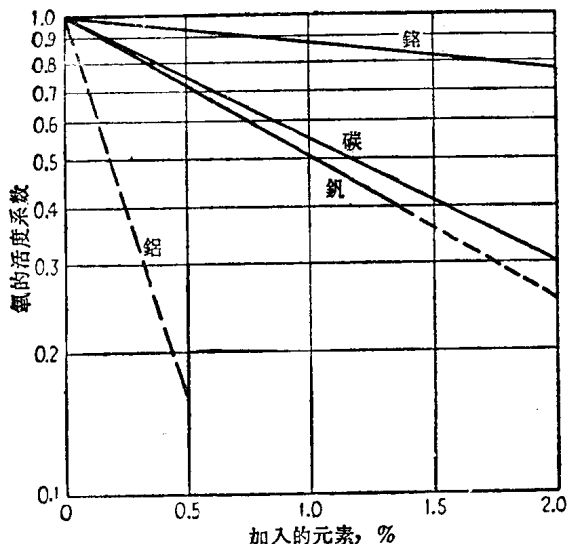


图 7 氧在 1600°C 时的活度系数同剩余碳、鉻、釩或鋁的含量之間的关系。鋁的虛綫是推测的。启普曼 [296]