微合金化16MnSiVN钢筋的研制*

金桂华

（攀枝花钢铁研究院）

本文通过实验室钢种筛选、工业试生产、钢强韧化机理、钢筋应用技术等方面的研究，确立以16Mn为基础，添加微量合金化元素钒、氮的工艺技术路线，生产42kg级可焊接钢筋。16MnSiVN钢筋钢采用钒渣直接合金化，可进一步降低钢的成本，按现行Ⅱ级钢筋设计，可比Ⅱ级钢筋节约钢材12～20%，经济效益显著，同时建筑物具有较大的安全储备。

一、概　述

随着土木建筑的发展，大量高层楼房的出现，要求相应提高钢筋的强度，改善钢筋焊接性能。目前除日本外，世界上主要工业国家已淘汰强度级别相当于我国Ⅰ级的钢筋。苏联虽有30kg级钢筋，但使用中优先采用屈服强度为40kg级钢筋。美国及西欧一些主要国家均采用屈服强度为400MPa钢筋，其产量占钢筋总产量50%以上。近来欧洲又生产500MPa等级混凝土增强钢筋。正在研制大于600MPa含钒氮微合金化钢筋[1]。而我国目前Ⅰ级钢筋仍占钢筋总产量90%以上。

我国Ⅰ级钢筋强度级别较低，因而有些构件由于钢筋强度不够而增加用钢量，甚至会出现截面配筋量过多而造成施工困难。屈服强度为380MPa的Ⅲ级钢筋，其强度不能充分保证，焊接性能较差，不能满足用户使用要求。目前研制的42kg级可焊接钢筋强度高、韧性好、可焊性优良，因而建筑上应用它可比Ⅱ级钢筋节约钢材12～20%，同时提高我国建筑物安全水准。采用Ⅱ，Ⅲ级钢筋，我国建筑安全系数平均为1.4，预计采用42kg级钢筋安全系数可提高到1.7。因此，新研制的42kg级钢筋较Ⅱ，Ⅲ级钢筋具有明显的经济效益和社会效益。

二、研究程序

我国Ⅱ，Ⅲ级钢筋主要是单纯采用提高含碳量，利用硅、锰固溶强化。因而不能很好地解决强度、塑性、韧性、可焊性之间的矛盾。而微合金化却是解决这一问题的好途径。

（一）设计思想

在碳钢中加入微量钒，特别是钒氮复合加入，可在轧制及冷却过程中析出极细小的弥散的碳氮化物。这些细小分散的质点可以大幅度提高钢的强度。因此，采用微合金化既可保证强度又可大幅度降碳，从而使钢材具有优良的焊接性能。

文献〔1，2〕指出，氮化物比碳化物对晶粒细化和弥散强化效果更显著，把氮元素作为一个重要元素利用，可获得综

---

*参加本课题的单位有：攀枝花钢铁公司、攀枝花钢铁研究院、四川省建筑科学研究所、冶金部建筑研究总院、黑龙江省低温建筑科学研究所，上海市构件研究所，北京钢铁学院，长沙矿冶研究院

合性能良好的优质钢材。文献[3]介绍，若在钢中加入约0.012%N，则可使钢中含钒量由0.12%下降到0.07%，而强度级别不变，还可大幅度降低含钒钢成本。

钢中硅、锰主要起固溶强化作用。若钢中硅含量在0.3～0.5%，钒的收得率可达85～95%[3]。

（二）工业性试验

实验室研制的五个钢种15MnVTi，20MnVTi，15MnVN，20MnVN，15MnSiVN中，15MnSiVN强度、韧性、焊接等综合性能最佳。因此，42kg级可焊接钢筋选定为16MnSiVN。

在攀钢120t氧气转炉上按成分范围（%）：C0.14～0.20，Si0.2～0.6，Mn 1.0～1.4，S≤0.05，P≤0.05，V0.05～0.10，N0.007～0.015。分别采用钒铁与钒渣直接合金化两种工艺冶炼了9炉16MnSiVN钢，并研究了两种工艺对16MnSiVN钢性能的影响。

16MnSiVN钒渣直接合金化钒收得率68.6～100%，钒平均收得率达83.4%。钢中非金属夹杂分布与形态、力学性能都与钒铁合金化相同。但钒渣直接合金化16MnSiVN吨钢成本可降低23元。

三、性能测试

为研究不同规格对力学性能的影响，将碳当量上、中、下限16MnSiVN钢（成分见表1）轧成φ16，20，25螺纹钢筋进行力学性能测试试验。

（一）拉伸性能

钢筋直接进行拉伸试验，结果见表2。

16MnSiVN钢化学成分(wt%)　　表1

炉号	成分范围	C	Si	Mn	P	S	V	N	C_{eq}
34564	下	0.16	0.60	1.20	0.015	0.046	0.06	0.01	0.36
34674	中	0.18	0.63	1.19	0.012	0.04	0.082	0.0125	0.38
852354	上	0.18	0.41	1.30	0.013	0.033	0.083	0.014	0.40
14433	上	0.23	0.77	1.40	0.014	0.035	0.09	0.0143	0.46

（二）冷弯与反弯

反弯试验先将钢筋冷弯45°，然后在100℃下保温30min，冷却至室温后回弯23°。反弯、冷弯合格率100%。

（三）断口观察

16MnSiVN钢筋在a_k大于50J/cm²的判定条件下，脆性转变温度为－70～－80℃之间。

对低温断口进行电子扫描观察，随着冲击温度的降低纤维区面积减少，放射区面积增加，－40℃断口延性区约占断口面积40%。断口形貌见照片1，2。

（四）钢筋弹性模量及膨胀系数（表3）

在28～411℃钢筋膨胀系数为14.3×10^{-6}/℃。

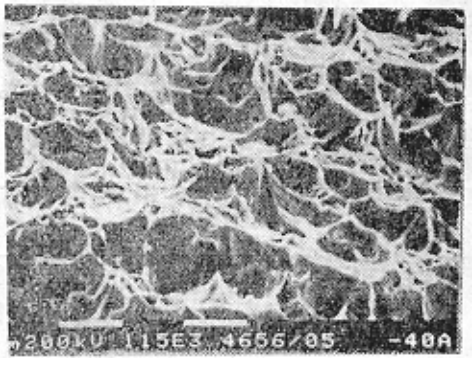
（五）钢筋疲劳性能

1. 纯弯曲疲劳试验

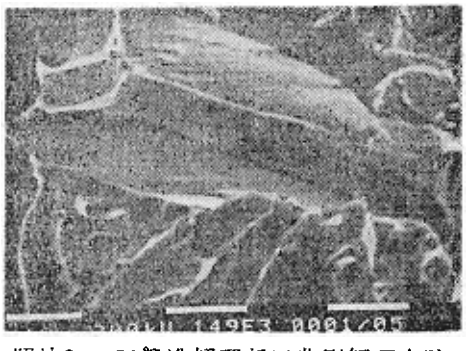
16MnSiVN钢筋拉伸性能　　**表2**

成分范围	规格	σ_s ×9.8MPa	σ_b ×9.8MPa	δ_5 %	σ_b/σ_s
下	φ25	49.4 47.7—59.3	63.1 61.2—62.3	26.6 21.9—29.8	1.28
下	φ16	51.3 49.5—53.9	63.9 61.9—65.5	28.0 18.8—31.1	1.25
中	φ25	49.1 47.2—51.2	64.5 60.7—67.7	24.9 20.4—28.2	1.31
中	φ16	52.1 46.3—54.9	66.3 63.9—68.7	27.8 23.8—31.5	1.27
上	φ25	50.2 48.5—51.5	63.6 61.9—65.1	28.0 23.9—31.5	1.27
上	φ16	51.7 46.6—55.1	65.7 63.5—70.8	29.5 25.4—32.9	1.27

注：攀钢小轧厂冷床短，因而轧制16MnSiVN螺纹钢筋时，在450轧机后将轧件用乙炔割开，造成终轧温度较低（900～950℃）、力学性能波动较大



照片1　-40℃低温延性断口形貌



照片2　-50℃准解理断口典型解理台阶

钢筋弹性模量E(MN/m²)　　**表3**

热轧	未预应变	预应变＋时效
1.99×10⁵	2.03×10⁵	1.94×10⁵

循环次数$N_0=5\times10^6$，疲劳极限σ_{-1}=372.4MPa，$\sigma_{-1}/\sigma_b=0.69$。

疲劳断口中瞬断区约占总面积30～40%。有些试样瞬断区分为韧性带与脆性带，疲劳源多产生在亚表面夹杂附近。

2. 钢筋拉伸疲劳性能

疲劳循环次数2×10^6，$\rho=0.1$，母材疲劳强度为356.7MPa。疲劳折减系数α=0.56。按照钢筋砼结构设计规范(TJ10—74)，对钢筋疲劳设计强度的取值计算，16MnSiVN疲劳强度为259.9MPa，高于(TJ10—74)规范要求。

四、钢筋焊接性能

(一) 钢筋焊接工艺与性能

焊接实验采用闪光对焊与电弧焊。闪光焊采用二种工艺。闪光-一次预热-闪光，连续闪光焊。电弧焊采用帮条、搭接、剖口焊。各种焊接工艺参数均按目前Ⅰ级钢筋焊接规范控制。

焊接实验表明，焊接接头拉力试验均断于母材，且与母材等强度。断口距焊缝

大于40mm。焊接接头冷弯90°，焊接合格率100%。

点焊实验采用常规生产时的参数，并相应上下各浮动一档。点焊试验共2187根，合格率100%。最大抗剪力2200～2300kg，最小抗剪力在1300～1760kg。

可见，16MnSiVN钢筋焊接工艺适应性强。焊接参数宽，适应于现场大、小火焊接。连续闪光焊焊接热影响区显微硬度低，产生冷裂纹敏感性小，因而16MnSiVN钢筋可不预热，简化了焊接工艺。

对于钢筋闪光对焊接头疲劳强度最大应力2.14MPa，$\alpha=0.34$检验，三根试样均通过200万次不断裂。满足设计和使用要求。

（二）焊接金相研究

观察了12组闪光及电弧焊接工艺金相组织及热影响区宽度、显微硬度。

电弧焊无过热区，无魏氏组织，因而热影响区宽度小。两种焊接工艺，焊缝铁素体晶粒度为3～4级。正火区铁素体晶粒度达11～12级。不完全重结晶区9～10级。

16MnSiVN热影响区宽度见表4，显微硬度见图1。

闪光焊焊缝、热影响区的冲击韧性见表5。

闪光、电弧焊热影响区宽度 表4

焊接工艺	过热区 mm	正火区 mm	不完全重结晶区 mm	热影响区宽度 mm
闪光一一次预热-闪光	4.5	4.5	1.5	10.5
连续闪光	2.5	3.0	2.0	7.5
电弧焊	/	4.5	2.0	6.5

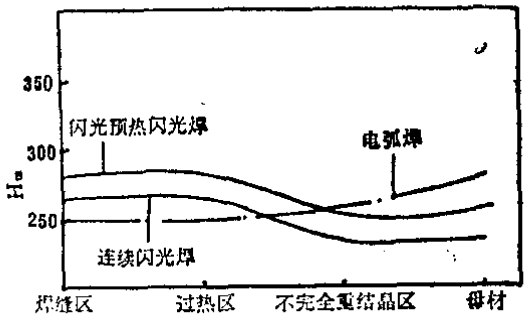


图1 中限成分三种焊接工艺热影响区硬度分布

五、冷拉时效与松驰性能

冷拉人工时效较冷拉未时效后$\overline{\sigma_s}$可提高41.1MPa，$\overline{\sigma_b}$提高7.8MPa，δ_5下降2.4%。冷拉时效后δ_5可达22.8%，塑性良好。而-40℃冷拉时效σ_s、σ_b增加较多，塑性下降不明显。-40℃冷拉时效δ_5达27.1%。

16MnSiVN钢筋拉力损失力只有1%，钢筋松驰性能优良（表6）。

六、试验结果与分析

（一）化学成分对力学性能的影响

随着V/C，V/N比增加（碳含量在0.16～0.20%），屈服强度、抗张强度增加（见图2）。

钢中含铝量超过0.3%，铝将大量占用钢中的氮，从而减少钢中氮化钒、碳氮

闪光焊焊缝、热影响区冲击韧性（×10，J/cm²）　　表5

成分范围	规　格	焊缝		热影响区	
		闪光-预热-闪光	连续闪光	闪光-预热-闪光	连续闪光
下	φ25	6.3	5.1	22.5	23.3
中	φ25	6.8	5.9	18.9	20.1
上	φ25	6.1	3.2	/	11.1

拉力为9t的条件下钢筋的松弛性能　　表6

拉力时间	1 min	2 min	5 min	1 h	10 h	100 h	总　计	占拉力，%
损失力，kg	14	8	18	29	3.7	8.7	90	1
损失力，kg	22	7	17	31	9	12	109	1.2
损失力，kg	0	0	18.5	6	22	13	73	0.85

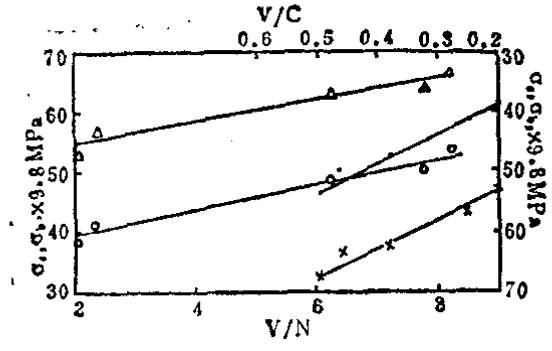


图2　V/N，V/C比对力学性能的影响

化钒析出，降低钢的强度。钢中铝含量在0.02～0.03%最好。若钢中铝含量为0.026%，将有54%的铝固溶钢中，18%的铝形成氮化铝，28%的铝形成三氧化二铝。氮化铝一般加热到1300℃才能完全溶解，因而在高温时氮化铝可以阻止奥氏体晶粒长大。

16MnSiVN钢筋与20MnSi钢筋相比（碳、锰、硅含量相近，规格相同），σ_s提高109.8MPa，σ_b提高69.6MPa，δ_5下降7%。

化学相分析法测定的钢中固溶钒及碳氮化钒的比例见表7，钢中氮形成各类化合物的比例见表8。

钢中钒的定量相分析（%）　　表7

成分范围	钢中含钒量	V_{sol}	$V_{(Fe_3C)}$	$V_{(V_4C_3)}$	$V_{(V(C,N))}$	$V_{(VN)}$
下	0.06	0.025	0.0047	0.0017	0.025	0.00082
中	0.082	0.030	0.0068	0.002	0.03	0.00064
上	0.09	0.030	0.0088	0.005	0.04	0.00088
平均	0.077	0.0283	0.00677	0.0029	0.032	0.00071
各量占总量百分比	/	40	9.6	4.1	45.3	1.0

钢中氮的定量相分析（%） 表8

成分范围	钢中含氮量	$N_{(AlN)}$	$N_{(V(C,N))}$	$N_{(VN)}$	ΣN	Ni
下	0.01	0.0030	0.0033	0.0050	0.0113	/
中	0.0125	0.0035	0.0041	0.0052	0.0128	/
上	0.0143	0.0038	0.0038	0.0059	0.0135	0.0008
平均	0.0123	0.0034	0.0037	0.0054	0.0125	/
各量占总量百分比	/	27.5	29.5	43.2	/	/

由表可见，钢中氮主要形成V(C,N)或VN，几乎无游离态氮存在，因而钢的时效倾向很小。所以16MnSiVN钢筋中只有钒氮比在6～9时，钢的强韧性，时效性配合最佳。

（二）组织对力学性能的影响

16MnSiVN金相组织为铁素体+珠光体。由于钒的加入，延长了奥氏体转变的孕育期，提高了奥氏体粗化温度(1150℃)，从而细化了晶粒。本钢种热轧钢筋晶粒度为9～10级，铁素体晶粒直径为11.3～14.8μm。

随着碳含量的增加，珠光体百分数增加，珠光体团增大，钢的屈服、抗张强度增加。

钒是显著提高钢的淬透性元素之一[4]。钢中固溶钒可以延缓相变过程，因而钢中固溶钒量与珠光体片层间距有密切关系。随着冷却速度增加，珠光体片层间距减小（见图3）。热轧时珠光体片层间距约0.3μm，为极细珠光体。

钢中加入钒氮后，将在轧制及冷却过程中析出细小的碳氮化物。钢中VN比V_4C_3在奥氏体和铁素体中溶解度几乎低两个数量级。因此从奥氏体中首先沉淀的几乎全是VN，只有在沉淀过程中氮含量减少到20～30ppm时，沉淀相成分逐渐变

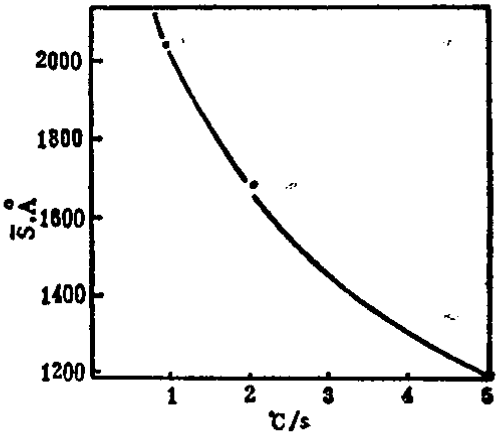


图3 珠光体片层间距与冷却速度的关系

化，先为V(C,N)，最后则是V_4C_3。

沉淀相粒子多为方颗粒（利用碳膜萃取复型及薄膜技术在Philips EM400及JEOL-100CXⅡ型电镜上观察沉淀相形貌），平均边长70～80Å，为无规则弥散分布。平均点阵常数$\bar{\alpha}$ =4.08Å，判断为氮碳化钒沉淀，沉淀相体积百分数约为1.154×10^{-3}～1.735×10^{-3}。沉淀相对屈服强度贡献约为88.5～108MPa。

第二相质点在铁素体中析出，强化了铁素体基体。同时，第二相质点在位错线上析出，将阻碍位错运动，钉扎位错，大大提高钢的强度。

16MnSiVN轧态试样铁素体中有微细孪晶结构，在低碳钢中铁素体微细孪晶结构很少见，但钢中加入钒常可观察到。

Heikkinen认为孪晶的出现，松弛了由于沉淀而产生的应变。同时，微细孪晶也可以阻碍位错运动，从而提高钢的屈服、抗张强度。

（三）力学性能回归分析

钢材力学性能与化学成分、显微组织及晶粒大小有关。回归分析中考虑了钒、氮、碳的交互作用。产品尺寸在一定情况下可以代表钢材冷却速度，因而晶粒大小可通过产品尺寸反应出来。珠光体量是影响力学性能因素之一，珠光体量与碳含量有关，因而回归分析中未考虑显微组织因子。

通过1000t钢材抽样测试，利用多元逐步回归进行数据处理。回归分析结果如下。

$$\sigma_s(MPa) = 9.8[16.54 + 23.78Si + 15.30Mn + 36.94V - 0.29\phi + 3523.9V \cdot N] \quad (1)$$

$R = 0.95$　　$S_y = 1.5$

$$\sigma_b(MPa) = 9.8[19.87 + 35.51C + 21.06Si + 20.78Mn - 0.08\phi + 167.15V \cdot C] \quad (2)$$

$R = 0.95$　　$S_y = 1.8$

$$\delta_5(\%) = 42.60 + 5.23Si - 97.85V \cdot C - 3748.2V \cdot N - 0.28\phi \quad (3)$$

$R = 0.95$　　$S_y = 2.43$

各式中元素含量为重量百分数，%；

R——复相关系数；

ϕ——产品直径，mm；

S_y——y因子标准离差。

从回归分析结果可以看出钒与氮的交互作用是影响屈服强度和抗张强度的重要因子。钒与碳、氮交互作用将引起钢的塑性下降。产品尺寸大小，也就是相应的冷却速度，对钢的屈服强度和塑性有显著影响。

七、结　论

1. 在16Mn基础上添加微量合金元素钒、氮生产钢筋，各项性能均达到42kg级可焊接钢筋技术条件。钢筋强度高，塑性、韧性好，脆性转变温度低，冷弯、反弯性能优良，钢筋时效倾向小。

2. 16MnSiVN钢筋碳当量小于0.43%，焊接性能优良。焊接参数宽，可采用大小火焊接，可按现行Ⅱ，Ⅲ级钢筋焊接规范进行焊接。

3. 采用钒渣直接合金化与钒铁合金化生产16MnSiVN钢筋，其纯洁度与力学性能相近。但钒渣直接合金化比钒铁合金化吨钢成本降低23元，经济效益显著。

4. 16MnSiVN钢筋应用性能良好，满足建筑工程各项要求。特别是疲劳、松弛、焊接性能大大优于现行Ⅱ，Ⅲ级钢筋。

5. 从沉淀相形貌观察及化学定量相分析，充分说明了16MnSiVN钢力学性能高，主要是V(C,N)沉淀强化和晶粒细化所致。

参 考 文 献

〔1〕国际低合金高强度钢发展动向，卧龙岗国际低合金钢会议资料，1985年

〔2〕国际高强度低合金钢会议论文摘要，New trends in science and technology of microalloyed, Michael Korchynsky, 1985, 11

〔3〕微合金化螺纹钢筋，美国碳化物公司交流钒在钢中应用资料，1981

〔4〕Pickering F.B., HSLA Steels'85 Extended Abstract