

连铸中间包用耐火材料冲蚀的数值模拟

张美杰 黄 奥 顾华志 林小龙 毕思标 吕 洁 尹 路
(武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 武汉 430081)

摘 要 建立了中间包内钢液-夹杂物两相流对耐火材料冲蚀的数学模型,并对设置有湍流控制器、挡渣堰、挡渣坝中间包耐火材料的冲蚀特性进行了数值模拟计算。计算结果表明,中间包内冲蚀率最大的位置在湍流控制器内,其次是注入区近渣线处包壁、挡渣堰与挡渣坝迎向钢液流动一侧壁面,其他区域耐火材料的冲蚀很小,可以忽略不计。

关键词 连铸中间包 耐火材料 冲蚀 数值模拟

Numerical Simulation of Erosion-Corrosion of Refractory for Continuous Casting Tundish

Zhang Meijie, Huang Ao, Gu Huazhi, Lin Xiaolong, Bi Shibiao, Lü Jie and Yin Lu
(State Key Lab of Refractories and High Temperature Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The math model for erosion-corrosion of liquid steel-inclusion two-phase flow in tundish on refractory has been established and the numerical calculation to erosion-corrosion characteristics of refractory in tundish with turbulence inhibitor, dams and weirs is carried out. Calculated results show that the position with max erosion-corrosion rate in tundish is at turbulence inhibitor, next is the tundish wall near slag line in pouring-in area and the side wall of dams and weirs facing to liquid steel flow, the erosion-corrosion of refractory in other region is very small and can be ignored.

Material Index Continuous Casting Tundish, Refractory, Erosion-Corrosion, Numerical Simulation

综合中间包耐火材料冲蚀的研究^[1-10]可得,中间包耐火材料的冲蚀可看作夹杂物颗粒与钢液共同对壁面的作用。本文基于计算流体力学(CFD)建立中间包内耐火材料的冲蚀预测模型。该冲蚀模型同时考虑钢液的冲刷及夹杂物颗粒的冲蚀,考虑颗粒之间的碰撞长大,应用半实验关联式计算冲蚀速率。

1 耐火材料侵蚀模型

1.1 协同效应原理

中间包内存在复杂的多相流动与化学反应过程,对耐火材料的侵蚀是多相流动、热应力破坏、化学反应及传质过程协同作用造成的。在实际的工况条件下,耐火材料的总侵蚀率可表示为:

$$W_t = W_{sys} = W_c + W_f + W_{th} \quad (1)$$

式中: W -耐火材料侵蚀量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); t 、 sys 、 c 、 f 、 th -分别表示耐火材料的总和、协同作用、化学反应、流体力学与热力学因素。

在极端情况下:(1)温度变化较大时,如新投入使用的中间包在初次浇注时,由于各部分耐火材料的热膨胀性能不一致而引起的开裂。此时, $W_t = W_{th}$;(2)静态条件下温度变化不大时为纯化学侵蚀,如钢包单纯作为钢液的转运容器时渣线部位的侵蚀

及静态抗渣实验下的侵蚀行为。此时, $W_t = W_c$;(3)当稳定状态下不存在化学反应时为流体及夹杂物的冲蚀,如钢包、中间包非渣线的工作区域,钢液与耐火材料不发生化学反应时,主要是钢液及夹杂物对耐火材料的冲蚀。此时, $W_t = W_f$ 。

1.2 流体冲刷侵蚀模型

中间包内的耐火材料在高温下的冲蚀可看作塑性冲蚀。带有夹杂物的钢液冲向耐火材料表面时,造成短程切削与塑性变形的坑,在反复塑性变形的情况下形成磨损。同时,高速流动的钢液与耐火材料壁面之间由于相对运动而产生剪切应力,不断地撕裂、剥落表面耐火材料。湍流加剧了局部钢液的搅动,促进冲蚀过程。因此,钢液对耐火材料的冲蚀需考虑剪切应力与湍流强度两方面主要因素,本文以两者乘积^[11]为参量定量研究钢液冲刷对耐火材料侵蚀的促进作用。即

$$W_f = f(\tau, I) = \tau(x, y) \cdot I(x, y) \quad (2)$$

式中: W_f -钢液冲刷引起的侵蚀量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); τ -钢液与耐火材料间的剪切应力/Pa; I -湍流强度/%。

1.3 夹杂物颗粒冲蚀模型

由于中间包内的钢液中存在夹杂物颗粒,夹杂

物随钢液一起流动,因此对耐火材料的冲蚀为固/液两相流的冲蚀。材料的冲蚀主要有脆性冲蚀与塑性冲蚀两种模型^[12],耐火材料在常温或低温下表现出典型的脆性特点,在高温条件下却表现出明显的塑性特点^[13],切削是冲蚀的主要形式,大量研究表明^[13,14]:固体颗粒的冲蚀主要与冲蚀物的性质、冲蚀角、冲蚀速度、被冲蚀材料的性质有关。脆性材料的最大冲蚀率发生在接近 90° 处,而塑性材料的最大冲蚀率发生在冲蚀角为 20° ~ 30° 处。

本文采用 Johnson-Cook 模型描述钢液中夹杂物颗粒的冲蚀特性,根据如下半经验关联式计算耐火材料的冲蚀率^[14]:

$$W_{pr} = \begin{cases} 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_p^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) \times \\ \quad d^{0.32} V_p^{2.06} \cos^{2.5} \alpha \sin(3\alpha), \alpha \leq \frac{\pi}{6} \\ 2.31 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) d^{0.32} V_p^{2.06} \sin^{2.5} \alpha + 9.81 \times 10^{-3} (8.75 \times 10^{-3} + 5.48q^{3.46}) \times \\ \quad d^{0.32} V_p^{2.06} \cos^{2.5} \alpha, \alpha > \frac{\pi}{6} \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_{pr} - 单位质量冲蚀物作用下耐火材料的冲蚀量/(g · kg⁻¹); q - 耐火材料的气孔率/%; d - 冲蚀物的粒径/μm; V_p - 冲蚀速率/(m · s⁻¹); α - 冲蚀角/rad。

钢液中的夹杂物颗粒会由于布朗运动碰撞、湍流碰撞、Stokes 碰撞而聚合长大,其碰撞长大速率根据文献^[15]求解。

2 计算条件

以炼钢厂的二流板坯中间包为实际模型,中间包及优化后控流装置结构示意图如图 1 所示。根据该厂的实际工作情况,拉坯速度 1.2 m/min,铸坯尺寸 900 mm × 230 mm,长水口(入口)内径为 95 mm,出口直径为 40 mm。

钢液的密度为 6 940 kg/m³,粘度为 6.293 × 10⁻³ Pa · s。假设夹杂物颗粒密度为 2 700 kg/m³,夹杂物半径区间取 10 ~ 100 μm。

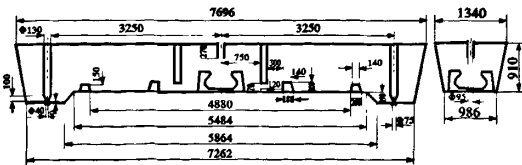


图 1 中间包结构及控流装置图

Fig. 1 Schematics of structure of tundish and flow control device

采用商业 CFD 软件求解中间包内的钢液的湍流流动^[15],夹杂物的运动轨迹通过 DPM (离散模型)求解,材料的冲蚀模型采用个人编程的形式带入 CFD 软件中,耦计算中间包内钢液的流动、夹杂物的运动过程及对耐火材料的冲蚀。

3 计算结果与分析

3.1 钢液冲刷磨蚀率分布

高温钢液通过钢包长水口以较快的速度冲击到湍流控制器内,然后越过湍流控制器、挡渣堰、挡渣坝等控流装置流向出口。在受限的湍流控制器内及注入区,钢液进行强烈地湍流流动,钢液与壁面之间不断碰撞,对耐火材料壁面进行快速地冲刷,造成耐火材料的冲刷磨蚀。图 2 为中间包钢液冲蚀图。

由图 2 可知,在该中间包内,湍流控制器底部及弯角处钢液冲刷磨蚀率最大,其次是湍流控制器顶部区域、注入区近液面处包壁、挡渣堰及近入口区挡渣坝迎向钢液流动方向侧壁面、塞棒底部,但远小于湍流控制器内钢液的冲蚀率,其它部位的冲蚀率更是可以忽略不计。由于控流装置的布置情况影响钢液的流场,因此也会影响中间包内钢液对耐火材料的冲蚀率,耐火材料的蚀损将会造成控流装置结构与尺寸的改变,反过来又影响钢液的流动特性,恶化钢液的流动,降低夹杂物的上浮去除率。

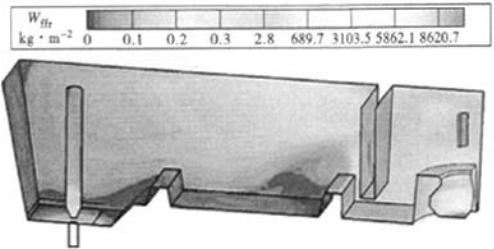


图 2 中间包钢液对耐火材料的冲蚀率分布图

Fig. 2 Distribution of erosion-corrosion rate of refractory by liquid steel in tundish

3.2 颗粒空间分布特征

由于中间包为对称结构,下边仅取其 1/4 进行分析。图 3 为夹杂物颗粒迹线图。由图 3 可知,在连续相钢液的携带作用下,在湍流控制器内颗粒密集,由于顶渣的吸附作用,在出口区域颗粒分布稀疏。因此,离散颗粒模型能够反映颗粒的空间分布的不均匀动态变化特征。另一方面,虽然颗粒受相间作用力、重力、加速度力的作用,但影响颗粒运动的主



图 3 中间包内夹杂物运动迹线图
Fig.3 Moving trace of inclusions in tundish

要因素仍是颗粒与流体间的相互作用力。

在颗粒运动过程中,颗粒速度最大的位置也发生在入口和出口区域内,而与壁面碰撞最为剧烈(碰撞次数较多、碰撞速度大)的区域在湍流控制器内,部分颗粒速度不同程度地偏离连续相流动方向,表明颗粒碰撞对液-固两相流运动有重要的影响。

3.3 中间包内夹杂物颗粒冲蚀率的分布

由图 4 可知,该控流装置的中间包内,夹杂物颗粒对耐火材料的冲蚀率分布与钢液的冲蚀率分布并

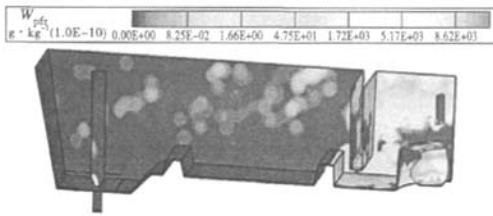


图 4 中间包夹杂物颗粒对耐火材料的冲蚀率分布
Fig.4 Distribution of erosion-corrosion rate of refractory by inclusion particles in tundish

参考文献

- 1 Maeda Eizo, Kanatani Satoi. The Damage of Continuous Casting Tundish Refractories. Taikabutsu, 2001, 53(4): 220
- 2 姜茂华, 陈树江. 连铸中间包镁质涂料及其抗渣性的研究. 炼钢, 2003, 19(5): 35
- 3 Anan Kenji. The Damage of Converter Refractories. Taikabutsu, 2001, 53(4): 178
- 4 Jerome Berjonncan, Pascal Prigem, Jacques Poiner. The Development of a Thermodynamic Model for Al₂O₃-MgO Refractory Castable Corrosion by Secondary Metallurgy Steel Ladle Slags. Ceramics International, 2009, 35: 623
- 5 Andreev K, Harmuth H. FEM Simulation of the Thermo-mechanical Behaviour and Failure of Refractories—a Case Study. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143-144: 72
- 6 He Qinglin, Geoff M Evans. Fluid Flow and Refractory Wear in a Blast Furnace Trough - a Water Model Study Using LDV// 61st Ironmaking Conference Proceedings. Nashville, Tennessee, 2002: 167
- 7 Viks Singh, Atanu Ranjan PAL, Prasanta Panigrahi. Numerical Simulation of Flow-induced Wall Shear Stress to Study a Curved Shape Billet Caster Tundish Design. ISIJ International, 2008, 48(4): 430
- 8 Zhang Meijie, Lin Xiaolong, Wu Yan, et al. Numerical Simulation on Flow-Induced Corrosion in One-Strand Tundish. Advanced Materials Research, 2010, 105-106: 142
- 9 Andrew P, Campbell Koulis A. Pericleous and Mark Cross. Modelling

不完全一致。耐火材料发生冲蚀最大的位置在湍流控制器底部(冲击区)及弯角处,这是由于在钢液的带动下,冲击到湍流控制器内的夹杂物颗粒的冲击速度很大,湍流控制器弯角处的冲蚀角在 30°左右,因此也有很大的冲蚀率。湍流控制器的其它区域、注入区包底近包壁区域、包壁上上部区域(渣线以下)、挡渣堰上部区域(渣线以下)及近包壁区域、挡渣堰底部、挡渣坝迎向钢流壁面处、塞棒顶端耐火材料的冲蚀率次之。这与实际工业生产中冲击区挡渣堰的腰部及渣线区域损毁严重相一致。

4 结论

(1) 中间包内耐火材料的损毁是由于化学反应与钢液流动协同作用所致。对于渣线区耐火材料主要是化学反应起作用,对于控流装置及包壁其他区域主要是钢液流动作用,包括钢液流动冲刷侵蚀及夹杂物颗粒冲蚀。

(2) 冲蚀率最大的位置在湍流控制器底部及弯角处,其次是注入区近渣线处包壁、挡渣堰与挡渣坝迎向钢液流动侧壁面,其他区域耐火材料的冲蚀可以忽略不计。

(3) 中间包耐火材料的冲蚀情况由钢液流动性决定,与控流装置的布置有关。耐火材料的冲蚀损毁使控流装置的结构尺寸受到破坏,改变钢液的流动性。

973 前期研究专项(2009CB62600);湖北省教育厅重点科研项目(D20081109)。

- of Freeze Layers and Refractory Wear in Direct Smelting Processes// 61st Ironmaking Conference Proceedings. Nashville, Tennessee, 2002: 479
- 10 林玉珍. 流动条件下磨损腐蚀的研究进展. 全面腐蚀控制. 1996, 10(4): 1
- 11 代真, 牛晓光, 沈士明. 流体力学因素对空冷器冲蚀影响的定量分析. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(4): 85
- 12 孙继龙, 许森虎. Sialo 陶瓷的冲蚀磨损及磨粒磨损行为. 无机材料学报, 2000, 15(5): 889
- 13 胡水. 耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法的研究:[硕士学位论文]. 西安:西安建筑科技大学, 2005
- 14 黄奥, 顾华志, 雷明, 等. 精炼钢包刚玉基耐火材料冲蚀的有限元分析. 硅酸盐通报, 2010, 29(1): 4
- 15 张美杰. 中间包气幕挡墙的结构优化及其夹杂物去除的数学物理模拟研究:[博士学位论文]. 武汉:武汉科技大学, 2006

张美杰(1972-),女,博士,副教授,1995年武汉科技大学毕业,热工窑炉内的仿真模拟,耐火材料研究和应用。

收稿日期:2010-04-20

连铸中间包用耐火材料冲蚀的数值模拟

作者: [张美杰](#), [黄奥](#), [顾华志](#), [林小龙](#), [毕思标](#), [吕洁](#), [尹路](#), [Zhang Meijie](#), [Huang Ao](#),
[Gu Huazhi](#), [Lin Xiaolong](#), [Bi Shibiao](#), [Lü Jie](#), [Yin Lu](#)
作者单位: [武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地](#), 武汉, 430081
刊名: [特殊钢](#) PKU
英文刊名: [SPECIAL STEEL](#)
年, 卷(期): 2010, 31(4)
被引用次数: 1次

参考文献(15条)

1. [Maeda Eizo;Kanatani Satoi](#) [The Damage of Continuous Casting Tundish Refractories](#) 2001(04)
2. [姜茂华;陈树江](#) [连铸中间包镁质涂料及其抗渣性的研究](#)[期刊论文]-[炼钢](#) 2003(05)
3. [Anan Kenji](#) [The Damage of Converter Refractories](#) 2001(04)
4. [Jerome Berjonncan;Pascal Prigem;Jacques Poiner](#) [The Development of a Thermodynamic Model for Al2O3-MgO Refractory Castable Corrosion by Secondary Metallurgy Steel Ladle Slags](#)[外文期刊] 2009(2)
5. [Andreev K;Harmuth H](#) [FEM Simulation of the Thermo-mechanical Behaviour and Failure of Refractories—a Case Study](#)[外文期刊] 2003(0)
6. [He Qinglin;Geoff M Evans](#) [Fluid Flow and Refractory Wear in a Blast Furnace Trough—a Water Model Study Using LDV](#) 2002
7. [Viks Singh;Atanu Ranjan PAL;Prasanta Panigrahi](#) [Numerical Simulation of Flow-induced Wall Shear Stress to Study a Curved Shape Billet Caster Tundish Design](#) 2008(04)
8. [Zhang Meijie;Lin Xiaolong;Wu Yan](#) [Numerical Simulation on Flow-Induced Corrosion in One-Strand Tundish](#) 2010
9. [Andrew P;Campbell Koulis A.Pericleous;Mark Cross](#) [Modelling of Freeze Layers and Refractory Wear in Direct Smelting Processes](#)[外文会议] 2002
10. [林玉珍](#) [流动条件下磨损腐蚀的研究进展](#) 1996(04)
11. [代真;牛晓光;沈士明](#) [流体力学因素对空冷器冲蚀影响的定量分析](#)[期刊论文]-[石油化工高等学校学报](#) 2007(04)
12. [孙继龙;许森虎](#) [Sialo陶瓷的冲蚀磨损及磨粒磨损行为](#)[期刊论文]-[无机材料学报](#) 2000(05)
13. [胡水](#) [耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法的研究](#) 2005
14. [黄奥;顾华志;雷明](#) [精炼钢包刚玉基耐火材料冲蚀的有限元分析](#)[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 2010(01)
15. [张美杰](#) [中间包气幕挡墙的结构优化及其夹杂物去除的数学物理模拟研究](#)[学位论文] 2006

本文读者也读过(1条)

1. [汪磊. 王谦. 陈永树. 张国兴. Wang Lei. Wang Qian. Chen Yongshu. Zhang Guoxing](#) [T型中间包湍流控制器对夹杂物去除的影响](#)[期刊论文]-[钢铁钒钛](#)2010, 31(3)

引证文献(1条)

1. [张美杰. 黄奥. 顾华志. 白晨. 张吉元](#) [连铸中间包耐火材料的冲蚀特性与控流装置的优化设置](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(5)