

东涛 孟繁茂 付俊岩 著



M

icroalloying

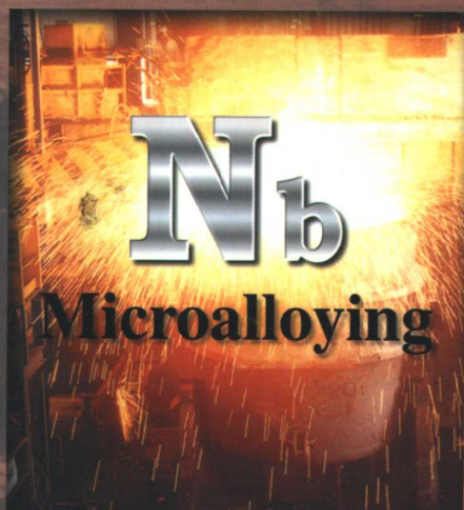
微合金化钢知识讲座



中信金属公司
中信微合金化技术中心

2.33

64



地址：北京朝阳区京城大厦 1903 室

邮编：100004

电话：(010) 64661091

传真：(010) 64661090

网址：www.citicmetal.com.cn

TC

微合金化钢知识讲座

东 涛 孟繁茂 傅俊岩 著

中信微合金化技术中心
中 信 金 属 公 司

内 容 简 介

《微合金化钢知识讲座》是在 1998 年和 1999 年由中国金属学会举办的两期“钢材品种结构调整”研讨班上的讲稿基础上编写的。自 2000 年 8 月 30 日起,以冶金工人专业知识问答的形式连载发表于《中国冶金报》周三科技版上,反馈的大量信息要求以单行本方式尽快提供给钢铁企业的科技、管理人员和第一线的广大工人,以配合各企业的钢材品种结构调整工作的进行。为此“中信微合金化技术中心”特编辑出版此书。《讲座》包括五个部分共 40 节,本书也供设计和使用部门、大专院校师生参考,以对我国低合金钢和微合金化钢的发展有较完整的了解。

微合金化钢知识讲座

东 涛 孟繁茂 傅俊岩 著

北京理工大学印刷厂印刷

*

850 毫米×1168 毫米 32 开本 2.875 印张 64.4 千字

2001 年 2 月第一版 印数 0001~3000 册

目 录

第一部分 基础知识

1.1 低合金钢由来	1
1.2 早期低合金钢的发展	3
1.3 我国低合金钢的发展	5
1.4 现代低合金钢重大进展	8

第二部分 低合金钢主要品种

2.1 焊接高强度钢	11
2.2 低合金冲压钢	14
2.3 低合金耐腐蚀钢	18
2.4 低合金耐磨损钢	20
2.5 低合金耐低温钢	22
2.6 低合金建筑钢筋	24
2.7 低合金钢轨钢	26

第三部分 微合金钢技术基础

3.1 钢的微合金化, 微合金化钢和微处理钢	29
3.2 我国微合金化钢发展方向	31
3.3 发展微合金化钢的资源优势	34
3.4 铌、钒、钛微合金化元素的特性	36

3.5	微合金化钢冶炼·····	38
3.6	微合金化钢精炼特点·····	40
3.7	防止微合金化钢连铸裂纹·····	43
3.8	微合金化钢不宜采取常规轧制·····	45
3.9	微合金化钢再结晶控轧·····	46
3.10	微合金化钢常化控轧·····	47
3.11	微合金化钢等板坯连铸连轧优势·····	49
3.12	微合金化钢铁素体区轧制·····	50
3.13	固溶强化不是微合金化钢主要强化手段·····	51
3.14	微合金化钢晶粒细化的强化机制·····	52
3.15	微合金化钢析出强化的机制·····	53
3.16	微合金化钢的相变强化·····	55

第四部分 微合金化钢生产技术要点

4.1	管线钢的生产技术·····	57
4.2	造船钢的生产技术·····	58
4.3	桥梁钢的生产技术·····	60
4.4	高层钢结构建筑用钢的生产技术·····	62
4.5	汽车用钢的生产技术·····	65
4.6	集装箱用钢的生产技术·····	67
4.7	工程机械用钢的生产技术·····	69

第五部分 钢材品种结构调整

5.1	钢材品种结构调整之一：大力发展微合金钢·····	71
5.2	钢材品种结构调整之二：扁平材的市场需求·····	73

5.3	钢材品种结构调整之三：长型材的市场需求 ...	76
5.4	钢材品种结构调整之四：企业的产品分工	80
5.5	钢材品种结构调整之五：工艺流程优化	81
5.6	低（微）合金钢在开发中的地位	83

第一部分 基础知识

1.1 低合金钢由来

中国钢产量已突破 1 亿吨，钢材数量不再是主要矛盾，钢材品种结构不合理的矛盾十分突出。当前行业的主要任务是努力提高产品的市场竞争力，站在可持发展的新起点上，把大力开发低合金钢列入发展战略的重要内容。许多普钢企业在钢材品种结构调整和编制科技发展规划中，已意识到低合金钢生产是提高产品技术含量和附加值的关键，对低合金钢开发中碰到的种种问题心中无数，一些科技管理干部觉得“成也低合金钢，败也低合金钢”，迫切要求对低合金钢有个全面的了解。

按国际标准，把钢区分为非合金钢和合金钢两大类，非合金钢是通常叫做碳素钢的一大钢类，钢中除了铁和碳以外，还含有炉料带入的少量合金元素 Mn、Si、Al，杂质元素 P、S 及气体 N、H、O 等。合金钢则是为了获得某种物理、化学或力学特性而有意添加了一定量的合金元素 Cr、Ni、Mo、V，并对杂质和有害元素加以控制的另一类钢。

原则上讲，合金钢分为低合金钢、中合金钢和高合金钢，顾名思义，以含有合金元素的总量来加以区分，总量低于 3%称为低合金钢，5 ~ 10%为中合金钢，大于 10%为高合金钢。在国内习惯上又将特殊质量的碳素钢和合金钢称为特殊钢，全国 31 家特钢企业专门生产这类钢，如优质碳素结构钢、合金结构钢、碳素工具钢、合金工具钢、高速工具钢、碳素弹簧钢、合金弹簧钢、

轴承钢、不锈钢、耐热钢、电工钢，还包括高温合金、耐蚀合金和精密合金等等。在钢的分类上，近年虽努力向国际通用标准靠拢，但还有许多不同之处。

① 随着特钢向“特”、“精”、“高”发展，向深加工方向延伸，特钢的领域越来越窄。美国特钢协会将特钢定位在工模具钢、不锈钢、电工钢、高温合金和镍合金。日本把结构钢和高强度钢归并在特钢范畴。随着我国普钢企业的技术改造和工艺进步，特钢企业的产品领域也在缩小，1999 年普钢厂已生产特钢产品总量的 34%。

② 国外的低合金钢，实际上是我们所熟悉的低合金高强度钢，属于特殊钢范畴，在美国叫做高强度低合金钢（HSLA—Steel），俄罗斯及东欧各国称为低合金建筑钢，日本命名为高张力钢。而在国内，首先是把低合金钢划入了普钢范围，概念上的区别导致在产品质量上的差异。在名称上也几经变化，如低合金建筑钢、普通低合金钢、低合金结构钢，至 1994 年叫做低合金高强度结构钢（GB/T1591—94）。到目前为止，从发表的资料文献来看，低合金钢的名称仍然随着国家、企业和作者而异。

③ 低合金钢与碳素钢、低合金钢与合金钢之间，明确划出的概念是不存在的。在国外，50 年代曾给低合金钢下过定义，总的意思是，凡是合金元素总量在 3% 以下，屈服强度在 275Mpa 以上，具有良好的可加工性和耐腐蚀性，以型、带、板、管等钢材形状，在热轧状态直接使用的软钢的替代品。当然，在技术发展进程中，低合金钢不论在合金含量、性能水平和交货状态，已经有了很大的变化。

在我国，低合金钢是一个更加笼统的钢类，钢材品种不仅含

有低合金焊接高强度钢，还包容了低合金冲压钢、低合金耐腐蚀钢、低合金耐磨损钢、低合金低温钢、甚至还纳入了低、中碳含量的低合金建筑钢和中、高碳含量的低合金铁道轨钢。具有中国特色，但带来的一个问题是缺乏与国外统计数据的可比性。

1.2 早期低合金钢的发展

低合金钢的出现可以追溯到 19 世纪的 1870 年，一种碳含量 0.64 ~ 0.9% 和铬含量 0.54 ~ 0.68%、抗拉强度 685Mpa、弹性极限 410Mpa 钢，第一次被采用于工程结构，建造了跨度 158.5m 的拱形桥梁。但这种钢不理想也是十分明显的，需要轧后热处理，难以机械加工，耐蚀性又不良。随后的 1 个多世纪的时间，世界各国不断探索，大体上可以把低合金钢区划为三个不同特征的发展阶段，在 20 世纪 20 年代以前，20 ~ 60 年代及 60 年代以后。前两个阶段姑且合称为传统的低合金钢发展阶段，后一阶段可以称为现代低合金钢发展阶段（后面我们称它为微合金钢 Microalloyed Steel）。

前一时期低合金钢的重大发展有三个标志：

① 由单一元素合金化向多元素合金化发展

1895 年曾采用 0.40 ~ 0.56%C 和 3.5%Ni 的钢建造了俄国的“鹰”级驱逐舰，该钢的加工性比初期的铬钢要好得多，屈服强度在 355Mpa。20 世纪初还用 8000 多吨含镍的钢建造了跨度为 448m 的桥梁，美中不足的是这种钢的合金资源有限，成本又高。此后开发了 1.25%Si 的低合金钢，建造了横渡大西洋的船舶和跨度 110m 的桥梁，俄国利用铁铜混生矿源，曾开发了 0.7 ~ 1.1%Cu 的低合金钢用于造船、建桥，这种钢导电性好，抗腐蚀性优良。

长达 30 多年的生产和应用经验的积累,发现多元合金化的低合金钢综合性能更佳,经济上更划算,开发了二元合金化的 Ni-Cr、Cr-Mn、Mn-V 低合金钢,和三元复合合金化的 Cr-Mn-V、Cr-Mn-Si、Mn-Cu-P 等低合金钢。用途上也扩大到了锅炉、容器、建筑和铁塔等方面。20 世纪 20 年代全世界的低合金钢产量达到 200 万吨。

② 赋予低合金钢的第一特征:低碳、可焊接

在工程结构广泛采用焊接技术之后,给低合金钢发展带来深远的影响。为减小焊接热影响区硬化和开裂、焊接接头延性恶化,把低合金钢的碳含量由 0.6%降到 0.4%,随后又降至 0.2%,至 60 年代末再降至 0.18%,提出了焊接碳当量的可焊性判据。为了获得高强度钢不断增高的强度需求,出现了两条发展途径,一个是提高合金含量,另一个是热处理手段,各有利弊,至今屈服强度高于 600Mpa 的钢仍采用热处理,E 级和 F 级船板仍规定正火状态使用,再如铁路钢轨仍有合金化轨和全长淬火轨的两种生产方式。

③ 注意到钢的冷脆倾向性和时效敏感性

二次世界大战期间大量“自由”轮在运行中断裂及许多锅炉、容器的失效,注意到了钢冷脆倾向与钢的粗晶结构和有害元素 P、S 的含量有关,而钢的时效倾向是由钢中 N 所致,从而采取了降硫、铝细晶化和控制终轧温度等优化工艺。为了钢结构的安全使用和寿命,同时还开发了低温夏比 V 型缺口冲击、温度梯度双重拉伸、零塑性转折落锤及 BDWTT 落锤撕裂等试验方法及制订了相应的断裂韧性判据。

20~60 年代间,工业发达国家的低合金钢开发带来了经济的

繁荣和现代化。据不完全统计，全世界成熟的低合金钢钢种牌号有 2000 余个，形成了 5 大合金成分系列：

(1) 以德国 St52 钢为代表的 C-Mn 钢系列，日本的 SM400、我国的 16Mn 属于这类钢。

(2) 以美国 Vanity 钢为代表的 Mn-V- (Ti) 钢系列，构成了现代微合金化的先驱。

(3) 美国的含 P-Cu 钢系列，代表钢种有 Corten 和 Mariner 钢，具有良好的耐大气和海水腐蚀性。

(4) Ni-Cr-Mo-V 钢系列，如美国开发的淬火回火状态 T-1 钢板成功用于压力容器的建造。

1.3 我国低合金钢的发展

50 年代原冶金工业部钢铁研究院刘嘉禾为首的一批冶金学专家率先研制成功了 16Mn 钢和 15MnTi 钢，开创了中国低合金钢领域，在此基础上制定了命名为低合金高强度钢的第一个标准 (YB13—58)，列入 12 个钢种牌号。1963 年易名为低合金结构钢 (YB13—63)，纳入的钢种牌号除 Mn 系列外，包括了结合我国富产资源所开发的 V、Ti、Nb 及稀土的低合金钢，并由此派生出了桥梁、造船、容器、汽车大梁、矿用等专用钢标准。其后修改的 YB13—69，改为普通低合金钢（简称普低钢），强调“普通”的意思在说明生产低合金钢就像生产普通碳素钢一样，不需要特别的生产手段，简便容易，即可取得 1 吨顶 1.3 ~ 1.5 吨的经济效益，此后长达 20 年难以消除它的负面影响，至今全国行业钢材品种结构调整时，还往往注意到低合金钢高附加值的一面，而忽视了低合金钢的高技术含量一面。1988 年升级为国标时 (GB—

1591—88), 回归到了低合金结构钢的名称, 1994 年颁布的现行标准更名为低合金高强度结构钢, (GB / T1591—94), 包括了屈服强度 295—460Mpa 5 个强度等级和 A ~ E 5 个质量等级, 新标准的积极意义在于努力向国际规范靠拢。由于我国低合金钢基础研究日趋深入和生产规模日益扩大, 在北京已连续召开了 4 届 (1985、1990、1995 及 2000 年) 国际低合金高强度钢会议, 无疑这是对中国低合金钢领域科技进步的肯定。

我国低合金钢发展历程可以划分为 4 个阶段:

1957 ~ 1969 年

是低合金钢开发的初创阶段, 第一个低合金钢 16Mn 钢与普碳钢相比, 具有高强度、高韧性、抗冲击、耐腐蚀等特性, 它的开发适应了各行业产品大型化、轻型化的趋势, 采用 16Mn 钢所建造的“东风”万吨轮, 显示了节省钢材、节约能源和延长产品寿命的优越性。

1966 年召开了全国规模的第一次低合金钢推广应用会议, 在计划经济条件下宏观指导低合金钢的发展。当年低合金钢产量为 141 万吨, 据不完全统计, 研制钢号达 345 个, 其中有 54 个钢号纳入了 11 个有关标准中。

1970 ~ 1974 年

全力进行了钢种整顿工作, 及时总结了开发中有益的经验, 收集了大量的试验研究数据, 合并和淘汰了一批无法组织批量生产或性能达不到预定指标的钢号, 化费四年时间的钢种整顿工作是十分有益的, 减少了开发盲目性和无序状态, 完善了富有中国特色的低合金钢体系。

1975 ~ 1983 年

我国低合金钢开发生产和应用等各方面存在的问题很多，积重难返，显示出了与客观需求的不适应，合金资源优势未能转化为产品优势，产品质量明显低于国外同类同级产品的实物水平，16Mn、20MnSi、U71Mn 3 个钢号占低合金钢总产量 90%以上。

1984 ~ 2000 年

这是一个中国低合金钢的转型期，从“六五”至“九五”期间，基本上实现了 4 个转变。

- (1) 按国外先进标准生产低合金钢
- (2) 引进国外发展成熟的低合金钢钢号
- (3) 按国外低合金钢基础研究成果，改造我国原有的传统观念设计的低合金钢钢号
- (4) 跟上新型低合金高强度钢(微合金钢)的发展趋势。

我国低合金钢发展面貌有了极大的变化，大大缩小了与国外低合金钢先进水平的差距。

由 1988 至 1993 年我国低合金钢的产量统计列于表 1。

表 1 我国低合金钢的产量统计 (万吨)

钢类品种	1988	1990	1993
低合金高强度钢			
低合金冲压钢	288.45	304.00	336.70
低温用钢			
耐大气腐蚀钢	3.0	3.5	3.8
耐海水腐蚀钢	2.8	3.0	4.5
低合金耐磨钢	20.42	32.88	41.35
建筑用钢筋钢	425.36	656.23	946.51
低合金钢轨钢	125.08	180.24	24.14
总计	865.11	1180.0	1357.0
低合金钢比 (%)	14.6	15.8	15.2
低合金高强度钢比 (%)	5.3	5.2	4.3

1.4 现代低合金钢的重大进展

自 20 世纪 70 年代以来,世界范围内低合金高强度钢的发展进入了一个全新时期,以控制轧制技术和微合金化的冶金学为基础,形成了现代低合金高强度钢即微合金化钢的新概念。进入 80 年代,一个涉及广泛工业领域和专用材料门类的品种开发,借助于冶金工艺技术方面的成就达到了顶峰。在钢的化学成分—工艺—组织—性能的四位一体的关系中,第一次突出了钢的组织 and 微观精细结构的主导地位,也表明低合金钢的基础研究已趋于成熟,以前所未有的新的概念进行合金设计。

低合金钢的现代进展有哪些呢? 主要表现有:

(1) 微合金化钢基础研究的新成就。

首先,对微合金化元素,尤其是 Nb、V、Ti、及 Al 的溶解—析出行为的研究取得显著的成果,这些元素的碳化物和氮化物的形成及其数量、尺寸、分布取决于冷却过程的形变温度和形变量,而加热过程中碳、氮化物的存在及其特性表现在回火的二次硬化、正火的晶粒重结晶细化、焊接热循环作用下晶粒尺寸的控制 3 个主要方面。

其二、重视含 Nb 微合金化钢、Nb-V 和 Nb-Ti 复合微合金钢的开发,据统计几乎占有近 20 年来新开发微合金化钢全部牌号的 75%和微合金化钢总产量的 60%。近几年注意到了微量 Ti ($\leq 0.015\%$) 十分有益的作用, Ti 的微处理不仅改变钢中硫化物的形态,而且 TiO_2 或 Ti_2O_3 成为奥氏体晶内铁素体晶粒生核的质点, Nb-Ti 复合微合金化构成超深冲汽车板 IF 钢的冶金基础,还显著改善了 Nb 钢连铸的裂纹敏感性。

其三,对低碳钢强化的 Hall-Petch 关系式进行了系统总结,

对加速冷却原理作了更深入的研究。人们十分有兴趣采用分阶段加速冷却工艺的应用，前期加速冷却用于抑制铁素体转变，后期加速冷却目的在于控制中、低温产物的晶粒尺寸和精细结构的组成，从而达到在较宽范围内调整钢的强度和强度 / 韧性匹配。

350MPa 级高强度钢：微合金化+热机械处理，机制为晶粒细化+析出强度。

500MPa 级高强度钢：铁素铁+贝氏体、马氏体，强化机制为晶粒细化、并晶界强化和位错强化。

700MPa 级高强度钢：淬火回火组织，机制为相变强化+析出强化。

(2) 工艺技术的进步

顶底复吹转炉冶炼，钢的碳含量可控制在 0.02 ~ 0.03%，精炼的应用可生产出碳含量在 0.002 ~ 0.003%，杂质含量达到 < 0.001%S、< 0.003%P、< 0.003%N，2 ~ 3ppm [O] 和 < 1ppm [H] 的洁净钢。

连铸的成功经验是低的过热度、缓流浇注和适宜的二次冷却，采用低频率、高质量的电磁搅拌，可以得到均匀的等轴的凝固区。

在再结晶控轧的基础上，应变诱导相变和析出的非再结晶控轧，以及 ($\gamma+\alpha$) 两相区形变，已成为目前控轧厚钢板生产主要方向。薄板坯连铸连轧流程和薄带连铸工艺的实用化，使低合金钢生产进入了又一个新境界。

(3) 低合金钢合金设计新观点

首先是钢的低碳化和超低碳趋势，例如 60 年代 X60 级管线钢碳含量为 0.19%，70 年代为 0.10%，80 年即使 X70 和 X80 级

管线钢碳含量降至 0.03% 以下。

根据微合金化元素在钢中的基本作用和次生作用，提出了“奥氏体调节”的概念，有意识地控制加入微合金化元素，使钢适于一定的热机械处理工艺，以发展新的性能更好的钢种。

传统控制轧制的合金设计：微合金化的重要目的是提高再结晶停止温度，利用非再结晶区的形变诱导相变和析出，Nb 是最理想的微合金化元素。

再结晶控制轧制的合金设计：它的目的是尽量降低再结晶停止温度，并形成阻碍晶粒粗化的系统。其中一种办法是以 TiN 为晶粒粗化阻止剂，以 V(CN) 作为铁素体强化。另一种方案是 Nb-Mo 的微合金化，具有较宽阔的可以加工的窗口。这种工艺特别适合于不能进行低温轧制的低功率的老旧轧机生产。