

金属熔体近壁面流动剪切模型及其对金属凝固影响的理论研究

王祥 钞润泽 管仁国 李元东 刘春明

Theoretical study on the model of metallic melt shearing flow near the surface and its effect on solidification microstructure

Wang Xiang Chao Run-Ze Guan Ren-Guo Li Yuan-Dong Liu Chun-Ming

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 116601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.116601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.116601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稀土 La 对 bcc-Fe 中 Cu 扩散行为影响的第一性原理研究

First-principles study of the effect of lanthanum on the Cu diffusion mechanism in bcc-Fe

物理学报.2014, 63(24): 248101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248101>

拉伸试验测试金属韧性的不确定性: 中温脆性和应变速率脆性

Measurement uncertainty of metallic ductility in tensile tests: intermediate temperature embrittlement and strain rate embrittlement

物理学报.2014, 63(22): 228101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228101>

不同加载条件下位错和溶质原子交互作用的数值模拟

Simulations of the interactions between dislocations and solute atoms in different loading conditions

物理学报.2014, 63(22): 228102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228102>

冷却倾斜板熔体处理过程边界层分布及流动传热的理论研究

Theoretical study on boundary distributions and flow-metal heat transfer during melt treatment by cooling sloping plate

物理学报.2012, 61(20): 206602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206602>

TiO₂/ZnO 纳米薄膜界面热导率的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of thermal conductivity for the TiO₂/ZnO nano-film interface

物理学报.2011, 60(6): 066601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.066601>

金属熔体近壁面流动剪切模型及其对金属凝固影响的理论研究*

王祥¹⁾ 钞润泽²⁾ 管仁国^{1)3)†} 李元东³⁾ 刘春明¹⁾

1) (东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819)

2) (中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471000)

3) (兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050)

(2014年10月18日收到; 2015年1月6日收到修改稿)

本文建立了金属熔体近壁面流动剪切模型, 并分析了流动剪切对金属凝固的影响. 针对 A356 合金计算结果表明: 层流流动的熔体内部剪应力随垂直斜板表面距离的增大而减小, 随着流动长度的增加先急剧下降之后趋于稳定; 紊流流动的熔体所受的剪应力随着垂直倾斜板表面距离的增大先急剧下降之后趋于稳定, 随着流动长度的增加而不断增大; 斜板倾角越大, 斜板上相同位置的熔体层受到的剪应力越大; 熔体垂直斜板表面距离越小, 柱状晶所承受的弯曲应力越大; 斜角越大, 斜板上相同位置的柱状晶的弯曲应力越大; 随着熔体在倾斜板表面流动长度的增加, 在层流阶段, 倾斜板表面柱状晶根部所受的弯曲应力先急剧下降之后趋于平稳, 而在紊流阶段, 弯曲应力是缓慢增加的; 理论分析表明柱状晶在熔体近壁面流动过程受到的最大弯曲应力低于 α -Al 晶粒的屈服强度, 所以斜板上熔体流动产生的弯曲应力不能将柱状晶折断, 只能将晶粒冲刷游离到熔体中使晶粒增殖, 与实验结果相符合. 所以本模型可以很好地解释熔体近壁面流动过程中的剪切本构关系以及剪应力对凝固组织的影响.

关键词: 凝固, 近壁面流动, 剪切, 柱状晶

PACS: 66.70.Df, 81.05.Bx

DOI: 10.7498/aps.64.116601

1 引言

金属熔体流动过程中, 由于壁面与金属熔体的摩擦作用而导致了金属熔体对壁面的冲刷, 这种冲刷现象在金属熔体处理过程广泛存在, 对金属凝固组织具有重要影响. 李廷举等^[1,2]和 Mahapatra 等^[3]研究发现, 连铸过程中, 由于结晶器的激冷作用而产生很大的过冷度导致在铸模壁面形成大量的初始晶核, 金属熔体对铸模的冲刷作用可以使贴近壁面的初始晶核脱离壁面, 提高了形核率并且细化了铸造组织. Cao 等^[4]发现金属液的冲刷还能使枝晶臂折断并导致晶核增殖. Ren 等^[5]研究发现金属液的冲刷有助于防止夹杂和气泡在凝固前

沿的聚集和被固相吞没, 降低了铸锭的夹杂和气泡. Chen 等^[6]研究表明熔体的流动对温度场产生扰动, 会促进球形晶界面的生长和衰减. Feng 等^[7]通过基于耦合流场和热噪声的相场模型, 模拟了流动对三维枝晶生长的影响, 结果表明流动使迎流侧和背流侧温度场的分布呈现不对称状态, 迎流侧优先生长, 枝晶向散热方向倾斜.

管仁国^[8,9], Haga^[10,11]和 Kund^[12]等在采用斜坡冷却法制备半固态浆料过程中, 发现倾斜板强大的冷却能力使靠近倾斜板表面的熔体首先过冷, 形成大量垂直于倾斜板表面的柱状晶组织, 柱状晶组织由于熔体的冲刷而脱离倾斜板表面, 成为非均质形核核心, 大大提高了形核率, 对凝固组织具有

* 国家自然科学基金 (批准号: 51222405, 51474063) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guanrg@smm.neu.edu.cn

明显的细化效果, Behnam 和 Kapranos 等的研究也得到了相同的结论 [13,14].

因此, 近壁面金属熔体流动在金属材料制备与加工过程中广泛存在, 由于熔体流动对晶核增殖和晶粒细化具有重要影响, 而熔体流动过程中的剪切本构关系尚未建立, 剪应力对凝固组织的影响研究也不足. 为此, 本文基于期理论研究 [8] 和熔体近壁面流动理论, 建立了金属熔体近壁面流动的剪切模型, 并分析了近壁面流动剪应力对合金凝固组织的影响.

2 金属熔体近壁面流动剪切模型的建立

金属熔体近壁面流动有两种特殊情况, 一种是壁面倾斜角为 90° , 即垂直壁面的金属流动; 另一种是壁面倾斜角为 0° , 即沿着水平壁面的水平流动. 作为一般情况, 本文研究熔体沿着倾斜表面流动的情况. 图 1 (a) 为金属熔体在倾斜板上流动示意图, 为了便于描述金属熔体流过冷却倾斜板的物理过程, 需要做以下假设:

- 1) 金属熔体流过倾斜板的过程处于连续、稳定状态.
- 2) 不考虑倾斜板上熔体宽度的变化.
- 3) 不考虑熔体浇注到倾斜板上的碰撞对熔体流动的扰动作用.

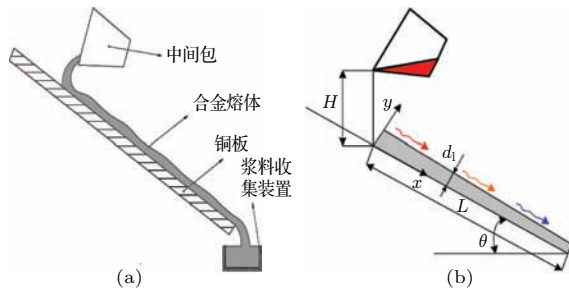


图1 倾斜板上熔体流动的示意图和几何模型 (a) 倾斜板上熔体流动的示意图; (b) 倾斜板上熔体流动的几何模型

Fig. 1. Diagram and geometric model of melt flowing along the slope: (a) diagram of melt flowing along the slope; (b) geometric model of melt flowing along the slope.

基于以上假设建立倾斜板上熔体流动的二维几何模型, 如图 1 (b) 所示, 其中金属熔体的浇注高度为 H , 倾斜板上熔体的厚度为 d_1 , 倾斜板的长度为 L , 倾斜板的倾角为 θ . 在倾斜板表面建立如图所示的坐标系, 以金属熔体与倾斜板接触的最开始位置为坐标原点, 金属熔体沿着倾斜板的流动方向为

x 轴, 垂直倾斜板表面方向为 y 轴. 金属液从高度为 H 处浇注到倾斜板上, 获得初速度 u_{10} , 当整体考虑倾斜板表面熔体流动时, 可以认为熔体是在重力场作用下沿倾斜板做匀加速运动, 则在倾斜板上流过 x 长度的整体流速 $u_{1\infty}$ 为

$$u_{1\infty} = (2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{1/2}, \quad (1)$$

其中 g 是重力加速度.

2.1 金属熔体近壁面流动速度边界层

一般将壁面流速为零与流速达到来流速度的 99% 处之间的距离定义为速度边界层厚度. 金属熔体在流动过程中, 逐渐从层流转变为紊流, 平板上流体从层流流动向紊流流动转变的示意图如图 2 所示. 依据流体雷诺数 Re 的大小来判断边界层状态, 倾斜板上熔体流动的雷诺数 Re_{1x} 根据 $Re_{1x} = xu_{1\infty}/v_1$ [15] 计算, 则熔体在倾斜板上流过 x 长度的雷诺数 Re_{1x} 为

$$Re_{1x} = \frac{x(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{1/2}}{v_1}, \quad (2)$$

其中 v_1 为熔体的运动黏度.

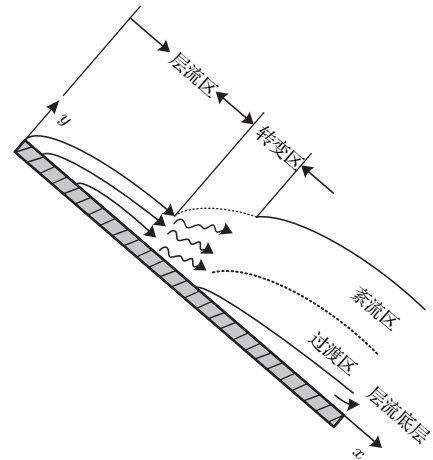


图2 平板上层流向紊流转变示意图

Fig. 2. Diagram of the transition from laminar to turbulence on the plate.

以 A356 合金熔体为例, 合金成分如表 1 所示, 取临界雷诺数 $Re = 5 \times 10^5$, 熔体黏度 $\mu_1 = 1.3 \times 10^{-3}$ Pa·s, 密度 $\rho = 2700$ kg/m³, 浇注高度为 0.1 m, 合金熔体在不同倾斜角的倾斜板上沿流动方向的雷诺数计算结果如图 3 (a) 所示. 当倾斜角分别是 30° , 45° , 60° 时, 层流向紊流的转变分别在流动长度为 0.166 m, 0.141 m, 0.123 m 处. 倾斜角越大, 合金熔体在倾斜板上流动的加速度越大, 由层流到紊流的转变越早.

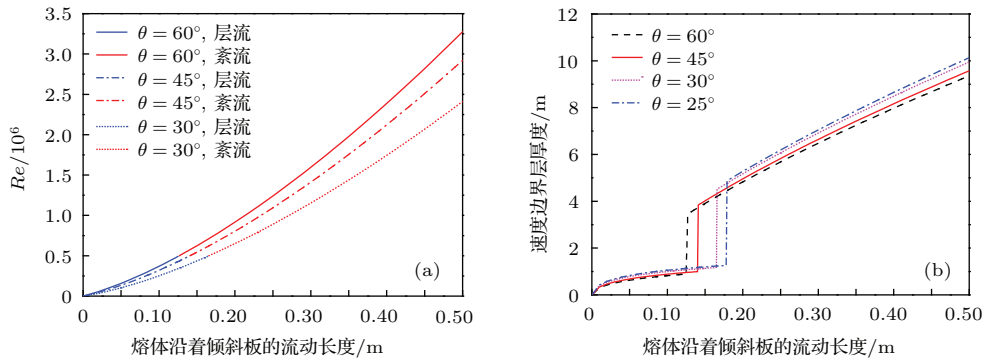


图3 (网刊彩色) A356合金熔体雷诺数和速度边界层在不同倾斜角斜板上沿熔体流动方向的变化 (a) 雷诺数沿着流动方向的变化; (b) 速度边界厚度沿着流动方向的变化

Fig. 3. (color online) Changes of Reynolds number and velocity boundary layer thickness of the A356 alloy melt under the conditions of different angle along the flow direction: (a) change of Reynolds number along the flow direction; (b) change of velocity boundary layer thickness along the flow direction.

金属熔体流过长度为 x 时的层流速度边界层厚度 δ_{vl} 的计算公式为 $\delta_{vl} = \frac{5x}{Re_{1x}^{1/2}}$ [16], 根据冯卡门积分方程获得的紊流速度边界层厚度 δ_{vt} 的计算公式为 $\delta_{vt} = \frac{0.376x}{Re_{1x}^{1/5}}$ [16]. 金属熔体在倾斜板上流动过程中, 速度边界层内存在速度梯度, 因此在各个流层之间存在剪切力, 速度边界层厚度外的熔体不受壁面的影响. 以 A356 合金熔体为例, 当浇注高度为 0.1 m 时, 熔体在不同倾斜角的倾斜板上流动的速度边界层厚度与流动长度的关系如图 3(b) 所示. 根据图 3(b) 可知, 紊流速度边界层厚度要比层流速度边界层厚度大, 层流速度边界层厚度不到 1 mm, 而紊流的速度边界层厚度可达到 4—10 mm; 倾斜角增大, 速度边界层的厚度减小.

表1 A356合金的成分
Table 1. Composition of A356 alloy.

| 元素 | Si | Mg | Fe | Ti | Al |
|----|---------|-----------|-----|-----|----|
| 含量 | 6.5—7.5 | 0.25—0.45 | 0.2 | 0.2 | 余量 |

2.2 金属熔体近壁面层流流动的剪切模型

金属熔体在倾斜板上的流动满足以下边界条件:

1) 熔体在与倾斜板上表面接触处速度为零, 压力梯度为零, 即

$$u_{1y}|_{y=0} = 0, \quad \frac{d^2 u_{1y}}{dy^2} \Big|_{y=0} = 0;$$

2) 熔体在速度边界层厚度处速度等于主流速度, 速度梯度为零, 即

$$u_{1y}|_{y=\delta_1} = u_{1\infty}, \quad \frac{du_{1y}}{dy} \Big|_{y=\delta_1} = 0;$$

根据上述边界条件可以近似求得层流速度边界层内的速度分布如下式 [16]:

$$\frac{u_{1y}}{u_{1\infty}} = \frac{3y}{2\delta_{vl}} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_{vl}} \right)^3, \quad (3)$$

其中 u_{1y} 为速度边界层内垂直倾斜板表面距离为 y 的金属熔体的速度, δ_{vl} 为速度边界层厚度.

熔体流动产生的剪应力的计算公式为 $\tau_1 = \mu_1 \frac{du_{1y}}{dy}$ [17], 则金属熔体内剪应力分布公式为

$$\tau_1 = \mu_1 u_{1\infty} \left(\frac{3}{2\delta_{vl}} - \frac{3y^2}{2\delta_{vl}^3} \right). \quad (4)$$

将 (2) 式和层流速度边界层厚度公式代入 (4) 式得到层流速度边界层内的剪应力分布为

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \frac{3\mu_1}{10} \left(\frac{1}{xv_1} \right)^{1/2} (2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{3/4} \\ & - \frac{3\mu_1 y^2}{250} \left(\frac{1}{xv_1} \right)^{3/2} \\ & \times (2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{5/4}. \end{aligned} \quad (5)$$

当 A356 合金熔体流过倾斜板的长度 x 为 0.04 m, 浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25°, 30°, 45°, 60° 时, 层流边界层内熔体内部剪应力与垂直倾斜板表面距离的变化关系如图 4(a) 所示. 图中纵坐标表示熔体内部剪应力大小, 横坐标表示熔体垂直倾斜板表面的距离. 由图可知, 倾斜角一定时, 熔体内部剪应力大小随垂直倾斜板表面的距离增大而减小; 倾斜角越大, 倾斜板表面处熔体的剪应力越大, 剪应力随着垂直倾斜板表面距离增加而减小的越快, 达到速度边界层厚度处剪应力降为零.

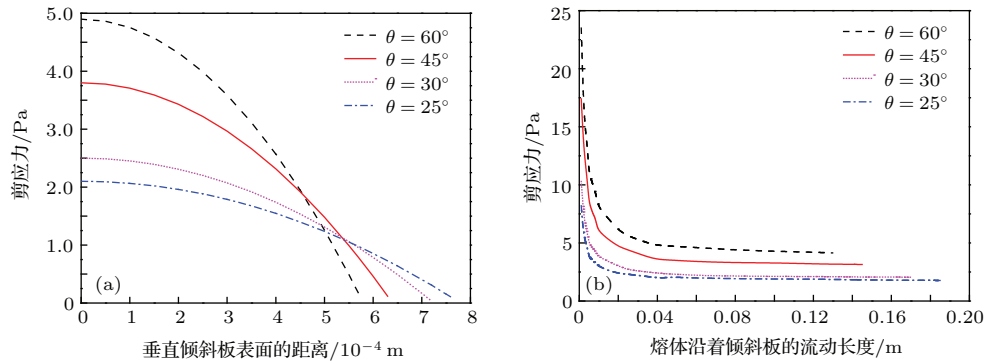


图4 (网刊彩色) 不同倾斜角斜板上层流边界层内的熔体内部剪应力在垂直倾斜板方向和沿着倾斜板方向的分布 (a) 剪应力在垂直倾斜板方向的分布; (b) 剪应力在沿着倾斜板方向的分布

Fig. 4. (color online) Distributions of shearing stresses along the vertical direction and parallel direction of slope with different angles within the laminar boundary layer: (a) distribution of shearing stress along the vertical direction of slope; (b) distribution of shearing stress along the parallel direction of slope.

当浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 层流流动的 A356 合金熔体在倾斜板表面的剪应力沿着流动长度的变化规律如图 4(b) 所示. 图 4(b) 中纵坐标表示熔体在倾斜板表面的剪应力大小, 横坐标表示熔体在倾斜板表面的流动长度. 由图可知, 倾斜角一定时, 随着流动长度的增加, 倾斜板表面熔体所受剪应力首先急剧下降, 然后趋于稳定, 大部分区域的金属熔体在倾斜板表面的剪应力在 2.5—7 Pa 之间. 熔体在倾斜板上的流动长度一定时, 熔体在倾斜板表面的剪应力随着倾斜角的增大而增大.

2.3 金属熔体近壁面紊流流动的剪切模型

熔体在倾斜板上紊流时, 在速度边界层内部仍然存在分层现象, 靠近倾斜板表面依然有一极薄层仍保持层流状态, 这一层称为紊流边界层的层流底

层. 层流底层厚度很小, 在工程应用中通常将其忽略, 只研究紊流区域的流动规律. 倾斜板上熔体的紊流区域的速度分布表达式为^[16]

$$u_{1y} = u_{1\infty} (y/\delta_{vt})^{1/7}, \quad (6)$$

其中 δ_{vt} 为速度边界层的厚度.

将 (1) 式和紊流速度边界层厚度公式代入 (6) 式整理可得

$$u_{1y} = \frac{0.143y^{1/7}(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{18/35}}{(x^4 v_1)^{1/35}}. \quad (7)$$

则紊流速度边界层内的剪应力分布为

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \frac{1}{7} \mu_1 (2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{1/2} \\ & \times (1/0.376xy^6)^{1/7} \\ & \times \left[\frac{x(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{1/2}}{v_1} \right]^{1/35}. \end{aligned} \quad (8)$$

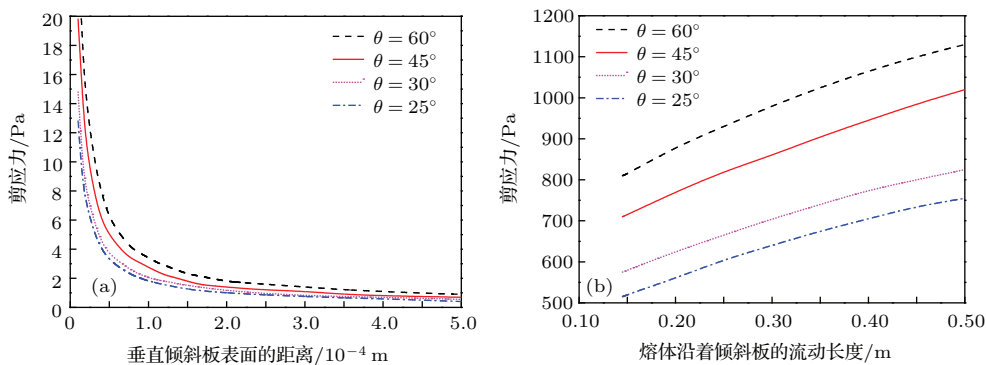


图5 (网刊彩色) 不同倾斜角斜板上紊流边界层内的熔体内部剪应力在垂直倾斜板方向和沿着倾斜板方向的分布 (a) 剪应力在垂直倾斜板方向的分布; (b) 剪应力在沿着倾斜板方向的分布

Fig. 5. (color online) Distributions of shearing stresses along the vertical direction and parallel direction of slope with different angles within the turbulence boundary layer: (a) distribution of shearing stress along the vertical direction of slope; (b) distribution of shearing stress along the parallel direction of slope.

当 A356 合金熔体在倾斜板上流过的长度 x 为 0.04 m, 浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 熔体流动过程中所受剪应力大小随垂直倾斜板表面高度变化的分布如图 5(a) 所示. 从图 5 中可知, 随着垂直倾斜板表面距离的增加, 熔体所受的剪应力首先急剧下降, 边界层内的大部分区域剪应力在 0.5—4 Pa 之间. 距离倾斜板表面的距离一定时, 熔体受到的剪应力随着倾斜角的增加而增大. 当 A356 合金熔体浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 熔体在倾斜板表面的剪应力大小随着流动长度增加的变化分布如图 5(b) 所示. 图中纵坐标表示熔体在倾斜板表面的剪应力大小, 横坐标表示熔体在倾斜板表面的流动长度. 由图可知, 当倾斜角一定时, 金属熔体在倾斜板表面受到的剪应力随着流动长度的增加而增大, 最大剪应力值在 750—1150 Pa 间. 当熔体在倾斜板上的流动长度一定时, 熔体在倾斜板表面受到的剪应力随着倾斜角的增加而增大.

3 流动剪切对金属凝固影响的理论分析

倾斜板与金属熔体接触表面为晶体的形核提供了附着位置, 对于金属熔体在接触表面的异质形核有很大的促进作用, 在板面上很容易形成柱状晶组织. 倾斜板表面形成的柱状晶会受到熔体剪应力作用, 发生游离或者折断. 边界层内部流动剪切作用使倾斜板表面柱状晶断裂的力学条件必须满足柱状晶承受的弯曲应力大于其在熔点温度时的屈服强度 [16].

为了说明剪切作用下柱状晶的受力, 本节对单个柱状晶进行受力分析, 并对倾斜板表面的柱状晶做以下假设:

- 1) 柱状晶附近温度、溶质分布均匀.
- 2) 不考虑凝热应力的影响, 忽略柱状晶重力影响.

3) 柱状晶为圆柱形的悬臂梁, 根部没有颈缩现象, 柱状晶直径为 D , 长度为 L_0 (如图 6 所示).

熔体流动剪应力作用在倾斜板表面的柱状晶上产生的弯矩

$$M = \int_y^{L_0} y\tau D dy,$$

将 (4) 式代入可得层流阶段的弯矩的表达式为

$$M = \mu_1 u_{1\infty} D \left[\frac{3}{4\delta_{v1}} (L_0^2 - y^2) - \frac{3}{8\delta_{v1}^3} (L_0^4 - y^4) \right]. \quad (9)$$

圆形截面的抗弯模量为 $I_z = \frac{\pi D^4}{64}$, 柱状晶受到的剪应力根据 $\sigma_1 = \frac{MD}{I_z}$ 计算, 则层流阶段柱状晶受到的弯曲应力分布的表达式为

$$\sigma_1 = \frac{64\mu_1}{\pi D^2} \left[\frac{3(L_0^2 - y^2)(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{3/4}}{20x^{1/2}v_1^{1/2}} - \frac{3(L_0^4 - y^4)(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{5/4}}{1000x^{3/2}v_1^{3/2}} \right]. \quad (10)$$

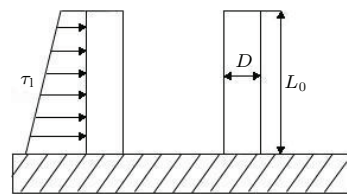


图 6 倾斜板表面柱状晶受力示意图

Fig. 6. Force diagram of the columnar crystal on the surface of slope.

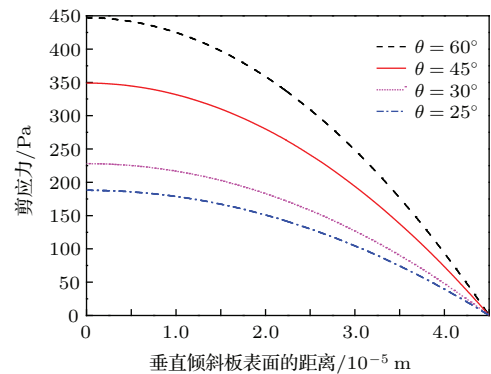


图 7 (网刊彩色) 不同倾斜角时板面晶粒弯曲应力大小分布

Fig. 7. (color online) Distribution of bending stress of the columnar crystal on the surface of slope with different angles.

根据倾斜板出口处 A356 合金熔体的淬火组织, 得到熔体中柱状晶的平均直径为 20 μm . 当 A356 合金熔体流过倾斜板的长度 x 为 0.04 m, 浇注高度 H 为 0.1 m, 在倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 倾斜板表面的晶粒所承受的弯曲应力大小随着离倾斜板表面距离变化的分布如图 7 所示. 图 7 中纵坐标代表斜板表面柱状晶承受的弯曲应力大小, 横坐标表示垂直倾斜板表面的距离. 从图中可知, 越靠近倾斜板表面, 熔体内部柱状晶所承

受的弯曲应力越大, 柱状晶根部的弯曲应力最大, 最大值在 180—450 Pa 之间. 倾斜角越大, 柱状晶的弯曲应力越大.

根据同样的方法可计算出紊流阶段柱状晶受到的弯曲应力分布为

$$\sigma_1 = \frac{9.2\mu_1}{\pi D^2} (L_0^{8/7} - y^{8/7}) \times \left[\frac{(2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta)^{18}}{x^4 v_1} \right]^{1/35}. \quad (11)$$

当 A356 合金熔体流过倾斜板的长度 x 为 0.4 m, 浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 倾斜板表面的柱状晶所承受的弯曲应力大小随着垂直倾斜板表面距离变化如图 8(a) 所示. 图 8(a) 中纵坐标代表倾斜板表面柱状晶承受的弯曲应力大小, 横坐标表示垂直倾斜板表面的距离. 从图中可知, 柱状晶根部的弯曲应力最大, 最大值在 1500—2300 Pa 之间.

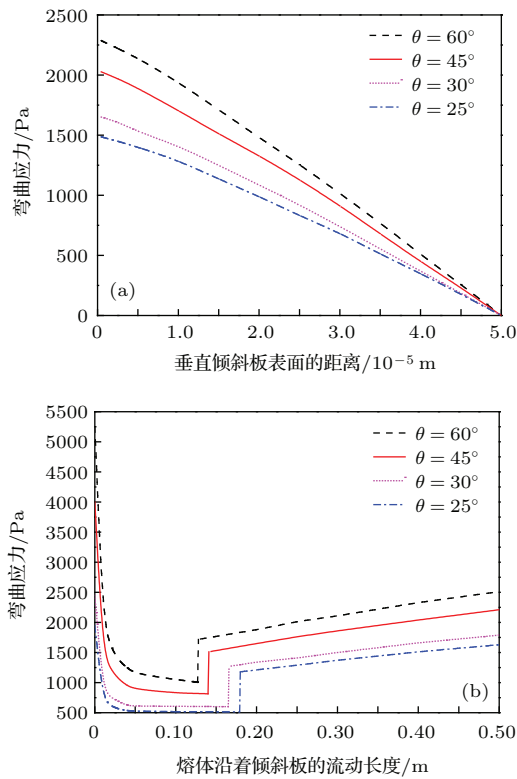


图 8 (网刊彩色) 不同倾斜角斜板上紊流流动的熔体内部柱状晶弯曲应力在垂直倾斜板方向和沿着倾斜板方向的分布 (a) 弯曲应力在垂直倾斜板方向的分布; (b) 弯曲应力在沿着倾斜板方向的分布

Fig. 8. (color online) Distributions of bending stresses along the vertical direction and parallel direction of slope with different angles within the turbulence boundary layer: (a) distribution of bending stress along the vertical direction of slope; (b) distribution of bending stress along the parallel direction of slope.

当倾斜板的长度为 0.5 m, 浇注高度 H 为 0.1 m, 倾斜角分别为 25° , 30° , 45° , 60° 时, 倾斜板表面的 A356 合金熔体内部柱状晶根部所承受的弯曲应力大小随着流动长度变化如图 8(b) 所示. 从图中可知, 随着熔体在倾斜板表面流动长度的增加, 在层流阶段, 倾斜板表面柱状晶根部所受的弯曲应力首先急剧下降之后趋于平稳, 而在紊流阶段, 弯曲应力是缓慢增加的. 倾斜板表面的柱状晶根部受到的弯曲应力随着流动长度的增大逐渐增大, 整个紊流阶段的弯曲应力在 1200—2500 Pa 之间. 根据 Dahle 等 [18,19] 研究结果, 当温度在固相线附近时, Al-5 Mg 合金中的 α -Al 晶粒的屈服强度为 50 kPa, 远高于熔体在斜板上的流动对柱状晶的弯曲应力, 所以不能将柱状晶折断, 只能将晶粒冲刷游离到熔体中使晶粒增殖. 图 9 为 A356 合金熔体在倾斜板出口处的淬火组织, 由图可知斜板表面的合金熔体中主要形成了柱状晶, 并且柱状晶发生了弯曲和游离, 但是并没有出现折断, 与理论计算结果相符合. 在实际的金属熔体凝固过程中, 还需要考虑晶粒与熔体的表面张力、结晶潜热、晶粒内部缺陷等其他影响因素, 综合分析柱状晶的断裂情况, 这需要进一步的研究.

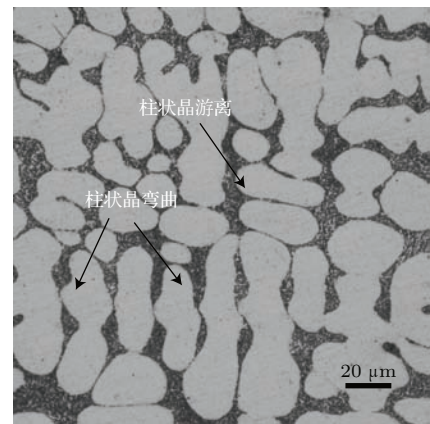


图 9 A356 合金熔体在倾斜板出口处的淬火组织
Fig. 9. Quenching microstructure of A356 alloy melt at the exit of the slope.

4 结 论

本文建立了金属熔体近壁面流动剪切模型, 并分析了流动剪切对金属凝固的影响, 以 A356 合金为例进行计算, 得到以下结论: 层流流动的熔体内部剪应力随垂直斜板表面距离的增大而减小, 随着流动长度的增加先急剧下降之后趋于稳定; 紊流流动的熔体所受的剪应力随着垂直倾斜板表面距离

的增大先急剧下降之后趋于稳定, 随着流动长度的增加而不断增大; 斜板倾角越大, 斜板上相同位置的熔体层受到的剪应力越大; 熔体垂直斜板表面距离越小, 柱状晶所承受的弯曲应力越大; 斜角越大, 斜板上相同位置的柱状晶的弯曲应力越大; 随着熔体在倾斜板表面流动长度的增加, 在层流阶段, 倾斜板表面柱状晶根部所受的弯曲应力先急剧下降之后趋于平稳, 而在紊流阶段, 弯曲应力是缓慢增加的; 理论分析表明柱状晶在熔体近壁面流动过程受到的最大弯曲应力低于 α -Al晶粒的屈服强度, 所以斜板上熔体流动产生的弯曲应力不能将柱状晶折断, 只能将晶粒冲刷游离到熔体中使晶粒增殖, 与实验结果相符合. 所以本模型可以很好地解释熔体近壁面流动过程中的剪切本构关系以及剪应力对凝固组织的影响.

参考文献

- [1] Yan Z M, Li X T, Cao Z Q, Zhang X L, Li T J 2008 *Mater. Lett.* **62** 4389
- [2] Zhang Z T, Li J, Yue H Y, Zhang J, Li T J 2009 *J. Alloy Compd.* **484** 458
- [3] Mahapatra R B 1991 *Metall. Trans.* **B22** 862
- [4] Cao Z Q, Jia F, Zhang X G, Hao H, Jin J Z 2002 *Mat. Sci. Eng. A* **327** 133
- [5] Li W X, Yu Z, Deng K, Lei Z S, Cheng Z K, Ren Z M 2008 *T. Nonferr. Metal Soc.* **18** 1058
- [6] Chen M W, He G W, Chen X Y, Wang Z D 2012 *CHin. Phys. B* **21** 1
- [7] Feng L, Wang Z P, Zhu C S, Lu Y 2009 *CHin. Phys. B* **18** 1985
- [8] Guan R G, Zhao Z Y, Huang H Q, Lian C, Chao R Z, Liu C M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 206602 (in Chinese) [管仁国, 赵占勇, 黄红乾, 连超, 钞润泽, 刘春明 2012 物理学报 **61** 206602]
- [9] Guan R G, Zhao Z Y, Chao R Z, Zhao H L, Liu C M 2013 *T. Nonferr. Metal Soc.* **23** 73
- [10] Haga T, Nakamura R, Tago R, Watari H 2010 *T. Nonferr. Metal Soc.* **20** 968
- [11] Haga T, Tkahashi K, Ikawaand M, Tatari H 2004 *T. Nonferr. Metal Soc.* **153-154** 42
- [12] Kund N K, Dutta P 2010 *T. Nonferr. Metal Soc.* **20** 898
- [13] Behnam A A, Hossein A 2010 *J. Mater. Process. Tech.* **210** 1632
- [14] Kapranos P, Liu T Y, Atkinson H V, Kirkwood D H 2001 *J. Mater. Process. Tech.* **111** 31
- [15] Du C, Xu M Y, Mi J C 2010 *Acta Phys. Sin* **59** 6331 (in Chinese) [杜诚, 徐敏义, 米建春 2010 物理学报 **59** 6331]
- [16] Shen Y S, Li B W, Wu M L 2000 *Basic Principles of Metallurgical Transmission* (Beijing: Metallurgical Industry Press) p5-210 (in Chinese) [沈颐身, 李保卫, 吴懋林 2000 冶金传输原理基础 (北京: 冶金工业出版社) 第5-210页]
- [17] Wang J Y, Chen C L, Zhai W, Jin K X 2009 *Acta Phys. Sin* **58** 6554 (in Chinese) [王建元, 陈长乐, 翟薇, 金克新 2009 物理学报 **58** 6554]
- [18] Dahle A K, Arnberg L 1997 *Acta Metall.* **45** 547
- [19] Guo D Y, Yang Y S, Tong W H, Hua F A, Cheng G F, Hu Z Q 2003 *Acta Metall. Sin.* **39** 914

Theoretical study on the model of metallic melt shearing flow near the surface and its effect on solidification microstructure*

Wang Xiang¹⁾ Chao Run-Ze²⁾ Guan Ren-Guo^{1)3)†} Li Yuan-Dong³⁾ Liu Chun-Ming¹⁾

1) (School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

2) (Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

3) (School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(Received 18 October 2014; revised manuscript received 6 January 2015)

Abstract

In this paper, the model of metallic melt shearing flow near the surface is established, and the effect of shearing flow on solidification microstructure of the metal is also analyzed. Calculated results based on A356 alloy melt show that in the laminar flowing melt, the shear stress decreases with increasing length along the vertical direction of the surface of the slope, and the shear stress first decreases rapidly and then stabilizes with increasing length along the flowing direction of the surface of the slope; while in the turbulent flowing melt, the shear stress firstly decreases rapidly and then stabilizes with increasing length along the vertical direction of the surface of the slope, and increases with increasing length along the flowing direction of the surface of the slope. The shear stress at the same position in the melt on the surface of the slope increases with increasing angle of the slope; the shear stress acting on the columnar crystal in the melt on the surface of the slope increases with decreasing length along the vertical direction of the surface of the slope. The shear stress acting on the columnar crystal at the same position in the melt on the surface of the slope increases with increasing angle of the slope; with the increase of the length along the flowing direction, the shear stress acting on the columnar crystal rapidly decreases first and then stabilizes in the laminar flowing melt on the surface of the slope, while the shear stress increases in the turbulently flowing melt on the surface of the slope. Based on the theoretical calculation, the maximum shear stress acting on the columnar crystal in the melt during the shearing flow near the surface of the metallic melt is lower than the yield strength of α -Al grain, so the shear stress induced by shearing flow cannot break the columnar crystal, and only by sweeping the grain into the melt to induce the multiplication of grain, which agrees with the experimental results. So, the proposed model can explain the constitutive relations of the metallic melt shearing flow near the surface and the effect of shear stress on the solidification microstructure.

Keywords: solidification, flowing near surface, shear, columnar crystal

PACS: 66.70.Df, 81.05.Bx

DOI: 10.7498/aps.64.116601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51222405, 51474063).

† Corresponding author. E-mail: guanrg@smm.neu.edu.cn