

## DD2 单晶合金激光表面重熔过程中熔区组织预测 \*

杨森<sup>1,2)</sup> 黄卫东<sup>2)</sup> 钟敏霖<sup>1)</sup> 刘文今<sup>1)</sup> 周尧和<sup>2)</sup>

1) 清华大学机械工程系, 北京 100084

2) 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072

**摘要** 利用晶体生长的最小过冷度判据, 对 DD2 单晶合金激光重熔过程中重熔区组织的生长速度进行了分析, 建立了枝晶尖端生长速度与激光束扫描速度和固液界面前进速度的关系。根据此分析对熔池组织进行了预测, 并与实验结果进行了比较, 发现激光熔池中枝晶组织的生长方向强烈地受基体晶粒取向和激光束扫描方向的影响。枝晶生长条件下, 择优取向对枝晶生长方向的影响要较热流的影响大。理论预测与实验结果相吻合。

**关键词** 激光表面熔凝, 熔池, DD2 单晶合金

中图分类号 TG114

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)05-0507-05

## MICROSTRUCTURE PREDICTION OF LASER SURFACE REMELTING ZONE OF SINGLE CRYSTAL ALLOY DD2

YANG Sen<sup>1,2)</sup>, HUANG Weidong<sup>2)</sup>, ZHONG Minlin<sup>1)</sup>, LIU Wenjin<sup>1)</sup>, ZHOU Yaohe<sup>2)</sup>

1) Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2) State Key Lab of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Correspondent: YANG Sen, associate professor, Tel: (010)62773253, Fax: (010)62773862,

E-mail: yang9694@263.net

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59771054) and Postdoctoral Science Foundation of China

Manuscript received 2001-08-08, in revised form 2001-11-16

**ABSTRACT** A growth velocity analysis was carried out during laser surface remelting processing based on a minimum undercooling criterion and the relationships among dendrite growth velocities in the three  $\langle 100 \rangle$  direction, moving velocities of the solid/liquid interface and laser scanning velocities for the different crystallographic orientations were also set up. The analytic results show that the growth direction of dendrites in the melting pool is obviously affected by the orientation of the matrix grain. According to this analysis, the melting pool shapes were reconstructed and predicted, which is agreement with the experimental results.

**KEY WORDS** laser surface remelting, melting pool, single crystal alloy DD2

激光表面快速熔凝技术作为一种可控性极强的凝固技术在凝固理论研究和材料的表面改性中发挥了重要作用<sup>[1-6]</sup>。在激光表面快速熔凝过程中, 熔池内组织从基体以外延生长的方式垂直于固液界面(熔池边界)生长<sup>[7-9]</sup>。但通常得到的却是形态各异, 甚至是紊乱的外延组织。这显然是受相邻晶粒不同取向影响的结果。事实上熔池中微观组织的生长是一个非常复杂的过程, 它不仅受熔池内热流方向的影响, 而且受晶体择优取向的影响。通常条件下

晶体的生长方向主要受温度场、浓度场和晶体的生长特性的影响。对于面心立方晶体中的胞晶生长, 胞晶轴介于  $\langle 100 \rangle$  方向和热流方向之间, 并随温度梯度  $G_L$  和生长速度  $V_s$  的比值  $G_L/V_s$  的减小而逐渐接近  $\langle 100 \rangle$  方向。而枝晶生长时, 晶轴沿  $\langle 100 \rangle$  方向生长, 热流方向不改变晶轴生长方向, 只是选择三个  $\langle 100 \rangle$  方向中与热流方向夹角最小的一个方向生长<sup>[10,11]</sup>。而晶体学因素可以通过提供择优晶体学方向影响晶体的生长, 即容易生长方向。但以往激光表面熔凝研究都是采用多晶进行的, 没有考虑原始组织取向对枝晶生长方向的影响, 因此采用多晶(等轴晶)的基体组织会将基体组织取向的复杂性引入到确定生长速度中, 这必然给定量分析带来误差。本文采用晶体生长的最小过冷度判据, 对单晶合金激光重熔区组织的生长速度进行分析, 并对熔池中组织的生长进行预测。

\* 国家自然科学基金项目 59771054, 清华大学 985 重点基金项目

和中国博士后科学基金项目资助

收到初稿日期: 2001-08-08, 收到修改稿日期: 2001-11-16

作者简介: 杨森, 男, 1967 生, 副教授, 博士

### 1 熔池中枝晶生长速度分析

在强制性生长条件下,凝固界面前沿的速度  $\vec{V}_S$  主要是由热场决定的,基本上沿着熔池中温度梯度最大的方向,与激光束的扫描速度  $\vec{V}_b$  有以下关系<sup>[12]</sup>:

$$|\vec{V}_S| = \vec{V}_b \cdot \vec{n} = |\vec{V}_b| \cos\theta \quad (1)$$

式中  $\vec{n}$  为固液界面的法向矢量,与  $\vec{V}_S$  平行,  $\theta$  是法向矢量与扫描速度的夹角。

对胞晶和共晶而言,其生长方向与凝固界面前沿的法线方向接近,因此其生长速度可以近似认为等于凝固界面前沿的速度。但对于枝晶而言,由于枝晶生长的择优取向问题,枝晶生长并不完全受热流的控制。对于面心立方的 DD2 单晶合金,三个  $\langle 100 \rangle$  方向是择优生长方向,而最终选择的(择优)生长方向将是与其夹角最小的一个。枝晶尖端的过冷度随生长速度增大而增大<sup>[13,14]</sup>,因此和生长方向最接近的枝晶具有最小的过冷度,其尖端位置超前于其它取向的枝晶,在生长竞争中处于最有利的地位。

对于一般的晶向  $[hkl]$ ,在此方向上的枝晶生长速度  $\vec{V}_{hkl}$  和凝固界面前沿的速度  $\vec{V}_S$  的关系为:

$$|\vec{V}_S| = \vec{V}_{hkl} \cdot \vec{n} = |\vec{V}_{hkl}| \cos\varphi \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为凝固界面前沿的速度  $\vec{V}_S$  与晶体择优生长方向的夹角,图 1 示出了  $\vec{V}_S$  和  $\vec{V}_b$  以及  $\vec{V}_S$  和  $\vec{V}_{hkl}$  之间的关系。

合并式 (1) 和式 (2), 得到:

$$|\vec{V}_{hkl}| = |\vec{V}_b| \cos\theta / \cos\varphi \quad (3)$$

对于给定的凝固前沿取向和激光束的扫描方向,根据式 (3) 可计算出三个  $\langle 100 \rangle$  取向的  $|\vec{V}_{hkl}|$  和  $|\vec{V}_b|$  的比值,结合最小生长速度判据,可确定最有利的枝晶生长方向。

设固液界面法线  $\vec{n}$  与  $[100]$ ,  $[010]$  和  $[001]$  三个方向的夹角分别为  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$ , 如图 2a, b 所示,代入式 (3), 则有:

$$|\vec{V}_{100}| = |\vec{V}_b| \cos\theta / \cos\alpha \quad (4a)$$

$$|\vec{V}_{010}| = |\vec{V}_b| \cos\theta / \cos\beta \quad (4b)$$

$$|\vec{V}_{001}| = |\vec{V}_b| \cos\theta / \cos\gamma \quad (4c)$$

为了分析方便起见,建立一参考坐标系,如图 2b 所示,  $x$  轴与  $\vec{V}_b$  的方向一致,  $z$  轴垂直于试样表面,  $\theta$  为界面法线方向与扫描速度方向 ( $x$  轴) 的夹角,  $\varphi$  是  $y$  轴与固液界面法向矢量在  $y-z$  面上的投影的夹角。

### 2 熔池内组织的预测

#### 2.1 激光束在 (110) 面上沿 [001] 方向扫描

当激光束在 (110) 面上沿 [001] 方向扫描时,固液界面法向矢量方向角余弦可表示为:

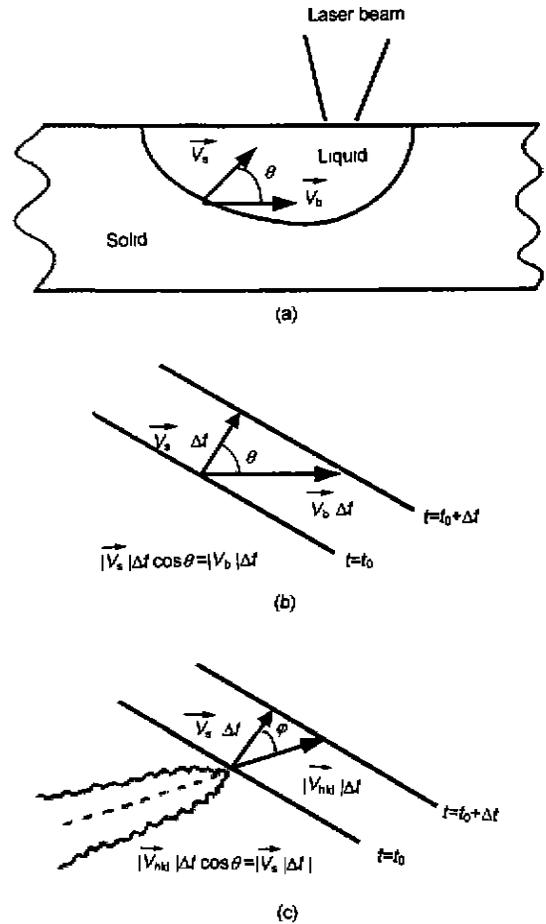


图 1  $\vec{V}_S$  和  $\vec{V}_b$ ,  $\vec{V}_S$  和  $\vec{V}_{hkl}$  之间的关系示意图  
Fig.1 Schematic diagrams illustrating the relationships between  $\vec{V}_S$  and  $\vec{V}_b$  (a), (b) and  $\vec{V}_S$  and  $\vec{V}_{hkl}$  (c)

$$\cos\alpha = (\sin\theta \cos\phi - \sin\theta \sin\phi) / \sqrt{2} \quad (5a)$$

$$\cos\beta = (\sin\theta \sin\phi - \sin\theta \cos\phi) / \sqrt{2} \quad (5b)$$

$$\cos\gamma = \cos\theta \quad (5c)$$

把式 (5) 代入式 (4) 可得到:

$$|\vec{V}_{100}| = \sqrt{2} |\vec{V}_b| [\text{tg}\theta(\sin\phi + \cos\phi)]^{-1} \quad (6a)$$

$$|\vec{V}_{010}| = \sqrt{2} |\vec{V}_b| [\text{tg}\theta(\sin\phi - \cos\phi)]^{-1} \quad (6b)$$

$$|\vec{V}_{001}| = |\vec{V}_b| \quad (6c)$$

由式 (6c) 可知, 不管熔池的几何形状如何,  $[001]$  方向枝晶的生长速度总是与扫描速度方向一致。根据式 (6) 可作出  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  的等值线图, 如图 3 所示, 该图可分为两个区域。

区域 1:  $\theta \leq 45^\circ - 55^\circ$ ,  $[001]$  枝晶沿扫描速度方向生长时,  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  的值最小, 等于 1, 故在此区域有利于  $[001]$  枝晶生长, 也就是说在熔池的顶部主要是  $[001]$  枝晶生长。在此区域内,  $[001]$  枝晶的生长总是平行于激光

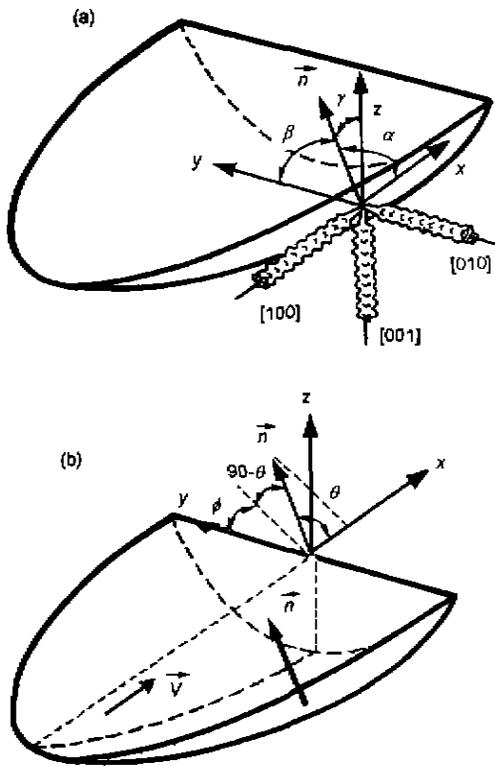


图 2 熔池中固液界面法线方向与 [100]、[010] 和 [001] 三个方向的夹角示意图

Fig.2 Schematic diagrams illustrating orientation between the molten pool surface normal and the dendrite growth direction (a), and the molten pool surface normal and the x-, y-, and z-reference axes (b)

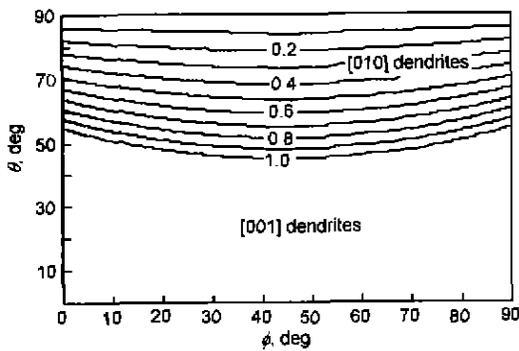


图 3 (110) 面 [001] 方向  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  的等值线

Fig.3 Isopleth map of  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  as a function of the orientation angles  $\theta$  and  $\phi$  for a scanning along [001] direction on (110) surface

束的扫描方向, 而与熔池内热流的方向无关: 其生长速度与激光束的扫描速度相等, 而与熔池形状无关。

区域 2:  $\theta \geq 45^\circ - 55^\circ$ , 沿 [010] 方向生长的枝晶的  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  值最小, 故在此区域内有利于 [010] 枝晶择优生长, 也就是在熔池的底部主要是 [010] 枝晶出现。如果

考虑另一半熔池 ( $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ ), [100] 枝晶的行为与 [010] 枝晶相似。当  $|\vec{V}_{001}| = |\vec{V}_{010}|$  时会发生两种枝晶取向上的转变。如图 3 所示。当  $|\vec{V}_{100}| = |\vec{V}_{010}|$  时, [100] 和 [010] 枝晶的生长方向发生转变。此时  $\phi = 90^\circ$ , 即对应熔池中心纵截面。当  $\theta = 90^\circ$  时, 此时各个方向枝晶的生长速度为 0, 对应熔池横截面固液边界。

根据上述分析, 可对熔池组织进行预测和重构。图 4 是重构后的熔池横截面示意图。此时  $\theta = 90^\circ$ 。区域 a 中 [001] 枝晶出现, 区域 b 中 [010] 枝晶出现, 区域 c 中 [100] 枝晶生长。各个区域的大小受熔池形状的影响, 也就是受激光束扫描速度和功率密度的影响。在激光束扫描速度较大而激光器输出功率较小的条件下, 熔池较浅, 此时  $\theta$  角和  $\phi$  角增大, 因此在熔池大部分区域是 [010] 枝晶在生长。在一定条件下, 将使 [001] 方向的枝晶完全得到抑制, 即在整个熔池内不出现 [001] 方向的枝晶。

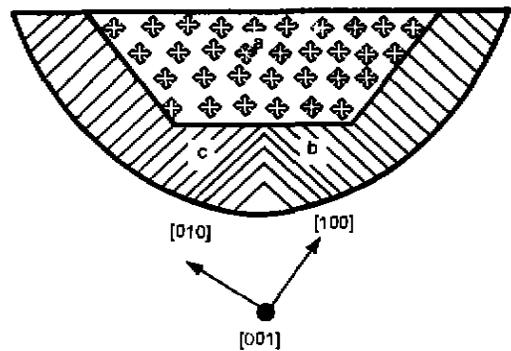


图 4 重构熔区横截面示意图

Fig.4 Schematic transverse section of the reconstructed structure of molten pool under scanning along [001] direction on (110) surface

### 2.2 激光束在 (110) 面上沿 $[1\bar{1}0]$ 方向扫描

当激光束在 (110) 面上沿  $[1\bar{1}0]$  方向扫描时, 固液界面法向矢量方向角余弦可表示为:

$$\cos\alpha = (\cos\theta + \sin\theta\sin\phi)/\sqrt{2} \quad (7a)$$

$$\cos\beta = (\sin\theta\sin\theta - \cos\phi)/\sqrt{2} \quad (7b)$$

$$\cos\gamma = \sin\theta\cos\phi \quad (7c)$$

把式 (7) 代入式 (4) 可得到:

$$|\vec{V}_{100}| = \sqrt{2}|\vec{V}_b|(1 + \text{tg}\theta\sin\phi)^{-1} \quad (8a)$$

$$|\vec{V}_{010}| = \sqrt{2}|\vec{V}_b|(\text{tg}\theta\sin\phi - 1)^{-1} \quad (8b)$$

$$|\vec{V}_{001}| = |\vec{V}_b|/\text{tg}\theta\cos\phi \quad (8c)$$

$|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  的等值线作于图 5, 由于对称的原因, 只给出了熔池一半的情形 ( $0 \leq \phi \leq 90^\circ$ ), 如果考虑另一半熔池 ( $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ ),  $[00\bar{1}]$  枝晶与  $[001]$  枝晶对称生长. 当  $|\vec{V}_{001}| = |\vec{V}_{100}|$  时会发生两种枝晶取向上的转变, 如图 5 所示. 在  $\theta = 90^\circ$ , 即在熔池的横截面上, 当  $\phi = 55^\circ$  时, 发生  $[100]/[010]$  枝晶和  $[001]$  枝晶生长方向的转变. 当  $\phi < 55^\circ$  时, 是  $[001]$  枝晶在生长, 而当  $\phi > 55^\circ$  时, 是  $[100]/[010]$  枝晶在生长. 图 6 是根据图 5 得到的熔池横截面重构示意图.

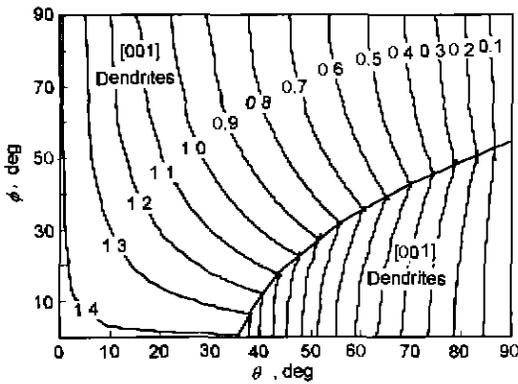


图 5  $(110)$  面  $[1\bar{1}0]$  方向扫描  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  的等值线

Fig.5 Isoleth map of  $|\vec{V}_{hkl}|/|\vec{V}_b|$  as a function of the orientation angles  $\theta$  and  $\phi$  for a scanning along  $[1\bar{1}0]$  on  $(110)$  surface

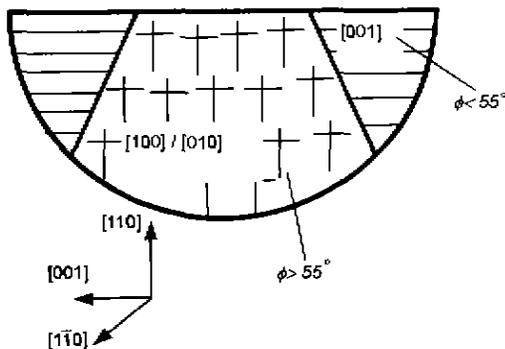


图 6 重构熔区横截面示意图

Fig.6 Schematic transverse section of the reconstructed structure of molten pool under scanning along  $[1\bar{1}0]$  direction on  $(110)$  surface

### 3 与实验结果的比较

图 7 是激光束在 DD2 单晶的  $(110)$  面上沿  $[1\bar{1}0]$  方向以  $24 \text{ mm/s}$  的速度进行扫描时, 得到的熔池横截面和纵截面金相组织照片. 在熔池横截面的两侧是  $[001]$  方向枝晶择优生长, 而在熔池的大部分区域则是  $[100]$  和  $[010]$  枝晶对称生长, 且与横截面成  $45^\circ$ . 在通常条件下, 激光熔池中组织的生长受热流方向影响. 在熔池底部由于温度梯度的方向垂直向上, 因此在熔池底部组织要垂直于向上

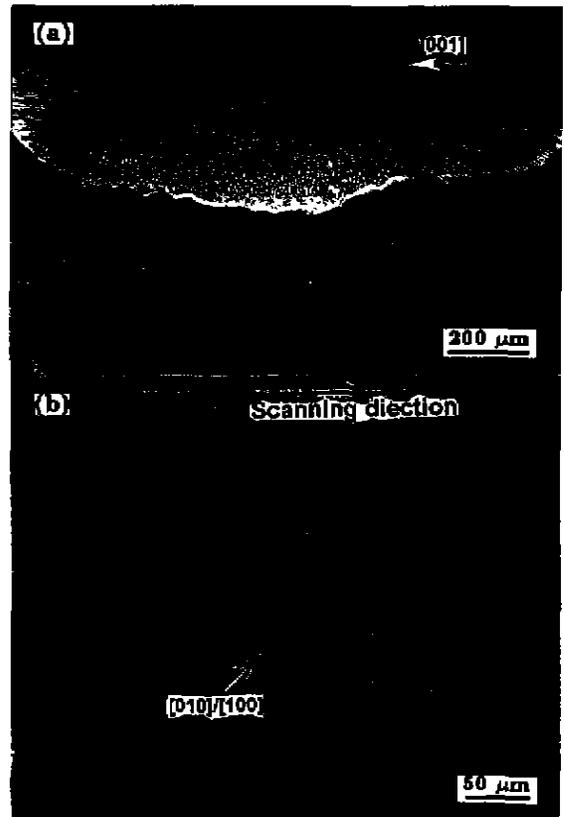


图 7 激光束在  $(110)$  面上以  $24 \text{ mm/s}$  的速度沿  $[1\bar{1}0]$  扫描时的熔池金相组织

Fig.7 SEM images of resolidified structure of laser melted regions scanning along  $[1\bar{1}0]$  direction on  $(110)$  surface with  $V_b=24 \text{ mm/s}$   
(a) transverse section (b) longitudinal section

生长, 而在实验条件下, 并没有观察到垂直向上的生长 (见图 7b), 可见, 在枝晶生长条件下, 择优取向对枝晶生长方向的影响要较热流的影响大. 实验结果与图 5 和图 6 的预测非常吻合.

### 4 结论

(1) 利用晶体生长的最小过冷度判据, 可对单晶合金激光重熔区组织的生长速度进行分析, 根据此分析可对熔池组织进行预测.

(2) 在相同的热流传导条件下, 激光熔池中枝晶组织的生长方向强烈地受基材晶粒取向和激光束扫描方向的影响.

(3) 枝晶生长条件下, 择优取向对枝晶生长方向的影响要较热流的影响大.

(4) 预测结果与实验结果非常吻合.

### 参考文献

[1] Lima M S F, Goldenstein H. *J Cryst Growth*, 2000; 208: 709

- [2] Zimmerman M, Carrad M, Gremaud M, Kurz W. *Mater Sci Eng*, 1991; 134A: 1268
- [3] Gill S C, Zimmerman M, Kurz W. *Acta Metall Mater*, 1992; 40: 2895
- [4] Zimmerman M, Carrad M, Kurz W. *Acta Metall Mater*, 1990; 38: 2586
- [5] Mudali U K, Dayal R K. *J Mater Eng & Perf*, 1992; 1(3): 341
- [6] Gopalakrishnan p, Shankar P, Subba R R V, Sundar M, Ramakrishnan S S. *Scr Mater*, 2001; 44: 707
- [7] Hoadley A F A, Rappaz M, Zimmermann M. *Metall Trans*, 1991; 22B: 101
- [8] Rappaz M, Carrupt B, Zimmermann M, Kurz W. *Helvetica Phys Acta*, 1986; 60: 924
- [9] Kou S Wang Y H. *Metall Trans*, 1986; 16A: 2265
- [10] Huang Weidong, Mao Zhiyin, Zhou Yaohe. *Acta Metall Sin*, 1986; 22: B240  
(黄卫东, 毛志英, 周尧和. 金属学报, 1986; 22: B240)
- [11] Flemings F C. *Solidification Processing*. New York: McGraw-Hill, 1974: 73
- [12] Ladeuille L, Daloz D, barat C, Kurz W, Lesoult G. *Mater Sci Forum*, 1999; 329: 37
- [13] Rappaz M, Blank E. *J Cryst Growth*, 1986; 64: 66
- [14] Kurz W, Fisher D J. *Fundamentals of Solidification*. Aedermannsdorf, Switzerland: Trans Tech Pub, 1984: 63