

# V-5Cr-5Ti 合金铸态组织中的第二相行为研究

李增德, 林晨光, 崔 舜

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘 要:** 采用 XRD、OM、SEM 和 TEM 对 V-5Cr-5Ti 合金铸态组织进行分析, 研究第二相的行为。结果表明: 采用真空电子束熔炼制备的 V-5Cr-5Ti 合金铸态组织具有粗大的晶粒, 晶粒内部存在以层状第二相堆垛成树枝状为特征的成分偏析区; 金属钒和铸态 V-5Cr-5Ti 合金的晶格常数分别为 0.30316 和 0.30375 nm, V 的单胞体积膨胀约 0.58%; 存在 2 种类型的第二相: (1) 短条状第二相, 具有 fcc 结构, 晶格常数为 0.4182~0.4228 nm; (2) 椭圆状第二相, 具有 fcc 结构, 晶格常数为 0.4186~0.4242 nm。V-5Cr-5Ti 合金凝固过程中, 首先 Ti 元素与 C 元素反应析出具有立方结构的亚稳间隙相 ( $Ti_2C$ ) 或 V 元素与 C 元素反应析出具有 hcp 结构的亚稳间隙相 ( $V_2C$ ), 随后原子发生相互取代, 最终形成以 Ti 元素为主, V、Cr 元素为辅, 具有 fcc 结构的碳-氧-氮化物, 化学式记为  $(Ti_2-CON)$ 。

**关键词:** 钒合金; 组织结构; 第二相; 晶格常数

**中图分类号:** TG146.4<sup>+13</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)01-0104-07

钒基合金作为聚变堆的重要候选结构材料, 具有良好的高温强度<sup>[1-3]</sup>、抗中子辐照肿胀<sup>[4-6]</sup>和耐液态金属腐蚀<sup>[7,8]</sup>等特性, 世界范围内钒基合金的研究主要集中在 V-(4~5)Cr-(4~5)Ti 合金。早在 20 世纪 60 年代, 国内外就开始了钒合金的研究工作。到 20 世纪 90 年代, 随着对聚变反应堆用结构材料的深入研究, 美国、俄罗斯和欧盟对钒基合金进行了大量系统的研究工作<sup>[9,10]</sup>。20 世纪 90 年代末期, 日本也参与到聚变钒合金的研究计划中。目前, 美国已经具备生产 1200 kg V-4Cr-4Ti 合金铸锭能力<sup>[11]</sup>。直到 20 世纪 90 年代后期, 我国核工业西南物理研究院开始利用磁悬浮熔炼制备实验规模的钒基合金, 如 V-4Cr-4Ti, V-4Ti, V-3Ti-Al-Si 等合金, 并展开了合金相关性能的研究<sup>[12-14]</sup>。北京有色金属研究总院从 21 世纪初就已进行钒基合金的研发工作, 现已具备了制备 200 kg 钒基合金的能力。

V-Cr-Ti 合金被认为是单相  $\alpha$  固溶体, 但该合金对间隙元素 C、O、N 等具有较高的化学活性, 在合金制备过程中, 间隙元素 C、O 与 Ti 元素反应析出球形的碳-氧化物 ( $Ti-CO$ )<sup>[15,16]</sup>, 或者析出片状的, 具有 fcc 结构的, 富 Ti 的高碳型氧-碳-氮化物 ( $Ti-CON$ )<sup>[17]</sup>。当合金中杂质含量总量 (C+O+N) 超过 0.08% 时, 第二相 ( $Ti-CON$ ) 必然会出现。第二相会改变 V-Cr-Ti 合金性能<sup>[18-22]</sup>, 特别是高温性能、抗辐照性能等。研

究 V-Cr-Ti 合金第二相的形态, 成分, 结构, 大小, 位置等对了解第二相对合金性能的影响机理具有重要意义, 对 V-Cr-Ti 合金的聚变堆应用起到关键作用。V-5Cr-5Ti 合金与 V-4Cr-4Ti 合金相比较而言, 由于 Cr、Ti 元素含量增加, 提高了合金的室温/高温强度, 但 Cr 元素含量增加, 合金抗中子辐照肿胀性能随之下降。另外, 随着 Ti 元素含量的增加, 合金的耐液态金属 (Li 或 Li-Pd) 腐蚀性能也相应提高<sup>[23]</sup>。V-5Cr-5Ti 合金具有优良的综合性能, 将成为核工业的关键结构材料。中国工程物理研究院针对 V-5Cr-5Ti 合金展开了相关使用性能的研究<sup>[24-27]</sup>, 包括力学性能, 焊接性能, 抗腐蚀性等。但对 V-5Cr-5Ti 合金的第二相的研究还比较薄弱, 尤其是对第二相的形态, 成分, 结构, 大小的研究。本研究通过热力学理论计算第二相的稳定性, 采用电子显微镜技术对合金组织结构进行分析, 全面了解合金组织和第二相结构, 讨论第二相的形成机制。

## 1 实 验

V-5Cr-5Ti 合金是采用高纯金属 V、Cr、Ti 为原料, 通过真空熔炼而成。合金的实际化学成分见表 1。其中间隙元素 (C+O+N) 总量 (0.0519%) 与美国 US632864 (0.0524%) 和 US632864 (0.06%) 铸锭相当<sup>[9]</sup>。

**收稿日期:** 2015-12-19

**作者简介:** 李增德, 男, 1982 年生, 博士生, 北京有色金属研究总院粉末冶金及特种材料研究所, 北京 100088, 电话: 010-82241215, E-mail: sabai110@163.com

表 1 V-5Cr-5Ti 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of V-5Cr-5Ti alloy (ω/%)							
Cr	Ti	C	O	N	Al	Fe	V
4.86	4.98	0.0102	0.038	0.0037	0.041	0.026	Bal.

采用 X' Pert PRO MPD X 射线衍射仪对高纯金属 V 和 V-5Cr-5Ti 合金进行物相分析, 参数: Cu Kα 射线, 管压为 40 kV, 管流 40 mA, 步长 0.02°。采用型号为 EPIPHOT 的光学显微镜(OM)分析合金组织, 腐蚀液为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:1:1 (体积比)。采用型号为 JSM-7001F 扫描电子显微镜(SEM)观察第二相的微观形貌。采用 FEI Tecnai F20 型场发射透射电子显微镜(TEM)对铸态合金中第二相进行微观结构分析。选择不同视场内同形貌第二相进行电子衍射分析。通过标定衍射斑点计算晶格常数, 最终晶格常数为 3 个同形貌第二相的晶格常数。采用 MTP 型电解双喷仪进行制样, 电解液为体积分数 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+95% CH<sub>3</sub>OH, 电压约为 10 V, 电流约为 20 mA, 温度约为 -10 °C。

## 2 结果及分析

### 2.1 铸态合金 XRD 分析

图 1 是金属钒和铸态 V-5Cr-5Ti 合金的 XRD 图谱。由图可知, 铸态合金 XRD 图谱中的 5 个强衍射峰与金属钒的 5 个强衍射峰相匹配, 并无其他杂峰。说明该合金具有金属钒的 bcc 结构。金属钒添加 Cr、Ti 元素后形成了替换式固溶体, 即单相 bcc 固溶体。通过立方晶系晶面间距与晶面指数、晶格常数的关系式 ( $1/d^2 = (h^2+k^2+l^2)/a^2$ ) 和布拉格方程 ( $2d\sin\theta = \lambda$ ) 可以计算出晶格常数, 并采用最小二乘法拟合出精确的晶格常数。其中金属钒的晶格常数为 0.303 16 nm, 铸态钒合金的晶格常数为 0.303 75 nm。

### 2.2 铸态合金显微组织

采用二次真空电子束熔炼法制备钒合金铸锭。由于真空电子束熔炼温度高, 冷却速度快, 钒合金流动

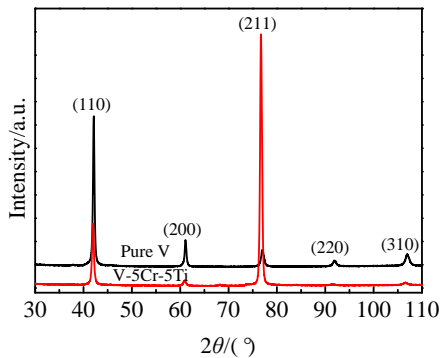


图 1 金属钒和铸态钒合金的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of vanadium and as-cast V-5Cr-5Ti alloy

性及导热性差, 合金铸锭易出现微观偏析。图 2 是钒合金的铸态组织照片。由图可知, 钒合金铸锭的晶粒粗大 (500~800 μm), 且某些晶粒内存在较明显的成分偏析区, 合金第二相以不规则的曲线交叉汇聚呈树枝状。

图 3 是铸态钒合金组织的 SEM 观察照片。可以看出, 在成分偏析区内树枝状第二相附近分布着较小的颗粒状第二相, 如图 3a。对第二相放大可发现, 第二相呈层状分布特征, 并堆垛成不规则的曲线, 层片厚度约为 100 nm, 宽度为 1~2 μm, 如图 3b。

合金微区成分半定量或定量的 EDS 分析图谱见图 4 和表 2。对于合金基体取方形面分析结果, 对于第二相成分取 5 点分析结果的平均值。相比化学分析法, 所得成分含量结果 (表 1) 基体 Cr 元素含量较接

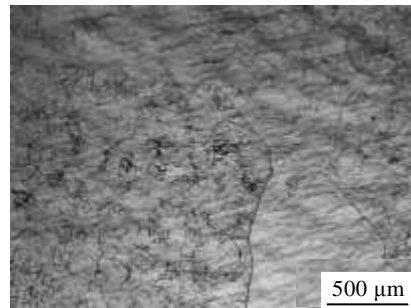


图 2 钒合金的铸态组织

Fig.2 As-cast microstructure of V-5Cr-5Ti alloy

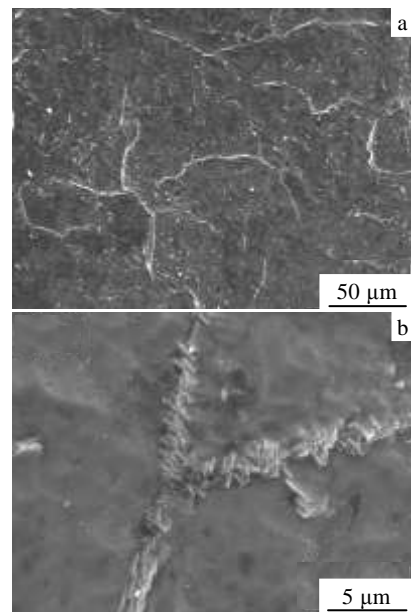


图 3 钒合金铸态组织的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of as-cast V-5Cr-5Ti alloy: (a) dendritic secondary phase and (b) lamellar secondary phase

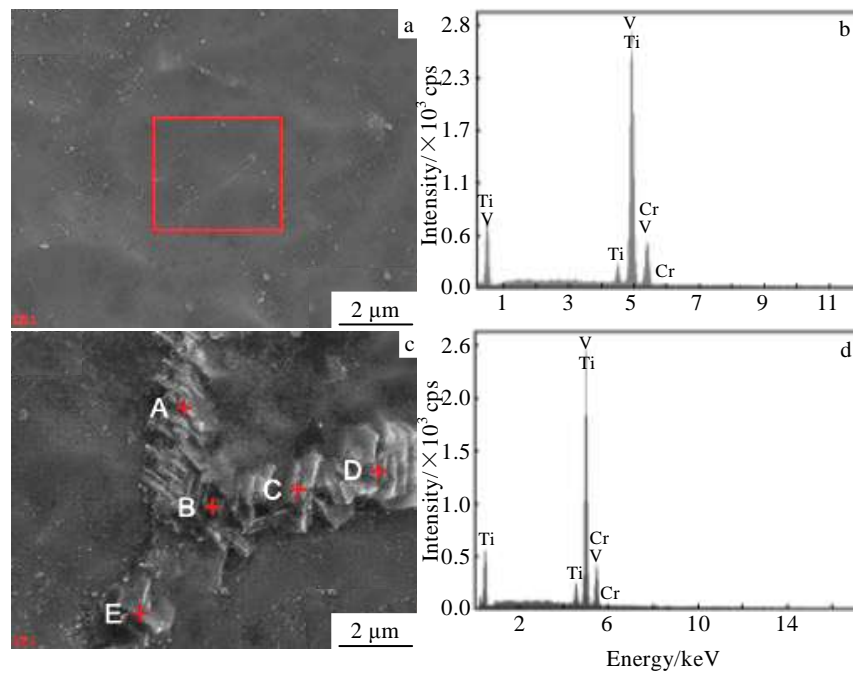


图 4 钒合金铸态组织及 EDS 能谱

Fig.4 Microstructures and EDS analysis of as-cast V-5Cr-5Ti alloy: (a, b) matrix and (c, d) secondary phase

表 2 图 4 中合金不同区域的 EDS 分析结果

Table 2 EDS results of the different regions of V-5Cr-5Ti alloy in Fig.4

Region	V		Cr		Ti	
	ω/%	at%	ω/%	at%	ω/%	at%
Matrix	89.86	89.64	4.73	4.62	5.41	5.74
Secondary phase	89.42	89.13	4.14	4.04	6.44	6.82

近, Ti 元素含量偏高。对比基体与第二相的 EDS 分析结果, Ti 元素含量在第二相中高出基体 19.0%。

### 2.3 铸态合金 TEM 分析

图 5 是铸态合金第二相的 TEM 照片。由图 5a 可知, 在铸态合金基体中分布着大量“短条”状的第二相, 第二相呈无规律排列分布, 第二相的长度为 100~300 nm, 宽度为 20~40 nm。通过对第二相的电子衍射分析可知(图 5b), 该第二相为 fcc 结构。通过计算可知, 该第二相的晶格常数为 0.4182~0.4228 nm, 具体结果见表 3。由图 5c 可知, 在铸态合金中还无规律地分布着“椭圆”状的第二相, 第二相的大小为 60~200 nm, 通过计算可知, “椭圆”状的第二相的晶格常数为 0.4186~0.4242 nm。EDS 分析结果见表 4。2 种相的成分不尽相同, 短条状第二相以 Ti、V 元素为主, 以及少量 Cr 元素与 C、O、N 形成的化合物, 元素 V、Ti、Cr 与 C、O、N 的原子比为 2.13。而椭圆状第二相以 Ti 元素为主, 以及少量的 V 元素与 C、O、N 形成的化合物, 化合物不含 Cr 元素, 元素 V、Ti、

Cr 与 C、O、N 的原子比为 1.71。

图 6 为铸态合金基体的电子衍射花样。通过标定和计算可知, 铸态合金基体具有 bcc 结构, 晶格常数为 0.3036~0.3058 nm, 大于纯钒的晶格常数(0.30316 nm)。

## 3 分析与讨论

### 3.1 热力学分析

A. N. Tyumentsev 等研究认为<sup>[17]</sup>, 在 V-Cr-Ti 合金中的析出相是富含 Ti 元素, 以及少量含有 V 和 Cr 元素的氧碳氮化物 (oxycarbonitride)。根据第二相的化学成分特征, 若非金属组元对金属组元的原子半径比小于 0.59, 则形成具有简单晶体结构 (fcc、bcc、hcp) 的第二相, 被称为间隙相。若其原子半径比大于 0.59, 则形成具有复杂的晶体结构的第二相, 被称为间隙化合物。间隙相中非金属组元的量可在由间隙缺陷而低于理想化学配比的一定范围内变化<sup>[28]</sup>。表 5 是 C、N、O 元素与 V、Ti 元素的原子半径比值<sup>[29]</sup>。各种组元的非金属元素与金属元素的原子半径比均小于 0.59, 可形成具有简单结构的间隙相。根据化学式查询 PDF 卡可知, 形成的 TiC、TiN、TiO、VC、VN、VO 均具有 fcc 结构。可知, 钒合金中的第二相主要是 V、Ti 元素与 C、N、O 元素形成的具有 fcc 结构的间隙相。

相关化学反应在 V-Cr-Ti 合金中进行, C、O 和 N 元素以间隙原子的形式存在于 V 的四面体间隙中, 合

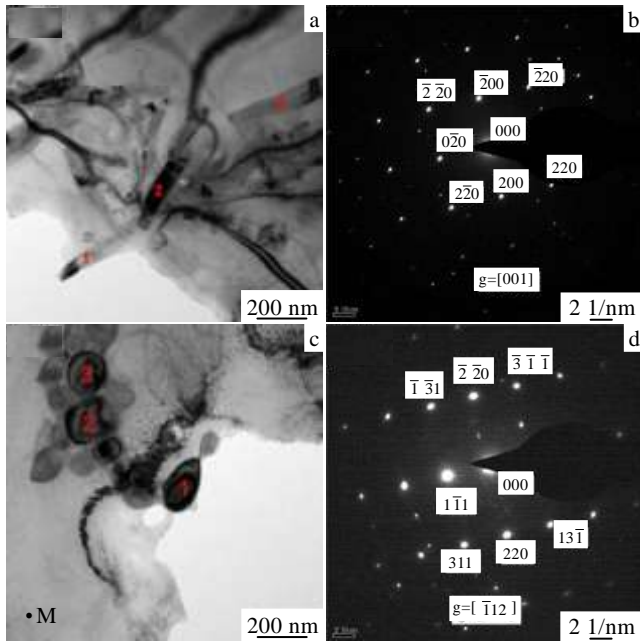


图 5 铸态合金第二相的 TEM 照片

Fig.5 TEM images of precipitations of as-cast V-5Cr-5Ti alloy: (a) short strip secondary phase, (b) SAED pattern of Fig.5a, (c) elliptical-shaped secondary phase, and (d) SAED pattern of Fig.5c

表 3 图 5 中第二相和基体的晶格常数

Table 3 Lattice parameters of secondary phases and matrix in Fig.5 (nm)

Region	1	2	3
Short strip secondary phase	0.4182	0.4228	0.4209
Elliptical-shaped secondary phase	0.4186	0.4231	0.4242
Matrix	0.3036	0.3058	0.3046

金中可能的反应如式 (1) ~ (6) 所示:

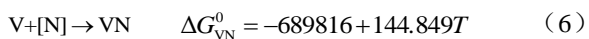
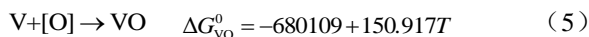
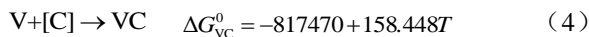
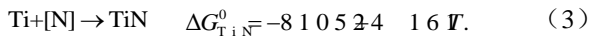
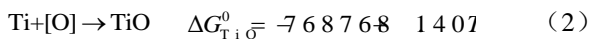
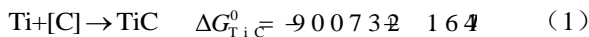


表 4 图 5 中铸态合金第二相的 EDS 分析结果

Table 4 EDS analyzing results of precipitations of as-cast V-5Cr-5Ti alloy in Fig.5 (at%)

Precipitation	V	Ti	Cr	C	O	N	A		B	
							V+Ti+Cr	C+O+N	A:B	
Short strip secondary phase	20.24	45.2	2.6	8.37	13.71	9.83	68.04	31.91	2.13	
Elliptical-shaped secondary phase	2.64	60.39	-	17.44	13.47	6.04	63.03	36.95	1.71	

式 (1) ~ (6) 中的标准吉布斯自由能与温度关系式是根据各种物质的热力学数据<sup>[30]</sup>, 采用吉布斯-亥姆霍兹 (Gibbs-Helmholtz) 方程和基尔霍夫 (Kirchhoff) 方程计算得出。通过以上关系式可绘制不同反应产物的吉布斯自由能-温度曲线图 (图 7 所示)。

由图 7 可知, 上述反应的标准吉布斯自由能的变化  $\Delta G^0$  均为负值, 反应均自发向右进行。同时, TiC 反应的标准吉布斯自由能的变化  $\Delta G_{\text{TiC}}^0$  是最大的, 因此, 在 V-Cr-Ti 合金的反应产物中, TiC 是最稳定相。另外, 室温下反应产物的稳定性为  $\text{TiC} > \text{VC} > \text{TiN} > \text{TiO} > \text{VN} > \text{VO}$ 。

### 3.2 显微组织

通过 OM、SEM 观察, V-5Cr-5Ti 合金的显微组织为粗大的晶粒内分布着树枝状和颗粒状第二相, 树枝状第二相具有层状结构。金属钒、钛、铬的熔点相差不大, 形成固溶体合金时结晶温度范围比较小。电子束将电极轰击成液滴, 液滴进入水冷铜坩埚冷却凝固成铸锭。合金结晶时, 固相可从周围液相中获得原子供应而得以均匀长大, 沿着水冷铜坩埚径向形成粗大的柱状晶。随着柱状晶的长大, 铸锭中心部分的液态金属的温度全部降至熔点以下, 满足均匀形核的条件。由于芯部合金冷却速度慢, 形成粗大的中心等轴晶。

根据 XRD 和电子衍射的测量结果, 铸态钒合金的晶格常数分别为 0.30375 nm 和 0.3036~0.3058 nm,

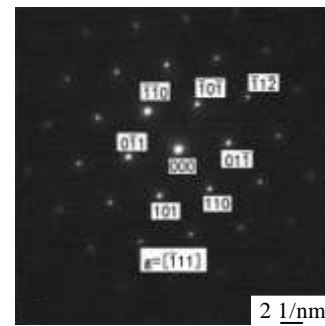


图 6 铸态钒合金基体的选区电子衍射花样 (对应图 5c 的 M 点)

Fig.6 SAED pattern of as-cast V alloy matrix (corresponding to point M in Fig.5c)

表 5 C、N、O 元素与 V、Ti 元素的原子半径比值

Table 5 Ratio of atomic radius of [C, N, O]:[V, Ti]

Atomic radius/nm	C (0.077)	N (0.071)	O (0.060)
V (0.131)	0.588	0.542	0.458
Ti (0.145)	0.531	0.490	0.414

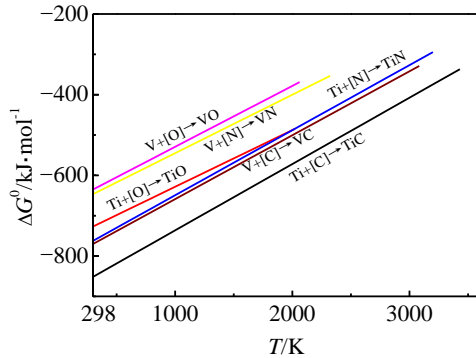


图 7 V-Cr-Ti 合金中  $\Delta G-T$  曲线图

Fig.7 Gibbs free energy-temperature curves of V-Cr-Ti alloys

考虑到测量与计算误差，铸态钒合金的晶格常数均为有效值。与金属钒（晶格常数为 0.30316 nm）相比，铸态钒合金的单胞体积膨胀约 0.58%。根据原子半径大小  $Ti(0.145\text{ nm}) > V(0.131\text{ nm}) > Cr(0.125\text{ nm})$ <sup>[28]</sup>，可知，在钒合金（替换式固溶体）中添加合金元素 Ti 使 V 晶格常数增大，Cr 元素使 V 晶格常数减小。杂质元素（特别是气体元素 C、N、O）存在于金属的四面体间隙和八面体间隙，但金属钒属于 bcc 结构，气体元素多数存在于钒的四面体间隙中。而气体元素的原子半径 ( $C, 0.077\text{ nm} > N, 0.071\text{ nm} > O, 0.060\text{ nm}$ )<sup>[29]</sup> 均大于金属钒的四面体间隙 ( $r = 0.0395\text{ nm}$ )，气体元素以间隙原子的形式存在，可使钒合金的晶格常数增大<sup>[31,32]</sup>。但是，铸态钒合金的晶格常数变大，原因在于 Ti 元素使钒的晶格膨胀。因为气体元素 C、N、O 三者的总含量为 0.0519%（质量分数），其中部分与 Ti 元素反应析出第二相，相比较 Ti 元素（4.98%）对钒晶格的影响，气体元素对钒晶格的影响可以忽略。

SEM 观察发现，铸态钒合金的显微组织存在树枝状第二相和颗粒状第二相，树枝状第二相由层片状第二相排列而成，层片厚度约为 100 nm，宽度为 1~2  $\mu\text{m}$ 。这与 TEM 分析的结果相对应，短条状第二相堆垛成树枝状第二相，而椭圆状第二相对应于零星分布在合金基体中的颗粒状第二相。TEM-EDS 分析结果表明，第二相是富含 Ti，少量（或不含有）V 和 Cr 与 C、O、N 形成的间隙相。根据电子衍射结果测量计算，短条状第二相具有 fcc 结构，晶格常数为 0.4182~0.4228 nm，椭圆状第二相同样具有 fcc 结构，其晶格常数为

0.4186~0.4242 nm。上述结果与 A. N. Tyumentsev 等的研究结果相吻合。A. N. Tyumentsev 等研究认为，铸态钒合金中主要析出片状第二相，片层厚度为 100~150 nm，宽度为数个微米。片状第二相是富含 Ti、少量含有 V 和 Cr、具有 fcc 结构的高碳型碳-氧-氮化物，化学式记为  $(Ti-CON)$ ，晶格常数为 0.424~0.428 nm<sup>[17]</sup>。由于合金体系和熔炼工艺不同，第二相的大小、成分、形貌和晶格常数稍有差别。本研究认为，铸态钒合金组织中存在两种类型的第二相，首先是短条状第二相，长度为 100~300 nm，宽度为 20~40 nm，具有 fcc 结构，晶格常数为 0.4182~0.4228 nm，该第二相在晶内排列成树枝状。其次为椭圆状第二相，尺寸大小为 60~200 nm，具有 fcc 结构，晶格常数为 0.4186~0.4242 nm。

### 3.3 第二相形成过程

根据图 7 所示，从热力学的数据分析，钒合金中第二相在平衡条件下析出顺序为  $TiC > VC > TiN > TiO > VN > VO$ ，析出的第二相均为具有 fcc 结构的间隙相。在电子束的作用下，电极熔化成液滴，通过水冷迅速凝固成铸锭。在凝固过程中，V、Ti、Cr 元素与 C、N、O 等杂质元素的析出反应的吉布斯自由能小于零，析出自发形成，形成具有 fcc 结构的碳-氧-氮化物的间隙相。间隙相的析出形貌和位置取决于凝固过程的冷却速度。第二相的形成过程分为两种机制。第 1 种机制，真空电子束熔炼后凝固过程在水冷铜坩埚中进行，冷却速度非常快，不能保持平衡状态，产生非平衡结晶。钒合金固溶体结晶按树枝状方式进行，由于冷却过快，固液界面处的扩散不充分，低熔点组元 Ti 容易在枝晶外围富集。室温下 C 元素在 V 基体中的固溶度非常小<sup>[33]</sup>。当 C 元素含量超过固溶度，高温下以间隙原子的形式形成固溶体存在。随着温度下降，C 元素的固溶度越来越小。钒合金中 Ti 元素与 C 元素反应析出具有立方结构的亚稳间隙相  $(Ti_2C)$ <sup>[32]</sup>。由于 V、Ti 原子序数相邻，原子半径差为 9.6%，且 V、Ti 与 C、N、O 间形成的间隙相均具有 fcc 结构，符合第二相完全互溶的 3 个条件，从而得出间隙相  $TiC$ 、 $VC$ 、 $TiN$ 、 $TiO$ 、 $VN$ 、 $VO$  均可以完全互溶。钒合金中 Ti 原子在高于 500℃ 可发生扩散迁移，Ti 原子与 V 原子发生相互替代，最终形成具有 fcc 结构的富 Ti 相。第 2 种机制，在钒合金凝固过程中，随着合金温度下降，C 元素的固溶度越来越小。V 元素与 C 元素反应析出具有 hcp 结构的亚稳间隙相  $(V_2C)$ <sup>[33]</sup>。Ti 元素比 V 元素对 C 元素具有更强的化学亲和力，Ti 原子可取代亚稳间隙相  $V_2C$  中的 V 原子形成  $Ti_2C$ ，第二相结构由 hcp 结构转变成 fcc 结构。间隙相中 C、O、N 元素之间也可相互取代形成，因此，铸态钒合金中第二

相为以 Ti 元素为主, V、Cr 元素为辅, 具有 fcc 结构的碳-氧-氮化物, 化学式记为  $Ti_2-CON$ 。

## 4 结 论

1) 采用真空电子束熔炼制备的 V-5Cr-5Ti 合金具有粗大的晶粒, 晶粒内部存在以层状第二相堆垛成树枝状为特征的成分偏析区, 其中层状第二相层片厚度约为 100 nm, 宽度为 1~2  $\mu m$ 。

2) 金属钒和铸态 V-5Cr-5Ti 合金的晶格常数分别为 0.30316 nm 和 0.30375 nm; 添加合金元素 4.98%Ti 使 V 的单体体积膨胀约 0.58%。

3) 铸态钒合金组织中存在 2 种类型的第二相, 一种为短条状第二相, 长度为 100~300 nm, 宽度为 20~40 nm, 具有 fcc 结构, 晶格常数为 0.4182~0.4228 nm, 该第二相在晶内排列成树枝状。另一种为椭圆状第二相, 尺寸为 60~200 nm, 具有 fcc 结构, 晶格常数为 0.4186~0.4242 nm。

4) V-5Cr-5Ti 合金凝固过程中, 首先 Ti 元素与 C 元素反应析出具有立方结构的亚稳间隙相 ( $Ti_2C$ ) 或 V 元素与 C 元素反应析出具有 hcp 结构的亚稳间隙相 ( $V_2C$ ), 随后原子发生相互取代, 最终形成以 Ti 元素为主, V、Cr 元素为辅, 具有 fcc 结构的碳-氧-氮化物, 化学式记为( $Ti_2-CON$ )。

## 参考文献 References

- [1] Satou M, Abe K, Kayana H. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1991, 179-181: 757
- [2] Li Ming(李明), Song Yueqing(宋月清), Cui Shun(崔舜) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2007, 31(4): 420
- [3] Fu H Y, Chen J M, Zheng P F *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 442(1-3): 336
- [4] Chung H M, Smith D L. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258-263(2): 1442
- [5] Takeshi Miyazawa, Takuya Nagasaka, Ryuta Kasada *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 455(1-3): 440
- [6] Fukumoto K, Iwasaki M, Xu Q. *Journal of Nuclear Materials* [J], 2013, 442(1-3): 360
- [7] Evtikin V A, Lyublinski I E, Vertkov A V *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 1995, 27: 731
- [8] Muroga T, Chen J M, Chernov V M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 455(1-3): 263
- [9] Kurtz R J, Abe K, Chernov V M *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 329-333: 47
- [10] Zinkle S J, Matsui H, Smith D L *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258-263: 205
- [11] Johnson W R, Smith J P. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258-263: 1425
- [12] Chen Jiming(谌继明), Yang Lin(杨霖), Qiu Shaoyu(邱绍宇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(2): 113
- [13] Chen Jiming(谌继明). *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2002, 10(4): 366
- [14] Chen Jiming(谌继明), Muroga T, Xu Zengyu(许增裕) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(8): 839
- [15] Heo N J, Nagasaka T, Muroga T. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 325: 53
- [16] Li Ruihuan, Zhang Pengbo, Li Xiaoqing *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 435(1-3): 71
- [17] Tyumentsev A N, Korotaev A D, Pinzhin Y P *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 329-333: 429
- [18] Zheng P F, Chen J M, Nagasaka T *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 455(1-3): 669
- [19] Zheng Pengfei(郑鹏飞), Chen Jiming(谌继明), Muroga T *et al. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*(理化检验—物理分册)[J], 2009(5): 253
- [20] Chen J M, Nagasaka T, Muroga T *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2008, 374: 298
- [21] Chen Yong(陈勇), Chen Jiming(谌继明), Qiu Shaoyu(邱绍宇). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2007, 31(3): 295
- [22] Muroga T, Nagasaka T, Abe K *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2002, 307-311: 547
- [23] Li Zengde(李增德), Cui Shun(崔舜), Lin Chenguang(林晨光) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2007, 31(6): 840
- [24] Xie Ruoze(谢若泽), Hu Wenjun(胡文军), Chen Chengjun(陈成军) *et al. Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2009, 30(6): 641
- [25] Yu Yong(余勇), Pan Xiaoxia(潘晓霞), Xie Ruoze(谢若泽) *et al. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* (力学学报)[J], 2012, 44(2): 334
- [26] Wang Yarong(王亚荣), Zhang Yongzhi(张勇智), Xu Chao(许超) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2014, 50(10): 58
- [27] Wang Qingfu(王庆富), Xian Xiaobin(鲜晓斌), Lang Dingmu(郎定木) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 2033
- [28] Yong Qilong(雍岐龙). *Secondary Phase of Iron and Steel Materials*(钢铁材料中的第二相)[M]. Beijing: Metallurgical

- Industry Press, 2006: 39
- [29] Liang Jingkui(梁敬魁). *Powder Diffraction Method for the Determination of Crystal Structures (Part I)*(粉末衍射法测定晶体结构(上))[M]. Beijing: Science Press, 2003: 126
- [30] Ye Dalun(叶大伦), Hu Jianhua(胡建华). *Handbook of Practicality Inorganic Thermodynamics Data*(实用无机热力学数据手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 175
- [31] Li Yufei(李鱼飞), Luo Chao(罗超), Wang Zhigang(王志钢) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(5): 805
- [32] Li Yufei(李鱼飞), Luo Chao(罗超), Wang Zhigang(王志钢) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(12): 2152
- [33] Liu Ansheng(刘安生). *Binary Alloy Phase-Diagrams*(二元合金状态图集)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 299

## Behavior of Secondary Phase of As-cast V-5Cr-5Ti Alloy

Li Zengde, Lin Chenguang, Cui Shun

(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The as-cast microstructure of the V-5Cr-5Ti alloy was analyzed by XRD, OM, SEM and TEM. The behavior of second phase was investigated. The results show that the V-5Cr-5Ti alloy, fabricated by vacuum electron-beam melting, has coarse grains, which possess the characteristics of dendritic crystal made by lamellar secondary phase. The lattice parameters of metal vanadium and V-5Cr-5Ti alloy are 0.30316 and 0.30375 nm, respectively. The swelling of V cell volume is 0.58%. There are two kinds of secondary phase in the as-cast alloy, i.e. short strip secondary phase, which has fcc structure with the lattice parameter between 0.4182~0.4228 nm and elliptical-shaped secondary phase, which has fcc structure with the lattice parameter between 0.4186~0.4242 nm. In the process of solidification of the V-5Cr-5Ti alloy, Ti and C react to form metastable interstitial phase ( $Ti_2C$ ), which has fcc structure, or V and C react to form metastable interstitial phase ( $V_2C$ ), which has hcp structure. Then, atoms are substituted by each other. Finally, the secondary phases are formed, that is vanadium and chromium-alloyed precipitations of titanium oxycarbonitride, whose chemical formula is expressed as ( $Ti_2-CON$ ).

**Key words:** vanadium alloy; structure; secondary phase; lattice parameter

---

Corresponding author: Li Zengde, Candidate for Ph. D., Powder Metallurgy and Special Materials Research Department, General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China, Tel: 0086-10-82241215, E-mail: sabai110@163.com