

# V、Ti 微合金化对钢的力学性能的影响

## THE EFFECT OF MICROALLOYING WITH VANADIUM AND TITANIUM ON MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS

黄 平      龚士弘  
Huang Ping    Gong Sihong  
(冶金及材料工程系)

**摘 要** 本文主要用 TEM 和相分析对几种 V、Ti 微合金钢析出相进行了形貌观察和定性、定量分析,研究了 V、Ti 微合金钢的析出特性及其对强度、塑性及韧性的影响,这对优化合金设计及微合金钢强韧化机制研究有十分重要的意义。

**关键词** 沉淀强化;微合金钢;强韧化

中图法分类号 TG113.255

**ABSTRACT** The precipitates of several V and Ti microalloying steels were observed under TEM and analyzed quantitatively with an APD-15 X ray diffractometer. The precipitation behaviour and its effects on strength, plasticity and toughness of the steels were studied. This is of significance to optimization of alloy design and study of mechanisms of strengthening and toughening in microalloying steels.

**KEY WORDS** precipitation strengthening; microalloying steel; strengthening and toughening

## 0 引 言

微合金钢是近二十几年来最重要的冶金进展。通过添加微量 V、Ti 等合金元素并配合一定的轧制工艺,可获得良好的综合机械性能,有研究表明强度能提高50%以上,而对冲击韧性转变温度损害很小。对此,微合金元素的第二相质点沉淀析出起了较大作用,微合金钢的第二相析出主要有以下几种形式:(1)在凝固前或凝固过程中的大块析出(有称之为夹杂);(2)在高温奥氏体(A)中的粗大析出;(3)相间析出;(4)铁素体(F)中的均匀析出。A 中的析出对强化贡献不大,相间析出及铁素体中的均匀析出有很强的析出强化作用。本文将研究 V、Ti 微合金化因析出质点对力学性能的影响。这对合金设计及攀西地区 V、Ti 资源的开发利用都具有十分重要的意义。

## 1 试验材料及方法

试验钢共五种(见表1),其中第 I 批钢用本校钢厂 150kg 感应炉冶炼,第 II 批钢由攀钢冶

\* 收文日期 1990-04-05

炼，均在重钢三厂轧成 $\Phi 20\text{mm}$ 的圆钢，加热温度为 $1150^\circ\text{C}$ 。

按GB228-87和GB4159-84作静拉伸和低温冲击试验，用H600电镜作微观观察，用APD-15型x衍射仪进行微析出定量分析。

表1 试验钢的成份及轧制(Wt%)

钢号	C	Mn	Si	V	Ti	P	S	轧制
第 I 批 1*	0.18	1.12	0.61	—	0.06	0.016	0.016	控轧，终轧温度约 $920^\circ\text{C}$
第 I 批 3*	0.16	1.19	0.61	—	0.15	0.017	0.016	同上
第 I 批 4*	0.16	1.19	0.61	—	0.15	0.017	0.016	热轧
第 II 批 11*	0.2	1.18	0.51	0.071	—	0.017	0.040	控轧，终轧温度约 $780^\circ\text{C}$
第 II 批 13*	0.2	1.14	0.49	0.074	0.03	0.017	0.039	同上

## 2 试验结果及分析

### 2.1 力学性能

试验钢的静拉伸及低温冲击实验结果见表2及图1。可见，(1)含Ti钢在相同控轧条件下，Ti含量增加，强度升高，塑性、韧性降低(见1号，3号钢)；(2)Ti含量相同的微合金钢，用控制轧制(3号钢)和热轧(4号钢)相比较，前者既改善强度，又改善塑性、韧性；(3)在V钢(11号钢)中加入微量Ti(13号钢)，强度有所降低，塑性和韧性略有提高。

表2 静拉伸数据

钢号	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)
1*	387.47	523.90	32.75	70.16
3*	505.64	637.73	30.36	67.75
4*	477.02	617.10	29.16	66.69
11*	487.38	626.73	30.65	68.42
13*	426.85	579.66	32.68	70.14

### 2.2 第二相质点透射电镜观察

图2是1号钢的析出形貌像，质点细小，约为几十 $\text{\AA}$ ，且很均匀。

3号钢中有大量粗大析出(图3)，约几千 $\text{\AA}$ ，这种质点常在高温析出。3号钢中还可见大量成排的相间析出(图4)。经选区衍射斑标定，这些质点为Ti(CN)，且基体(002)面的斑点与Ti(CN)的(022)面重合，说明析出与基体有一定取向关系。

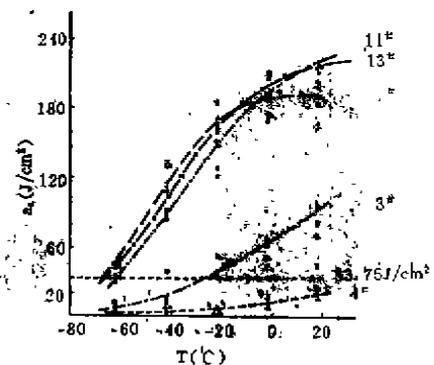


图1  $a_k(\text{J}/\text{cm}^2)$ -温度( $^\circ\text{C}$ )曲线



图2 1号钢中弥散析出 ×75000

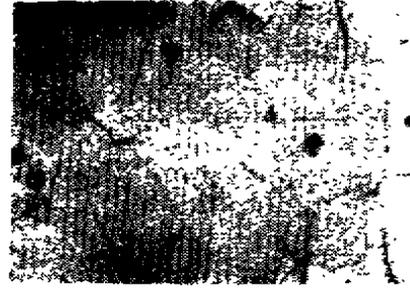
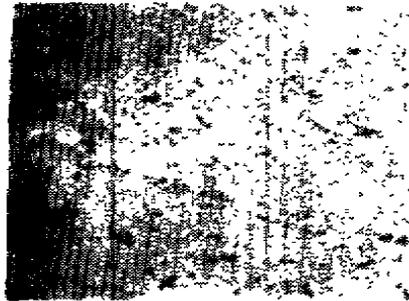
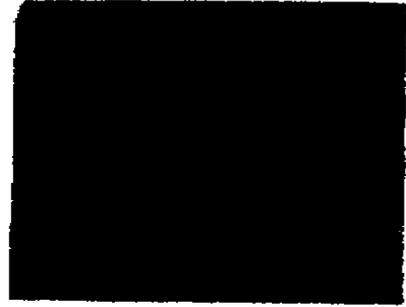


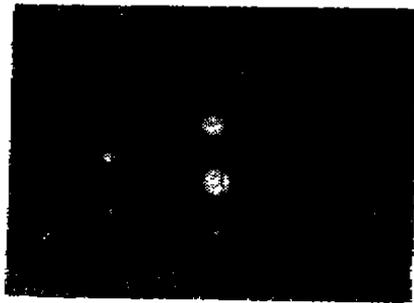
图3 3号钢中粗大析出 ×30000



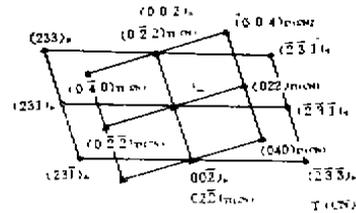
(a) 明场像 ×30000



(b) 暗场像 ×30000



(c) 衍射花样



(d) 标定结果

图4 3号钢中相间沉淀



图5 4号钢中粗大质点 ×20000

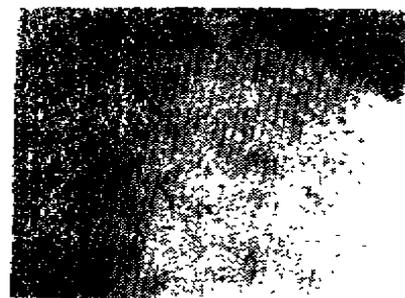


图6 11号钢中弥散析出 ×50000

高Ti热轧钢(4号)在其F基体中也存在类似1号钢、3号钢的弥散析出,但此钢中还出现更多更大的质点,形状各异(图5)。V钢析出见图6,主要特征是在F基体中均匀细小的析出,质

点尺寸几十至几百Å。



(a)暗场像 ×30000



(b)衍射花样

V-Ti 钢(13号)析出比 V 钢(11号)多,见图7(a),质点尺寸也很均匀。经选区衍射花样分析,这些质点可认为是复合微合金化合物(V,Ti)(C,N),而且与基体很可能有一定取向关系。

在 V-Ti 钢(13号)中,还可见大量粗大的高温析出,(图8)。

### 2.3 析出相定量分析

1号、3号、11号、13号钢进行的化学相分析结果见表3。分析时将所有的 V 和 Ti 的 C、N

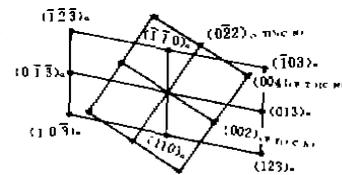
化合物分别看作 VC、TiC。 $[V\%]_{vc}$ 表示形成了 V 化合物的含 V 量(%)。 $[Ti]_{tc}$ 表示形成了 Ti 化合物的含 Ti 量(%), $x_v\%$ 、 $x_n\%$ 分别表示钢中总的 V 含量和 Ti 含量。

表3 析出相化学分析

	$[V\%]_{vc}$	$\frac{[V\%]_{vc}}{x_v\%}$	VC%	$[Ti]_{tc}$	$\frac{[Ti]_{tc}}{x_n\%}$	TiC%
1#	-	-	-	0.051	85%	0.064
3#	-	-	-	0.145	97%	0.181
11#	0.039	54%	0.048	-	-	-
13#	0.026	35%	0.032	0.024	80%	0.030

由表3可见:(1)在 V、Ti 微合金钢中,经控轧后,Ti 析出较 V 多,析出更完全,对1号、3号、13号钢析出化合物中的 Ti 量分别占钢中总 Ti 量的85%、97%、80%,而11号、13号钢中,V 化合物中 V 量仅分别占总 V 量的54%、35%。(2)随钢中 Ti 含量增多,Ti 析出更完全(3号钢与1号比较)。(3)在 V 钢(11号钢)中加入少量 Ti(13号钢),降低了 V 的析出量。11号钢为54%,13号钢为35%。

大量实验表明<sup>[5]</sup>:在微合金钢常采用的化学成份范围内,Ti(CN)的全固溶温度为1300℃-



(c)标定结果

图7 13号钢中弥散析出



图8 13号钢高温析出质点×30000

1600℃, V(CN)的全固溶温度为800℃-1100℃,当试验钢轧制加热温度为1150℃时,Ti的化合物还有一部分未固溶,V的化合物已完全固溶。从热力学看<sup>[5]</sup>,Ti的MC、MN、M(CN)相的溶度积比V的相应化合物的溶度积要小得多。如TiC与VC的平衡溶度积为:

$$\lg((Ti) \cdot (C))_v = 2.75 - 7500/T$$

$$\lg((V) \cdot (C))_v = 6.72 - 9500/T$$

在一定温度下,TiC的溶度积比VC的溶度积小,所以冷却过程中Ti优先从固溶体中析出。在轧制过程中Ti的析出从较高温度就开始,直到终轧温度,V在较低温度下才开始析出,所以V没有Ti析出完全。由于V析出温度低,析出颗粒较小、均匀。

钢中Ti含量增多,使Ti化合物的形成温度提高,更早从基体中析出,因而Ti的析出更完全,而且在高温下析出的粗大颗粒增多。

对于V-Ti钢,在低温轧制后,除了Ti进一步析出外,V开始大量析出,由于钢中C,N含量一定,析出的V化合物量受到限制,比单独含V钢的V析出量更低。

X衍射能谱分析表明,1号、3号钢中,存在Ti的化合物;11号钢中存在V的化合物;13号钢中存在V,Ti的化合物(图9)。

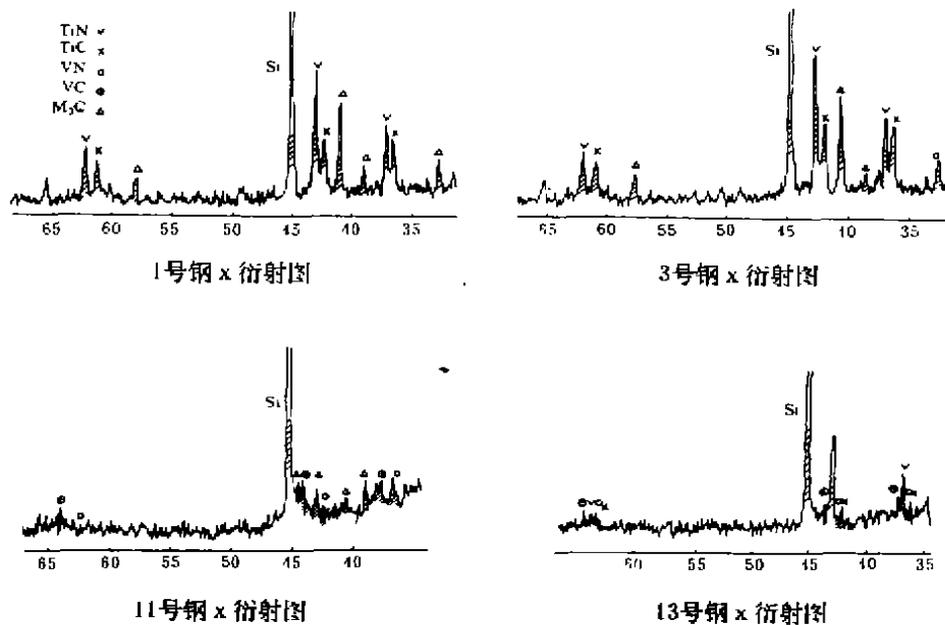


图9 试验钢X衍射图

### 3 讨 论

#### 3.1 V、Ti析出物对强度的影响

微合金钢强度有以下几部分<sup>[6]</sup>:基体计算强度、弥散强化、位错强化、细晶强化等。文献<sup>[7]</sup>认为:Ti钢中强化效果70%来自Ti(CN)的析出强化,25%来自晶粒细化,并且只有在F中的析出(包括相间析出),才对强度有贡献,在A中和在液态凝固过程中的析出对强度贡献很小。高Ti钢(3号)在F中的形变诱导析出多,而且细小均匀,加之Ti的细化晶粒作用,所以强度较高;

热轧钢(4号)由于F中析出少,有较多粗大质点,所以强度较3号钢低。1号钢的含Ti量低,析出相应减小,强度最低。

V钢和V-Ti钢冶炼时出自一炉(先浇V钢,再加Ti),轧制工艺一样,位错强化相近。由图象仪检验铁素体晶粒大小也相近(V钢为11.5级,V-Ti钢为12级),其强度差别主要来自第二相质点析出强化。V钢析出细小均匀,V-Ti钢析出量较多,但有较多粗大质点。V-Ti钢强度比V钢低,有以下几个原因:

(1)从电镜观察和析出定量分析结果看,V-Ti钢中的第二相析出虽然数量较多,但从热力学看,钢中复合微合金元素的C、N化合物的平衡溶度积,在一定温度下,比单元微合金元素的C、N化合物的溶度积小,在高温下,可析出更多的复合C、N化合物(V、Ti)(C、N),这种质点也可能是以先析出的Ti(C、N)为核心长成的。文献<sup>[5]</sup>认为,对复合微合金钢,在较低温度下沉淀的C、N化合物常常是在较高温度沉淀的化合物上沉淀出来,而且析出相中的微合金元素含量是可变的,微合金元素含量浓度之比与析出颗粒尺寸有关,大颗粒中含高温析出的元素较多,所以,V-Ti钢的析出实质上是(V、Ti)(C、N),只是不同时期的析出,其V、Ti含量不一样,粗大颗粒含Ti较多,细小颗粒含V较多,当析出较粗时,对强度的贡献相应减小,(图6-8)。

(2)V常在较低温度析出,质点弥散,细小,有很强的析出强化作用,V-Ti钢中,Ti降低了V的析出,也就减小了V的析出强化效果。

### 3.2 对塑性、韧性的影响

第二相质点大小对微合金钢的塑性、韧性有影响。一般认为:高温析出质点尺寸小于 $0.1\mu\text{m}$ 时,可有效阻止晶粒长大,提高塑性、韧性;但当质点尺寸大于 $0.5\mu\text{m}$ 时,对塑性、韧性就不利了。相间沉淀与F中弥散沉淀的损害较小,夹杂的损害较大。3号、4号高Ti钢中的出现大量粗大质点,如图3、图5,使其塑性、韧性降低。4号钢由于出现很多晶界夹杂(图10),也大大降低了塑性及韧性。

V-Ti钢的韧性比V钢好,与Ti改善了夹杂物形态有关。

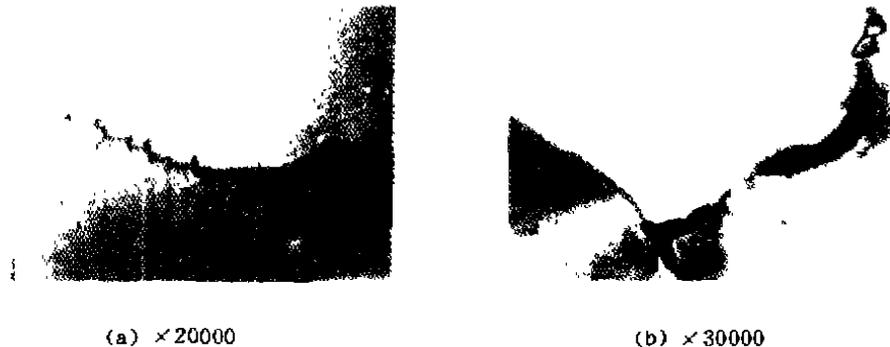


图10 4号钢中晶界夹杂

## 4 结 论

(1)V-Ti复合微合金化与V微合金化相比,复合微合金化使钢的强度有所降低,塑性与韧性有所提高。

(2)Ti钢中,含Ti量过高,钢的强度增高,但塑性、韧性大大降低,控制轧制能使其强韧性

有所改善。

### 参 考 文 献

- 1 Platts G K. Developments in Highstrength Lowalloy Steels. an overview. *Met. Mater. Tech.*, 1984, 16(9): 447~454
- 2 Wamen A, Ubhi H S. Relationship between Processing, Microstructure, and Properties in Rolled 0.45%V steel. *met. sci.*, 1983, 17(1): 19—26
- 3 Honeycombe R W K. Fundamental Aspects of Precipitation in Microalloyed Steels. In, Gray J M. HSLA Steels: Metallurgy and Applications. United State of American. Published by ASM International. 1985. 243~250
- 4 Sellars C M. Options and Constraints for Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel. In, Gray J M. HSLA Steels: Metallurgy and Applications. United State of American. Published by ASM International. 1985. 158~163
- 5 徐温崇. Nb、V、Ti 在钢中的析出行为, *金属学报*, 1983, 19(6): 482~486
- 6 M. 科恩等. 钢的微合金化及控制轧制. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 47~50
- 7 谭江级. V、Ti、Nb 微合金钢的高应变低周疲劳性能研究. 重庆大学硕士论文, 1988