

鋼錠中的 氣體與夾雜物

В.И.雅伏依斯基 著

陳亞 謝周 譯

冶金工业出版社

75.1
660

銅錠中的气体与夹杂物

Д.И. 雅伏依斯基 著

陈 亚 謝 周 譯

冶金工业出版社

В. И. Явойский

ГАЗЫ И ВКЛЮЧЕНИЯ В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ

Металлургиздат (Москва, 1955)

鋼錠中的气体与夹杂物

陈 亞 謝 周 譯

編輯：王婷娣 設計：朱駿英 魯芝芳 校對：李慧英

冶金工业出版社出版（北京市灯市口甲45号）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

工人出版社印刷厂印

新华書店發行

1959年7月第一版

1959年7月北京第一次印刷

印數4,530册

开本850×1168¹/₃₂·160,000字·印張7¹²/₃₂

統一書号 15062·1507 定价0.90元

本書系根据苏联冶金工业出版社(Металлургиздат)出版的科学技术博士雅伏依斯基(В.Н. Яво-
йский)著“鋼錠中的气体与夹杂物”(Газы и
включены в стальном слитке)1955年版譯出。

本書介紹了熔融金屬內非金属夹杂物及气泡生
成与扩大的热力学和动力学；决定鋼錠內夹杂及气
体的数量和成分的因素；在金屬結晶及冷却过程中
气体和夹杂的性状及在沸騰鋼和鎮靜鋼內气体和夹
杂引起的缺陷的特性，並指出了消除这些缺陷的措
施。

本書供炼鋼工程师、技术員和 研究人員参考
用。

本書由陈亚、謝周等譯，由李传薪同志作技术
校对。

序 言

在苏联正竭力改善着鋼錠的质量。近年来在这方面进行了大量的周密研究。但是,在这些研究資料中,关于鋼錠中气体含量及非金属夹杂的数量、成份和物理結構方面的实际資料比較少见。关于夹杂物及气体的分布状况与鋼的冶炼及浇注方法的关系的作品也很少。其原因可能是因为鋼中气体及夹杂物的測定作为检查金屬质量的一种方法在各厂尚未被人掌握,以致至今还未被普遍采用,广泛推行。

然而,測定鋼錠中气体及夹杂的問題不仅具有理論上的意义,而且具有深刻的实际意义。

很明显,鋼錠头部及底部的切割必須符合于根据鋼錠中气体及夹杂物的分布状况記錄下来的結晶过程。

在切割《定尺》鋼錠时,常常要考虑到鋼錠中气体及夹杂物的分布情况。在許多情况下,必須指定气体及夹杂物最少的几段鋼錠(成鋼坯)用于制造重要用途的零件。反之,气体及夹杂物較多因而质量較低的鋼,只用于制造对机械性能要求較低的零件。

在生产某些易生白点的合金鋼时,鋼坯或鍛件的氢退火制度,同样地必須符合鋼錠中气体及夹杂分布的特性。

气体分布問題在生产大型鍛造鋼錠时具有特殊的迫切性,而随着軋制用鋼錠重量的增加,这个問題对于冶金工厂也是很重要的。

在加速进行冶炼过程的条件下,生产大型沸腾鋼鋼錠时,会遇到一些不良现象,这些现象系由于鋼錠結晶过程中气体的析出及在低于出鋼溫度时气体重新分布所引起。

本書的目的是探討和整理关于气体及非金属夹杂物在鋼錠内分布的实际資料,以及关于鋼生产的最后几个阶段內气体饱和度及夹杂含量变化的实际資料,探索夹杂物及气体分布的规律性及找出它們的分布性质与鋼錠結晶的各种过程的关系,以及与熔炼和鑄錠操作的关系。

目 录

序言

第一章 概論	1
一 液体金屬結構簡述	2
二 实用液体鉄合金的結構特性	9
三 熔融金屬中非金屬夹杂物和气泡产生与扩大的热力学 及动力学	10
四 决定鋼錠中夹杂物和气体数量及成分的因素	21
五 金屬結晶过程中气体和夹杂物的性状	33
六 在凝固鋼的冷却过程中气体及夹杂物的性状	47
七 鋼內偶然性的非金屬夹杂物	62
第二章 沸騰鋼鋼錠中的气体与夹杂物	69
一 出鋼与鑄鋼时沸騰鋼中气体和夹杂物的性状	69
二 沸騰鋼鋼錠結晶时气体从鋼錠內的析出	86
三 氮、氧和氢在沸騰鋼鋼錠中的分布	101
四 非金屬夹杂物在沸騰鋼鋼錠中的分布	112
五 沸騰鋼因气体和非金屬夹杂物所造成的缺陷	120
第三章 鎮靜鋼鋼錠內的气体及夹杂物	135
一 在出鋼、盛鋼桶內靜置及澆鑄过程中碳素鎮靜鋼及合 金鎮靜鋼內气体饱和度的变化	135
二 出鋼及在盛鋼桶內的鎮靜对鋼中內在氧化物夹杂含量 的影响	159
三 鎮靜鋼与盛鋼桶、流鋼槽及下鑄磚耐火材料的相互作用	155
四 鎮靜鋼鋼錠在結晶过程中的除气作用	169
五 鎮靜鋼鋼錠內氢气的分析	168
六 氮气在鎮靜鋼鋼錠內的分布	183
七 氧化物夹杂在鎮靜鋼鋼錠內的分布	191
八 鎮靜鋼鋼錠由于鋼中存在气体而造成的缺陷	203
九 消除鎮靜鋼中气体与夹杂物所造成的缺陷的方法	220
参考文献	223

第一章 概 論

氢、氮及氧的絕大部分并不是以气体形态（气孔、气泡）而是以固溶体或化合物的形态存在于鋼中；也就是以特殊冷凝相的形式存在，或存在于溶液中基本金屬相成份之內，但在冶金学中对鋼錠或鋼鑄件中“气体”这个名詞，通常理解为氢、氮及氧。

这样，鋼錠中的氮、氢或氧之所以叫作气体，是根据他們轉入鋼內时的原始状态的特征而来的。这些存在于金屬成份中的元素之所以可称为气体，原因是：在鋼液的冷却、結晶和进一步冷却的过程中，以及置于爐中加热时，有若干数量的气体从溶液中析出来并逸入大气中去，或者就在鋼錠中形成特种气相。

大家知道，这个在金屬結晶过程中以独特相形式分离出气体的过程，对于鋼錠結構的形成以及物理的不均匀性有着决定性的作用，而在較低的溫度下，它又是鋼中生成許多缺陷的原因。气体既能以各种形态存在于鋼中，那就証明对气体及夹杂物的問題必須同时加以研究。

鋼錠中絕大部份的夹杂物應該看作是鋼中气体存在的特殊形态（硫化物不在內），正如把金屬中的气孔及气泡看作是非金屬与气体夹杂物一样。

正在結晶的和已冷却的鋼錠中，气体的析出形态取决于氧、氮或氢和鋼中各个組分結合的特征及結合力的大小。如果气体的原子和任一組分的原子之間的結合力很大，足使熔鋼中这些原子造成牢固的原子团，那末溶液中的气体就不是以元素的形态而是以化合物的形态析出来。二氧化碳及氧化物夹杂的析出就可作为例子。反之，溶解于鋼中的元素跟合金組分的化学亲和力不大的話，那么这元素以元素的游离状态存在于溶液中，并从其中析出。氢从鋼中或氧从銀中的析出就是典型的例子。

在这两种情况下，析出的元素及其化合物在鋼中的溶解度作

跳跃式的或徐徐地降低，这是独特相形成的主要原因。因此，这个过程与正在結晶和正在冷却的鋼中的結構变化有密切的关系。以独特相形式呈现的元素或其化合物能在不同的鋼的冷却阶段中使鋼过饱和；根据这一点，鋼内气泡或夹杂物的尺寸、形态及分布特征也完全不同。为了要闡明金屬中夹杂物、气泡及气孔的本質，必須簡略地研究一下熔鋼的結構与鋼中金屬物存在的形态。

一、液体金屬結構簡述

理想的熔融純鉄是单原子和光学上透明的^①（即不含有悬浮固体或液体微粒的）均質液体。理想的熔融純鋼同样可以看作是不同的型的单原子微粒的一个集合体（鉄原子、錳原子、碳原子或相当的离子）。因此，在研究熔融鋼的性質时，可以利用积累起来的关于液态物質的一般知識。

因为熔融純（理想的）鋼由原子或离子所組成，其中不含有多原子的复杂分子，所以在这种情况下只有最簡單的单原子液体和我們有关系；关于一系列的，例如某些有机液体的很显著而复杂的现象（性質的非均質性、定向熔化），对熔融鋼来說是沒有

的。

在粒子活动性及其运动集体性的程度方面，液体居于固体及气体間的某一中間位置。大家知道，固态結晶体具有几何学上的正规結構，原子或离子就在这結構中依严密的順序排列于所謂基本結晶格的一定位置上。当然，这不是說原子及离子严格地固定于晶格的《結节点》内。但是，上面提到的《結节点》是原子或离子比較可能的重心位置。固体中的原子或离子圍繞着晶格的《結节点》或繞着原子或者离子的比較可能的位置振盪着。振盪运动的能是固体微粒蓄能的主要組成部分，它的大小取决于物体加热的程度。

基本晶胞按一定次序組成，然后形成固体的晶体。这样，固

① A.A. 巴依科夫用語。

体的特征有《近的》（晶胞内部）和《远的》两种序列。固体微粒之间的附着力非常大，它的大小大概可以根据固体的熔点来判定；熔点愈高，附着力愈大。

虽然固体中可能有扩散及自扩散，即各种成份的个别原子或组成该物体主要元素^①的个别原子的移动，但是，就这种物体来说，在大量相互吸引的微粒受外力作用下（塑性变形），集体移动最显著。固体钢中的原子并不保持原子结构及电子层性质方面的独特性。

原子的直径，或者更正确地說，外层电子轨道的直径为 10^{-8} 厘米的数量级，晶格常数正好也是 10^{-8} 厘米的数量级，即在两种情况下量度的数量级是相同的，用 $\text{\AA}$ 为单位。因此，电子、特别是外壳电子受到许多原子的作用。这样，固体金属中的电子、特别是外层电子是集体化的，所以不能把电子认为局部地限定于某原子附近。

固体金属中的原子核是固定地分布着的^②，而原子的电子群则相互紧挨着，并且全面分布于金属的整个体积内。

与此相反，气体结构的特征是微粒的分布紊乱，处在混乱的运动之中。气体微粒移动的距离及其运动的速度比固体微粒大得多。顺着物体体积内微粒轨迹的微粒移动能，永远是气体微粒蓄能的主要部分。气体的个别微粒由于运动的无规律以致运动的集体性程度极低，这一点，我们认为是最突出的地方。

现在有可靠的数据可证明，甚至在运动着的气体流中，微粒紊乱运动的能大大超过了整个气流作直线移动的能。通常把分子，即中性（电）微粒当作是气体的基本粒子。在室温或接近室温下气态物体的分子是双原子或三原子的。在 $2000-3000^{\circ}\text{K}$ 的温度下，这些多原子的分子便分解成原子。有许多金属在温度较

① 固体内部的自扩散，即主要元素（溶剂）个别原子的移动，现在已在实验中得到了证明。例如 B. П. 格鲁金、Л. А. 施伐尔茨曼利用放射性铁证明了铁在热处理时有自扩散的能力。

② 如果暂不考虑上述的原子核振盪的话。

低的情况下，就显著地蒸发了。但是在这些温度下，金属的分子已是单原子的了。

液体的特征是其结构介于固态和气态之间。结构十分整齐的固体和结构完全紊乱的气体研究起来都很方便。分子统计学及热力学理论为研究这些物体（即在具体的外界条件下和当物体结构为基本粒子时：原子，离子或分子，确定物体的性质）创造了现实的可能性。

与此相反，至今还没有建立起用于所有液体的统一的热力学理论，而仅试图为某些液体拟定这样的理论。因此，在研究液体时，都利用固体和气体的规律，另外考虑到液体的特性再加以补充修改而已。

范德华证明了从液态转到气态的连续性。他的研究结果就是大家一时认为液体在性质上更接近于气体的原因。

在接近临界点的高温下，或者在一般比较大的比容下，液体和气体有共同之点是毫无疑问的。但是，对于冶金工作者来说，液体与固态晶体的共同点却有着非常重大的意义，因为冶金工作者是专管稍过热至熔点以上的（仅超过熔点 $100-200^{\circ}$ ）熔融金属的。这一共同点说明于后 [1]。

1. 许多固体在熔化时，体积相对增加得不多（约10%）。对于金属，这种增加更为微小，约为1.5%到4.4%。固体金属和熔融金属比重的差别很少超过0.3。就钢来说，根据其成分的不同，这个数值等于0.14—0.35克/立方厘米①。

2. 物体的熔化潜热大大低于物体的蒸发潜热，因此，物体

① 钢熔化时比容的增加或结晶时比容的缩小很难用实验来确定。大部分作者认为这种体积的变化随碳含量的增加而增加。例如，Ю.А. 森亨德齐得出了这样的数字：

碳含量 (%)	0.1	0.35	0.45	0.70
凝固时的收缩率 (佔液体金属体积的%)	2.0	3.0	4.3	5.3

熔化时粒子間的附着力減弱得較少。

3. 熔化时的热容几乎沒有变化，或者有极微小的增加，即在接近熔点的液体中，热运动的特性仍和固体中的热运动特性一样。

4. 在接近熔点时，固体具有相当显著的流动性，而液体則具有剪切弹性，但常被大的流动性所隱蔽。这样，从机械性質变化的观点来看，熔化仅是量变而不是质变。

5. X-射綫結構分析明显地証明：在接近結晶点的溫度下，液体內微粒的分布并不紊乱，但与它們在結晶体中的分布很相似。

分子在液体中整齐地分布与它們在固体中的分布相似，这一点也为其他方法。（例如研究溶液的导电性，传热性、电磁波与声波分散作用以及使溶液发螢光等）所証实。所有这些資料使我們能認為在液体中存在有某些固体結構的单体。但是，这种现象仅仅保持在比較小的（超倍显微的）体积中。只有在极小的距离間原子和小孔很整齐而交替錯开排列，即液体結構中的空位。在專門的文献中，把这种状态作为《近程規律》来闡述。在比較大的体积中，例如显微体积中，晶格某些基本晶胞的对称軸并不完全一样。由于晶格的畸变，任何原子間的距离并不是晶格常数的倍数。因此在远距离上，液体中沒有整齐的结构。

在现代物理中，对液体結構最有力的各种观点，在原則上能以二种理論來說明。一种理論認為液体是由非常微力的晶粒或固态的晶粒碎屑所組成，每一个微小晶粒含有少数（数百个或者仅数十个）原子（或复杂液体中的分子）。非常細小的晶粒碎屑，其中持有固体的整齐結構，即交替錯开的原子和《小孔》，便是《近程規律》的范围。一經轉移到邻近的显微結晶粒时，上述的周期性便失去了。当显微結晶粒的单位面积值很大时，在某些外界作用的影响下，个别原子从該显微晶粒中脫离出来是完全力所能及的。

另一种理論把液体視作为《蜂窝》的聚集，或者是所謂《流

动集团»的聚集。它們在時間和空間上都是不穩定的。这些窩群不停地在移动，部分或全部受到破坏，并重新形成。

每一个分子或原子并不是任何一团的組成者，而是由这一团轉移到另一团，在液体中到处《窜来窜去》，这就說明了液体的高速度扩散和流动性以及其他的性質。

各个群聚团内部的液体原子或分子之間的平均統計距离几乎是固定的，因此也可以把它看作为《近程規律》的体积。

上述每一种理論都能說明液体的某些性質。

显微晶粒或者群聚团不受任何无定形介质的隔离，而是互相接触着的。由于液体的溫度不同，显微晶粒的大小不一，这就使得液体在加热或冷却时改变其性質。正是有了若干其内部存在近程規律的显微体积，或甚至超倍显微体积，就使得接近結晶点的液体和固体金屬的 X- 射綫照片相似。液体的过热和群聚团的碎裂，会使 X- 射綫照片的綫条渐变《模糊》。

个别物理学家認為液体中有《自由体积》，它与固体晶格內的《小孔》不同，它是連續的以貫穿液体結構的平面、孔隙、和裂縫的形式存在的。

在任何一个群聚团中或显微晶粒中，显然只有带阳电荷的金屬离子是比較固定的，虽然固定的時間并不长；而电子則不仅可算在該显微晶群內，而且也可以算在整个液体的体积之內。

液体合金具有某些結構上的特点。在能产生共晶体和在固态时具有有限溶解度的金屬合金中，縱使超过熔点很多过热时，也未发现充分的分子可混合性。这些合金中存在着熔融体内每种組分的个别群聚团〔2〕。

在液态和固态下具有无限互溶性的金屬（例如 Fe+Mn, Fe+Cr, Fe+Ni, Fe+Co）是取代溶液，即在这些合金中，晶格的基本晶胞内部分鉄原子为錳原子，鉻原子或其他金屬原子所取代。

形成取代固溶体的必要条件是众所周知的。仅須补充一点：凡能生成取代固溶体的金屬，在液态时都具有无限的互溶性。

但是必須指出，在晶格中这一种类型的原子被另一种类型的原子所取代时，会改变晶格参数，使晶格发生畸变，同时会改变类金屬在合金中的溶解度，从而改变該合金的成份。这种情况对于液体合金也相同。

金屬中，特别是鋼中类金屬元素存在的形式問題，目前尙处在解决的初步阶段。

根据許多实验事实，我們可以認為液体鉄和固体鉄中的碳、氢、氮是以带阳电荷的微粒的形式存在的。这些元素在鉄中形成侵入溶体，为此，如大家所知道的，必須遵守一条原則，即 $r_x/r_A \leq 0.59$ (式中 r_x —侵入元素原子的半径， r_A —金屬-熔剂的原子半径)。然而对于鉄中的碳溶液來說，上述定則就不能遵守。这也可作为碳的基本单位不是原子而是离子 C^{4+} [3] 的証据之一。此外，还有其它証据足以說明液体鋼及固体鋼中的碳是以离子形态存在着的。

正像 A. И. 克拉斯尼柯夫 [4] 首先指出的那样，氢在固体鉄及其他合金中是以离子 H^+ 形式存在的。最近的研究証明了熔鋼中的氢是以质子的形态存在的 [5]。

如果把电极插入熔融鋼中，同时通以直流电，那就很容易看出氢向阴极移动。

图 1 中 a、б 和 в 所示系低碳鉄和 ЭИИТ 鋼中的氢气浓度在阴极空間及阳极空間随時間变化的曲綫 ①。从图中可以看出：在所有情况下，阳极空間中氢的浓度迅速下降，而阴极空間中氢的浓度或者上升(如果氢不易逸入大气中)，或者比較緩慢地下降。

当然，氢的这种性状之所以有可能产生，仅仅是由于氢从阳极轉移到阴极之故。按照我們的意見，这可作为氢气是带阳电荷的离子(即质子)的形式存在于液体金屬中的一个有力証据。

碳离子主要分布在鉄晶胞面心立方体的八面体范围中，或者即是分布在這些立方体各稜的中央。显然，碳离子在液体鉄中群

① 图 1 的曲綫系根据作者及 Г. И. 巴塔林共同研究的結果所得出的。

聚团内也占有相似的位置。质子 H^+ 由于体积小，在固体铁的晶格中以及在熔融铁的群聚团中可能占有各种不同的位置。

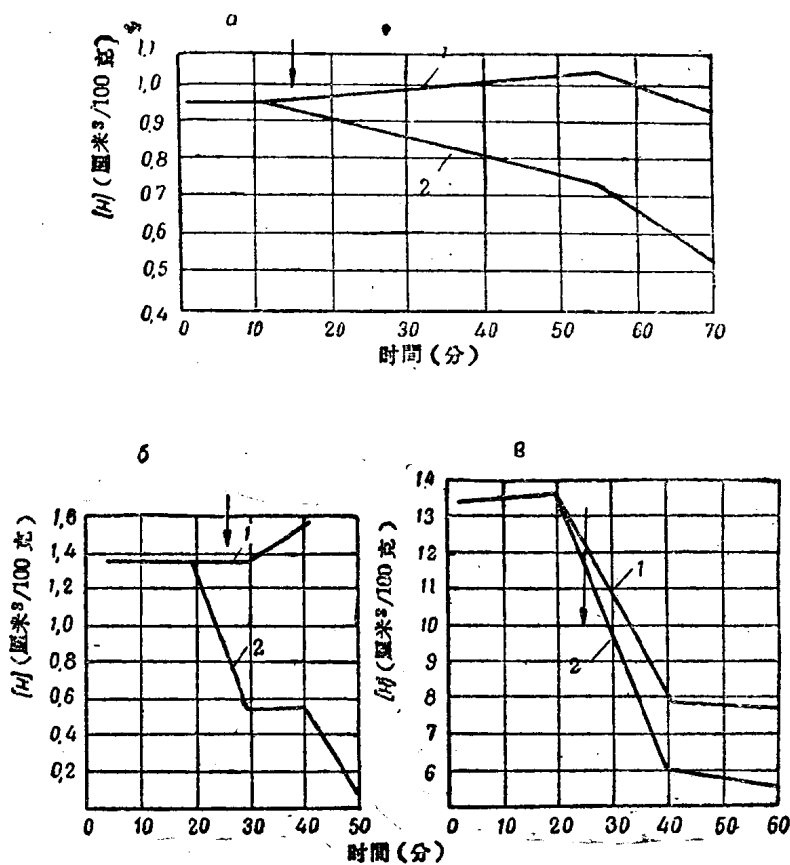


图 1 熔铁和 0.01% Ti 钢中的氢在直流电流影响下移向阴极。箭头表示通电时间

a 和 b—低碳铁；g—0.01% Ti 钢；1—阴极空间；2—阳极空间

氮在液体铁中也极可能形成侵入相，氮气以带阳电荷的离子形式进入侵入相的组织中。

氧和硫显然是以离子 O^{2-} 和 S^{2-} 的形式存在于鉄中的。这一点已被在鉄的硫化物或氧化物的晶格中电子云强烈地向金屬方面推移的事实所証明。至于磷和矽，則可以想像得到，它們在溶解于鉄中时形成以共价鍵起主要作用的微粒^①。

二、实用液体鉄合金的结构特性

实用熔融鋼和其他鉄的合金（生鉄、鉄合金）一样，其特点是其中存在悬浮状态的各种各样的非金屬夹杂物。

当夹杂物的可溶性受到某种因素的影响而减弱时，鋼中似金屬就以独特相的形式分离出来，因而鋼就由理想的光学上透明的液体轉变为不均匀的实用液体。溫度金屬成分，以及金屬上气体的压力的变化都属于这一类因素。

鋼中《自由体积》的縮小，是夹杂物或气体析出的首要原因之一，同时这自由体积的各个別組成部分变得不足以容納溶解物质的基本粒子（离子、原子或分子）。

第二个重要原因应该認为是溶液中似金屬和溶液的其它組分（似金屬或金屬）形成異常牢固的組合物（或化合物）。如果似金屬和溶液中第二种組分之間的結合大大超过似金屬离子和該金屬（溶剂）离子之間的結合，那末通常根据似金屬离子和溶液中第二种組分离子之間的离子結合，形成比較大的离子組合物。似金屬离子及溶液中第二种組分的离子同时是溶液中溶解的似金屬与第二种組分的基本粒子（载体）。这些組成物的例子有 Al_2O_3 ， MnS ， CO ， TiN 等。

似金屬及溶剂本身之間也可能有类似的穩固的离子組合物。在这种情况下，溶剂的个别离子似乎是从离子格中，或液体熔融物的显微晶粒（群聚团）中脱离出来的。因此，这时形成的組合

① 关于固体和熔融鉄中似金屬存在的形式問題，现在已有詳細和深刻的研究。請參閱 O. A. 叶辛和 П. В. 盖里德〔3〕的著作，以及 1954 年苏联冶金出版社出版的《火法冶金过程的物理化学》第二册。（原書《Физическая химия пирометаллургических процессов》）

物，由于本身的体积很大，不可能被安置在各个别的基本自由体积之中。

由于这些离子組合物能形成新相的晶核，因而它們在表面力的影响下能合併——結合或凝聚起来，这便促使形成用显微镜能看得见的夹杂物，或用肉眼能看得见的气泡。

这样，如果液体金屬即使在某些条件下仍是均匀的熔体，即为任何似金屬和金屬的溶液，而不含有外来的固体或液体夹杂物的悬浮微粒，这种金屬在下列的情况下可能是不均匀的系统：

1) 在同一溫度下，但在加入能和熔体中的似金屬形成牢固的組合物的新組分时；

2) 当由于溫度下降溶解的似金屬离子或它們与熔融体的金屬組分所組成之組合物的溶解度降低时。

事实上在炼鋼的条件下，鋼中总还有外来夹杂物，如耐火材料的固体微粒，爐渣微滴等。它們在气泡或非金屬夹杂物的产生过程中起着非常积极的作用，是新相产生的中心或是有利于形成这种新相晶核的表面。

三、熔融金屬中非金屬夹杂物和气泡产生

与扩大的热力学及动力学

任何化学过程或物理过程的自发进行，只有在系統内的自由能减少的条件下，即在 $\Delta F < 0$ 的条件下才有可能。

这个論点应用很广。在均匀液体内部产生新相时，系統的自由能靠着各相（原液体——孤立相）接触界上的相間表面能而增大。

自由能的这一种变化用下列方程式求出：

$$\Delta F = k_1 S \sigma > 0$$

式中： S ——系統内任一容积的原始相与孤立相的接触面；

σ ——原始相和孤立相接触界上的单位相間能；

k_1 ——計算晶核表面形状的系数。

当然，我們所研究的均匀系統靠着液体中晶体、固态或液态

的夹杂物，或气泡的析出而向着两相系统转变的过程，仅在自由能的负变化超出上述的正变化时才可能发生。

例如，当温度低于金属的熔点时，金属固体结晶的单位自由能小于液体金属的单位自由能。同样，原始反应物比起反应生成物来有一定的剩余自由能。这剩余的自由能是过程中的动力，并保证着过程的进行。

如果系统中自由能变化的总值减少 ($\Sigma \Delta F < 0$)，那末伴随着产生新相的过程。便也能顺利的进行。

我们把溶解于熔融铁中的矽和氧相互作用的反应作为例子。当温度在 $1700-1873^\circ K$ 的范围内时，对反应 $Si_{\%Fe} + 2O_{\%Fe} = SiO_{\text{固体}}$ 来说，自由能变化为：

$$\Delta F^\circ = -119180 + 43.5 T$$

即当 $t = 1600^\circ C$ 时，对 1 克分子 SiO_2 为 37705 卡。

如果这时所形成的相是由于金属沉淀和反应生成物上浮而分离出来的单独的渣层，则对相间的现象可以不予注意，因为相间表面的值并不大，而且由于这表面 ($\Delta F = S\sigma$) 的形成而造成的能量变化，与系统中自由能储蓄的总变化比较起来是微乎其微的。

如果矽的氧化生成物是呈球形玻璃状夹杂物形式的分散相，那么形成新相所需的能量消耗就很显著。根据吉勃斯的意见，形成新相晶核的功可用下列方程式计算：

$$W = \frac{4}{3} \pi r^2 \sigma$$

式中： r ——晶核的半径；

σ ——相间能，这里可以认为它等于 $600 \text{ 尔格/厘米}^2 [10]$ 。

计算结果指出，每形成 1 克分子的氧化矽或玻璃状夹杂物所消耗的能 $\Delta F = -W$ 为：

若 $r = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 厘米}$ —141 卡

若 $r = 1 \cdot 10^{-5} \text{ 厘米}$ —1410 卡

因此，在一般炼钢过程的温度下，甚至生成胶态分散相形式