



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 31309—2020  
代替 GB/T 31309—2014

---

## 铸造高温合金电子空位数计算方法

Calculation of electron vacancy number in cast superalloys

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 31309—2014《镍基高温合金电子空位数计算方法》，与 GB/T 31309—2014 相比，主要技术变化如下：

- 增加了钴基铸造高温合金电子空位数计算方法(见 2.2、2.4、3.2 和 4.2.2)；
- 修改了镍基铸造高温合金电子空位数计算方法(见 2.2、2.3 和 4.2.1, 2014 年版的第 2 章和 4.2)；
- 删除了电子空位数矩阵中的铜元素,增加了钨元素,修改了镍元素的电子空位数(见表 1, 2014 年版的表 1)；
- 增加了典型高温合金电子空位数计算和应用实例(见附录 B)。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位:北京钢研高纳科技股份有限公司、钢铁研究总院、冶金工业信息标准研究院、中国航发北京航空材料研究院、中国航发南方工业有限公司、中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司。

本标准主要起草人:吴剑涛、吴保平、李维、燕平、戴强、宋尽霞、李炼、李波、陈惠霞。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 31309—2014。



# 铸造高温合金电子空位数计算方法

## 1 范围

本标准规定了铸造高温合金电子空位数的计算原理、计算步骤、计算方法和结果应用。  
本标准适用于铸造高温合金母合金及铸件的电子空位数的计算。

## 2 计算原理

2.1 铸造高温合金强化元素种类多,且各合金元素饱和度高,易于析出对强度和塑性产生不利影响的TCP相,该相主要包括 $\sigma$ 、 $\mu$ 、Laves相等。这些相的析出规律与合金 $\gamma$ 固溶体中合金元素的d层电子轨道未充满的程度——即电子空位数有关。合金的电子空位数 $N_v$ 值采用式(1)计算:

$$N_v = \sum_i^n m_i (N_v)_i \dots\dots\dots (1)$$

式中:  
 $N_v$  ——合金的电子空位数;  
 $m_i$  ——合金中 $\gamma$ 固溶体的第*i*个元素的原子分数;  
 $(N_v)_i$  ——第*i*个元素的电子空位数;  
*n* ——合金 $\gamma$ 固溶体中元素的数目。

2.2 计算电子空位数时,应了解合金中的沉淀相。镍基铸造高温合金的沉淀相包括硼化物、碳化物和 $\gamma'$ 相,钴基铸造高温合金沉淀相包括硼化物和碳化物。扣除这些沉淀相析出所占用的合金元素后,确定 $\gamma$ 固溶体成分,然后计算电子空位数。

2.3 镍基铸造高温合金电子空位数计算原则如下:

- a) 镍、铬、钛和钼形成 $(Mo_{0.5}, Ti_{0.15}, Cr_{0.25}, Ni_{0.10})_3 B_2$  硼化物,由此得到析出硼化物以后的元素剩余含量。
- b) 镍基合金中主要碳化物类型有MC、 $M_{23}C_6$  和  $M_6C$ 。假设1/2C形成MC即(Hf, Ta, Nb, Ti, Zr, V)C, 1/2C形成 $M_{23}C_6$  即  $Cr_{21}(Mo, W)_2C_6$  [(W+Mo) $\leq 6\%$ 时], 或者  $M_6C$  即  $NiCo_2(Mo, W)_3C$  [(W+Mo) $> 6\%$ 时], 由此得到析出碳化物以后的元素剩余含量。
- c) 剩余的铝、钛、钨、铌、钽、50%原始含量的钒以及3%原始含量的铬,与3倍的镍形成 $\gamma'$ 相,即  $Ni_3(Al, Ti, Nb, Hf, Ta, 0.5V, 0.03Cr)$ , 由此得到析出碳化物、硼化物及 $\gamma'$ 相以后的剩余固溶体成分。
- d) 利用式(1)计算剩余固溶体平均电子空位数 $N_v$ 。

2.4 钴基铸造高温合金电子空位数计算原则如下:

- a) 镍、铬、钛和钼形成 $(Mo_{0.5}, Ti_{0.15}, Cr_{0.25}, Ni_{0.10})_3 B_2$  硼化物,由此得到析出硼化物以后的元素剩余含量。
- b) 钴基合金中主要碳化物类型有MC、 $M_{23}C_6$  和  $M_6C$ 。假设1/2C形成MC即(Hf, Ta, Nb, Ti, Zr, V)C, 1/2C形成 $M_{23}C_6$  即  $Cr_{21}(Mo, W)_2C_6$  [(W+Mo) $\leq 6\%$ 时], 或者  $M_6C$  即  $NiCo_2(Mo, W)_3C$  [(W+Mo) $> 6\%$ 时], 由此得到析出碳化物以后的元素剩余含量。
- c) 利用式(1)计算剩余固溶体平均电子空位数 $N_v$ 。

### 3 计算步骤

3.1 镍基合金的电子空位数  $N_v$  应按以下顺序计算：

- 将每种元素的质量分数转换为原子分数；
- 计算硼化物和碳化物析出后的元素剩余含量；
- 计算  $\gamma'$  相析出后的元素剩余含量；
- 计算剩余各元素在基体  $\gamma$  相中所占的原子百分数；
- 计算合金的电子空位数  $N_v$ 。

3.2 钴基合金的电子空位数  $N_v$  应按以下顺序计算：

- 将每种元素的质量分数转换为原子分数；
- 计算硼化物和碳化物析出后的元素剩余含量；
- 计算剩余各元素在基体  $\gamma$  相中所占的原子百分数；
- 计算合金的电子空位数  $N_v$ 。

3.3 建立与表 1 相似的矩阵,计算合金的电子空位数。

表 1 计算合金的电子空位数  $N_v$  的矩阵

栏目	元素	质量分 数/%	原子 质量	质量分数/ 原子质量	原子分数 /%	析出后元素 原子分数 /%	固溶体元素 原子分数 $m_i$	元素的电 子空位数 $(N_v)_i$	合金的电 子空位数 $m_i(N_v)_i$
		A	B	C	D	E	F	G	H
行 1	Cr		52.00					4.66	
行 2	Ti		47.90					6.66	
行 3	Mo		95.94					4.66	
行 4	Al		26.98					7.66	
行 5	Co		58.93					1.71	
行 6	B		10.81					7.66	
行 7	Zr		91.22					6.66	
行 8	C		12.01					—	
行 9	Si		28.09					6.66	
行 10	Mn		54.94					3.66	
行 11	Fe		55.85					2.66	
行 12	Ru		101.07					2.66	
行 13	V		50.94					5.66	
行 14	W		183.85					4.66	
行 15	Ta		180.95					5.66	
行 16	Nb		92.91					5.66	
行 17	Hf		178.49					6.66	

表 1 (续)

栏目	元素	质量分 数/%	原子 质量	质量分数/ 原子质量	原子分数 /%	析出后元素 原子分数 /%	固溶体元素 原子分数 $m_i$	元素的电 子空位数 $(N_v)_i$	合金的电 子空位数 $m_i(N_v)_i$
		A	B	C	D	E	F	G	H
行 18	Re		186.21					4.66	
行 19	Ni		58.71					0.66	
总和									

4 计算方法

4.1 原子分数

4.1.1 在 A 栏每行输入每个元素的质量分数。合金中若无某种元素,则输入 0。将其他元素的质量分数相加,用 100 减去总数,确定镍或钴的质量分数。

4.1.2 每种元素的质量分数(A 栏)除以其对应的原子质量(B 栏),然后将所得结果填入表中的 C 栏。将 C 栏的值相加获得 C 栏的总和,然后分别用 C 栏中每种元素的值除以 C 栏的总和,将该值输入 D 栏,得到元素的原子分数。

4.2 沉淀相析出后元素原子分数

4.2.1 镍基合金沉淀相析出后元素原子分数

镍基合金沉淀相析出后铬、钼、镍、钨、钴、钒和锆的原子分数按表 2 规定进行计算,将结果输入相应的 E1、E3、E19、E14、E5、E13 和 E7 中。钛、铝、硼、碳、钽、铌和铪的原子分数 E2、E4、E6、E8、E15、E16 和 E17 输入 0。硅、锰、铁、钨和铈的原子分数 E9、E10、E11、E12 和 E18 直接输入相应行中 D9、D10、D11、D12 和 D18 的值。

表 2 镍基合金沉淀相析出后铬、钼、镍、钨、钴、钒和锆元素原子分数

元素	沉淀相析出后元素原子分数	
	$W+Mo\leq 6\%$	$W+Mo>6\%$
铬	$D1 \times 0.97 - 0.375 \times D6 - 1.75 \times D8$ , 将结果输入 E1 栏, 其中: ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数	$D1 \times 0.97 - 0.375 \times D6$ , 将结果输入 E1 栏, 其中: ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数
钼	$D3 - 0.75 \times D6 - 0.167 \times D8 \times D3 / (D3 + D14)$ , 将结果输入 E3 栏, 其中: ——D3 是 Mo 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D14 是 W 的原子分数	$D3 - 0.75 \times D6 - 1.5 \times D8 \times D3 / (D3 + D14)$ , 将结果输入 E3 栏, 其中: ——D3 是 Mo 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D14 是 W 的原子分数

表 2 (续)

元素	沉淀相析出后元素原子分数	
	$W + Mo \leq 6\%$	$W + Mo > 6\%$
镍	$D19 - 0.15 \times D6 - 3 \times (D4 + 0.03 \times D1 + D16 - 0.5 \times D8 \times D16 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D2 - 0.225 \times D6 - 0.5 \times D8 \times D2 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D15 - 0.5 \times D8 \times D15 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D17 - 0.5 \times D8 \times D17 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + 0.5 \times D13)$ , 将结果输入 E19 栏, 其中: ——D19 是 Ni 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D4 是 Al 的原子分数; ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数	$D19 - 0.15 \times D6 - 0.5 \times D8 - 3 \times (D4 + 0.03 \times D1 + D16 - 0.5 \times D8 \times D16 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D2 - 0.225 \times D6 - 0.5 \times D8 \times D2 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D15 - 0.5 \times D8 \times D15 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + D17 - 0.5 \times D8 \times D17 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17) + 0.5 \times D13)$ , 将结果输入 E19 栏, 其中: ——D19 是 Ni 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D4 是 Al 的原子分数; ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数
钨	$D14 - 0.167 \times D8 \times D14 / (D3 + D14)$ , 将结果输入 E14 栏, 其中: ——D14 是 W 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D3 是 Mo 的原子分数	$D14 - 1.5 \times D8 \times D14 / (D3 + D14)$ , 将结果输入 E14 栏, 其中: ——D14 是 W 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D3 是 Mo 的原子分数
钴	将 D5 结果输入 E5 栏, 其中: ——D5 是 Co 的原子分数	$D5 - D8$ , 将结果输入 E5 栏, 其中: ——D5 是 Co 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数
钒	$D13 \times 0.5 - 0.5 \times D8 \times D13 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E13 栏, 其中: ——D13 是 V 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	
锆	$D7 - 0.5 \times D8 \times D7 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E7 栏, 其中: ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	

4.2.2 钴基合金沉淀相析出后元素原子分数

钴基合金沉淀相析出后铬、钼、镍、钨、钴、钒、锆、钛、钽、铌和铪的原子分数按表 3 规定进行计算,将结果输入相应的 E1、E3、E19、E14、E5、E13、E7、E2、E15 和 E17 中。硼和碳的原子分数 E6 和 E8 输入 0。铝、硅、锰、铁、钨和铪的原子分数 E4、E9、E10、E11、E12 和 E18 直接输入相应行中 D4、D9、D10、D11、D12 和 D18 的值。

表 3 钴基合金沉淀相析出后铬、钼、镍、钨、钴、钒、锆、钛、钽、铌和铪元素原子分数

元素	沉淀相析出后元素原子分数	
	$W+Mo\leq 6\%$	$W+Mo>6\%$
铬	$D1-0.375\times D6-1.75\times D8$ ,将结果输入 E1 栏,其中: ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数	$D1-0.375\times D6$ ,将结果输入 E1 栏,其中: ——D1 是 Cr 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数
钼	$D3-0.75\times D6-0.167\times D8\times D3/(D3+D14)$ ,将结果输入 E3 栏,其中: ——D3 是 Mo 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D14 是 W 的原子分数	$D3-0.75\times D6-1.5\times D8\times D3/(D3+D14)$ ,将结果输入 E3 栏,其中: ——D3 是 Mo 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D14 是 W 的原子分数
镍	$D19-0.15\times D6$ ,将结果输入 E19 栏,其中: ——D19 是 Ni 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数	$D19-0.15\times D6-0.5\times D8$ ,将结果输入 E19 栏,其中: ——D19 是 Ni 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数
钨	$D14-0.167\times D8\times D14/(D3+D14)$ ,将结果输入 E14 栏,其中: ——D14 是 W 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D3 是 Mo 的原子分数	$D14-1.5\times D8\times D14/(D3+D14)$ 将结果输入 E14 栏,其中: ——D14 是 W 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D3 是 Mo 的原子分数
钴	将 D5 结果输入 E5 栏,其中: ——D5 是 Co 的原子分数	$D5-D8$ ,将结果输入 E5 栏,其中: ——D5 是 Co 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数
钒	$D13-0.5\times D8\times (D13/(D2+D7+D13+D15+D16+D17))$ ,将结果输入 E13 栏,其中: ——D13 是 V 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	

表 3 (续)

元素	沉淀相析出后元素原子分数	
	$W + Mo \leq 6\%$	$W + Mo > 6\%$
锆	$D7 - 0.5 \times D8 \times D7 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E7 栏, 其中: ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	
钛	$D2 - 0.225 \times D6 - 0.5 \times D8 \times D2 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E2 栏, 其中: ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D6 是 B 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	
钽	$D15 - 0.5 \times D8 \times D15 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E15 栏, 其中: ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	
铌	$D16 - 0.5 \times D8 \times D16 / (D2 + D7 + D13 + D15 + D16 + D17)$ , 将结果输入 E16 栏, 其中: ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	



表 3 (续)

元素	沉淀相析出后元素原子分数	
	$W + Mo \leq 6\%$	$W + Mo > 6\%$
钨	D17—0.5×D8×D17/(D2+D7+D13+D15+D16+D17),将结果输入 E17 栏,其中: ——D2 是 Ti 的原子分数; ——D7 是 Zr 的原子分数; ——D8 是 C 的原子分数; ——D13 是 V 的原子分数; ——D15 是 Ta 的原子分数; ——D16 是 Nb 的原子分数; ——D17 是 Hf 的原子分数	

4.3 计算剩余  $\gamma$  固溶体元素原子分数

将 E 栏的值相加获得 E 栏的总和,然后分别用 E 栏中每种元素的值除以 E 栏的总和,将结果输入到对应的 F 栏,得到固溶体元素原子分数。

4.4 计算电子空位数

4.4.1 用 F 栏中每种元素的固溶体元素原子分数乘以对应的 G 栏中的电子空位数,将结果输入到对应的 H 栏中。

4.4.2 合金的电子空位数  $N_v$  是 H 栏输入值的总和,修约到 0.01 单位。

4.4.3 镍基合金电子空位数  $N_v$  矩阵计算实例参见附录 A。

5 结果应用

当  $N_v$  不小于临界值  $N_v^c$ ,则合金趋于析出 TCP 相;当  $N_v$  小于临界值  $N_v^c$  时,则认为合金组织是稳定的,不析出 TCP 相。临界值  $N_v^c$  是不同合金不同状态下通过试验确定的,应用实例参见附录 B。



附 录 A  
(资料性附录)

镍基合金电子空位数  $N_v$  矩阵计算实例

A.1 镍基合金化学成分见表 A.1。

表 A.1 镍基合金化学成分

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
Cr	15.8	Mn	0.03
Ti	3.45	Fe	0.35
Mo	1.65	Ru	0.00
Al	3.45	V	0.00
Co	8.50	W	2.5
B	0.01	Ta	1.75
Zr	0.04	Nb	0.00
C	0.17	Hf	0.00
Si	0.03	Re	0.00

A.2 镍基合金电子空位数  $N_v$  矩阵计算实例见表 A.2。

表 A.2 镍基合金电子空位数  $N_v$  矩阵计算实例

栏目	元素	质量分 数/%	原子质量	质量分数/ 原子质量	原子 分数/%	析出后元素 原子分数/%	固溶体元素 原子分数 $m_i$	元素的电 子空位数 ( $N_v$ ) <sub><math>i</math></sub>	合金的电 子空位数 $m_i(N_v)_i$
		A	B	C	D	E	F	G	H
行 1	Cr	15.8	52.00	0.303 8	0.171 4	0.152 1	0.307 8	4.66	1.434 4
行 2	Ti	3.45	47.90	0.072 0	0.040 6	0.000 0	0.000 0	6.66	0.000 0
行 3	Mo	1.65	95.94	0.017 2	0.009 7	0.008 6	0.017 3	4.66	0.080 8
行 4	Al	3.45	26.98	0.127 9	0.072 1	0.000 0	0.000 0	7.66	0.000 0
行 5	Co	8.50	58.93	0.144 2	0.081 4	0.081 4	0.164 7	1.71	0.281 6
行 6	B	0.01	10.81	0.000 9	0.000 5	0.000 0	0.000 0	7.66	0.000 0
行 7	Zr	0.04	91.22	0.000 4	0.000 2	0.000 2	0.000 5	6.66	0.003 0
行 8	C	0.17	12.01	0.014 2	0.008 0	0.000 0	0.000 0	0.00	0.000 0
行 9	Si	0.03	28.09	0.001 1	0.000 6	0.000 6	0.001 2	6.66	0.008 1
行 10	Mn	0.03	54.94	0.000 5	0.000 3	0.000 3	0.000 6	3.66	0.002 3
行 11	Fe	0.35	55.85	0.006 3	0.003 5	0.003 5	0.007 2	2.66	0.019 0
行 12	Ru	0.00	101.07	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	2.66	0.000 0

表 A.2 (续)

栏目	元素	质量分 数/%	原子质量	质量分数/ 原子质量	原子 分数/%	析出后元素 原子分数/%	固溶体元素 原子分数 $m_i$	元素的电 子空位数 $(N_v)_i$	合金的电 子空位数 $m_i(N_v)_i$
		A	B	C	D	E	F	G	H
行 13	V	0.00	50.94	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	5.66	0.000 0
行 14	W	2.50	183.85	0.013 6	0.007 7	0.007 0	0.014 2	4.66	0.066 0
行 15	Ta	1.75	180.95	0.009 7	0.005 5	0.000 0	0.000 0	5.66	0.000 0
行 16	Nb	0.00	92.91	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	5.66	0.000 0
行 17	Hf	0.00	178.49	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.66	0.000 0
行 18	Re	0.00	186.21	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	4.66	0.000 0
行 19	Ni	62.27	58.71	1.060 6	0.598 4	0.240 4	0.486 6	0.66	0.321 1
总和		100	—	1.772 5	—	0.494 2	—	—	2.22

附 录 B  
(资料性附录)  
典型铸造高温合金电子空位数  $N_v$  应用实例

B.1 典型铸造高温合金化学成分

典型铸造高温合金 K424 合金的 4 种成分见表 B.1,电子空位数  $N_v$  计算值见表 B.2。

表 B.1 K424 合金化学成分

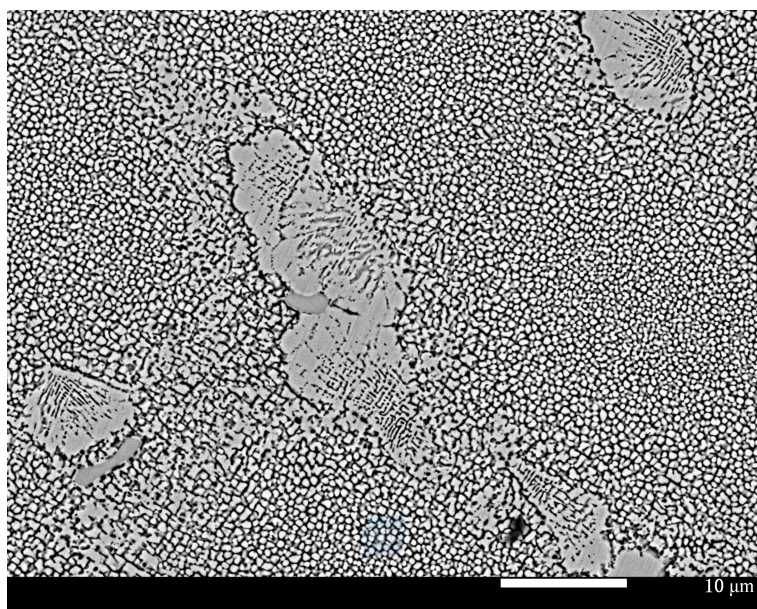
序号	化学成分(质量分数)/%											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	V	B	Zr	Ni
1	0.16	9.11	14.54	1.02	2.73	5.08	4.22	0.51	0.50	0.006	0.01	余量
2	0.16	9.82	14.47	1.02	2.73	4.97	4.22	0.74	0.49	0.006	0.01	余量
3	0.16	9.76	14.32	1.02	3.19	5.08	4.22	0.74	0.49	0.006	0.01	余量
4	0.16	10.39	14.34	1.02	2.73	5.32	4.22	0.76	0.50	0.006	0.001	余量

表 B.2 K424 合金电子空位数应用实例

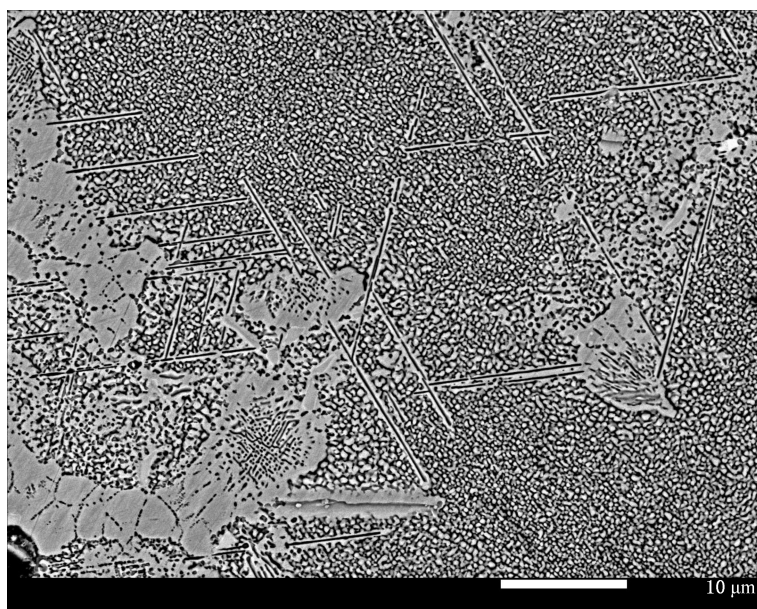
序号	电子空位数 $N_v$	850 ℃时效 1 000 h,TCP 析出倾向(2 mm 板状)
1	2.24	×
2	2.32	×
3	2.38	×
4	2.51	√
注：“√”表示有 TCP 相析出,“×”表示无 TCP 相析出。		

B.2 典型铸造高温合金 TCP 相析出临界值确定

4 种成分的 K424 合金(2 mm 铸态板状试样)在 850 ℃时效 1 000 h 后 TCP 相析出情况见表 B.2,试样显微组织见图 B.1,从而确定 K424 合金(2 mm 铸态板状试样)电子空位数的临界值  $N_v^c$  为 2.51。



a)  $N_v$  值 2.38



b)  $N_v$  值 2.51

图 B.1 不同  $N_v$  值 K424 合金(2 mm 板状试样)在 850 °C 时效 1 000 h 后的显微组织