

# 晶体取向对镍基单晶高温合金枝状组织的影响\*

西北工业大学 何国 李建国 毛协民 傅恒志

本文研究了一种镍基单晶高温合金不同晶体取向形成的枝晶组织的变化规律，发现枝晶择优生长方向偏离热流方向时，一次枝晶形态发生明显的变化，二次枝晶分枝出现明显的不对称性。

关键词：晶体取向，单晶高温合金，枝晶组织

## Influence of Crystallographic Orientations on Dendrite Morphologies in a Ni-Based SC Superalloy

He Guo Li Jianguo Mao Xiemin Fu Hengzhi  
(Northwestern Polytechnical University)

The influence of crystallographic orientations on dendritic morphologies in a SC superalloy has been investigated. The results indicate that, an obvious change of the geometrical arrangement of primary dendrites and unsymmetric secondary arms occur for different crystallographic orientations.

Keywords: dendrite morphologies, single crystal superalloy, crystallographic orientation

### 一、引言

镍基单晶高温合金是近年来研究较多的一类高温合金，它比定向高温合金具有更优越的高温承载能力，因此具有很好的发展前景。单晶高温合金具有强烈的各向异性特性，通常在〈100〉取向合金的热疲劳、高温蠕变等性能具有最大值<sup>[1~3]</sup>，这种性能的各向异性源于单晶合金的晶体取向和凝固组织结构，控制G/R的范围，可获得从平面、胞状到树枝状的组织结构。一般认为一次树枝晶取向为〈100〉择优生长方向，枝晶的二次分枝取向为和一次枝晶取向〔100〕相垂直的〔010〕、〔001〕、〔010〕及〔001〕方向。本文通过改变籽晶的晶体取向用籽晶法制取单晶，以建立在一定凝固条件下特定成分的单晶高温合金晶体取向和枝晶组织形态的关系。

### 二、试验方法

选用一种国内研制的耐蚀镍基单晶高温合金（%）（Cr16，Co8.5，W6.0，Al3.9，Ti3.8，Ta1.0，C<0.01，余Ni），其固液相温度为1295~1310℃。将具有枝状组织的籽晶加工成φ7×20的小圆柱，其轴向晶体取向如图1，分别为a~e五种不同的晶体取向。在自制高温梯度电阻加热真空定向凝固装置上制取单晶。抽拉试样时液态金属在籽晶上沿轴向进行外沿生长，以获得不同晶体取向的单晶体。

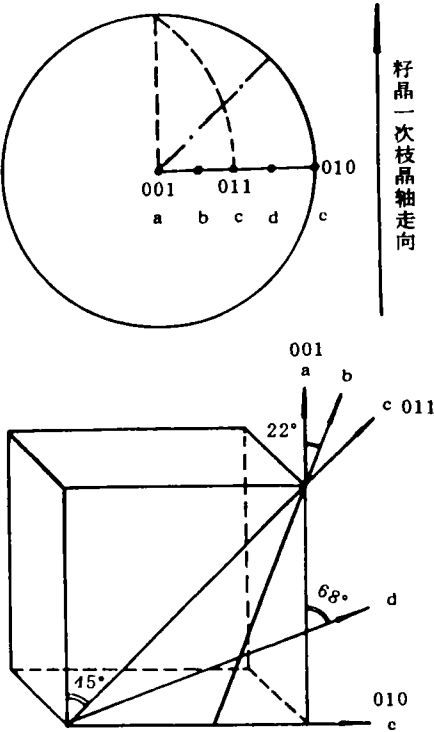
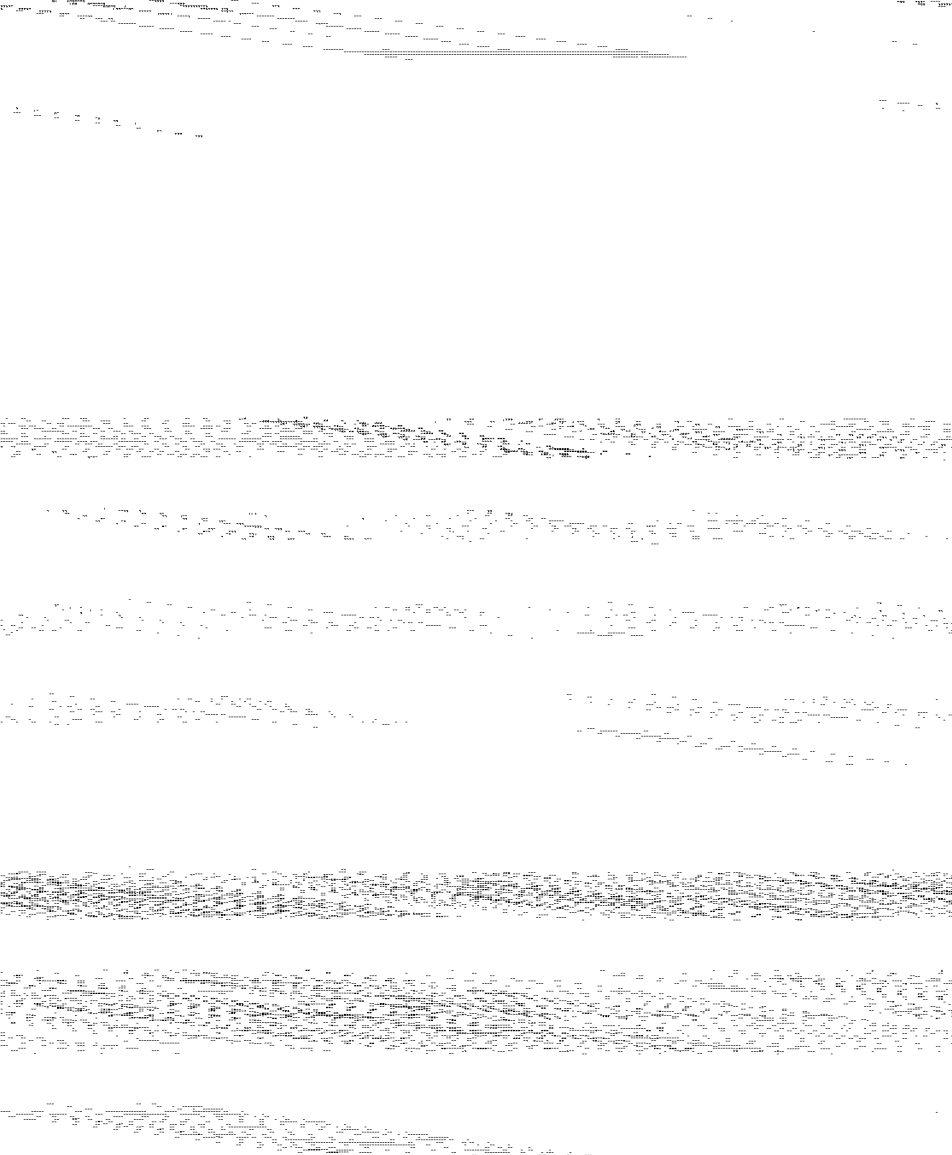


图1 籽晶的枝晶取向（晶体取向）

### 三、结果及讨论

图2为不同籽晶取向在 $G/R = 5.0 \times 10^4 \text{K} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 时，籽晶及其外沿生长的单晶的枝晶形态，A为单晶横截

\* 本课题得到国家自然科学基金资助  
材料工程



次轴取向和单晶的一次枝晶轴取向也相一致，在A面可见不对称的枝晶形态。(c) 籽晶的〔001〕及〔010〕与单晶生长方向均成45°角，因此相互垂直的〔001〕及〔010〕同时为单晶的择优生长方向，由图中B及C可见单晶具有相交的树枝晶，并分别和籽晶的一次及二次枝晶轴取向相一致。(d) 当籽晶的一次枝晶轴〔001〕方向和单晶生长方向具有较大的夹角时(68°)，二次枝晶轴〔010〕方向和单晶生长方向夹角最小，因此单晶将沿〔010〕方向生长，即单晶的一次枝晶轴和籽晶二次枝晶轴相一致，因此两者一次轴相垂直，而A面枝晶形态和(b)中A面相似。(e) 籽晶的一次枝晶轴〔001〕和单晶生长方向垂直，二次枝晶轴〔010〕方向和热流方向一致，因此单晶的枝晶形态(B、A)和(a)中单晶的枝晶形态相似。

### 1. 枝晶二次分枝的不对称性

当枝晶的择优生长方向和单晶的生长方向（或热流方向）偏离某一角度( $\phi$ )时，背向液固界面前沿一侧的二次枝晶生长将受到相邻枝晶朝向液固界面前沿一侧的二次枝晶生长时溶质扩散场的抑制。如图3所示，在 $t_1$ 时间，二次枝晶①已经历了相当的生长过程，而二次枝晶②才刚刚开始生长，在②的生长过程中很快将接近发达的①，因此②的生长将受到①的溶质扩散场的抑制。当到达时间 $t_2$ 时，二次分枝③已开始生长，并继续对相邻左边枝晶的二次分枝的生长产生上面所述的影响，结果将造成不对称的二次枝晶分枝，而且偏离角 $\phi$ 越大，这种影响越强烈，二次枝晶分枝的不对称性越显著。图2中(b)和(d)单晶的一次枝晶轴和单晶生长方向具有相同的偏离角( $\phi=22^\circ$ )，这种二次枝晶分枝的不对称性也相同；(c)单晶的一次枝晶轴和单晶生长方向具有最大的偏离角( $\phi=45^\circ$ )，因此这种二次枝晶分枝的不对称性最严重。

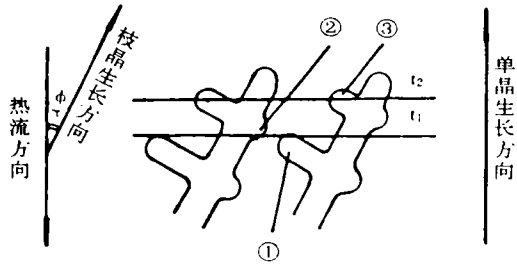


图3 不对称二次枝晶分枝形成机理

由于热流方向的改变对二次枝晶分枝形态的影响，将进一步影响到微观偏析以及枝晶间相及碳化物的形态和分布，因此将对单晶高温合金的性能产生很大的影响。

### 2. 晶体取向对枝状组织的影响

当枝晶的择优生长方向和热流方向一致，枝晶生长速率和液固界面推进的速率相同，单晶组织为规则的树枝晶(图2a、e)，其一次枝晶间距取决于生长速率及界材料工程

面前沿液相温度梯度<sup>[4,5]</sup>。当枝晶择优生长方向偏离热流方向 $\phi$ 角，枝晶的二次分枝将产生明显的不对称分布，一次枝晶间距不仅受生长速率和温度梯度的影响，同时也受 $\phi$ 角的影响<sup>[6]</sup>(图2b、d)。当 $\phi$ 角为45°时，〔011〕方向为单晶生长方向，在试样横截面(〔011〕面)具有相对排列的不对称的枝晶组织；在纵截面(〔100〕面)，两个择优生长方向〔001〕及〔010〕具有相同的生长条件，因此同时生长，形成“V”形的枝状组织(图2c)。图4是根据试验获得的，籽晶不同一次枝晶取向(图1a~e)单晶枝状组织的示意图，单晶生长方向从〔001〕到〔010〕，在〔011〕时为一对称点，从〔001〕到〔011〕和从〔011〕到〔010〕单晶枝状组织形态具有相对称的变化规律。

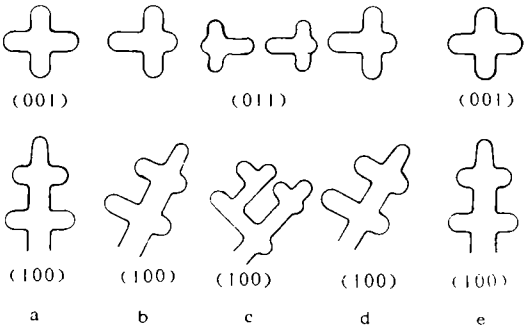


图4 改变晶体取向对枝晶形态的影响

## 四、结 论

单晶高温合金在定向凝固条件下，当枝晶择优生长方向偏离热流方向时，单晶一次枝晶形态将发生明显的改变，一次枝晶间距也将受到热流方向偏离的影响，枝晶二次分枝将出现明显的不对称性，由此影响单晶组织的微观偏析以及枝晶间相的形态和分布，从而影响单晶高温合金的性能。

### 参考文献

1. Y. G. Nakagawa et al., NASA TM-88387, 1~23
2. A. Fredholm et al., High Temperature Alloys, 1985, 9~18
3. R. P. Dalal et al., Superalloys, 1984, 185~187
4. K. Kurz et al., Acta Metall., 1981, Vol. 29, 11
5. J. D. Hunt, Solidification and Casting of Metals, The Metals Society, London, 1979, 3~9
6. 何国等，第四届青年材料科学会议，武汉，1993，10，65

\* \* \* \* \*

欢迎订阅  
1994 年《材料工程》