

V、N共存埋弧焊焊缝中V的析出相行为的研究

王莲芳副教授 陈伯蠡教授 赵其旺硕士*

(北京 清华大学)

摘要

已有的 $15MnVN$ 钢工字梁大线能量埋弧焊研究结果表明, 焊缝的强度总是过高而韧性偏低。本文利用透射扫描电镜和能谱仪研究了 $Mn-V-N$ 和 $Mn-Mo-V-N$ 系焊缝中V的析出相行为和V、N的存在形式及其对焊缝强韧性的影晌。试验表明, 在焊态或SR态下, 由于焊缝冷速大, 或因重复加热温度不够高, V、N均不能以非共格形式析出。V的共格析出是使焊缝强度过高和韧性偏低的重要原因。

主题词 han jin yan
焊缝 金相组织 研究

0 序言

$15MnVN$ 钢用于长江某大桥的焊接工字梁, 其角焊缝要求采用大线能量单道埋弧焊。在熔合比较大的情况下, 焊缝中必然存在较多的V和N。已有的研究^[1]说明: V和N的存在使焊缝强度过高, 韧性偏低。V对韧性的影响因含N量不同而不同; 大范围内变化V/N比值, 没有找到对韧性影响的V/N最佳比值。

关于钢材中微量元素V的析出相行为的研究已有不少报道^[2]。认为 $15MnVN$ 钢正火处理后, 强韧性综合性能好是由于弥散均匀分布的微细VN、VC或V(C、N)析出相沉淀强化和晶粒细化的作用。

关于焊缝中析出相行为的研究报道不多。一般认为^[3~4], 含微量V的焊缝金属的脆化(SR处理或多层焊条件)与存在V的析出相有关。但在大线能量埋弧焊条件下,

* 参加本论文工作的还有冯卉青, 黄贤德。

V、N共存焊缝中是否存在V、N的析出相和V、N存在形式以及焊缝过于强化与韧性偏低的根本原因等问题，尚未见国内外的研究报道。

本文目的在于查明在大线能量埋弧焊条件下，V、N共存焊缝中V、N的存在形式及其对焊缝性能影响的原因。

在微合金化钢中，一般认为析出相的颗粒在 $100 \times 10^{-10} \text{ m}$ 以下，因而使析出相的研究成为一项复杂和难度较大的工作。

1 试验条件与试验方法

1.1 试样成分及条件

试样均是从V型坡口埋弧焊焊缝中截取的。根据合金系统、试板尺寸和焊接状况不同分为三类试样，三类试样的编号、化学成分和机械性能如表1所示。机械性能数据均按有关国家标准测试得出的。

第Ⅰ类试样为Mn-V-N系单道焊焊缝(焊态)。根据含N水平的不同分为A组和B组试样，两组试样的含N水平不同，V含量均为系列变化。试板尺寸为 $400 \times 350 \times 20 \text{ mm}$ ，焊接线能量为 $42 \sim 44 \text{ kJ/cm}$ 。

第Ⅱ类试样为Mn-Mo-V-N系单道焊焊缝(焊态)。三个试样含V、N量有所不同。试板尺寸为 $500 \times 300 \times 56 \text{ mm}$ ，为使其 $t_{s/5}$ 与实际工字梁焊接角焊缝的 $t_{s/5}$ 相近，

表1 试样化学成分及机械性能

类别	试样 编号	化 学 成 分 (%)									机 械 性 能					备注	
		C	Mn	Si	S	P	V	N	Mo	Ti	Cr	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_s (%)	ψ	$\nu E_{-40^\circ C}$ (J)	
I 组	21	0.10	1.46	0.22	0.017	0.017	0.017	0.0095		0.015		450.8	588.0	20	65	13.72	
	22	0.14	1.37	0.25	0.022	0.017	0.051	0.0091		0.012		449.8	637.0	23	64	12.74	单道焊焊缝 AW
	23	0.10	1.62	0.24	0.019	0.017	0.15	0.010		0.012		509.6	627.2	21	67	14.70	
	24	0.12	1.42	0.25	0.016	0.015	0.19	0.010		0.012		568.4	705.6	19	64	13.72	
II 组	29	0.11	1.46	0.27	0.014	0.018	0.03	0.0068		0.009		509.6	646.8	22	63	16.66	
	30	0.11	1.54	0.28	0.010	0.017	0.09	0.0055		0.009		548.8	666.4	20	64	18.62	单道焊焊缝 AW
	31	0.11	1.29	0.24	0.015	0.016	0.10	0.0063		0.006		548.8	656.6	19	62	17.64	
	S2	0.13	1.49	0.28	0.018	0.020	0.109	0.010	0.15			544.7	706.2	22	60	46.06 (-20°C)	
III 类	S10	0.12	1.43	0.24	0.018	0.018	0.090	0.010	0.17			543.4	688.9	23	62	39.89 (-20°C)	单道焊焊缝 AW
	S16	0.11	1.36	0.22	0.017	0.014	0.078	0.009	0.18			492.0	641.0	22	63	42.43 (-20°C)	
钢板	581	0.07	1.59	0.36	0.006	0.025	0.058	0.011	0.34	Ni 0.09	0.11	485.7	600.0	20	62	27.44	多道焊焊缝 AW
	582	0.09	1.63	0.38	0.006	0.020	0.049	0.011	0.27	0.10	0.10	547.3	647.9	20	58	11.76	多道焊焊缝 SR
		15MnVN	0.18	1.56	0.39	0.029	0.021	0.15	0.02			444.0	618.0	32	69	41 (-20°C)	正火态

采用的焊接线能量为 $37\sim38\text{kJ/cm}$ 。试板预热温度为 $140\sim160^\circ\text{C}$ 。

第Ⅲ类试样为Mn-Mo-V-N系多道焊焊缝(AW和SR态)。试板尺寸为 $500\times300\times20\text{mm}$, 焊接线能量为 $29\sim30\text{kJ/cm}$, 焊三层, 层间温度为 125°C 。SR处理条件为 620°C 保温1 h、炉冷。

为了对比, 同时观察了正火态的15MnVN钢母材试样和经正火处理(900°C 保温1 h、空冷)的S2试样。

1.2 试验方法

为了确定各试样中有无析出相及相的成分, 采用了非水电解液恒流萃取法做焊缝碳萃取复型^[5], 在H-700和H-800透射电镜上进行相形貌观察分析; 采用能谱仪进行相成分分析; 采用萃取分离定量方法^[6]和X射线衍射、电子衍射分析方法进行了相结构分析。

2 试验结果

2.1 透射电镜观察和能谱分析

对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类试样碳萃取复型进行的观察和分析结果表明, 无论是单道焊焊缝, 还是多道焊焊缝, 无论是焊态还是SR态焊缝中, 只发现有含Al、Cr、Fe的析出物, 而均未发现有含V的析出物(如图1、2、3)。由此可以认为, 这三类焊缝中不含大于 $50\times10^{-10}\text{m}$ 的非共格的V的沉淀析出相。

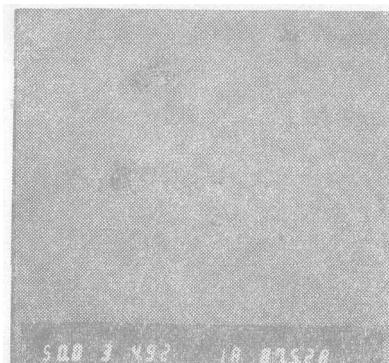
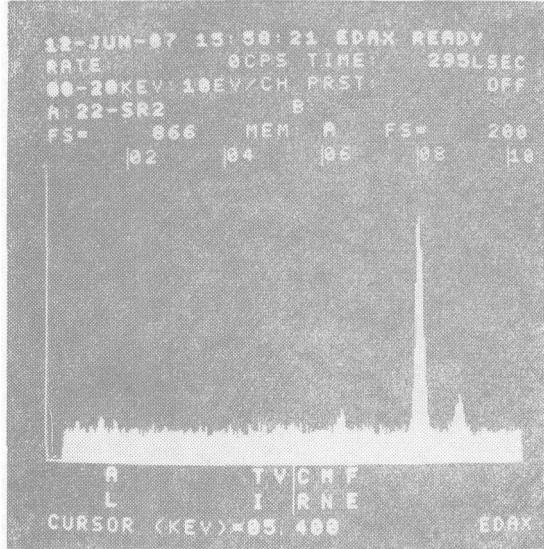


图1 S2试样中的析出相形貌



(a)



(b)

图2 SR态22*试样中的析出相形貌和能谱分析图

(碳萃取复型)

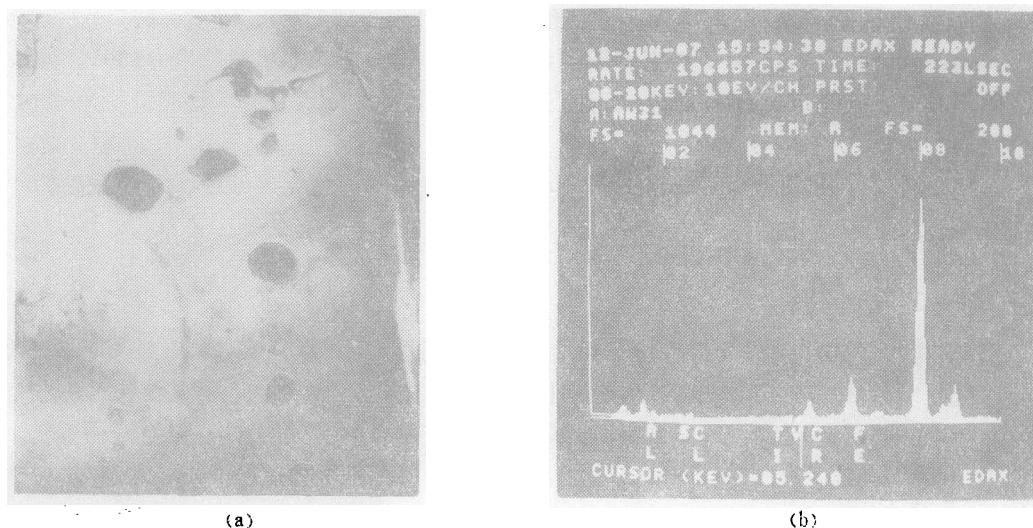


图3 SR态582#试样中析出相形貌($\times 20k$)和能谱分析图
(碳萃取复型)

对经正火处理的S2试样碳萃取复型观察结果表明：经正火处理后焊缝出现了大量的微细析出相，析出相的尺寸小于 200×10^{-10} m。能谱分析结果表明：析出物含V，也有少含量Al和Fe，如图4所示。

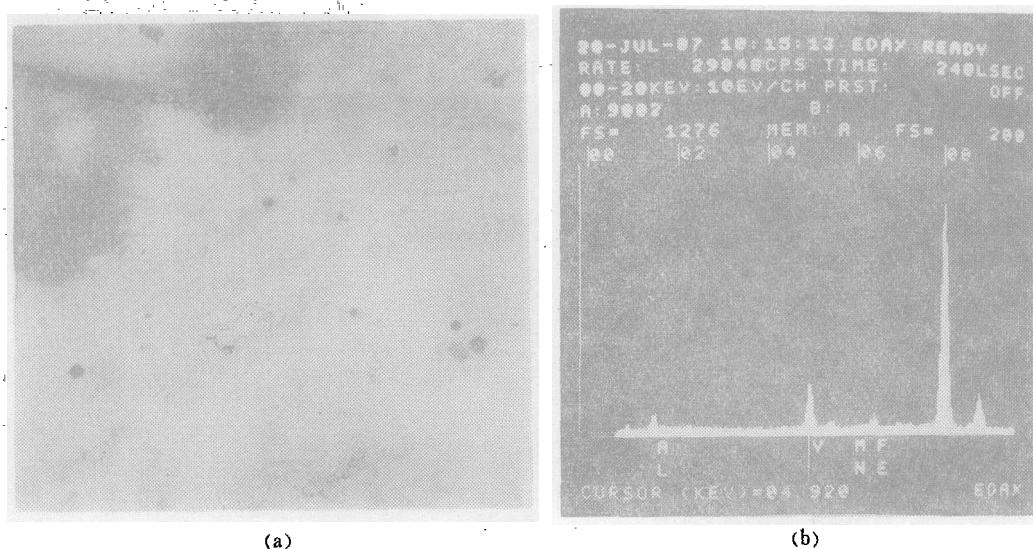


图4 正火态S2试样中析出相形貌($\times 86k$)和能谱分析图

为了对比，观察了正火态的15MnVN钢的碳萃取复型，看到有大量弥散分布的析出相(图5a)，经能谱分析证明这些析出相含V(图5b)，选区电子衍射分析结果，析出相为面心立方结构，晶格常数在 $4.066 \times 10^{-10} \sim 4.1686 \times 10^{-10}$ m之间，证明析出相是V的碳

氮化合物(图5c)。与正火态的焊缝试样对比,15MnVN钢试样中析出相的尺寸较大(大于 200×10^{-10} m)。说明这种钢中的V是以非共格的碳、氮化合物形式存在,从而能得到较好的综合机械性能。

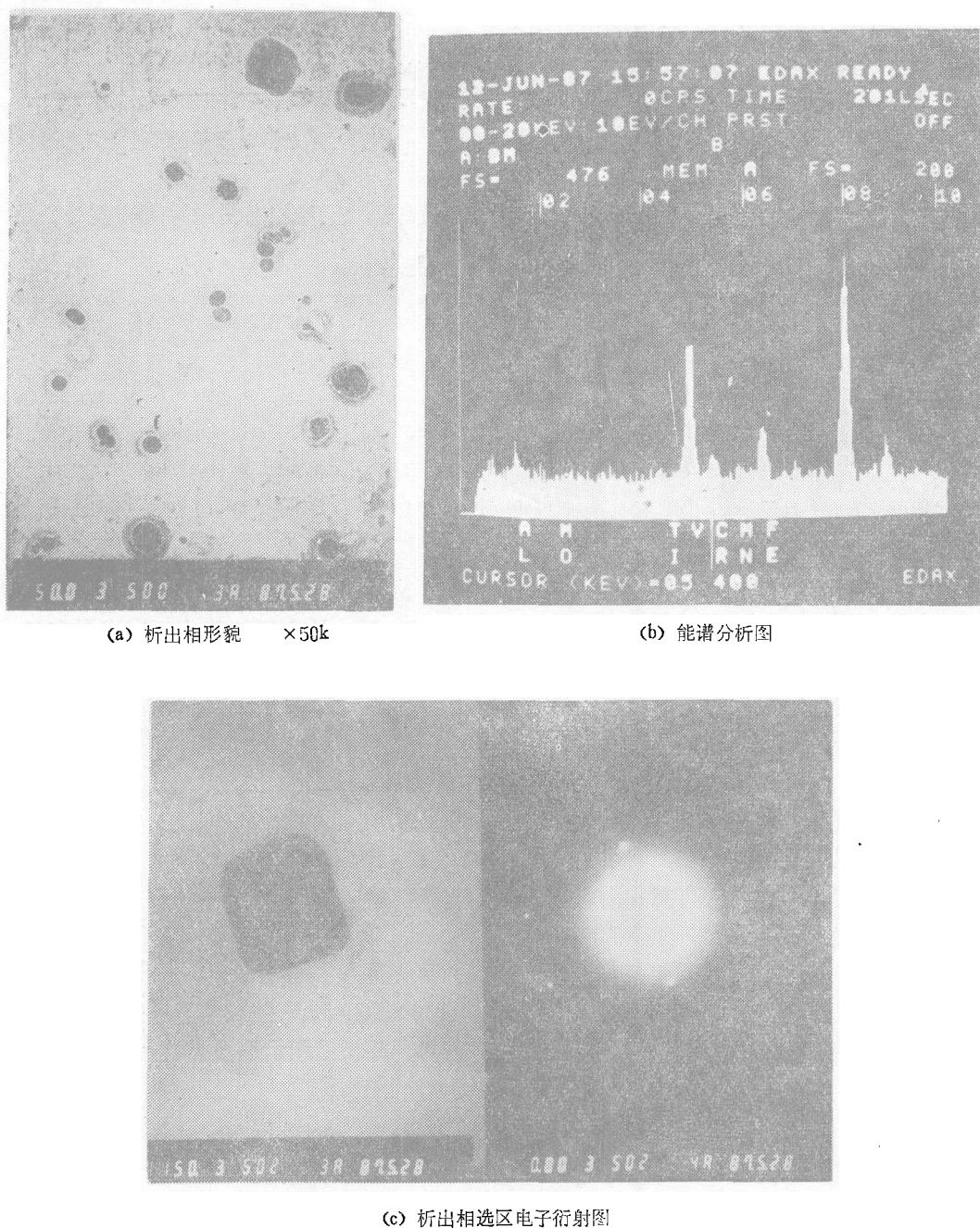


图5 母材15MnVN钢碳萃取复型中的析出相

2.2 定量分析

对焊态下的S2、S10、S16试样非水解萃取后的残渣进行了定量分析。X射线衍射结果发现总析出物为渗碳体 M_3C ，将 M_3C 与其它物质分离后的X射线衍射结果如图6所示。

由图6可看出，Mn-Mo-V-N系焊缝中除存在大量 Fe_3C 外，还存在 Al_2O_3 、 α -MnS、 α -石英等夹杂物。X光结构分析结果未发现有V的析出物。定量相分析结果列于表2。

表2 M_3C 和MN定量分析结果

试样号	M_3C 中元素含量, % (钢)				MN中元素含量, % (钢)		
	Fe	Mn	V	Mo	Fe	V	Mo
S2	0.80	0.034	0.001	0.055	<0.001	<0.0005	<0.001
S10	1.20	0.055	0.002	0.053	<0.001	<0.0005	<0.001
S16	1.16	0.058	0.0009	0.051	<0.001	<0.0005	<0.001

由表2可看出， M_3C 主要应是 Fe_3C ，而Mn、Mo、V均可少量溶于 Fe_3C 中，V在 Fe_3C 中的溶解量很少。由定量相分析结果知道，Mn-Mo-V-N系焊缝中不存在V和Mo的非共格沉淀析出物。

为了弄清焊缝中N的存在形态，对焊缝中化合的氮量进行了测定，结果列于表3。

由表3可知，焊缝金属中大约有一半的氮是以化合状态存在，其余的N存在于固溶体中或呈游离态。由此可看出，焊缝中没有强固N元素存在时，N固溶在基体中从而引起不利影响。经分析后认为，化合N的存在形式主要为 $Fe_3(C,N)$ 及少量 AlN ，另外可能存在颗粒小于 $50 \times 10^{-10} m$ 、并且与基体共格的VN析出相。而固溶N和可能存在的与基体共格的微细的VN析出相均会使焊缝过于强化和使韧性偏低。

3 试验结果分析

研究结果表明：无论是在焊态，还是回火(SR处理)态，无论是单道焊焊缝还是多道焊焊缝中都没有发现V的析出物。而在正火态的焊缝中和15MnVN(正火态)钢

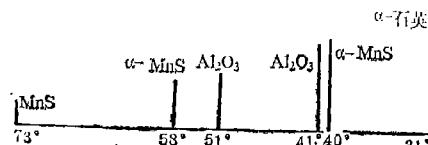


图6 焊态下S2焊缝的X射线衍射图

表3 焊缝中化合N测定结果

试样号	样品中总N量(%)	化合N量(%)
S2	0.010	0.0040
S10	0.010	0.0048
S16	0.009	0.0047

板试样中均发现有V的析出物。此结果可做如下分析解释：

V是强碳、氮化合物形成元素，当V与C、N共存时会形成相应的化合物，而且这种化合物的稳定性高^[7]。焊缝中的V、N主要是由钢板过渡来的。由于焊缝金属在焊接过程中处于高度过热状态，难以形成V的化合物的核心，而在熔池冷却时高度过冷，又难以扩散。即使有V的化合物的核心，V的碳氮化物聚集长大的速度比其它碳化物要小得多^[7]。加之在SR态时焊缝重新加热温度偏低，在多道焊时焊缝被重新加热部位的加热时间过短，都不足以使V和碳、氮形成颗粒较大（大于 50×10^{-10} m）的非共格沉淀析出相。另外，V在 α -Fe中可以无限固溶，只是在碳、氮存在的条件下，形成碳、氮化物的趋势比固溶趋势大才得以析出。图7是Fe-V-C三元相图^[7]，从图7可以看出，在低C时无论V量多高都不会生成VC；在低V时无论含碳量多高也不会生成VC。生成VC的下限V含量为0.1%左右。当N存在时，这个值可能会减少。由此可以认为，VC不是总能析出的。

综上所述，焊态或SR态焊缝是有可能不出现非共格沉淀相，而形成极其微小的共格沉淀相，因而观察不到。只有在正火处理条件下，由于在较高温度下停留时间较长，才会形成较大颗粒的非共格沉淀析出相，因而可以观察到。

V的析出相的存在会引起焊缝金属性能的很大变化。当析出相颗粒比较微细，从而与基体存在共格关系时，析出相会引起组织的极大强化和脆性转变温度的大幅度提高^[2]。当析出相的颗粒较大时，析出相可使金属的韧性得到较大的改善，但也会引起强度的提高。

在所研究的15MnVN钢焊接情况下，V和N可能有两种存在形态：一是V和N固溶在铁素体基体或其它夹杂物、析出物中，二是V和N结合形成小于 50×10^{-10} m的析出物。如果V以固溶状态存在，它对焊缝金属的强、韧性均会产生一定的影响。N以固溶状态存在时，它将会起到强化作用且对韧性产生不利的影响。试验结果表明，焊缝中的V、N对焊缝产生了过分强化作用。因此作者认为，焊缝中V和N应是部分固溶，部分以化合态析出。V、N析出相的颗粒极其微小（ 50×10^{-10} m以下）且以共格沉淀析出，从而引起焊缝金属强度的大幅度上升。试验证明，有二分之一左右的N以化合态存在，这些化合N存在于V、N析出物AlN、 $Fe_3(C,N)$ 中。

4 结 论

1. 在埋弧焊条件下，对Mn-V-N或Mn-Mo-V-N系焊缝金属而言，无论是单道焊或多道焊，也无论是焊态或SR态，均未见有含V的碳氮化物析出相，只见到含Fe、Cr、Al等的析出相。

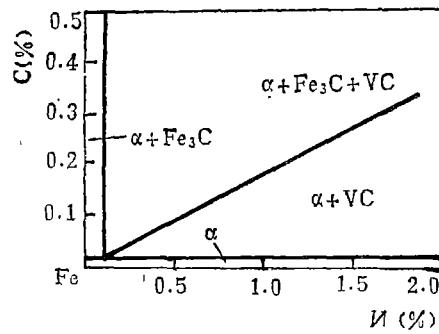


图7 Fe-V-C三元相图富铁的一角

2. Mn-V-N或Mn-Mo-V-N系焊缝金属，在非正火态下，V、N多以微细共格沉淀相存在，从而引起焊缝强度的大幅度提高和焊缝韧性的降低。只有正火态时才能使V、N析出相脱离与基体的共格关系而改善韧性和降低强度。

(1988年6月18日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 陈伯麟等. V、N共存埋弧焊焊缝韧性的研究, 第五届全国焊接学术会议论文. 1986.
- 2 鞍钢钢研所技术情报研究室. 锰、钒(铌)氮低合金钢专辑. 1975.
- 3 Dolby R E. Met Met Constr. 1982, 14 (3)
- 4 陈伯麟等. 焊接学报. 1987, 8 (3)
- 5 徐温崇等. 电子显微学报. 1985, (1)
- 6 马翔. 理化检验(化学分册). 1985, 21 (4)
- 7 章守华. 合金钢. 北京: 冶金工业出版社, 1981.

A STUDY OF THE V PRECIPITATION BEHAVIOR IN V AND N COEXISTENT SUBMERGED ARC WELDS

*Associate Professor Wang Lianfang,
Professor Chen Boli, Master Zhao Qiwang
(Tsinghua University, Beijing)*

Abstract

The investigations in the past show that the weld metals of 15MnVN steel by SAW process with high heat input usually have over high strength and comparatively low toughness. In this paper, the precipitation behavior of V and the existing forms of V and N in the weld metals of Mn—V—N and Mn—Mo—V—N systems were investigated with STEM and EDAX methods. Their effects on the strength and the toughness of the weld metals were studied. This work proved that under as-welded or SR treatment conditions V and N in the weld metals do not precipitate incoherently since the cooling rate of the weld is so high and the reheat temperature is so low. The coherent precipitation of V is the main factor which makes the strength of the weld metal very high but the toughness comparatively low.

Key words Weld Microstructure Study