

复合铸锭包覆铸造的数值模拟

韩 星, 邵 博, 张海涛, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 建立了一个用来描述 4045/3003 复合铸锭包覆铸造过程的数学模型, 对包覆铸造过程中的流场和温度场进行了数值计算, 重点针对铸造速度对流场、温度场的影响规律, 并将计算结果和实验测温结果进行了对比. 结果表明, 适当提高铸造速度有利于两种合金的复合, 但是铸造速度过大时, 导致芯材支撑层厚度太薄、温度太高, 以致复合界面处发生重熔, 复合失败, 为保证包覆铸造过程的顺利进行, 较为合理的铸造速度应为 100 mm/min. 计算结果和实验测温结果存在良好的对应关系, 微观组织表明两种合金的结合是一种冶金结合, 模拟结果可有效预测界面复合成功与否, 对进一步优化包覆铸造工艺方案提供科学指导.

关 键 词: 包覆铸造; 数值模拟; 复合界面; 铸造速度; 冶金结合

中图分类号: TG 274; TB 115

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)07-0969-06

Numerical Simulation on Cladding Casting of Composite Ingot

HAN Xing, SHAO Bo, ZHANG Hai-tao, CUI Jian-zhong

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Hai-tao, E-mail: haitao_zhang@epm.neu.edu.cn)

Abstract: A mathematical model was developed to describe the process of cladding casting of 4045/3003 composite ingot. The flow field and temperature field in the casting process were simulated to investigate the effect of casting speed on flow field and temperature field, which was also compared with temperature measurements during the process of cladding casting. The results showed that proper increasing the casting speed can contribute to the compounding of two alloys, but excessive speed will make the supporting outer surface so hot and thin that the interface remelted and thus the test failed. The reasonable casting speed for a smooth cladding casting is 100 mm/min. Moreover, there is a good agreement between the calculated results and the measured results. The interface microstructure shows that the bonding of two different alloys are metallurgical bonding. The simulated results can predict whether the two alloys could composite together successfully or not, which provides a scientific guidance for optimizing the process of cladding casting.

Key words: cladding casting; numerical simulation; composite interface; casting speed; metallurgical bonding

双金属复合材料具有一系列单一金属不可比拟的优点, 可以改善材料的综合力学性能、抗腐蚀性能、焊接性能等. 因此, 双金属复合材料已成为整个金属材料界的研究热点^[1]. 目前, 由于生产成本低、节省能源且制备工艺简单, 直接水冷半连续铸造法是生产双金属复合材料的理想方法, 并获得日益广泛的研究和应用^[2]. 为了确定工艺参数, 最早 1981 年 Katgerman^[3] 为了预报不同铸造

工艺下几种铝合金热裂纹倾向性, 描述了一个简单的二维轴对称热模型, 并计算了沿铸锭长度方向的温度场和固相率. 1982 年, Weckman 和 Niessen^[4] 发表了一篇关于铝合金半连续铸造过程中热传输分析的报道, 在这个分析中使用了精心设计的边界条件来描述铝合金半连续铸造过程, 并提出一个经验公式来描述水沸腾换热系数. Raffourt 等^[5] 发展了一个数学模型来研究分流包

的设计参数对铝合金半连续铸造过程液穴内流体流动和温度分布的影响. 1996 年, Watanade 和 Hayashi^[6]使用了一个三维热模型来计算半连续铸造启车阶段和稳静态阶段. Zhang 等^[7]建立了铝合金低频电磁连铸过程中电磁场、流场、传热及凝固过程的二维耦合计算模型. 邱逊等^[8]应用 ANSYS 在双金属复合铸造温度场模拟的基础上进行了三维热应力场数值模拟, 得到界面的温度场以及定量的动态的变形和应力变化. 但是关于采用直接水冷半连续铸造法实现复合铸锭包覆铸造过程的数值模拟的报道及研究甚少.

本文根据复合铸锭包覆铸造的特点, 创建描述了尺寸为 $\phi 140\text{ mm}/\phi 110\text{ mm}$ 的 4045/3003 复合铸锭包覆铸造过程的数学模型, 并将该模型在商业软件 Fluent 中得以实现. 利用这个数学模型模拟工艺参数对复合铸锭包覆铸造过程中的流场、温度场以及凝固过程的影响规律, 并对计算结果和实测结果进行比较.

1 工艺过程简介

图 1 为包覆铸造装置示意图. 3003 合金通过浇口浇入内结晶器, 受到石墨内套和引锭头的激冷作用开始凝固. 当形成一定厚度且具有一定强度的高温固态支撑层时, 4045 合金流经流槽, 通过分流口进入外结晶器, 受到石墨环、引锭头和 3003 合金支撑层的冷却作用开始凝固, 同时启车. 当铸锭出结晶器时, 二次冷却水喷射到铸锭表面, 使之进一步冷却. 保持内外液面高度基本一致, 以适当的速度实现包覆铸锭的半连续铸造. 与此同时, 铸造过程中主要测量石墨内套附近的 3003 合金温度, 铸造过程稳定后, 将固定有偶线的不锈钢架浸入 3003 合金, 最终凝固在铸锭中.

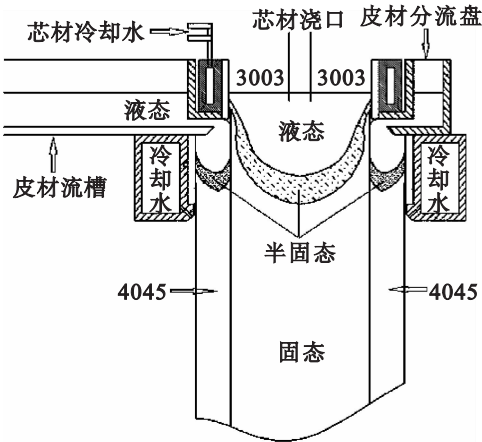


图 1 包覆铸造装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of cladding casting equipment

2 包覆铸造数学模型及其数值实现

2.1 数学模型的假设、简化及控制方程

在本研究中, 为了精确快速地描述铝合金包覆铸造过程中多物理场的相互作用, 熔体流动、热量传输和合金凝固必须被耦合在一起求解. 但是为了简化这些问题, 应当使用一些必要的假设:

1) 在这个模型中, 溶质场的计算并没有包括在本研究中.

2) 在这个模型中, 铝熔体被认为是不可压缩流体, 即密度为常数. 但是在这个模型中包括热浮力, 热浮力可解决熔体密度随温度变化而变化的问题, 所以一个 Boussinesq 估计被用来计算热浮力, 其表达式为

$$F_{\text{thermal}} = \rho_l g \beta (T - T_0). \quad (1)$$

式中: ρ_l 和 β 分别为铝熔体的密度和体膨胀系数; T_0 为参考温度, 通常为枝晶搭接温度.

3) 在包覆铸造过程中, 铸锭已凝固的部分以铸造速度轴向向下运动.

根据上面的假设, 所有控制方程被改变并在表 1 给出. 其中 μ_{eff} 和 S_m 分别是有效黏度系数和

表 1 模型的控制方程
Table 1 Governing equations used in the model

控制方程名称	简化后的控制方程
质量守恒方程	$\nabla \cdot U = 0$
动量守恒方程	$\nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) - \nabla P + S_m$
能量守恒方程	$\nabla \cdot (\rho U T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_{\text{th}}$
湍动能守恒方程	$\nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \right] + G_k - \rho \varepsilon - \frac{\mu_1}{K+x} k$
湍动能耗散守恒方程	$\nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{\mu_1}{K+x} \varepsilon$

动量源项. 有效黏度系数方程为 $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_T$, 其中, μ_l 是液体的层流黏度, μ_T 是湍流黏度. 动量源项 S_m 包括热浮力和 Darcy 源项, S_{th} 是热源项, 这里指结晶潜热.

2.2 物理模型的建立与物性参数

采用 Fluent 来计算流体流动、热量传输及合金凝固, 从而研究包覆铸造过程的温度场、流场. 本文的物理模型关于皮材流槽中垂面呈平面对称, 所以为了减小计算量同时又不影响计算结果, 该物理模型可简化为 1/2 对称模型来描述. 包覆铸造过程物理模型和网格模型如图 2 所示.

数值模拟过程使用的材料为 3003 铝合金和 4045 铝合金, 利用金属材料相图计算与材料性能模拟软件 JMatPro 的铝合金模块, 来计算数值模

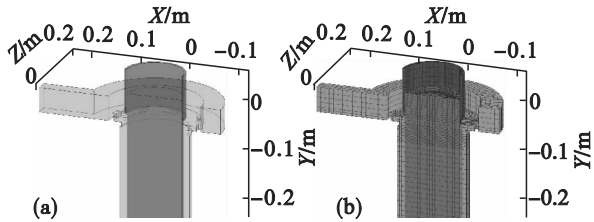


图 2 流场、温度场的物理模型和网格模型
Fig. 2 Physical model and mesh model of flow field and temperature field
(a)—物理模型; (b)—网格模型.

拟所需的物性参数. 3003 铝合金和 4045 铝合金的物性参数中 t_l 表示液相线温度, t_s 表示固相线温度, S_{th} 表示结晶潜热, β 表示体膨胀系数, k_p 为初始渗透率, f^n 表示枝晶搭接时的固相率, t_{ref} 表示参考温度, 具体数值如表 2 所示.

表 2 模拟中的物性参数及常量
Table 2 Physical properties and constants used in the numerical simulation

合金	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$t_l / ^\circ\text{C}$	$t_s / ^\circ\text{C}$	$S_{\text{th}} / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\beta / ^\circ\text{C}^{-1}$	k_p	f^n	$t_{\text{ref}} / ^\circ\text{C}$
3003	2 520	658	645	3.9×10^5	6.7×10^{-5}	2×10^{-11}	0.3	652
4045	2 420	595	577	4.7×10^5	5.2×10^{-5}	5.2×10^{-5}	0.25	569

2.3 边界条件的设定

模拟计算包覆铸造过程中速度场、温度场的边界条件如下: 入口和出口均为速度入口, 入口温度为 $730\text{ }^\circ\text{C}$, 出口温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$. 石墨内套边界的对流换热系数为 $3\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. 皮材二冷边界采用的对流换热系数分为击流区和顺流区^[7]; 复合界面边界为相对静止壁面, 两种合金的热量相互耦合.

皮材一冷边界处理为 Cauchy 类型边界条件, 其表达式为

$$k_{\text{thermal}} \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{en}}). \quad (2)$$

式中: h 为该边界处的对流换热系数; T_{en} 为该边界

处的环境温度.

3 模拟结果分析及实验验证

3.1 流场、温度场计算结果

图 3 表示不同铸造速度时, 两种合金的计算区域内速度矢量图的三维结果. 随着铸造速度的增加, 分流口内熔体流动速度增加, 熔体流动速度的增加可以从各分流口流出的速度矢量的长度和颜色清晰地看出来. 随着铸造速度的增加, 正对分流口的界面附近区域因受到较强烈的热流的冲击而温度升高, 这一点可以从图 4, 图 5 得到.

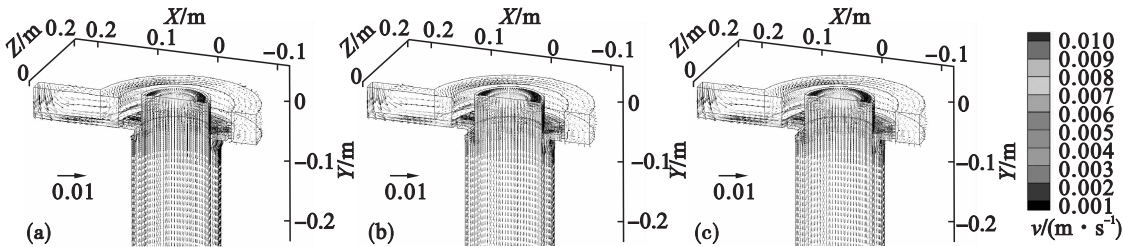


图 3 不同铸造速度时的三维速度场
Fig. 3 3D-surface plot of vector field at different casting velocities
(a)— $v = 80\text{ mm/min}$; (b)— $v = 100\text{ mm/min}$; (c)— $v = 120\text{ mm/min}$.

图 4 是不同铸造速度下的三维温度场. 从图中可以发现: 当铸造速度由 80 mm/min 增加到 120 mm/min 时, 液穴越来越深、越来越大, 液穴

下方合金温度由外向内越来越陡峭; 当铸造速度较低时, 熔体从左到右流动过程中, 温降较大, 铸造速度提高时, 温降变小. 因此, 铸造速度对复合

界面处支撑层的厚度及支撑层外表面的温度影响较大,这是因为:其一,石墨套筒高度保持不变,随着铸造速度的增加,界面处受石墨套筒冷却作用的时间就会缩短,从而使支撑层厚度变小,同时使支撑层外表面的温度升高;其二,铸造速度的增加会使从分流口流出的热流的动量变大,热流会对正对分流口界面处及附近区域产生较大的冲击,从而使该处温度偏高.相反,当铸造速度降低时,正对分流口的界面处及附近区域温度会偏低.

铸造速度为 80 mm/min 时,如图 4a 所示,由于石墨套筒冷却时间较长,使得皮材(4045 合金)接触支撑层时其表面温度已降至 577 ℃ 以下,挡块后面熔体甚至已降至 530 ℃ 以下,这样复合效

果会很差,甚至皮材熔体会因到达支撑层时温度过低而难以复合,或直接在保温材上凝固;铸造速度为 100 mm/min 时,如图 4b 所示,石墨套筒对芯材的冷却作用时间变短,芯材出石墨套筒时在界面处的支撑层有一定厚度,而且支撑层外表面温度较高,皮材流至支撑层时对芯材还有一定的回热作用,这样基本能保证复合铸造过程的稳定进行;铸造速度为 120 mm/min 时,如图 4c 所示,石墨套筒对芯材的冷却作用时间进一步缩短,这样,皮材对芯材的回热作用愈发明显,在铸造过程中,芯材形成的支撑层厚度逐渐变小,强度逐渐降低,当支撑层温度回至芯材固相线(645 ℃)以上时,界面会被破坏,发生混流,以致实验失败.

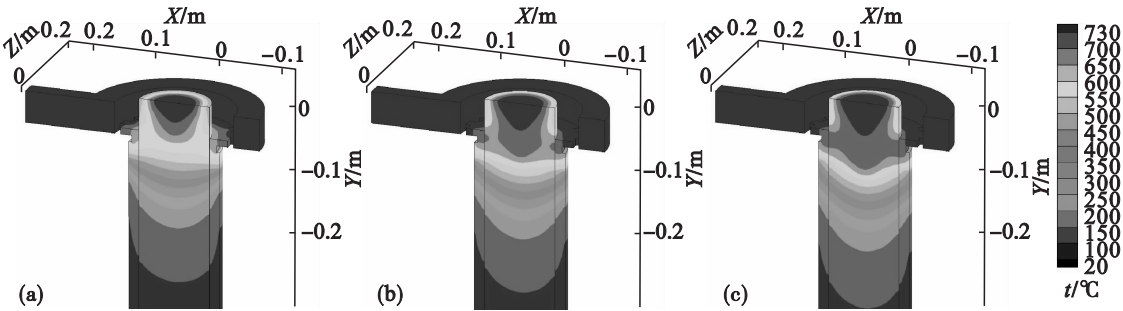


图 4 不同铸造速度时的三维温度场
Fig. 4 3D-surface plot of temperature contours at different casting velocity
(a)— $v = 80$ mm/min; (b)— $v = 100$ mm/min; (c)— $v = 120$ mm/min.

为更清晰显示复合界面处的温度变化,现将复合界面处温度提取出,如图 5 所示.当铸造速度为 80 mm/min 时,复合面上边缘的温度已降至 567 ℃ 以下,这样支撑层外表面温度过低,而且这一温度已在皮材固相线以下,这会使实验无法进行;当铸造速度为 100 mm/min 时,复合面上边缘温度在 632 ℃ 左右,随着铸造进行,皮材熔体回热

作用使支撑层外表面温度上升至近 642 ℃,在此温度下,两种熔体中合金元素能充分的扩散,达到良好的复合效果;当铸造速度为 120 mm/min 时,复合面上边缘温度上升到 637 ℃ 以上,随铸造过程的进行,皮材熔体回热作用使支撑层外表面温度升至 652 ℃ 左右,超过芯材的固相线(645 ℃),界面处将发生重熔,复合失败.

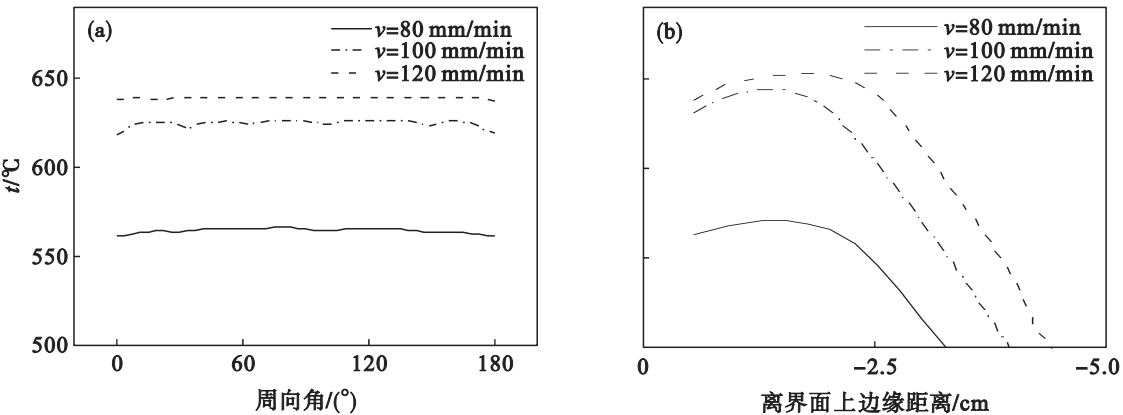


图 5 复合面周向和轴向温度分布图
Fig. 5 Temperature distribution of the composite surface in circumference and axial direction
(a)—一周向温度; (b)—一轴向温度.

提高铸造速度,一方面皮材和芯材的液穴深度都有所增加,皮材液穴深度也受芯材液穴深度的影响,芯材液穴深度增加,支撑层温度升高,从皮材熔体中吸收的热量减少,从而使其液穴深度增加.而更深的皮材液穴深度有利于延长两种合金在界面处元素扩散的时间,因而有利于提高界面结合强度;另一方面使芯材支撑层厚度减小.芯材脱离石墨套筒后与皮材溶体接触,并从后者吸收热量,而支撑层越薄,其温度越容易升高.因此,适当提高铸造速度有利于两种合金的复合,但是铸造速度过大时,导致芯材支撑层厚度太薄、温度太高,以致复合界面处发生重熔,复合失败.为保证包覆铸造过程的顺利进行,较为合理的铸造速度应为 100 mm/min.

3.2 实验验证

以模拟结果为依据制定工艺参数,进行 4045/3003 复合铸锭包覆铸造实验,同时对铸锭凝固冷却过程进行测温.热电偶共 8 根,沿界面周向均匀分为四组,每组包括位置固定的热电偶和与铸锭随行的热电偶.前者位于 4045 合金刚刚接触 3003 合金的位置,后者位于界面处与铸锭同步竖直向下运动,测温结果取平均值.图 6 表示计算结果和实验测温结果的对比,从图中可以看到计算结果和测温结果存在良好对应关系.图 6a 表示两种合金接触时复合面周向的温度.复合界面周向温度呈周期性的升降,幅度在 5℃左右,恰好与分流口对应.图 6b 表示铸造过程中复合界面轴向温度的变化,3003 支撑层由于石墨内套的冷却作用,在接触 4045 合金液时温度较低.随着铸造的进行,4045 合金液不断流入外结晶器,复合面温度明显有一个回热过程,复合面温度的升高有利于合金元素的扩散,进而促使两种合金实现冶金结合.

图 7 为以模拟结果为依据制定工艺参数,所得到 4045/3003 包覆铸锭的宏观形貌和微观组织.铸锭的截面图中,皮材为 4045 合金,芯材为 3003 合金,两种合金复合良好,界面清晰、曲率规整,无气孔、夹杂,无混流、开裂现象,尺寸规整,无明显偏心现象.微观组织中上半部分为皮材 4045 合金,主要有 α -Al 相和针状的共晶硅相,下半部分为芯材 3003 合金,主要有 α -Al 相和条形的铝锰相,且在界面处为柱状晶.图中界面两侧 4045 合金和 3003 合金微观组织清晰,界面平直,无混流、开裂现象,界面无气孔、夹杂等缺陷.从微观角度上讲,界面附近的两种合金中的 α -Al 相很好地结合在一起,两种合金成功实现复合.

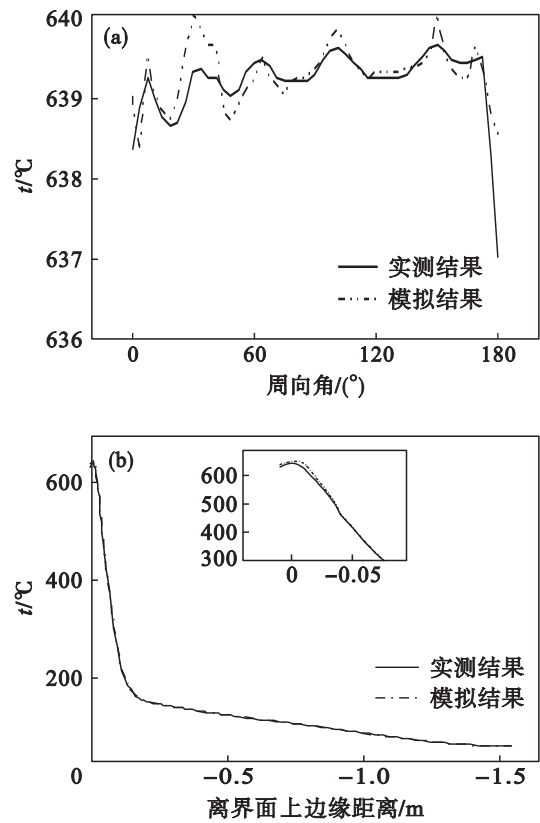


图 6 复合面周向和轴向温度的计算结果与实测结果的比较
Fig. 6 Comparison between the calculated result and the measured result of the composite surface in circumference and axial
(a)一周向温度;(b)一轴向温度.

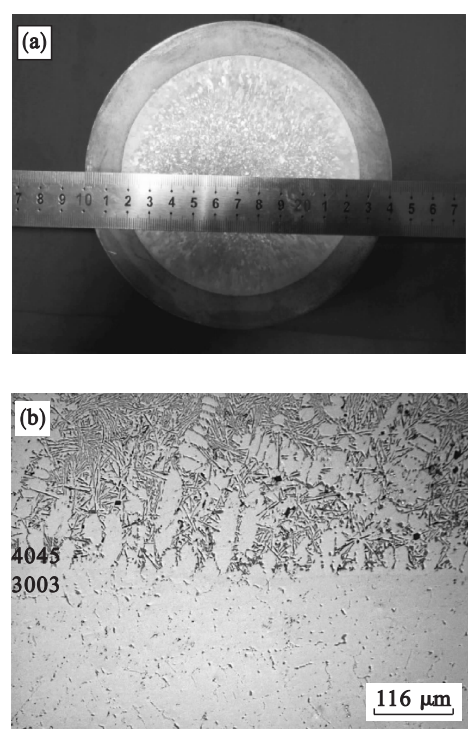


图 7 铸锭界面宏观形貌和微观组织
Fig. 7 The appearance and the metallographic structure of the cladding ingot interface
(a)一宏观形貌;(b)一微观组织.
(下转第 978 页)