

鋼和鑄鐵的 微量合金化

[蘇聯] И. Е. 戈利德什特因 著



國防工業出版社

内 容 简 介

微量合金化是炼制低合金钢的一种方法。广泛采用低合金钢和铸铁是节约金属，减轻机器重量，提高产品使用寿命的重要途径。本书针对这一问题，就微量合金化的基本理论作了深入系统的探讨。详尽地阐述了微量添加剂——铝、硼、钛、锆、铈、铈对钢和铸铁性能的影响。

书中列举了苏联和美国的有关研究资料和数据，推荐了苏联机械和冶金企业采用微量合金化法的经验及有效地应用微量合金化钢和铸铁的实例。

本书可供机械制造、冶金工厂及设计、研究部门的工程技术人员和高等工业院校有关专业的师生参考。

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ И ЧУГУНА

〔苏联〕Л. Е. Гольдштейн

МАШГИЗ 1959

钢和铸铁的微量合金化

王楷锡、白以麟、牟焕坤、易永芳

胡庆坪、高明辉、戚长凯 译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印张 6 1/4 插页 7 171 千字

1965年11月第一版 1965年11月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·1022 定价：(科七) 1.30 元

目 录

引言	5
书中所采用的符号与计量单位	6
第一章 微量合金化与强度问题	7
1. 少量添加剂在初次结晶过程中的作用	7
2. 添加剂对固相中所发生的过程的影响	16
3. 少量添加剂和细晶组织	21
第二章 钢和铸铁中的铝	23
1. 铝作脱氧剂	24
2. 铝与晶粒度	29
3. 铸钢中的铝	38
碳钢	38
合金钢	42
综合脱氧对铸钢机械性能的影响	44
4. 铝对机械时效和热时效的影响	46
5. 铝对结构钢冲击韧性的影响	49
6. 铝对钢的回火脆性的影响	53
7. 铝对钢和铸铁的石墨化的影响	56
第三章 钢和铸铁中的硼	61
1. 硼及其化合物的物理与化学性能	62
2. 硼对钢中转变过程的影响	63
铁-硼状态图	63
硼对奥氏体分解动力学的的影响	65
硼对钢的淬透性的影响机理问题	65
3. 含硼铁合金及其应用工艺	67
4. 硼及与其一起加入钢中的添加剂对钢性能的影响	74
铁合金成分的影响	74
钛与锆对硼钢性能的影响	80
硼对可逆回火脆性的影响	93
硼对奥氏体晶粒度的影响	95
加硼使钢微量合金化的效果	97
5. 硼钢	102

含硼碳鋼	103
含硼滲碳合金鋼	111
含硼中碳合金鋼	119
硼鋼在美國的實際應用	120
6. 灰口鐵和可鍛鑄鐵中的硼	126
灰口鐵中的硼	126
可鍛鑄鐵中的硼	127
硼和鉍的綜合影響	131
第四章 鋼和鑄鐵中的鈦	133
1. 鈦作鋼的脫氧劑	134
2. 鈦對鋼性能的影響	138
鈦對機械性能的影響	138
鈦對滲透性的影響	144
鈦對晶粒度的影響	144
鈦對回火脆性的影響	146
3. 含鈦鋼	149
4. 鑄鐵中的鈦	152
第五章 鋼和鑄鐵中的鈾	156
1. 鈾及其化合物的性能	157
2. 鈾作鋼的脫硫劑	160
3. 鈾對鑄鋼性能的影響	166
鈾對機械性能的影響	167
鈾對显微組織的影響	171
鈾對夾有易熔雜質的鑄鋼性能的影響	172
4. 鈾對鍛鋼性能的影響	173
5. 稀土金屬對鋼的特殊性能的影響	173
6. 鑄鐵中的鈾	175
第六章 鋼和鑄鐵中的碲	181
1. 碲的性能	181
2. 碲對鋼性能的影響	182
碲對機械性能的影響	182
碲對晶粒度的影響	183
碲對鋼的滲透性的影響	184
3. 碲對鑄鐵性能的影響	185
碲對鑄鐵白口化傾向的影響	185
可鍛鑄鐵中的碲	189
參考文獻	193

鋼和鑄鐵的微量合金化

〔苏联〕Я.Е. 戈利德什特因 著

王楷楊、白以麟、牟煥坤、易永芳

胡庆坪、高明輝、戚长凱 譯



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

微量合金化是炼制低合金鋼的一种方法。广泛采用低合金鋼和鑄鉄是节约金屬，減輕机器重量，提高产品使用寿命的重要途径。本书针对这一問題，就微量合金化的基本理論作了深入系統的探討。詳盡地闡述了微量添加剂——鋁、錳、鈦、鉍、鉻、鎢、磷对鋼和鑄鉄性能的影响。

书中列举了苏联和美国的有关研究資料和数据，推荐了苏联机械和冶金企业采用微量合金化法的經驗及有效地应用微量合金化鋼和鑄鉄的实例。

本书可供机械制造、冶金工厂及設計、研究部門的工程技术人員和高等工业院校有关专业的师生参考。

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ И ЧУГУНА

〔苏联〕Л. Е. Гольдштейн

МАШГИЗ 1959

鋼和鑄鉄的微量合金化

王楷揚、白以麟、牟煥坤、易永芳

胡庆坪、高明輝、戚长凱 譯

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印張 6 1/4 插頁 7 171 千字

1965年11月第一版 1965年11月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

統一书号：15034·1022 定价：(科七) 1.30 元

目 录

引言	5
书中所采用的符号与计量单位	6
第一章 微量合金化与强度问题	7
1. 少量添加剂在初次结晶过程中的作用	7
2. 添加剂对固相中所发生的过程的影响	16
3. 少量添加剂和细晶组织	21
第二章 钢和铸铁中的铝	23
1. 铝作脱氧剂	24
2. 铝与晶粒度	29
3. 铸钢中的铝	38
碳钢	38
合金钢	42
综合脱氧对铸钢机械性能的影响	44
4. 铝对机械时效和热时效的影响	46
5. 铝对结构钢冲击韧性的影响	49
6. 铝对钢的回火脆性的影响	53
7. 铝对钢和铸铁的石墨化的影响	56
第三章 钢和铸铁中的硼	61
1. 硼及其化合物的物理与化学性能	62
2. 硼对钢中转变过程的影响	63
铁-硼状态图	63
硼对奥氏体分解动力学的的影响	65
硼对钢的淬透性的影响机理问题	65
3. 含硼铁合金及其应用工艺	67
4. 硼及与其一起加入钢中的添加剂对钢性能的影响	74
铁合金成分的影响	74
钛与锆对硼钢性能的影响	80
硼对可逆回火脆性的影响	93
硼对奥氏体晶粒度的影响	95
加硼使钢微量合金化的效果	97
5. 硼钢	102

含硼碳鋼	103
含硼滲碳合金鋼	111
含硼中碳合金鋼	119
硼鋼在美國的實際應用	120
6. 灰口鐵和可鍛鑄鐵中的硼	126
灰口鐵中的硼	126
可鍛鑄鐵中的硼	127
硼和鉍的綜合影響	131
第四章 鋼和鑄鐵中的鈦	133
1. 鈦作鋼的脫氧劑	134
2. 鈦對鋼性能的影響	138
鈦對機械性能的影響	138
鈦對滲透性的影響	144
鈦對晶粒度的影響	144
鈦對回火脆性的影響	146
3. 含鈦鋼	149
4. 鑄鐵中的鈦	152
第五章 鋼和鑄鐵中的鈾	156
1. 鈾及其化合物的性能	157
2. 鈾作鋼的脫硫劑	160
3. 鈾對鑄鋼性能的影響	166
鈾對機械性能的影響	167
鈾對显微組織的影響	171
鈾對夾有易熔雜質的鑄鋼性能的影響	172
4. 鈾對鍛鋼性能的影響	173
5. 稀土金屬對鋼的特殊性能的影響	173
6. 鑄鐵中的鈾	175
第六章 鋼和鑄鐵中的碲	181
1. 碲的性能	181
2. 碲對鋼性能的影響	182
碲對機械性能的影響	182
碲對晶粒度的影響	183
碲對鋼的滲透性的影響	184
3. 碲對鑄鐵性能的影響	185
碲對鑄鐵白口化傾向的影響	185
可鍛鑄鐵中的碲	189
參考文獻	193

引 言

近几年来，在机器制造业中，創造了几十种和几百种鋁、鎂和鈦基的新型合金，并得到了广泛的应用。毫无疑义，这些合金同塑料（合成化学制品）一样，都是非常具有发展前途的。采用低合金鋼是节约金屬，減輕机器重量，提高机器使用寿命的最重要的途径。要解决这项任务就需要进一步深入研究鋼的合金化理論和实践，尤其是极力扩大微量合金化的应用范围。

微量合金化的概念，驟然看来很简单，但是，直到目前为止，没有一个通用的解釋或定义。建議把微量合金化理解为：往合金中专门添加，有时結合脫氧添加某些元素或其化合物，其殘留量不超过 0.1%，从而，显著地提高材料的机械性能或其他使用性能。微量合金化时可以采用各种方法来提高性能，其中包括：

1) 改变結晶过程条件，因此也改变了初生雛晶及非金屬相（石墨、非金屬夹杂物、金屬間化合物等）組織；2) 消除或中和鉄碳合金中存在着的少量或极少量的有害杂质的不良影响；3) 提高純度或改变晶界区組織的排列；4) 影响合金的細密組織。

近几年来，各国的研究所和大型企业都在极力地創立微量合金化的理論并扩展其实用范围。但是，不論在何种程度上，积累的資料也还不系統，未能綜合在一起，文章都分散在期刊和文集中，难于为工业部門及院所广大的工程技術人員所了解。本书的目的是想部分地弥补这一缺陷，以便进一步在工业中推行所获得的良好成果，促使鋼和鑄鉄的微量合金化成为机器制造业中提高机器零件使用寿命的常用方法。

鉴于上述任务，本书特別注意論述苏联和其他外国工业部門中創制和应用新型廉价材料（低合金鋼及鑄鉄）的先进經驗。书中还介紹了作者在齐略賓斯克拖拉机制造厂中央實驗室完成的研究成果（烏拉尔工学院和齐略賓斯克工学院金相学与热处理教研室科学工作者及毕业生們参加了某些研究工作）。

书中所采用的符号与計量单位

σ_b ——抗拉强度 (公斤/毫米²);

σ_T ——屈服点 (公斤/毫米²);

σ_{-1} ——持久强度 (公斤/毫米²);

δ_s ——相对延伸率 (%);

ψ ——断面收縮率 (%);

a_K ——用梅氏試样测定的冲击韧性 (公斤米/厘米²);

H_B ——布氏硬度 (公斤/毫米²);

D_B ——布氏硬度試驗时的压痕直径 (毫米);

R_C ——洛氏硬度;

t, T ——温度 (°C、°K)。

上述各数值在表中与图中不再作說明。

第 一 章

微量合金化与强度問題

长期以来，合金的合金化理論局限于研究合金元素对固熔体及其分解产物的性能的影响。这里所指的是，在形成固溶体时，合金元素的影响表现在下列几个方面：

1) 固溶体的强度总是比純的、原始金屬的强度高，而且固熔体的屈服点随着所加入元素濃度的增大而有規律地增高；

2) 在多元低合金中，每个合金元素对强度的影响与在二元合金中对强度的影响一样；

3) 合金元素进入固溶体时，影响到固溶体的晶粒大小，以及合金的塑性和冲击韌性。

当用与合金的一定組份形成化合物的元素进行合金化时，注意到了这些化合物的性质、数量及其在晶体内的分布特性。对于鋼來說，也注意了合金元素对鋼的临界点位置及改变碳在奥氏体中的极限溶解度的影响，对冷却时奥氏体的稳定性，对奥氏体分解产物的弥散度，以及合金弥散硬化能力的影响。

稍晚些时候，合金的个别合金元素的扩散过程，及其在淬火加热、过冷奥氏体的等溫分解和回火时在各相間的重新分布問題曾特別引人注意。但是，就这些問題在絕大多数情况下对結構鋼來說，仅在易于測定数量的一般元素的作用方面进行了探討和研究。同时，在工业上已积累的越来越多的事实証实了少量添加剂，有时甚至是极少量的添加剂对合金（其中包括鑄鉄和鋼）組織的形成及其性能所起的巨大作用。

1 少量添加剂在初次結晶过程中的作用

对少量添加剂在各种合金（其中包括鑄鉄和鋼）初次結晶过

程中的巨大作用已进行了研究并得到了公认。苏联和其他外国的学者們（其中不能不举出吉布斯、居里、Ю. Б. 烏尔夫、B. И. 达尼洛夫、П. А. 列宾杰尔、П. Д. 丹科夫、B. К. 謝明欽科、A. A. 鮑奇瓦尔、И. Н. 鮑加乔夫、H. C. 克列沙諾夫斯基等人的名字）的許多著作都专门研究了少量添加剂对液相結晶过程的影响的理論与实践問題。他們所进行的研究工作的結果証明，在許多情况下，結晶过程不是自发的，而是被迫地进行的，同时它屈服于熔体中具有的，而有时是专门加入到熔体中的所謂活潑晶核的影响。

由于可能利用人工制造各类活潑晶核——結晶核——及利用它們甚至在熔体高温下的稳定性，因此在生产优质鑄鉄和鋼的現代技术中已开始广泛采用变质处理法。因不可能詳細研究这个問題，特介紹对变质处理理論感兴趣者参閱的有关著作[1~6]。現仅簡略地談一下这一方法的定义及其机理。

用在熔体中加入单个元素或其化合物的少量添加剂的方法来控制初次結晶，改变結晶相的弥散程度的过程称为变质处理。变质剂作用的理論效应可根据它在液相和固相界面表面張力大小的变化情况来評定。事实上，根据馬克斯威尔-波茨曼定律，新晶核形成的强度或者或然率可用下列方程式表示：

$$S = Ae^{-\frac{\omega}{kT}},$$

式中 S ——晶核生成速度；

e ——自然对数的底数；

ω ——临界晶核形成功；

T ——绝对温度；

k ——波茨曼常数；

A ——前指数系数，其数值由晶核和旧相間分子的互换速度确定。

对于液体結晶情况來說， A 值可从下式求得：

$$A = k_1 e^{-\frac{U}{kT}},$$

式中 k_1 ——物质常数，按数量级它与所研究体积内的分子区别不大；

U ——某种活化能。

晶核形成功 ω ，又取决于相界面上的表面张力 σ_{sm} 和临界晶核的大小。根据吉布斯定律

$$\omega = \frac{F\sigma_{sm}}{3},$$

式中 F ——晶核表面。

如果把晶核看成是球形的，那么在某些热力学变换之后得出：

$$S = Ae^{-\frac{B\sigma_{sm}^3}{(\Delta T)^2 T}},$$

式中 B ——材料常数；

ΔT ——过冷度值；

T ——转变温度。

从上列公式中可以看出，晶核形成的强度取决于两个因素：过冷程度（平方）和表面张力的大小（立方）。

И. А. 安德列耶夫〔7〕首先阐明了由于少量添加剂对表面张力值的巨大影响，因此其对金属和合金在其凝固过程中以及其后热处理时的性状的影响也很大。Ю. А. 聶亨吉和 А. М. 薩馬林〔8〕、И. В. 波林〔9〕、Л. Л. 庫寧〔6〕等人的著作中也对此問題进行了有成效的研究。因为目前还没有简单而可靠的测定固相和液相界面表面张力 σ_{sm} 的方法，所以不得不利用 σ_{sm} 和 σ_{sc} 之間的关系式，此关系式可用拉普拉斯方程式表示：

$$\sigma_{sm} = \sigma_m - \sigma_{sc} \cos \Theta,$$

式中 σ_m ——固相与气体交界处的表面能量；

σ_{sc} ——液相在与气体交界处的表面张力；

Θ ——接触角（潤湿角）。

在晶核生成时，也就是在潤湿很好的条件下，潤湿角 $\Theta = 0$ ，因此，拉普拉斯方程式可采用下列形成：

$$\sigma_{sm} = \sigma_m - \sigma_{sc0}$$

如果变质剂能提高液相表面張力，并从而降低 σ_{sm} 值，那末临界尺寸的三度晶核的形成就会减小，这就有利于結晶核生成速度的提高。因此，用适当选择少量添加剂加入熔体中的办法可以影响表面張力的大小，并由此获得高的变质效果。

在从液相轉变成固相的过程中，借变质剂来改变組織的方法可能有几种。П. А. 列宾杰尔将变质剂区分为第一类和第二类：第一类变质剂是选择性地吸附在晶核面上，降低晶核个别界面的长大速度，特别是在胶体弥散的晶胚区里；第二类变质剂能建立新的結晶核，减低晶核的形成和增加晶核数量。

第一类变质剂 根据 П. А. 列宾杰尔和 М. С. 李普曼的意見，在金屬熔体变质处理时，可把自熔体中析出吸附在熔体与晶体界面上的表面活性金屬作为第一类变质剂。这类表面活性金屬在金屬与蒸汽的界面上应具有最低表面自由能，也就是在液态具有最小的內聚力，因此，通常具有較低的熔点。

第一类变质剂应该符合的一个必不可缺的条件是：变质剂在起吸附作用的液相中极少溶解[1、2]。根据 П. А. 列宾杰尔的概念，吸附层对个别晶面长大速度的影响归結如下：1) 减小个别晶体的尺寸；2) 由于变质剂多半是在一种类型的晶面上急剧地选择性吸附而改变晶核体的形状；3) 改变雛晶的共生条件[1]。同时，冷却速度应对变质剂的表面活性发生大的影响。上述概念已由用在液态时添加原子間內聚力小的少量表面活性金屬 Li、Na、Zn、Hg、Mg、Ca、Al、Sn、Pb、Bi 等作少量添加剂加入純金屬銅、鋁、鋅以及硅鋁合金和硅中的方法进行变质处理的系統研究証实了。М. С. 李普曼特別強調指出了作为表面活性物质和作为防止微晶体粘和凝結的胶溶剂的第一类变质剂的作用在理解上的原則性区别。

第二类变质剂 与第一类变质剂不同，第二类变质剂是一些极难熔的金屬或加到熔体中（或在熔体中形成）呈高度弥散状态及易于形成大量的結晶核的化合物。根据 П. Д. 丹科夫[10]所发

展了的定向和尺寸一致性的原理来看，不是所有的固体微粒都可成为“核”，即形成结晶物质晶粒的现成结晶中心。物质只有在 其晶格与结晶相的晶格相一致或与其区别不大的时候，才能起这种结晶中心的作用。两种物质的结晶组织越接近，则一种物质在另一种物质的结晶面上生长得也越好。П. Д. 丹科夫同时也确定了，在共生晶面的平面原子网状组织相类似，以及在原子半径大小相接近的情况下（如果它们之间的差别不超过 12% 的话），这种共生现象不仅对于组织相同的金属，就是对各种不同晶格的晶体也能观察出来。

这些原理的正确性，在И. Н. 鮑加切夫的近作[5]中得到了证实，并且在М. В. 馬里采夫的著作[11、12]里特别明显。М. В. 馬里采夫以铝合金、镁合金和铜合金为例，明显地指出能与合金组份生成难熔化合物（金属间化合物）的少量添加剂元素急剧细化晶粒的影响。这类的元素在铝合金中有钛、钽、硼和锆，而在铜合金中有钒、钨、钽和锆与硼的综合添加剂。

加入综合添加剂的目的在于，以生成难熔硼化物（过渡金属与硼的化合物）的方法造成必要的结晶核。根据 М. В. 馬里采夫的资料，将最有效的添加剂的成分及其最佳加入量（能保证某些工业合金的晶粒最好的细化）列于表 1。

金属间化合物微粒在结晶过程中的不同作用符合上述定向和组织一致性的规则。而相反，随着原子间距离差别的增大，变质处理的效果则明显地降低。少量添加剂在细化晶粒的同时，在大多数情况下有利于提高合金的强度和塑性（图 1）。М. В. 馬里采夫认为：“…在晶粒细化相同的情况下，

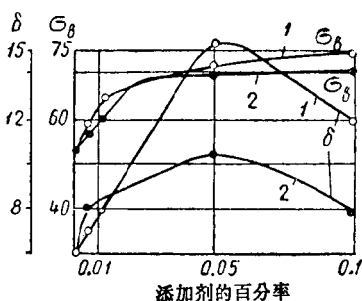


图 1 钒(1)和硼(2)添加剂对 Бр. АЖМц10-3-1.5 青铜(铸态)机械性能的影响[11]。

表1 个别元素少量添加剂对宏观晶粒度的影响

合金牌号	添加剂及其浓度	在磨片每一平方厘米面积上的晶粒数	合金牌号	添加剂及其浓度	在磨片每一平方厘米面积上的晶粒数
AMu	—	4~5	Бр. АЖМu	—	40~50
	0.05% Ta	230	10-3-1.5	—	350
	0.1% Ti	150		0.05—0.1% V	450
	0.01% B	150		0.02% V + 0.02% B	500
	0.1% Zr	140		0.01% V + 0.02% B	500
	0.05% Ti + 0.05% B	250~260			
Д16	—	20~30	Бр. ОИС	—	25~30
	0.06~0.09% Ti	170~200	6-6-3	—	550~600
	0.05% Ti + 0.02% B	200~210		0.02% B + 0.05% Ti	250~270
АЖ14	—	8~12	Л68	—	10~15
	0.1~0.15% Ti	150~170		0.02% V + 0.02% B	350~410
	0.1~0.02% B	120~150		—	10~15
	0.05% Ti + 0.05% B	180~200	Бр. С30	—	200~250
еАЖ16	—	10~15		0.05% Ti + 0.02% B	300~350
	0.1~0.15% Ti	150~180		0.30% V + 0.05% B	300~350
	0.05% B + 0.05% Ti	180~200			
Бр. А10	—	25~30			
	0.02% V	200~230			
	0.02% V + 0.02% B	350~370			

机械性能与添加剂的性质关系不大”。然而后一论点还有一定的局限性并且还需要进一步的探讨。这个局限性就在于所加添加剂的性质在晶粒度相等的情况下，对合金机械性能的影响只有对第二类变质剂才是“不干涉”的。在这种情况下，加到熔体中或在熔体中生成的难熔微粒（金属间化合物、氮化物、硼化物）通常不位于晶界上，而在晶体内部。在吸附于晶界的添加剂影响下的铸造晶粒细化时，合金的性能会提高，也可能降低，这取决于添加剂的性质，吸附层的厚度，还取决于试验何种性能及试验方法。

这种变质剂在铁基合金中能提高耐热性，减小产生热裂纹的

傾向性，但同时会增加产生冷裂紋的傾向性，提高或降低淬透性。

变质处理是提高合金机械性能和工艺性能的有效方法之一，但它仅仅是确定微量合金化概念的金屬学的一部分。应当強調指出，只有当变质处理不仅是为了細化初生組織，而且还大大地提高金屬的性能时，变质处理与微量合金化的概念才能相符。

作为微量合金添加剂或在个别場合作为变质添加剂而加入黑色金屬和有色金屬的元素的特征是，具有高的化学活性，即与 O_2 、 N_2 、 H_2 、 S 及熔体中所含的某些其他杂质直接反应的能力很强。少量添加剂的这种特征，在И. А. 安德列耶夫[13]，А. П. 古里亚耶夫[14]的著作中也都談到过。А. П. 古里亚耶夫把位于門捷列夫周期表左方的39个元素(其中14个是稀土元素)：Al、B、Ti、V、Zr、Be、Mg等歸屬於鋼的活性少量添加剂。1945年А. П. 古里亚耶夫所提出的这一假設，現在已被完全証实。

然而必須指出，对鑄鉄和鋼的性能起着积极影响的少量添加剂的高化学活性，使得操作大大复杂化。在許多情况下要求采用特殊防护措施，以避免它們仅作为脫氧剂而被消耗。另一方面，已积累了不少証明少量添加剂对合金性能影响有良好作用的資料，这首先是由于少量添加剂改变了合金化学成分的结果，及因此而改变显微体积中的非金属夹杂物的性质和分布形式的結果。

以鋼和鑄鉄熔液中所含的个别添加剂与相应杂质(O_2 、 N_2 、 S 等)之間发生的脫硫、脫氧和除气反应的良好影响作例子，可指出鎂以及K、Na、Ca、Li、Ba及其他易沸騰金屬在变质鑄鉄时获得球状石墨过程中的作用；鋁、鈦、鈣和稀土金屬在鑄鋼和鍛鋼中硫化物形成过程中的作用及其分布特性；在鋼中形成鋁、鈦、鈮和鋳的氮化物的作用——对晶粒天然大小及其在加热时对其长大的傾向性的作用，以及在防止結構鋼、特別是沸騰鋼的变形时效时上述氮化物的作用。

在这些反应影响下所发生的非金属相(石墨、硫氧化物)从热力学不稳定的片状到稳定的球状和球体状的形状变化，致使合