

文章编号:1000-582x(2001)04-0005-07

双辊薄带凝固组织中晶粒三维尺寸的特征

杨明波, 彭晓东, 潘复生, 丁培道

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:双辊薄带凝固组织中柱状晶粒和等轴晶粒的尺寸大小对薄带的性能和行为有非常重要的影响,在薄带铸造过程中由于晶粒的生长具有三维特征,采用传统表征方法无法实现对薄带凝固组织中晶粒三维尺寸大小的表征,本文运用定量金相和概率论知识,在对晶粒形状作出合理假设的基础上,建立了双辊薄带凝固组织中柱状晶粒和等轴晶粒三维尺寸的表征表达式,实现了柱状晶粒和等轴晶粒三维生长特征的定量描述。

关键词:双辊薄带;凝固组织;晶粒;表征

中图分类号:TC249.7

文献标志码:A

双辊薄带的凝固组织一般由柱状晶区和等轴晶区组成,其中柱状晶粒、等轴晶粒的尺寸大小直接影响着薄带的性能和行为,是非常重要的组织参数^[1]。但目前国内外对薄带凝固组织中晶粒尺寸大小的表征还缺乏系统的研究,由于薄带在凝固过程中晶粒的生长具有三维特征,如果采用传统把晶粒假设成球状的表征方法^[2],势必与实际情形出入较大,不能真实的反映薄带组织中晶粒的三维尺寸大小。因此,对双辊薄带凝固组织中晶粒三维尺寸大小的表征展开研究,对于定量描述薄带的凝固组织特征具有重要的理论意义和实用意义。

1 柱状晶粒三维尺寸的表征

假设:①薄带组织中的柱状晶粒形状相同,尺寸

不同;②柱状晶粒的形状为倾斜的椭圆柱状,其有三个尺寸参量: a 、 b 、 l ,其中 a 、 b 分别为沿薄带样品 Y 、 Z 轴方向的轴长, l 为柱状晶的长度(见图1)。

1.1 柱状晶粒长度的表征

对图2所示的薄带样品,沿平行于 $X-Z$ 平面制取金相磨面(如图1),由薄带凝固组织特征知^[3]:不论金相磨面的位置如何变化,柱状晶粒的长度均可在该金相磨面上反映出来。故柱状晶粒平均长度的表征表达式为:

$$\bar{l} = \bar{l}_R / (N \cos \theta) \quad (1)$$

式中: \bar{l} 、 \bar{l}_R 、 N 分别表示柱状晶粒的平均长度、测量视场内的柱状晶区的总长度及与柱状晶粒取向度 θ 方向相一致的随机切割线切割的柱状晶粒个数。

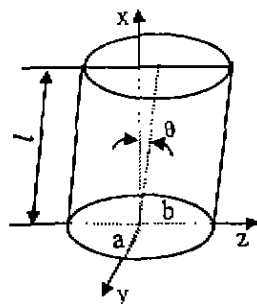


图1 柱状晶粒的形状假设

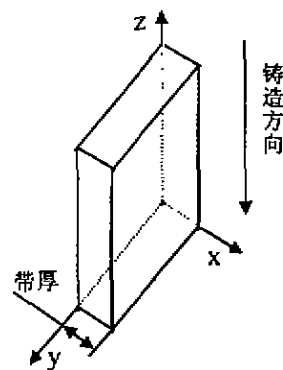


图2 薄带样品示意图

• 收稿日期:2001-02-26

基金项目:国家自然科学基金重大基金资助项目(59995440)

作者简介:杨明波(1971-),男,重庆南川人,博士生。主要从事材料加工工程的研究。

1.2 柱状晶粒轴长的表征

1. 随机截线切割单个椭圆。用随机截线 l_1 沿平行 Z 轴方向切割椭圆(如图 3), 截出截线长度为:

$$l_z = \frac{2b}{a} \sqrt{a^2 - y^2} \quad (2)$$

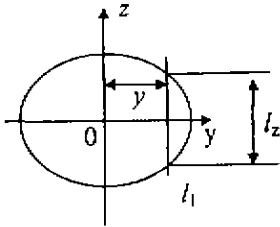


图3 随机截线切割单个椭圆

随机截线 l_1 通过 y 和截出截线长度为 l_z 的概率密度分别为^[4]:

$$p(y) = \frac{1}{a}, p(l_z) = p(y) \cdot \left| \frac{dy}{dl_z} \right| \quad (3)$$

$$\text{截出截线长度 } l_z \text{ 的平均值 } \bar{l}_z \text{ 为: } \bar{l}_z = \int_0^{2b} p(l_z) l_z dl_z = \frac{\pi}{2} b \quad (4)$$

$$\text{单个椭圆沿 } Z \text{ 方向的轴长为: } b = \frac{2}{\pi} \bar{l}_z \quad (5)$$

$$\text{同理可求单个椭圆沿 } Y \text{ 方向的轴长为: } a = \frac{2}{\pi} \bar{l}_y \quad (6)$$

2. 柱状晶粒平均轴长尺寸的表征。对图 1 所示的薄带样品, 沿于 $Y-Z$ 平面成 θ 角度制取的金相磨面可将柱状晶粒的轴长反映出来, 金相磨面上这些不同尺寸大小的柱状晶粒轴长的平均值可用随机截线切割单个椭圆推导的结论来近似计, 故由式(5)和(6)可得柱状晶轴长平均值的表征表达式:

$$\bar{a} = \frac{2}{\pi} \bar{l}_y, \bar{b} = \frac{2}{\pi} \bar{l}_z \quad (7)$$

$$\text{式中: } \bar{l}_y = \frac{l_{Ny}}{N_y}, \bar{l}_z = \frac{l_{Nz}}{N_z}$$

其中: l_{Ny}, l_{Nz} —表示分别沿 Y 轴、 Z 轴方向的随机截线的长度, N_y, N_z —表示分别沿 Y 轴、 Z 轴方向的随机截线切割的柱状晶粒个数。

用式(7)来表征柱状晶粒轴长所带来的误差, 取决于柱状晶粒轴长尺寸分布的标准误差, 假设柱状晶粒轴长尺寸服从正态分布, 其标准误差为^[2,4]:

$$\sigma(a) \approx \frac{1}{3}(a_{\max} - \bar{a}), \sigma(b) \approx \frac{1}{3}(b_{\max} - \bar{b}) \quad (8)$$

式中 a_{\max}, b_{\max} 由金相磨面上直接测定。

由上述推导过程可知, 双辊薄带凝固组织中柱状

晶粒的三维尺寸可用式(1)和(7)来表征, 且只需对薄带样品制取二个不同的金相磨面, 就可实现柱状晶粒三维尺寸大小的定量描述。

2 等轴晶粒三维尺寸的表征

假设: ① 薄带组织中等轴晶粒的尺寸不同, 形状相同; ② 等轴晶粒的形状为椭球状, 其有三个尺寸参数 a, b, c , 即: 沿薄带样品 X, Y, Z 轴方向上的轴长(见图 4)。

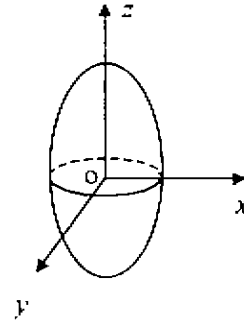
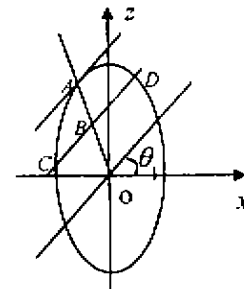


图4 等轴晶粒的形状假设

2.1 随机截面切割单个等轴晶粒

图 4 中用于 $X-Y$ 平面成 θ_1 角度的一随机截面切割单个等轴晶粒, 反映到二维坐标系上如图 5 所示。假设随机截面与晶粒相截得到的截面为椭圆, 其轴长分别为 d_1, d_2 :



二维坐标系下反映的随机切割

$$d_1 = \frac{a \sqrt{c^4 - (a^2 \text{tg}^2 \theta_1 + c^2) z_0^2}}{c \cos \theta_1 \sqrt{a^2 \text{tg}^2 \theta_1 + c^2}} \quad (9)$$

$$d_2 = \frac{b}{c} \sqrt{c^4 - (a^2 \text{tg}^2 \theta_1 + c^2) z_0^2} \quad (10)$$

截出截面的面积为: $s_1 = \pi d_1 d_2$, 易知截出截面面积的理论极值分别为:

$$S_{1\max} = \pi abc / \cos \theta_1 \sqrt{a^2 \text{tg}^2 \theta_1 + c^2}, s_{1\min} = 0 \quad (11)$$

截面通过 z_0 (B 点的 Z 轴坐标) 的概率密度及截出截面面积为 S_1 的概率密度分别为^[4]:

$$p(z_0) = \frac{1}{|Z_A|} = \frac{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \theta_1 + c^2}}{c^2},$$

$$p(s_1) = p(z_0) \left| \frac{dz_0}{ds_1} \right| \quad (12)$$

截出截面面积的平均值 \bar{s}_1 为：

$$\bar{s}_1 = \int_{s_1^{\min}}^{s_1^{\max}} p(s_1) s_1 ds_1 = \frac{2}{3} \pi abc \frac{1}{\cos \theta_1 \sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \theta_1 + c^2}} \quad (13)$$

同理随机截面分别与 $Y-Z$ 平面成一角度 θ_2 与 $X-Z$ 平面成一角度 θ_3 相截等轴晶粒得到的截面积的平均值分别为：

$$\bar{s}_2 = \frac{2}{3} \pi abc \frac{1}{\cos \theta_2 \sqrt{c^2 \operatorname{tg}^2 \theta_2 + a^2}} \quad (14)$$

$$\bar{s}_3 = \frac{2}{3} \pi abc \frac{1}{\cos \theta_3 \sqrt{c^2 \operatorname{tg}^2 \theta_3 + b^2}} \quad (15)$$

由式(13)、(14)、(15)可得单个等轴晶粒的轴长：

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{3\bar{s}_1 \cos \theta_1 A \sqrt{A \operatorname{tg}^2 \theta_1 + 1}}{2\pi \sqrt{AB}}} \\ b = \sqrt{\frac{3\bar{s}_1 \cos \theta_1 \sqrt{A \operatorname{tg}^2 \theta_1 + 1}}{2\pi \sqrt{AB}}} \\ c = \sqrt{\frac{3\bar{s}_1 \cos \theta_1 B \sqrt{A \operatorname{tg}^2 \theta_1 + 1}}{2\pi \sqrt{AB}}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{式中：} A = \frac{\bar{s}_2^2 \sin^2 \theta_2 + \bar{s}_1^2 \cos^2 \theta_1}{\bar{s}_1^2 \sin^2 \theta_1 - \bar{s}_2^2 \cos^2 \theta_2},$$

$$B = \frac{\bar{s}_3^2 \sin^2 \theta_3 + \bar{s}_1^2 \cos^2 \theta_1}{\bar{s}_3^2 \cos^2 \theta_3} - A \frac{\bar{s}_1^2 \sin^2 \theta_1}{\bar{s}_3^2 \cos^2 \theta_3}$$

2.2 等轴晶粒平均轴长的表征

薄带组织中不同尺寸的等轴晶粒的平均轴长可以用一个等轴晶粒被随机截面相截推导出来的结论来近似估计，由于等轴晶粒存位于薄带中心区域，加之薄带较薄，考虑到金相试样制取的易操作性，对图 1 所示的薄带样品在三个方向上制取金相磨面，即：平行于 $X-Y$ 平面和平行 $X-Z$ 平面（即： $\theta_1 = \theta_3 = 0$ ），以及与 $Y-Z$ 平面成一角度 θ_2 （取： $\theta_2 = \theta$ ）切割样品制取金相磨面，由(16)式得等轴晶粒轴长平均值的表征表达式为：

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{3s_1 A}{2\pi \sqrt{A \cdot B}}}, \bar{b} = \sqrt{\frac{3s_1}{2\pi \sqrt{A \cdot B}}},$$

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{3s_1 B}{2\pi \sqrt{A \cdot B}}} \quad (17)$$

$$\text{式中：} \bar{A} = \frac{\bar{s}_1^2 - \bar{s}_3^2 \sin^2 \theta}{\bar{s}_3^2 \cos^2 \theta}, \bar{B} = \frac{\bar{s}_1^2}{\bar{s}_3^2}, \bar{s}_1 = \frac{s_{T1}}{N_1}, \bar{s}_2 = \frac{s_{T2}}{N_2}, \bar{s}_3 = \frac{s_{T3}}{N_3}$$

$= \frac{s_{T3}}{N_3}$ 其中： s_{T1}, s_{T2}, s_{T3} —表示随机截面与薄带样品 $X-Y$ 平面、 $X-Z$ 平面平行和与 $Y-Z$ 平面成一定角度相截制取的金相磨面上测量视场的总面积。 N_1, N_2, N_3 —表示随机截面与薄带样品 $X-Y$ 平面、 $X-Z$ 平面平行和与 $Y-Z$ 平面成一定角度相截制取的金相磨面上测量视场内的总等轴晶粒数。

需要注意的是，用式(17)来表征等轴晶粒轴长所带来的误差，取决于轴长尺寸分布的标准误差，假设轴长尺寸服从正态分布，其标准误差为^[2,4]：

$$\sigma(a) \approx \frac{1}{3}(a_{\max} - \bar{a}), \sigma(b) \approx \frac{1}{3}(b_{\max} - \bar{b}),$$

$$\sigma(c) \approx \frac{1}{3}(c_{\max} - \bar{c}) \quad (18)$$

式中： $a_{\max}, b_{\max}, c_{\max}$ 为等轴晶粒沿 X, Y, Z 轴方向的最大表征轴长，其分别为：

$$a_{\max} = \sqrt{\frac{s_{1\max} A_{1\max}}{\pi \sqrt{A_{\max} B_{\max}}}}, b_{\max} = \sqrt{\frac{s_{1\max}}{\pi \sqrt{A_{\max} B_{\max}}}}, c_{\max} = \sqrt{\frac{s_{1\max} B_{\max}}{\pi \sqrt{A_{\max} B_{\max}}}}$$

$$\text{式中：} A_{\max} = \frac{s_{1\max}^2 - s_{3\max}^2 \sin^2 \theta}{s_{3\max}^2 \cos^2 \theta}, B_{\max} = \frac{s_{1\max}^2}{s_{3\max}^2}$$

其中： $s_{1\max}, s_{3\max}, s_{2\max}$ —表示随机截面与薄带样品 $X-Y$ 平面、 $X-Z$ 平面平行和与 $Y-Z$ 平面成一定角度相截制取的金相磨面上测量视场内的最大等轴晶粒截面积。

由上述推导过程可知，双辊薄带凝固组织中等轴晶粒的三维尺寸可由式(17)来表征，且只需对薄带样品制取三个不同的金相磨面，就可实现等轴晶粒三维尺寸大小的定量描述，而在其中的二个金相磨面上可同时实现柱状晶粒三维尺寸大小的定量描述，所以定量描述双辊薄带凝固组织中柱状晶粒和等轴晶粒的三维尺寸大小，只需对薄带样品制取三个不同的金相磨面。

3 结 论

1) 本文建立的柱状晶粒和等轴晶粒的三维尺寸表征体系，较之将晶粒形状假设为球状的传统表征方法，能更真实地反映双辊薄带凝固组织中柱状晶粒和等轴晶粒的三维尺寸大小。

2) 对于双辊薄带，只需对薄带样品制取三个不同的典型金相磨面，并在金相磨面上测定相应二维组织参数的基础上，就能实现薄带凝固组织中柱状晶粒和等轴晶粒三维尺寸的定量描述。 (下转第 30 页)

- York: SIAM, 1993.189-195.
- [3] 王志杰. 齿轮箱振动信号时频分析与故障诊断[D]. 重庆大学硕士学位论文, 1995.
- [4] [美]L·科恩著 白居宪译. 时-频分析: 理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [5] 史习智. 非平稳信号分析. 动态信号分析及其工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994.
- [6] CHOI H I, WILLIAMS W J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels [J]. IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing, 1989, 35: 862 ~ 871.
- [7] J. Jeong and W.J. Williams, "A new formulation of generalized discrete-time time-frequency distribution", [J] Pro., IEEE 1991, pp. 3189 ~ 3192.
- [8] G.S. Cunningham and W.J. Williams. "High-Resolution Signal Synthesis for Time-Frequency Distribution", [J] Proc. IEEE 1993, pp. 400 ~ 403.

Repression of the Interference in the Wigner Distribution and the Algorithm

Ji Yue-bo, QIN Shu-ren, TANG Bao-ping

(Testing Center, College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Although as being a real means of time-frequency analysis, Wigner Distribution is limited by its falsity time-frequency spectrum called interference item. By applying the analytic signal and the Choi-Williams Distribution to repress the interference and the time-frequency spectrum got is satisfactory. The algorithm to compute the Wigner Distribution and the Choi-Williams Distribution of the signal using its analytic form are presented. Testifies The algorithm through several simulation tests using some typical signals such as segmented multicomponent signal, frequency modulation signal etc. The result is consistent with the theory. It indicates that the algorithm of the software developed is accurate.

Key words: time-frequency analysis; Wigner Distribution; Choi-Williams Distribution; analytic signal; failure diagnosis

(责任编辑 成孝义)

(上接第7页)

参考文献:

- [1] 钱玉麟. 影响双辊薄带连铸薄带质量的因素[J]. 上海钢研, 1998, (1): 40-49.
- [2] 秦国友. 定量金相[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1987.
- [3] Toshiaki M, Ken-ichi M. Formation of Solidification Structure in Twin-roll Casting Process of 18Cr-8Ni Stainless Steel[J]. ISIJ International, 1995, 36(5): 771-777.
- [4] 余永宁, 刘国权. 体视学—组织定量分析原理和应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.

Token of Three-dimension Size of Grain in Microstructure of Twin-roll Thin Strip

YANG Ming-bo, PENG Xiao-dong, PAN Fu-sheng, DING Pei-dao

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044)

Abstract: The property and behavior of twin-roll thin strip is greatly affected by three-dimension size of columnar and equiaxed crystal grains in the solidification structure of thin strip. The growth of crystal grain has three-dimension feature during casting process of thin strip, So the token of three-dimension size of crystal grain cannot be realized by traditional token method. On the basis of assumption to crystal grain shape, the token expression of three-dimension size of columnar is established along with crystal grain in microstructure of twin-roll thin strip according to quantitative metallurgical analysis and probability theory, And quantitative discription about three-dimension growth feature of crystal grain in microstructure of twin-roll thin strip is realized.

Key words: twin-roll thin strip; solidification structure; crystal grain; token

(责任编辑 成孝义)