

神奇的铌

—在钢铁中的应用(之四)

—Nb 微合金化热轧钢筋

编译 孟繁茂 付俊岩
审核 东 涛



中国国际信托投资公司(集团)

中信美国钢铁公司 Citisteel USA INC (Beijing)

北京中信铌贸易发展公司

中信铌钢发展奖励基金管理委员会

7G 433
M 53

神奇的铌

——在钢铁中的应用(之四)

——Nb 微合金化热轧钢筋

编译 孟繁茂 付俊岩
审核 东 涛

中国国际信托投资公司(集团)
中信美国钢铁公司(Cristeel USA INC (Beijing))
北京中信铌贸易发展公司
中信铌钢发展奖励基金管理委员会

• 224031

序 言

微合金化技术的开发是经济效益和发展制钢技术的统一体。它是在几乎不增加生产成本,不降低生产效率的条件下,把炭锰硅系列低合金高强度钢的强度和韧性,推向一个新的水平。这是继控制轧制技术出现之后的很重要的发展。

微合金化的第一个专利是美国炭化物联合公司于1936年发表的。当时成为一个很有趣的奇妙的新闻公布于世。由于当时铌的价格昂贵,以至于十几年没有人敢于问津,专利搁置。直到60年代,地质学家在巴西阿拉沙发现绿烧石铌矿,巴西铌公司(CBMM)大规模生产铌铁以后,才使铌铁价格降下来,促使微合金化技术在六十年代末,七十年代初蓬勃发展起来。

微合金化技术的最初应用形式就是用于钢筋生产。微合金化技术的出现,也是出于解决那些没有巨额投资而试图建设控轧、控冷设备的中小企业生产者的需要。这个技术现已推广于钢铁材料的各个领域之中。

现在含Nb钢筋,除中国外,已普遍生产和应用。七十年代,德国阿见德公司用铌生产热轧增强钢筋,把屈服强度提高到400MPa。供应欧洲市场。日本新日铁用铌微合金化加上控制轧制技术生产低温用可焊接高强度热轧钢筋。八十年代德国曼内斯曼用穿水工艺生产韧芯钢筋Bst500/550性能优越,节约了合金元素,取得了巨大的社会 and 经济效益。

微合金化元素中的Nb是佼佼者。因为它即可提高强度,提高韧性、改善焊接性能,又可以降低韧脆转变温度;这是V、Ti所不及的。

现在,西欧、北美、日本等国家的热轧钢筋多以Nb或Nb+V或用V+N微合金化生产。至于采用那种微合金化元素,这取决于生产厂的偏好,取决于对性能的要求和经济效果。

抗冷脆性、抗震、可焊接钢筋,其炭当量很低,德国标准炭在0.16%以下,焊接性能优越。由于炭含量低,强度损失由Nb的细化晶粒强化和沉淀强化得以补偿。

北极地区、加拿大、苏联等国大量使用含Nb钢筋。我国北部气温偏低、大部分冬季处于零度以下,以至达到 -20°C 、 -40°C ,漠河最低可达 -53°C 又兼中国是多震国家,所以我国应大力发展高强度、高韧性的耐冷脆抗震钢筋。这类钢筋以Nb微合金化最为合理。

提高钢的使用强度等于增加钢的产量。从六十年代开始,欧、美、日等国家,用微合金化技术提高热轧钢的强度,取得巨大效益,吨钢铌铁消耗量成为一个国家钢铁工业的先进指数,德国为53克,美国47克,日本为45克,中国只有2克。这说

明我国的钢材品种质量,远远落后于先进国家。因此,年产9000多万吨钢的中国,每年还要进口大量钢材。我国使用20MnSiⅡ级钢筋、加入0.02%Nb就可成为Ⅲ级钢筋,等强度设计中就可以节省20%钢筋。我国年产约700万吨Ⅱ级热轧钢筋,如果升级为Ⅲ级,相当于节约100多万吨钢。

当前在国际上已广泛使用Ⅲ级以上的微合金化建筑钢筋。像20MnSi这种Ⅱ级钢筋也只有在中国仍在大量生产和使用,远远不能满足国民经济,高层建筑的要求。

随着我国经济建设的飞速发展,对建筑用钢推广400MPaⅢ级微合金钢筋的优越性和更新换代的必要性,已引起各界人士的关注。1995年8月4日,冶金部和建设部以冶建(1995)348号文联合下发了“关于推广应用400MPaⅢ级钢筋的通知”,并将纳入国家“混凝土结构设计规范”标准。这是我国建筑用钢筋发展史上的重大事件。

在此之际,我们向钢铁界同仁们赠送这本“神奇的铌在热轧钢筋中的应用”文集,希望她有助于促进我国微合金高强度钢筋的新发展,为我国经济建设的腾飞,更多、更好、更高的社会主义大厦的建设贡献出我们钢铁战士的智慧和力量。

中信美国钢铁公司和北京中信铌贸易发展公司,愿为钢铁界同仁们做好各种服务工作。

中信美国钢铁公司(北京)
北京中信铌贸易发展公司

副总经理 付俊岩
1996.1.1

目 录

序 言	(1)
1. 低合金高强度钢中添加钒和铌微合金化的成本分析	(1)
2. 大力发展含 Nb 热轧钢筋 ——使我国钢筋升级换代.....	(3)
3. 含 Nb 高强螺纹钢筋	(25)
4. 新研制的低温用混凝土螺纹钢筋	(34)
5. 用于热轧和冷成型型钢及混凝土增强钢筋的微合金化钢	(45)
6. 利用微合金化和控制夹杂物改善棒材和锻件性能	(55)
7. Nb、V 微合金化可焊接热轧带肋钢筋	(67)
8. Temprimar [®] 生产的可焊接高强度钢筋的机械性能和工艺特性	(71)
9. 附:世界钢筋市场动态	(81)

低合金高强度钢中添加钒和铌微合金化的成本分析

众所周知,作为微合金化元素的钒和铌正广泛应用于低合金高强度钢中,这些产品加入任何一种钒或铌进行微合金化处理,都会获得所期望的性能。实际上,选择哪一种微合金化元素,钒或铌一般取决于每一个钢厂的偏好。

然而,价格条件是影响选择哪种微合金化元素的主要因素,例如八十年代后期,由于钒铁价格不断提高,一些产品从使用钒转而使用铌作为微合金化元素。此外,为获得一定的强度增量,加铌的数量要少于钒,因为铌的作用更有效。一般而言,铌与钒相比,要达到相同的强化效果,其用量比约为 $Nb:V=1:2$ 。在常规低合金钢中加入 0.025% 和合理的工艺条件下,铌可提高强度达 50MPa。

例如在 1200—1250℃ 高温下加热的钢坯中,添加 0.02% 的铌可以替代 0.04% 以上的钒。而在较低的加热温度下,由于铌和钒两种元素溶解温度的不同,其替代比例会有所减小,这是由于铌的作用在此条件下更有效。当要求更高强度等级的产品或高碳与低温加热工艺配合时,也可以复合添加钒和铌微合金化元素。

以当前钒铁(50%含量)的价格 8 万元/吨和铌铁(65%含量)的价格 12.35 万元/吨计算,成本分析见下表(1,2):

表 1

钢中含 V(%)	Fe—V 加入量(kg/吨钢)	提高成本(元/吨钢)
0.02	0.36	28.80
0.03	0.54	43.20
0.06	1.08	86.40
0.07	1.27	101.60
0.10	1.80	144.00
0.12	2.16	172.80
0.14	2.54	203.20

表 2

钢中含 Nb(%)	Fe—Nb 加入量(kg/吨钢)	提高成本(元/吨钢)
0.01	0.18	22.23
0.02	0.36	44.46
0.03	0.54	66.69
0.04	0.72	88.92
0.05	0.90	111.15

(注:以上数据由首钢钢研所提供)

根据首钢潘兴英同志和史宸兴同志在 1991 年的研究结果表明:按英国 BS4449—88 标准的 460MPa 屈服强度要求,在 $\Phi 28\text{mm}$ 的 20MnSiV 钢中钒含量要增加到 0.10—0.12%,而对于 $\Phi 32\text{mm}$ 的 20MnSiV 钢的钒含量要增加到 0.14%,才能满足英标 460MPa 的技术要求。由于钒铁价格上扬而造成的成本昂贵,首钢于 1991 年开发了含铌新钢种 ($\text{Nb} < 0.05\%$) 20MnSiNb 钢,其 $\Phi 32\text{mm}$ 的螺纹钢材性能完全符合英标 BS4449—88 (屈服强度 $\geq 460\text{MPa}$) 的要求。(注:以上资料摘自 93 年发表的“九十年代低碳钢国际学术会议”中《钒铌微合金化热轧螺纹钢》一文)其成本分析表明(91 年价格计)用巴西进口铌铁(STD—110)取代钒铁作微合金化,其成本至少降低 5—6%左右。

使用铌铁除了比钒铁成本低外,它还有一个特点就是市场价格稳定,巴西铌公司是世界上最大的铌制品生产厂家,其铌资源按当前消耗量可供世界使用 500 年。

中信美国钢铁公司是中国国际信托投资公司(集团)的全资海外子公司,公司拥有研究含铌钢的雄厚技术力量,并且与冶金部钢铁研究总院及各大钢厂有着良好的合作关系。公司作为全国低合金钢协调组的理事单位,掌握了大量国际和国内有关含铌钢研究、生产、应用方面的技术资料,依靠这方面的专家与钢铁企业紧密合作,不断共同开发含铌新钢种和新产品。

中信美国钢铁公司自一九八九以来一直经营巴西铌公司的铌铁(STD—110)以及真空级铌铁(VG—210)和真空级镍铌合金(VG—220),不仅为用户提供了高质量的产品,还提供了完善的技术服务。为方便用户,我们为用户提供的进口铌铁和铌制品采用人民币方式结算。方便用户,为用户提供良好的服务是我们的工作目标。

我们诚恳地期望与贵公司在开发含铌低合金高强度钢领域中的合作。如果您对铌铁及铌在低合金高强度钢中的应用资料有兴趣,请与我们联系:

单位名称:中信美国钢铁公司(北京)

北京中信铌贸易发展公司

单位地址:北京市朝阳区新源南路六号京城大厦 1220 室

联系人:副总经理 傅俊岩

业务经理 谭 燕 刘宴龙

单位电话:466.1091

单位传真:466.1090

大力发展含铌热轧钢筋

——使我国热轧钢筋升级换代

孟繁茂* 付俊岩** 编译
东 涛*** 审核

〔提要〕 本文叙述了我国钢筋生产概况,指出了以 20MnSi 为主体的热轧钢筋远远不能满足建筑业发展的需要,升级换代是历史的必然。我国地理位置决定钢筋的抗震性、耐冷脆性是钢筋混凝土结构用钢筋的主要指标。所以应大力发展以细化晶粒强化为主,辅以沉淀强化的铌微合金化的Ⅲ级、Ⅳ级钢筋。

自改革开放以来,全国建筑行业,取得了空前大发展。高层建筑首先从各大城市像雨后春笋般的耸起。这种发展势头有增无减,方兴未艾,正向中小城市发展,向内陆地区发展。在这大好形势下,钢筋市场出现持续供不应求的局面。

但是作为钢筋混凝土结构的主要材料钢筋的产生、钢筋的性能及使用等方面还存在着很多问题,特别是当前建筑行业使用钢筋强度偏低,浪费着大量钢材,这个问题急待解决。

本文就“我国热轧钢筋的发展问题”谈谈几点看法。

一、我国热轧钢标准和国外标准

表 1 列出了国际标准以及日本、美国、德国、英国、前苏和我国标准的强度级别及代号^[1,2]。钢筋代号数字代表最低屈服强度(MPa)。国际通用标准 ISO 6935 共包括 7 个牌号 4 个强度级别。其他各国标准也与之相对应。从表 1 可以看出各国标准基本是一致的。

就各国大量使用的钢筋来看。西欧、北美和日本,主要使用Ⅲ级钢筋,占总产量的 70%,其次是Ⅳ级钢筋占 30%。而我国主要使用Ⅱ级 20MnSi 钢筋,占钢筋总产量 90%以上^[3]。可见我国钢筋的生产和使用与其它国家的钢筋的生产和应用存在着巨大的差别。

第一,我国钢筋混凝土结构建筑物的安全度比外国低很多。

第二,按等强度设计,使用强度比较低的钢筋,必须通过加大配筋率满足设计要求。我国的建筑物用钢筋比外国多用钢筋大约 20%,如果以年用 700 万吨钢筋计算浪费总计 130~150 万吨。

* 教授级高级工程师、中信美国钢铁公司(北京)副总工程师
** 高级工程师、中信美国钢铁公司(北京)副总经理
低合金钢协调组理事、中信特钢发展奖励基金管理委员会副主任
*** 教授级高级工程师、钢研院新材料总公司副总经理
中信特钢奖励基金会评委会副主任、中信美国钢铁公司(北京)总工程师

热轧钢筋的最新标准

表 1

标准号	代号及强度级别(数字代表最低屈服强度 MPa)					
ISO6955-1 1991(E) ISO6935-2 1991(E)	PB240	PB300				
		RB300	RB400 RB400W	RB500 RB500W		W 代表可焊接
JISG3112 1987	SR235	SR295 SD295A SD295B	SD345 SD390	SD490		
ASTM A615M-90 A706/706M-90		300	400	500		
	钢筋代号 直径 MM	10,15,20	10,15,20 25,30,35 45,55	35,45,55		
			400			
			全部规格			
NID488 1984.9			Bst420	Bst500S Bst500M		M 也适于钢丝
BS4449 1988	250 级			460 级		
ГОСТ5781-82	A-1	A-Ⅱ Ac-Ⅱ	A-Ⅲ	A-Ⅳ	A-Ⅴ	A-Ⅵ
	235	294	392	590	785	980
GB13013-91	RL235					
GB13014-91		3	KL400			
GB1499-91		RL35	RL400	RL540	RL590	
YB(T)27-86		345 20MnSi				

二、我国热轧钢筋生产概况

1. 我国热轧钢筋的产量

我国建筑钢材生产量 1500~1800 万吨^[3]。其中钢筋混凝土用钢筋、钢丝、钢绞线用量约 1000 万吨。热轧螺纹钢Ⅱ级钢筋约 700 万吨。90%由 20MnSi 生产。

全国持有生产许可证的厂家到 93 年共有 242 家^[5]。无证生产钢筋的厂家很多,仅当涂县有 62 家^[4]。

2. 产品质量

有些厂家生产技术很落后,20MnSi 钢坯^[4]来源不足,常有采用各种大截面废钢,生产钢筋。

国家有关单位历年对钢筋质量进行抽查。其合格率很低。

受抽查的样品合格率如下⁽⁴⁾

1990 年二季度合格率 40.68%

1991 年二季度合格率 59.26%

1992 年二季度合格率 80.06%

1993 年二季度合格率 20~35%

大型钢厂生产的Ⅱ级钢筋质量还是按标准交货的。

3. 生产设备

生产热轧钢筋小型轧钢厂居多,一般都是按传统工艺生产的,难以实行控制轧制和控制冷却。

先进的生产设备有连铸、连轧、高速线材轧机、穿水冷却设备等。

采用这些设备生产过程中,也出现了各种各样的质量问题⁽³⁾。诸如连铸坯生产的钢筋的延伸率比模铸坯生产的低约 5%以上;高速连轧机生产的 20MnSi 钢筋性能检验表明,24 小时后取样抗拉强度有所降低,甚至低于标准值,但塑性提高了;在续棒材轧机上,采用微张力轧制的情况下,强度有所下降,而采用张力轧制时,强度上升。此外,电炉生产改为转炉生产后,出现强度下降或不稳等等。这些问题都应予以认识和研究。

总体来说我国的生产设备已经具备生产各级钢筋的能力。

4. 用户反映意见

从 60 年代以来,在我国建筑行业中 20MnSi Ⅱ级热轧钢筋做出了应有贡献,满足了社会发展的需要。

现在建筑业迅猛发展,诸如高层建筑,铁路桥梁,大跨度殿堂……,对钢的强度、韧性、焊接性能、抗震性能、抗疲劳性、抗低温冷脆性能的要求,越来越严,标准越来越高。20MnSi Ⅱ级钢筋已远远满足不了发展的需要。

①强度级别低

Ⅱ级钢筋的最低屈服强度为 335MPa。

用等强度设计配筋率过大,致使砂石混凝土灌注困难,和采用Ⅲ级钢筋相比,多用钢材约 20%。

如果用比强度设计,Ⅱ级钢筋强度低,钢筋混凝土结构的安全度比用Ⅲ级钢筋低得很多。

(2)具有应变时效倾向性

据文献报导 20MnSi 具有应变时效倾向。它的应变时效敏感性的转变温度很高。抗震性能不好,唐山地震遗址,机车厂铸钢车间的严重破坏就是证明。

(3)铁道部门反映 20MnSi Ⅱ级钢的焊接性能较差,耐疲劳性也不理想⁽³⁾。

三、我国热轧Ⅱ级钢筋急需更新换代

西欧、北美、日本、热轧钢筋在 60 年初同样是 C MnSi 系列低合金钢。随着建筑业的发展,对钢筋的强度、韧性、焊接性提出更高的要求,用传统轧钢技术 C MnSi 系列钢筋几乎已挖尽了潜力。于是发展了控制轧制技术和微合金化技术,这两者都以细化晶粒来提高钢的强度和韧性,从而允许降低钢的碳含量和包括在碳含量中的全部化学成分含量,改善了焊接性能。首先在德国以专利形式出现了Ⅲ级、Ⅳ级可焊接钢筋⁽⁹⁾。

西欧大陆、法国、瑞典等国家,大量生产 V—N 微合金化的Ⅲ级、Ⅳ级钢筋,这是因那里环境温度,终年在 0℃ 以上,对钢筋的耐冷脆性能要求不高的缘故。

中国大部地区冬季气温较低,北方地区冬季可达 -40℃,从北京、上海、武汉直到昆明、贵州、西藏,冬季都有程度不同冰霜期,同时中国又处两大地震带之间,属于多震国家,所以应吸取北美、加拿大等北极地区国家的经验,中国应多发展含 Nb 高韧性钢筋^[10]。

Ⅱ级钢筋的更新换代是热轧钢筋的发展,势在必行。

四、铌在热轧钢筋中的应用及其冶金学^[10,14,12]

铌在钢筋生产中的应用是微合金化技术的最初形式。早在 70 年代德国阿贝德钢铁公司,用普通轧机,采用普通的热轧工艺生产含铌增强钢筋,取得很大的发展,同时期日本新日铁用铌微合金化和控轧技术相结合生产低温和超低温用螺纹钢筋。到 80 年代德国用穿水工艺生产 Bst500/550 级螺纹钢,进一步降低了合金元素总量,改善了焊接性能。

我国首钢用 Nb 微合金化生产了大规格新Ⅲ级钢筋(Φ32mm)提高了并解决了 20MnSiV 生产 Φ32 圆钢筋强度低于标准要求的问题^[11]。

利用 Nb 微合金化和控轧技术,提高强度,改善韧性的钢筋可以用在 -40℃ 以下的北极地区。可用在超低温工业钢筋混凝土结构,工作温度可达 -160℃^[10]。

微合金化原理,简单说就是在热变形过程中利用强碳化物、氮化物或炭氮化物形成 Nb、Ti、V 等的炭氮化物的溶解析出规律、控制析出时机,达到细化奥氏体晶粒从而进一步细化铁素体晶粒对钢产生强韧化作用以及在铁素体相中的沉淀强化作用。

铌的炭氮化物在低碳钢中的析出规律可用欧文公式计算。利用这个公式可算出在不同温度下“可溶铌”,和“沉淀铌”在钢中的分配,从而可估计,细化奥氏体晶粒和沉淀强化的两个分量。

$$\lg(\text{Nb})(\text{C} + \frac{12}{14}\text{N}) = 2.26 - \frac{6770}{T} \quad \text{欧文公式(1)}$$

Nb(CN)的溶度积的对数与绝对温度成直线关系。

添加 0.04%Nb 的 0.20%C 钢,加热温度到 1250℃,也不能完全固溶,这就是说从 1250℃ 到再结晶停止温度 TR 之间的热加工都有细化奥氏体晶粒的作用。

Nb(CN)以细小而坚硬的颗粒存在于固溶体中,在热加工过程中它可成为再结晶的核心,它可阻止奥氏体晶界的移动,阻止晶粒长大,达到细化奥氏体晶粒的作用。Nb C 在铁素体中的沉淀是极为细小(纳米级)的弥散相,从而强化铁素体相。

Nb、Ti、V 对力学性能和低温韧性的影响如图 1 所示^[12]。不难看出铌在钢中的强韧化作用效果最大,它既提高强度,又降低转变温度 T_s 。同时合金元素用量很少。Ti 在 0.08% 以下,强化作用很小,有降低转变温度的作用。V 只有强化作用,降低转变温度的作用不明显。

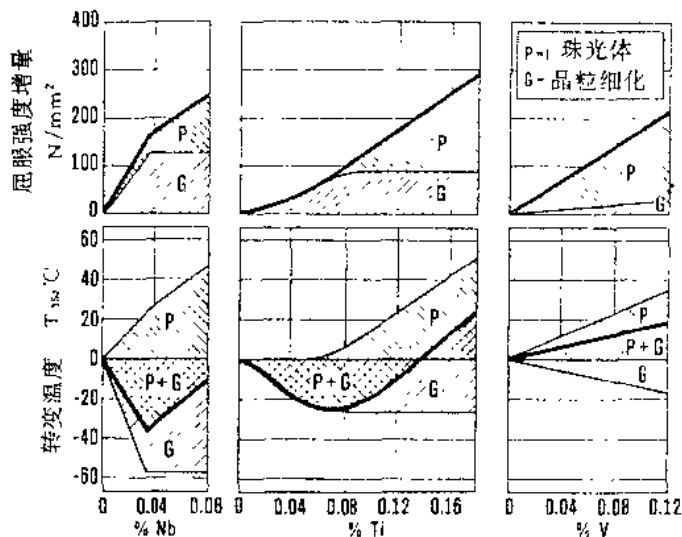


图 1 Nb、V、Ti 的冶金效果

所以,要改善钢的韧性不能用钒,只能用 Nb 或 Ti;要提强度,同时又要提高韧性只能用铌;或 Nb+V、Nb+Ti 复合更好。

对强度的影响,Nb 的作用是 V 的 2 倍。即 0.04%Nb 和 0.08%V 相当,而 Nb 还同时改善钢的低温韧性。

描述 C、Mn、Si 系统以铁素体、珠光体为基相的低合金钢的强度和韧性的 F、B 皮克林公式如下^[6]:

$$\text{屈服应力(MPa)} = 15.4[3.5 + 2.1(\% \text{Mn}) + 5.4(\% \text{Si}) + 23(\sqrt{N_r} + 1.13(d^{-\frac{1}{2}}))] \quad (2)$$

$$\text{抗拉强度(MPa)} = 15.4[19.1 + 1.8(\% \text{Mn}) + 5.4(\% \text{Si}) + 0.25(\% \text{珠光体}) + 0.5(d^{-\frac{1}{2}})] \quad (3)$$

$$\text{冲击转变温度 } ^\circ\text{C} = -19 + 44(\% \text{Si}) + 700\sqrt{N_r} + 2.2(\% \text{珠光体}) - 11.5(d^{-\frac{1}{2}}) \quad (4)$$

$$VT_n = 4.02TS(\text{kgf/mm}^2) - 18.0Na + 196C\% - 125 \pm 14 \quad (5)$$

d:晶粒度尺寸,Na:晶粒度番号

铌钒对钢的屈服强度和剪切断口形状转变温度的影响的比较还可以从图 2 进行分析,0.18C—0.05Nb 是最佳组合。这正是高强度,高韧性,可焊热轧钢筋的选择^[10]。

微合金化技术,是提高 C、Mn、Si 系低合金钢的强度和韧性的生产技术。影响强度和韧性的因素中有 C、Mn、Si、N 等的化学成分,珠光体和晶粒尺寸。提高强度同时又降低韧脆转变的因素只有晶粒尺寸。如前所述不难理解,用 Nb 微合金化生产热轧钢筋是最佳选择。

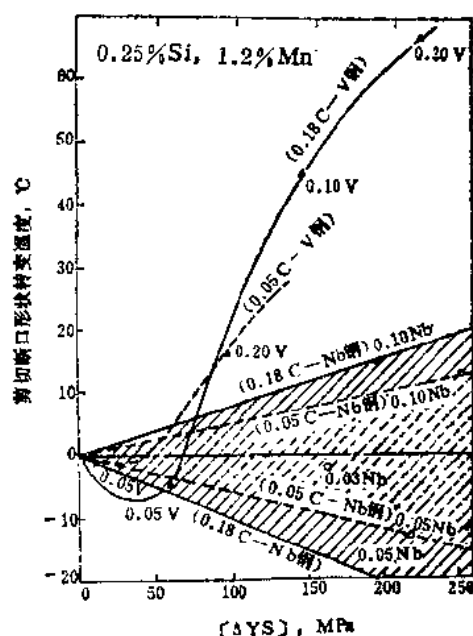


图2 屈服强度的增加和断口形状转变温度的变化

五、合金设计要点

按美国钢铁学会的说明,低合金高强度钢是指专门的一组钢,其化学成分经专门研制是有较高的机械性能值……在这类钢的生产通常更强调对机械性能的要求而不是化学成分。

微合金元素在钢中的应用,只是作为制钢技术,而不是某钢号的合金成分。这类钢的成分设计,决定于机械性能的等级和生产方法。

现以 Nb 或 Nb+V 为微合金化技术的添加剂,生产各级热轧钢筋为例,合金设计要点如下:

1. 碳含量和碳当量

碳含量是决定钢的机械性能和焊接性能的关键元素。碳当量包括全部化学成分在内的碳的当量数,由碳当量大小分钢筋为可焊和不可焊两种。按国际焊接学会提供的碳当量公式如下:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$$

式中 C、Mn、Cr、V、Mo、Cu、Ni 为百分数含量。

碳当量数实质上是淬透性指数。高于这个数,在焊缝溶合线处,淬透性很大,硬度很高。焊缝易出现冷裂现象。焊接难度较大。

ISO 6935-2 1991(E)规定可焊接钢筋 C_{eq} 值不大于 0.55%、碳含量不大于 0.25%。

ASTM A 706/706M-90 C_{eq} 值用下式计算:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{10} - \frac{Mo}{50} - \frac{V}{10}$$

C_{eq} 值不大于 0.55。炭含量不大于 0.33%。

BS4449—1988 C_{eq} 值用国际焊接学会公式计算,但 C_{eq} 值控制:250 级不大于 0.42%,460 级的不大于 0.51%,炭含量不大于 0.25%。

DIN 488—1984.9 第一部分各级钢筋对炭含量要求最严,Bst 500M 钢的炭含量不大于 0.15%。

炭含量除受焊接性能制约外,还受钢筋的韧性要求。

为了进一步改善韧性,特别是焊缝的韧性(包括低温韧性),现代钢筋生产,炭可控制到很低,美国钢筋生产实绩 SATM A 615 GR60 炭降到 0.10%及其以下。

我国Ⅲ级钢筋炭含量在 0.17%~0.25%,含量偏高,建议上限控制在 0.18%或 0.16%更好。

炭含量过高,珠光体的害处就变得严重。对应变时效变得敏感、冷脆转变温度升高。

2. 锰含量

我国钢筋标准规定在 1.60%Mn 以下,国际和国外各国准标,没有严格规定,一般说把 Mn/6 放进炭当量计算中。先进的钢筋生产厂,用不同的工艺生产时,其锰量差别较大,低至 0.5,高至 1.6%^[16]。

关于锰的使用要甚重,我国的钢筋中锰是主要强化、控制应变时效和 $\gamma-\alpha$ 转变的元素。锰的使用根据生产工艺在保证钢的机械性能的条件下,以经济为准则,可以变动。如风冷或穿水冷却均可降低锰含量^[13,16]。

微合金化钢的 Mn 量要根据生产条件调正。可得到更经济的成分。^[1,3,8]

3. Si 含量

大多数热轧钢筋中没有 Si 含量的规定。其炭当量计算公式中也没此项。

ISO 标准中 $Si \leq 0.65$,JIS 标准 ≤ 0.55 ,ASTM 标准 ≤ 0.55 ,中国和原苏联标准 Si 含量有上下限规定。

在一定条件说 Si 在钢筋中的应用是取决于采用镇静钢或半镇静钢生产工艺问题。如果用全镇静钢,最好有连铸与之组合,生产钢筋韧性好;如果用半镇静钢则锭到坏的收得率高,效益好。Si 有一定的抑制应变时效作用。

4. 固定氮元素

在抑制应变时效脆化方面国际标准和国外标准^[11]中都注有钢中有足够的固定氮元素的要求。20Mn Si 钢筋中加入 0.025Al,可改善反弯性。用 Nb、V、Ti 微合金化可完全抑制应变时效脆化现象^[4,6,7,14]。

5. P、S、N 元素

在国际标准和国外标准中对 P、S、N 元素都有规定。一般说 P、S 不大于 0.06%,N 不大于 0.012%。但在典型成分中 P、S 都在 0.03 以下,甚至 0.02 以下。

N 是应变时效敏感元素。0.008%N+0.02%Al 才能抑制应变时效,反弯合格。除特殊情

况外 N 元素也是越低越好,在 V-N 微合金化钢中应精确控制化学当量比。即使是这样,在焊缝区, N 的应变时效特性,也要重新表现出来。

6. Nb、V、Ti

Nb 或 Nb+V 在钢筋中的作用有四:

- (1) 提高强度,特别是屈服强度,0.02%Nb 可提高 50MPa。
- (2) 提高韧性即提高断裂吸收功和降低冷脆温度。
- (3) 改善焊接性能。
- (4) 提高中、高碳钢筋的延性和冷弯性。

大量生产实践指出,钢筋中加 Nb 一般在 0.01~0.05%,如果有控冷、控轧设备,加入 0.01~0.02%Nb 亦可满足要求。

V 的强化作用较 Nb 低。从图 3 可见 Nb 的作用 2 倍于 V。因此可用少量 Nb 取代用量较多的 V 是合乎情理的。

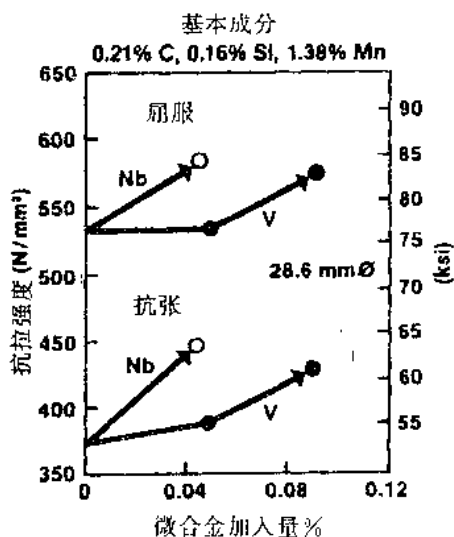


图 3 Nb 或 V 微合金化可焊接
钢筋拉伸性能

Ti 在钢筋中主要是改善焊缝溶合线及热影响区的韧性,用 0.02%Ti 阻止焊缝区的晶粒长大,是被公认的标准技术。

Nb、V 复合微合金化。在生产强度更高,韧性、焊接性能更好,而冷脆转变温度更低时可采用 Nb、V 复合微合金化处理。Nb、V 在钢中的作用是各自发生而累加的。如图 4。

例如 0.08%C 1.50%Mn 0.55%Si 0.06%Nb 0.10%V 的钢,其碳当量 0.36%、屈服强度 390MPa、-50℃夏比 V 型缺口冲击值为 40 焦耳〔内罗尔数据〕。

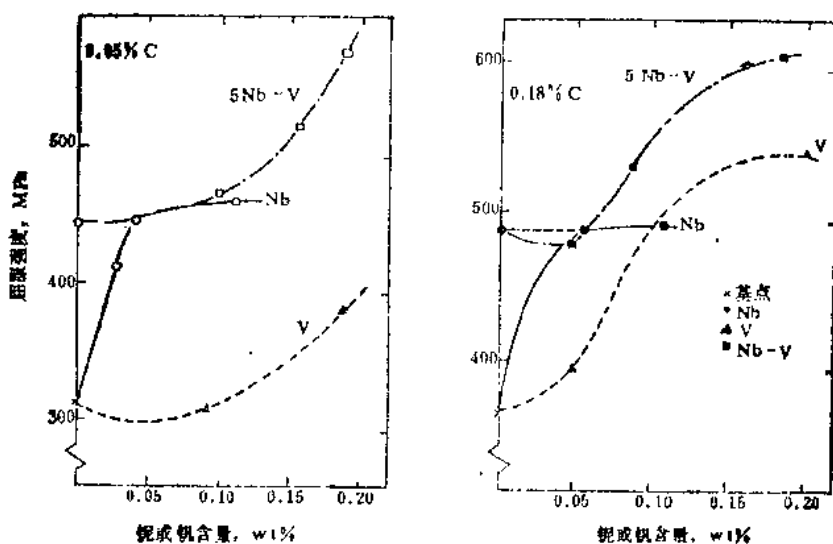


图4 添加铌或(和)钒对轧制钢的强度的影响

Nb 微合金化钢筋的化学成分例

表 2

强度级别 MPa	设备特点	化 学 成 分				注
		C	Si	Mn	Nb	
410	330 毫米 连轧机	0.32 0.20	0.05 0.3	1.4 1.45	0.03 0.03	微合金化半镇静钢 硅镇静钢,可焊接
490		0.35	0.35	1.45	0.03	
450	控 轧	0.09	0.51	1.67	0.033	可用到-160℃
Bst500/550	穿水工艺	0.20	0.2	1.00	0.025	曼内斯曼生产的
BS4449/250	两线式高速 生产车间	0.06	0.06	0.39	0.011	匹兹堡生产的 ⁽¹⁾
BS4449/460	高速高压缩 无扭精轧机	0.23	0.26	1.27	0.054	
BS4449/460		0.21	0.27	1.49	0.040	
A35 016		0.12	0.10	0.61	0.024	
Fe E 400		0.12	0.12	0.48	0.024	

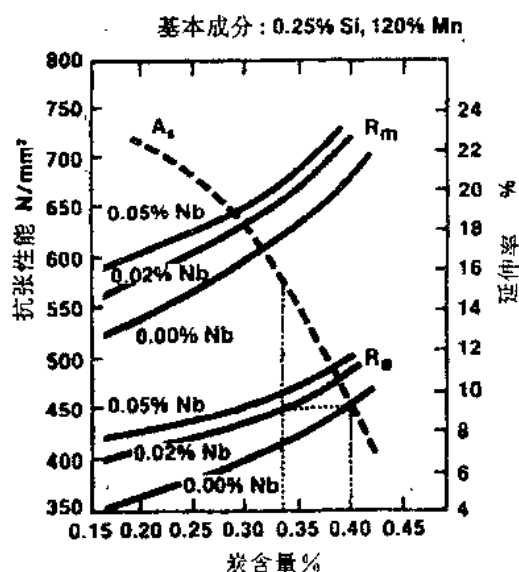
续表 2

强度级别 MPa	设备特点	化 学 成 分				注
		C	Si	Mn	Nb	
ASTM A615 GR 40		0.23	0.15	0.74	0.025	
" GR 300		0.10	0.10	0.65	0.036	
" GR 60		0.09	0.09	0.48	0.034	

7. 铌在非焊接钢筋中的应用

在北美非可焊接钢筋的产量大大超过可焊接钢筋产量。高强度钢种 Grade60(最低屈服强度 415MPa)这类钢筋中还包函高碳调质钢筋。

铌在钢筋的作用不在于改变焊接性。也不是提高强度,而是提高延性和可弯性。通常加入 0.01—0.02%Nb 来生产。由图 5 以可看出加入 0.02%Nb 以后的作用。

图 5 $\Phi 40\text{mm}$ 钢筋的机械性能

如图细点线所示,生产同级钢筋,碳从 0.4 降到 0.34 左右。延性约提高 1 倍。

六、铌微合金化生产热轧钢筋的生产要点

用微合金化技术,生产热轧钢筋,无疑是为了提高强度,提高焊接性能、改善低温韧性。

制定轧制工艺、加热温度、控制冷却速度(包括不同规格的冷却时间),是微合金化钢筋生