

连铸中间包内三维湍流流动的数值模拟*

朱苗勇

(东北大学, 沈阳 110006)

沢田郁夫

(新日本制铁株式会社, 川崎 211)

摘要 连铸中间包的操作条件决定了其内流动现象的复杂性, 为此, 本文选择两种不同的湍流模型 $k-\varepsilon$ 和 LES(Large eddy simulation), 建立了描述连铸中间包内三维湍流流动的数学模型, 并实施了数值计算和模型验证, 对单流中间包内的流动现象进行了描述, 考察了有、无流动控制情况下中间包内的流动特征和湍流模型的合理性. 结果表明, 合理的流动控制有利于中间包内非金属夹杂的上浮和吸附, 用 $k-\varepsilon$ 模型基本上能够描述中间包内的流动现象, LES 则能描述用 $k-\varepsilon$ 模型所不能很好描述的现象.

关键词 连铸中间包, 湍流流动, 湍流模型, 数值模拟

在连铸生产中, 中间包不仅充当钢液的分配器, 而且也是提供钢液中非金属夹杂上浮和排除的重要场所, 可见, 其内钢液的流动方式对非金属夹杂的去除影响较大. 为此, 自 80 年代以来, 不少研究者用物理模拟和数学模拟方法研究中间包内的传输行为^[1-5], 而且采用数学模拟的颇多, 其目的在于了解中间包内的过程特征, 以优化操作和提高铸坯的质量. 但由于中间包属于流动现象比较复杂的反应器, 其内入口与出口的湍动比较剧烈, 而其它区域较弱, 因此, 要对中间包内的传输现象作出准确的数学描述, 湍流模型的选择和应用、计算技术的运用和边界条件的确立都很重要.

以往的工作基本上采用了 $k-\varepsilon$ 模型来计算中间包内的湍流流场, 提供不少有价值的信息, 但对湍流模型本身的合理性、局限性却少有涉及, 对计算结果的准确度考虑得也不多. 随着计算机技术的发展, 对湍流深层次的模拟已成为现实. 湍流涡旋学说的大涡模拟 LES(Large eddy simulation)已引起了研究者的高度重视, 但目前冶金中的应用研究却很少, 未见对中间包内流动模拟的合理性进行研究的报道.

本文通过建立描述中间包内三维流动的数学模型和开发计算程序, 选择 $k-\varepsilon$ 模型和大涡模拟, 对中间包内的流动现象进行了数值模拟研究. 目的在于揭示中间包内的流动特征, 考察 $k-\varepsilon$ 模型和 LES 的合理性, 为中间包内流控装置的设计和传输过程的数学模拟提供信息和依据.

1 数学模型

本研究选择的研究对象为单辊连铸中间包, 其长、宽、高分别为 1.317, 0.316 和 0.316 m.

* 国家自然科学基金资助项目 59504006 和冶金工业部资助项目

收到初稿日期: 1996-07-02, 收到第 2 次修改稿日期: 1997-03-03

本文通讯联系人: 朱苗勇, 副教授, 沈阳(110006)东北大学钢铁冶金系

中间包中入口和出口的水口内径均为 28.5 mm, 入口的流速为 0.545 m/s. 包内设置的堰离入口水口的距离为 0.45 m, 离熔池表面的距离为 0.238 m; 设置的坝离入口水口的距离为 0.570 m, 高为 0.111 m.

1.1 控制方程

中间包内的湍流流动可用连续方程, Navier-Stokes(N-S)方程和湍流模型来描述, 其表达式为

连续方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

N-S 方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中, u_i, u_j 为 i 和 j 方向的速度; x_i, x_j 为 i 和 j 方向的坐标值; ρ 为流体密度; p 为压力; μ_{eff} 为有效粘度系数, 可用湍流模型确定. 本文选择两种湍流模型, 即由 Launder 和 Spalding 提出目前应用较广的 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[6] 和由 Deardorft 提出的大涡模拟 LES^[7].

采用 $k-\varepsilon$ 模型时, 式(2)为稳态, 模型的控制方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率, G_k 为湍动能产生项, 可表示为

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (6)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \mu_t \quad (7)$$

式中, μ_1 和 μ_t 分别为层流和湍流粘度系数. 模型中, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$ 和 C_μ 这 5 个常数采用 Launder 和 Spalding^[6] 的推荐值.

采用 LES 时, 式(2)含有时间项, μ_t 由下式确定

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 \cdot (2S_{ij} \cdot S_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

式中, C_s 为 Smagorinsky 常数, 根据文献 [8], 取其值为 0.1; S_{ij} 表示大尺度流场应变率, 可表示为

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式(8)中, Δ 为过滤宽度, 由下式确定

$$\Delta = \left(\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{3} \right)^{1/2} \quad (10)$$

式中, Δx , Δy 和 Δz 分别为微元体三方向的尺寸.

1.2 边界条件

在自由表面, 平行表面速度分量、压力、湍动能、湍动能耗散率的梯度设为零; 在固体壁面上, 速度、压力设为无滑移边界条件. 在近壁区, 使用 $k-\varepsilon$ 模型时, 平行于壁面的速度和湍流特性参数采用壁函数来确定^[6]; 大涡模拟时, 速度由 1/7 法则确定^[9]. 入口处, $u = u_{\text{inlet}}$, $k = 0.01 u_{\text{inlet}}^2$, $\varepsilon = k^{1.5} / (d_{\text{inlet}} / 2)$, 其中, u_{inlet} 为入口速度, d_{inlet} 为入口内径; 出口处, 速度分量和除压力外的其它标量的梯度均设为零.

1.3 数值求解

采用有限控制体法对偏微分方程组进行离散化. 当使用 $k-\varepsilon$ 模型时, 用 Simple 法计算流场^[10], 中间包全场的计算网格为 $60 \times 20 \times 20$, 所用计算程序为作者开发, 计算在工作站上进行; 当使用大涡模拟时, 采用 Fractional step 法计算流场^[11], 全场的计算网格为 $60 \times 26 \times 20$, 计算在大型机 (Super-Computer) 上进行.

2 结果与讨论

2.1 中间包内的流动特征

图 1 为用 $k-\varepsilon$ 模型在无流动控制中间包内中心截面(图 1a), 1/4 截面(图 1b)和壁面附近截面(图 1c)上的计算流场. 可以看出, 三截面上的流场差别较大, 反映出中间包内的三维流动特征. 图 1a 显示来自大包的钢水流以较大的速度冲到中间包包底, 然后向四周扩展, 但钢水主要是沿中间包侧壁流向水口的(图 1c). 在 1/4 截面上, 还可发现在包底附近形成了一循环流, 这限制了中间包多数区域上升流的发展, 因此, 这样的流动方式是不利于非金属夹杂物的上浮, 要提高钢液中夹杂物的去除率须对中间包内流动进行有效控制.

图 2 为中间包设有一坝和一堰时在中心截面(图 2a), 1/4 截面(图 2b)和壁面附近截面(图 2c)上的计算流场. 与无流动控制时中间包内流场比较, 可见坝和堰的设置对其内的流场影响很大, 从而将影响夹杂物的行为. 在此情况下, 坝和堰将较强烈湍动区域限制在钢水的入口附近, 这样就促进了夹杂物的碰撞、聚合和上浮; 来自钢包的钢液经坝和堰后主要沿着熔池表面流动, 这样也促进了夹杂物的上浮和与表面渣的接触. 因此, 在中间包内实行合理的流动控制有利于夹杂物的上浮. 关于流动控制装置在实际中间包的真实功能和作用可参见文献[12].

2.2 计算结果和 $k-\varepsilon$ 模型的合理性

通过对以上两种情况三个截面上的计算结果与 Lee 等^[5]的实测流场结果比较, 可发现两者吻合良好(尤其是有流动控制时的结果), 但也存在着一些局部偏差, 特别在无流动控制时, 在包底附近计算的流体其穿透深度较实测要短. 这也反映出传统的 $k-\varepsilon$ 模型对这种特殊的体系并不总能很好地描述其内部湍流随空间的变化. 这有以下几方面原因:

湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 都是标量, 它们构成的湍流粘度系数无法体现出湍流传输的各相异性;

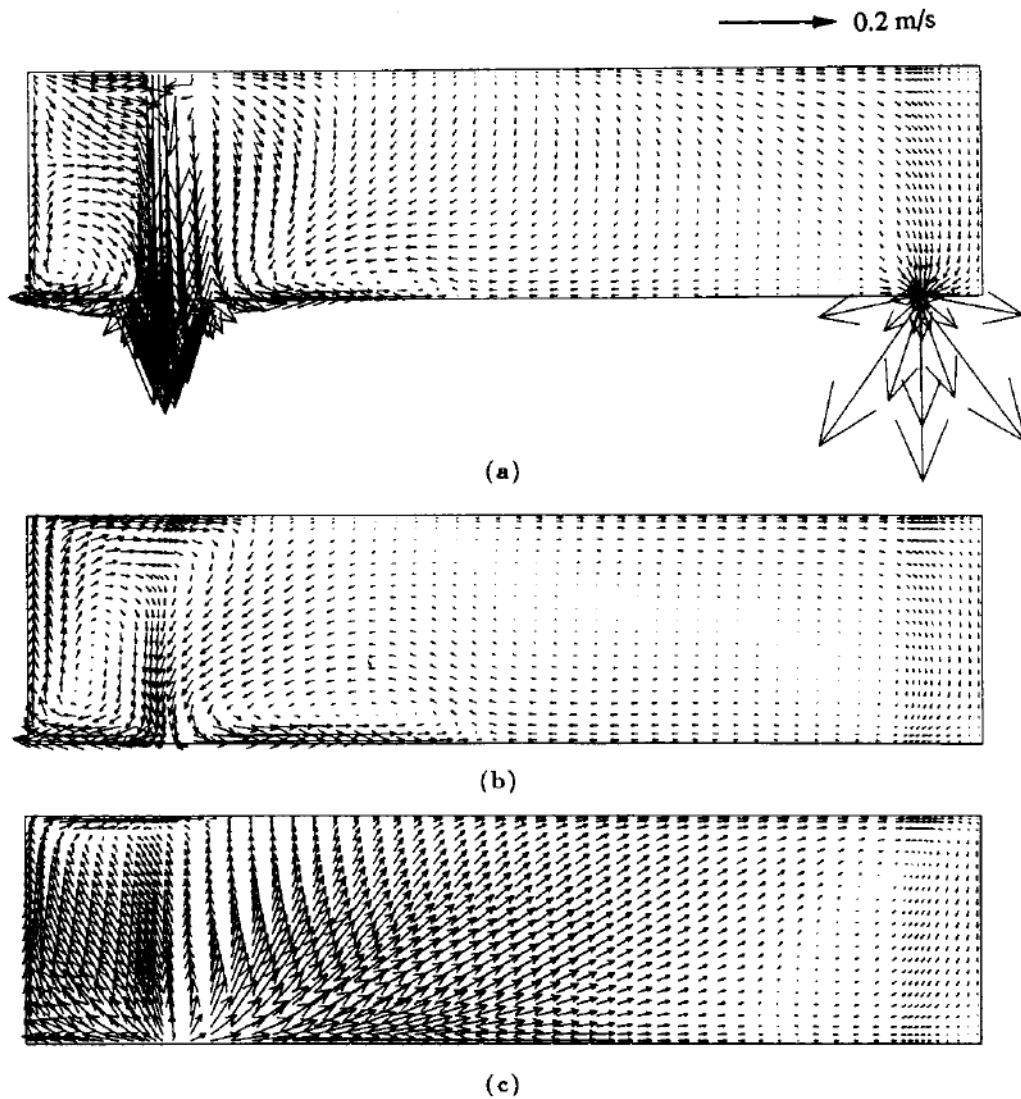


图 1 中间包内无流动控制时用 $k-\varepsilon$ 模型的计算流场

Fig.1 Predicated flow patterns in the tundish without flow control by using $k-\varepsilon$ model

(a) middle plane (b) quarter plane (c) near-wall plane

$k-\varepsilon$ 模型中的经验成分比较多, 5 个常数主要是根据一些特殊条件下的试验结果确定的, 故对中间包内复杂流动的描述, 传统 $k-\varepsilon$ 模型所造成的一些局部偏差是不可避免的.

这里要提及的是 Lee 等^[5] 通过使用 Phoenics 软件包也进行了同样的流场计算, 但与实测结果比较, 其吻合程度比本文的计算结果低, 在中间包出入口附近区域和堰下区域的计算流场与实测差别较大, 而本文的结果与实际较吻合, 除了网格和其它原因外, 出口边界条件的强设置是造成偏差的一个主要原因.

2.3 LES 的合理性

图 3 是与图 2 在相同截面上用 LES 所获得的计算流场. 与用 $k-\varepsilon$ 模型所获得的计算结果比较, 其与实测的吻合程度要好些, 靠近底面的流动得到了很好的计算结果.

由于中间包内的流动比较复杂, 在入口和出口处的流体湍动得较厉害, 而在其它区域则较弱, 甚至有湍流与层流的过渡区. 因此, 为了准确计算中间包内的流动场和湍流特性, 合理

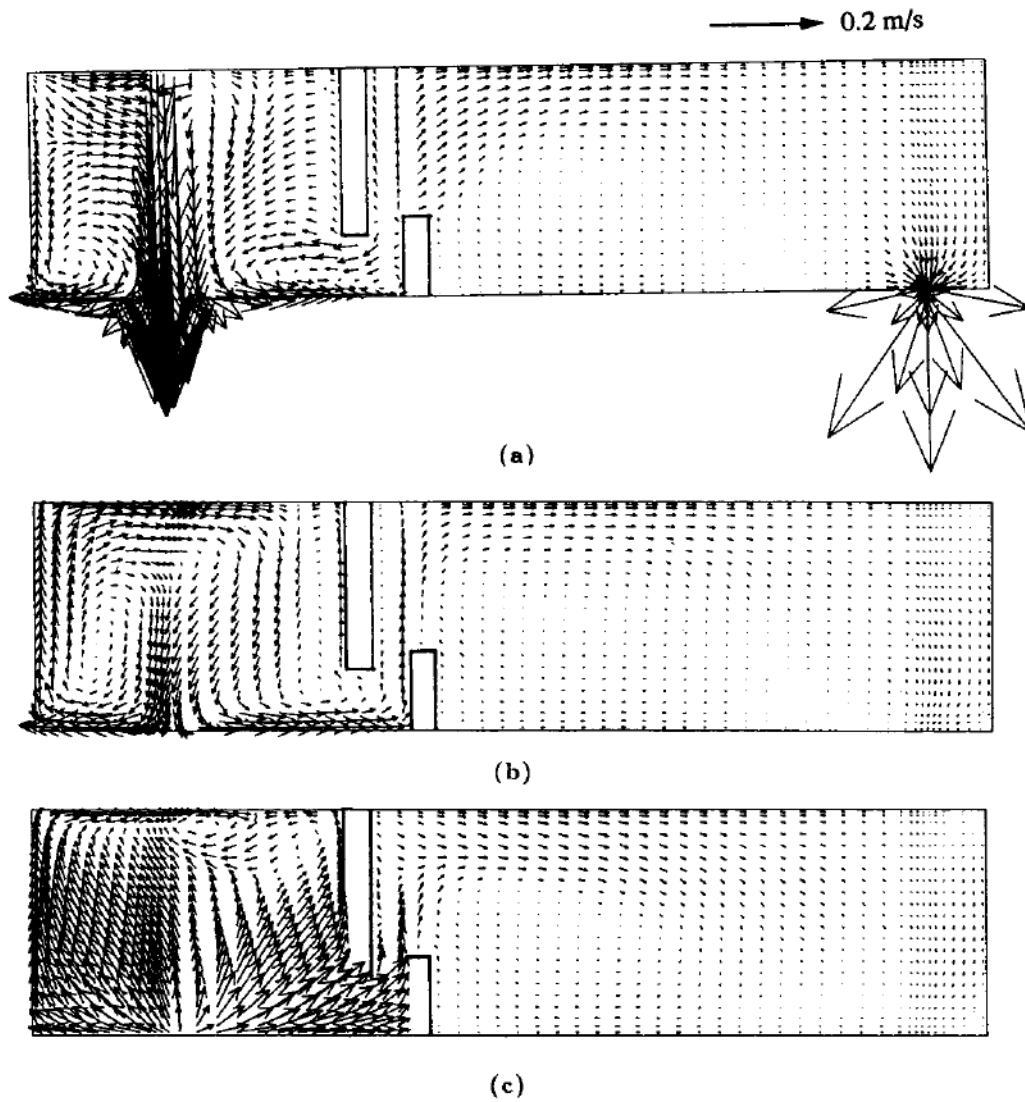


图 2 中间包内有流动控制时用 $k-\varepsilon$ 模型的计算流场

Fig.2 Predicated flow patterns in the tundish with flow control by using $k-\varepsilon$ model

(a) middle plane (b) quarter plane (c) near-wall plane

选择湍流模型和数值计算方法很重要. 大涡模拟因其经验成分少、反映湍流本质已显示出优势, 但 LES 须求解三维非定常方程, 需要大量的网格和计算时间, 因此, 目前在工程计算的推广应用上还有一定难度.

总的看来, $k-\varepsilon$ 模型能较好地用于中间包内流动和湍流特性的计算, 且计算时间比用 LES 要短得多, 但因其本身的限制有些现象还不能得到很好计算, 因此, 采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型来进行中间包内湍流场的研究将是一项有意义的工作.

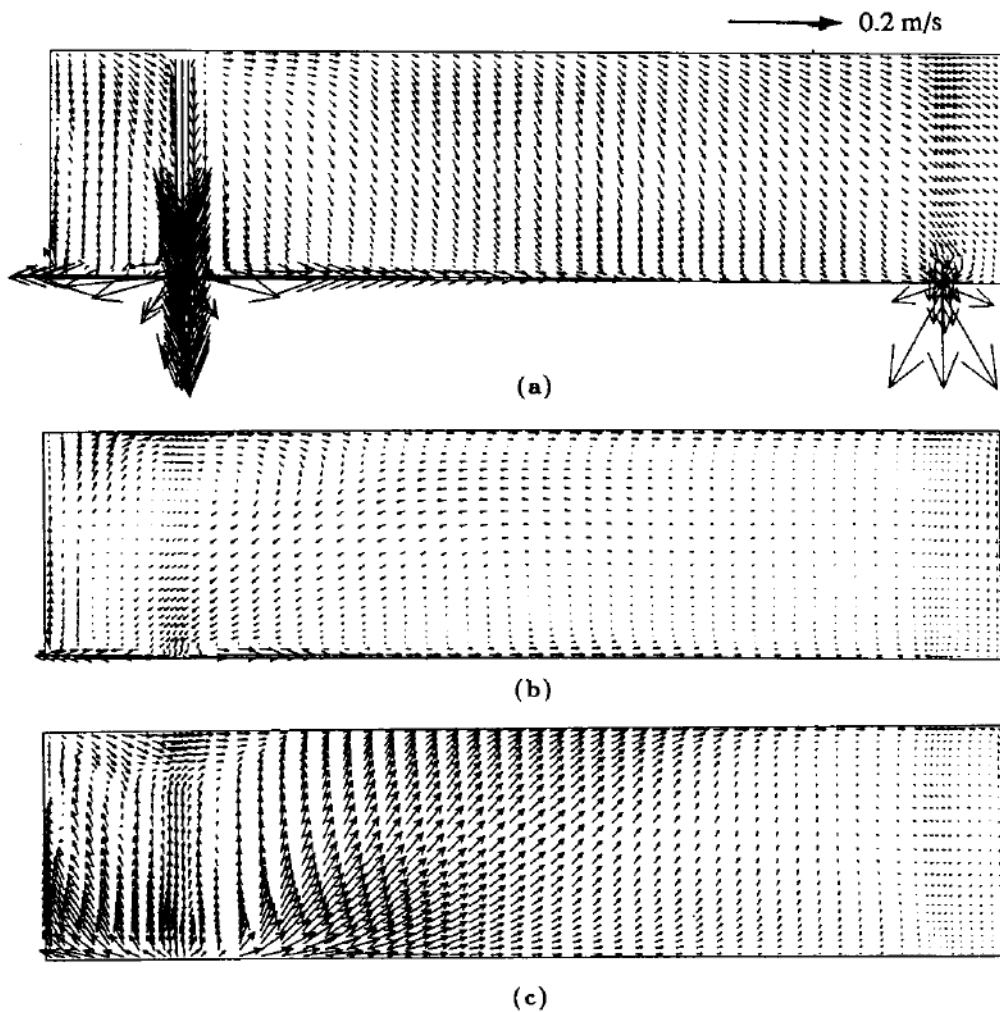


图3 中间包内无流动控制时用大涡模拟(LES)的计算流场

Fig.3 Predicated flow patterns in the tundish without flow control by using LES

(a) middle plane (b) quarter plane (c) near-wall plane

3 结 论

(1) 建立了基于两种不同湍流模型描述中间包内三维湍流流动的数学模型. 计算结果和分析表明, 无流动控制时, 中间包内的流场不利于非金属夹杂的上浮; 包内坝和堰的设置, 对其内的流场和湍流特性影响较大, 合理的设置有利于非金属夹杂的上浮和吸附.

(2) 总体上看, 传统的 $k-\varepsilon$ 模型能较好地用于中间包内的流动和湍流特性的计算, 且计算时间较短, 但因模型本身固有的局限有些现象还不能得到很好计算. 另一方面, 大涡模拟却能描述中间包中传统的 $k-\varepsilon$ 模型所不能很好描述的现象, 但它需要较大的网格和较长的计算时间.

参 考 文 献

- 1 Lai K Y M, Salcudean M, Tanaka S, Guthire R I L. *Metall Trans*, 1986; 17B: 449
- 2 He Y, Sahai Y. *Metall Trans*, 1987; 18B: 81
- 3 Szekely J, El-Kaddah N. *Steelmaking ConfProc*, 1986; 69: 761
- 4 Tacke K H, Ludwig J C. *Steel Res*, 1987; 58: 262
- 5 Lee S M, Koo Y S, Kand T, Lee I R. *Proc 6th Int Iron Steel Congress*, Nagoya, Iron Steel Inst Japan, 1990: 239
- 6 Launder B E, Spalding D B. *Comput Method Appl Mech Eng*, 1974; 3: 269
- 7 Deardoff J W. *J Fluid Mech*, 1970; 41: 451
- 8 Yoshizawa A. *Encyclopedia of Fluid Dynamics*. Vol.4, Houston: Gulf, 1984: 1377
- 9 村上周三, 持田灯, 林吉彦. 生产研究, 1992; 43: 28
- 10 Patankar S V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere, 1980
- 11 棚桥隆彦. 机械研究, 1987; 39: 1249
- 12 朱苗勇. 金属学报, 1997; 33: 933

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW IN CONTINUOUS CASTING TUNDISHES

ZHU Miaoyong (Northeastern University, Shenyang 110006), SAWADA Ikuo (Nippon Steel Corporation, Kawasaki 211, Japan)

(Manuscript received 1996-07-02, in revised form 1997-03-03)

ABSTRACT A Mathematical model to describe three-dimensional turbulent flow in continuous casting tundishes has been developed by choosing two different types of turbulent model as $k-\varepsilon$ and LES (Large eddy simulation). Numerical calculations have been performed to study the characteristics of flow in the tundish without / with flow control, and the reasonability of the turbulent models has been discussed. The results show that the proper flow control is in favor of inclusions floating in the tundish; basically, the phenomena of flow in the tundish can be described by using traditional $k-\varepsilon$ model, however, the phenomena which could not be well calculated by $k-\varepsilon$ model can be described by using LES.

KEY WORDS continuous casting tundishes, turbulent flow, turbulent model, numerical simulation

Correspondent: ZHU Miaoyong, associate professor, Department of Ferrous Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006