

带有真空壳和盖的钢包墙体传热研究

谢剑波^{1,2} 周建安^{1,2} 王 宝^{1,2} 雷 洪³

(1 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉科技大学, 武汉 430081; 2 省部共建钢铁冶金与资源化教育部重点实验室, 武汉科技大学, 武汉 430081; 3 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 东北大学, 沈阳 110004)

摘 要 采用涂有防辐射材料的钢板焊接在传统钢包和钢包盖外壳上, 构造出新型带真空壳钢包体减少热损失, 并运用真空绝热理论, 研究压力 ($50 \sim 10^5$ Pa) 对 500 kg, 1 873 K 的钢液温降以及真空壳内综合传热机理的影响。结果表明, 30 min 后, 钢包壳和钢包盖真空室的真空绝对压力分别为 50 Pa 和 10^5 Pa 时, 钢液温降分别为 8 K 和 37 K; 转化对流附加因素值在 10^5 Pa 时是在 50 Pa 的 200 倍; 传统钢包绝热层的导热系数是真空壳绝对压力为 50 Pa 时的 11 倍; 工作层耐火材料导热系数是真空压力为 50 Pa 的 116 倍。因此, 新型钢包在低压力下保温作用明显。

关键词 钢包 热损失 真空壳 压力 热流 绝热

A Study on Thermal Transmission of Walls of Ladle with Vacuum Shell and Lid

Xie Jianbo^{1,2}, Zhou Jianan^{1,2}, Wang Bao^{1,2} and Lei Hong³

(1 State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Key Laboratory of Ferrous Metallurgy and Resources Utilization, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 Key Laboratory of Electro-Magnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract By using steel plates with radiation-proof material coating welding on conventional ladle exterior shell and lid, a new ladle with vacuum shell is got to reduce heat loss, and the effect of pressure in vacuum chamber ($50 \sim 10^5$ Pa) on temperature reduction of 1 873 K 500 kg liquid steel and the comprehensive thermal transmission mechanism in vacuum chamber are studied by using vacuum thermal insulation theory. Results show that as the absolute pressure in chamber of ladle shell and lid is respectively 50 Pa and 10^5 Pa for 30 min, the temperature drop of liquid in ladle is respectively 8 K and 37 K, and the conversion convection additional factor value at 10^5 Pa is 200 times as much as that at 50 Pa; the thermal conductivity of insulated layer of conventional ladle is 11 times as much as that of vacuum shell ladle with vacuum chamber absolute pressure 50 Pa, and the thermal conductivity of working layer refractory materials of conventional ladle is 116 times as much as that new ladle with 50 Pa. Therefore, the new ladle with lower pressures in shell has obvious thermal insulation effect.

Material Index Ladle, Heat Loss, Vacuum Shell, Pressure, Heat Flux, Thermal Insulation

冶金工业在国民经济中有着重要地位, 它为各领域提供大量基础材料, 如房地产、道路桥梁和制造业^[1,2]。然而, 它又具有高能耗、重排放和资源回收利用低等特点^[3]。因此, 减少能源和资源消耗被看作是 21 世纪新型钢铁企业可持续发展的重要课题。

钢包是炼钢生产的重要冶金设备之一, 主要用于盛装、运载以及浇注钢液同时也是钢液二次精炼的容器^[4]。转炉出钢后, 钢水包将钢水运往精炼车间以及连铸车间, 但在此过程中, 由于钢包包体耐火材料导热以及钢液表面热损失, 导致钢水在运输和操作过程中存在着强烈的散热温降, 通常吨钢温降为 $100 \sim 200$ °C^[5]。在钢液损失大量热量后, 钢液温度场分布不均匀, 因此, 生产上常采用添加钢包盖或保护渣覆盖剂的方法^[6]来减少钢包中钢液表面的热损失, 但添加传统钢包盖保温效果并不理想, 同时

添加覆盖剂又具有高成本、二次污染以及操作复杂不安全等问题。目前, 并没有关于从钢包和包盖包体结构着手来减少钢包盖和钢包包体耐火材料层的热损失的相关报道。运用真空绝热原理, 作者提出一种将涂有防辐射材料的钢板焊接在传统钢包和钢包盖外壳上构造出新型钢包体, 以减少钢液热损失的新钢包技术^[7]。生产时将其空腔层中的大气抽成真空。本文以真空壳钢包内外层温度为依据来研究真空壳内的传热行为, 并探测钢包壳和钢包盖组合真空室内不同真空绝对压力对钢液保温效果的影响, 以此来确定钢包壳和钢包盖真空室最佳真空度, 试验取得了较好的效果。

1 试验材料与方法

1.1 真空壳钢包

试验前将传统钢包外包壳钢板、钢包盖外壳顶部钢板以及焊接钢板表面打磨抛光,接着在所有抛光后的钢板表面上涂防辐射材料,随后将防辐射钢板焊接在钢包盖和钢包外壳钢板上,构造出带有空腔体的新型钢包和钢包盖,并串联安装两个球阀隔绝真空室与外界大气。试验时,真空泵将腔体内的
大气压力抽至试验所需绝对压力;此时的钢包即为真空壳钢包,包盖为真空包盖。考虑实际操作性、保温效果以及可行性等综合因素,根据真空设计手册相关资料介绍^[8],作者建议钢包真空层厚度一般选择 $L=80\sim120\text{ mm}$,钢包盖真空层厚度一般选择 $d=60\sim100\text{ mm}$ 。试验材料有 1 台真空机械泵 (2XZ-2);5 支铂-铑热电偶 (Pt-Rh6%-Pt-Rh30%);2 台便携式红外测温仪 (TM550);热流量计 (TY10HFM201);温度为 1 873 K,质量为 500 kg 的钢液;焊接钢板 (Q-235);防辐射材料 (荧光粉)。本次试验,钢包真空壳腔体体积约为 0.125 m^3 ,钢包盖真空壳腔体体积约为 0.015 m^3 ,钢包有效容积约为 0.55 m^3 。钢包真空壳和真空盖的制作工艺,如图 1 所示。

传统钢包盖由纤维锆棉[导热系数为 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]和钢板 (Q-235) 组成;传统钢包壳由耐火砖和钢板组成,其包体耐火材料物性参数见表 1。

1.2 试验研究方法

试验时将钢包壳和钢包盖真空室绝对压力抽至 $50\sim10^5\text{ Pa}$,然后将温度为 1 873 K,质量为 500 kg 的钢液装入试验真空壳钢包中,再分别加盖真空钢包

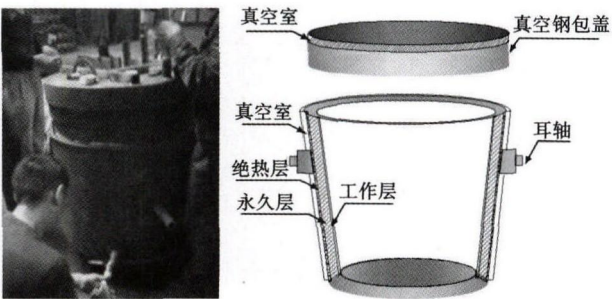


图 1 带有真空壳和盖的钢包结构图
Fig. 1 Figure of structure of ladle with vacuum shell and lid

表 1 钢包包体参数 Table 1 Parameters of the ladle walls			
包体分层	材质	热导率	厚度/mm
工作层	镁质砖	$2.06+0.19\times10^{-3}T$	20
永久层	轻质粘土砖	$0.33+0.26\times10^{-3}T$	70
绝热层	石棉板	$0.17+0.19\times10^{-3}T$	10
真空层		λ_1	50

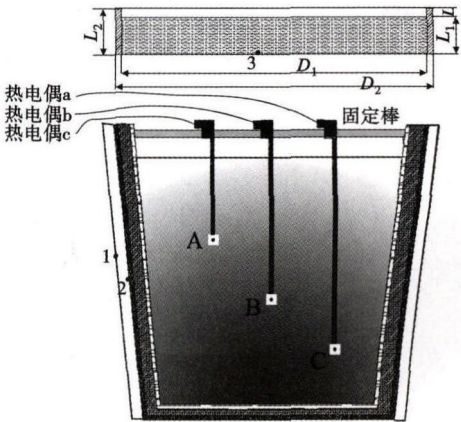


图 2 带有真空壳和盖的钢包温度测量点示意图
Fig. 2 Schematics of measuring spots of temperature in ladle with vacuum shell and lid

盖和传统钢包盖,以此来检测对比不同钢包和钢包盖组合真空室压力对钢液保温效果的影响。分别记录钢液、钢包壳和钢包盖真空层测量点随时间变化的温度来研究真空室的传热行为,如图 2 所示。

图 2 中, T_1 - 钢包壳真空室中低温面温度,如 1 点处; T_2 - 钢包壳真空室中高温面温度,如 2 点处; T_3 - 钢包盖耐火纤维棉高温面温度,如 3 点处。 T_A - 钢液 A 点温度, T_B - 钢液 B 点温度, T_C - 钢液 C 点温度; $T_{\text{钢}}$ - 钢液温度, $T_{\text{钢}}=(T_A+T_B+T_C)/3$ 。真空室绝对压力为 10^5 Pa 时,记为传统钢包或传统钢包盖,其参数见表 2。

1.3 真空层综合传热系数

钢包壳和钢包盖加上真空室后,包体传热^[9]改变。根据真空绝热理论^[10-11],那威^[12]等人提出一种用于计算中、低压力的综合导热系数方法。综合导热系数由导热和对流组成:

$$\lambda_1 = \lambda (1 + \varepsilon_k) \tag{1}$$

式中: λ_1 - 真空室综合导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$; λ - 真空室中导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$; ε_k - 真空室对流附加因数。

(1) 真空室中的导热系数 λ 。在中、低压下气体的导热系数计算公式如下:

$$4\lambda = (9\gamma - 5) \eta C_v \tag{2}$$

表 2 钢包盖尺寸参数/mm Table 2 Parameters of the ladle lid /mm					
D	D ₁	D ₂	L	L ₁	L ₂
10	780	800	30	70	100

注: D- 钢板厚度; D₁- 真空钢包盖内径; D₂- 真空钢包盖外径; L- 钢包盖中真空室厚度; L₁- 耐火材料厚度; L₂- 真空钢包盖厚度。

式中： γ - 气体绝热指数，1.403； η - 气体分子粘度/ $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$ ； C_v - 气体分子定压比热容^[11]/ $[\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$ ， $C_v = 0.717 \times (1 + 3.45 \times 10^{-5} \times T_m)$ 。

(2) 转化对流附加因素 ε_k 。真空室里对流传化附加因素计算式根据俄罗斯学者提出的方法，其表达式如下^[8,12]：

$$\varepsilon_k = 0.062 [P_r G_r L^3]^{1/3} = 0.062 \left(\frac{g \beta}{\nu \alpha} \right)^{1/3} \Delta T^{1/3} L L \quad (3)$$

式中： P_r 、 G_r - 普朗特和格拉肖夫准数^[12]； L - 定型尺寸/m； l - 特征长度/m； g - 重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ； β - 体积膨胀系数； ν - 动力粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ； ΔT - 真空室内高低温差/K。

2 结果与讨论

2.1 不同钢包壳和钢包盖真空压力组合的钢液温度

钢包壳和钢包盖真空室分别设置压力为 50， 10^2 ， 10^3 ， 10^4 ， 10^5 Pa，将温度为 1 873 K，质量为 500 kg 的钢液注入钢包后，加盖钢包盖，并记录数据，温度如图 3 所示。本试验在武汉花山合金钢有限责任公司进行。其钢水熔炼是 500 kg 的中频感应炉，钢水质量为 500 kg，出钢温度 1 600 ℃。当钢液倒进试验小钢包时，并同时加盖钢包盖，钢包壳及钢包盖真空室压力为 50 Pa，到 30 min 左右钢液温降达到 8 K；图 3 表明，随着真空室压力增加，钢液温度下降速率增加；然而钢包壳和钢包盖压力为 10^5 Pa，温降为 35 K。真空绝对压力强烈影响钢包包体层传热。当钢包真空室压力为常数时，钢包盖真空绝对压力越小，钢包盖真空室绝对压力为常数时，钢包壳真空室内绝对压力越小，其钢液热损失越小。由于钢包盖耐火棉的导热系数比钢包绝热层的导热系数大，

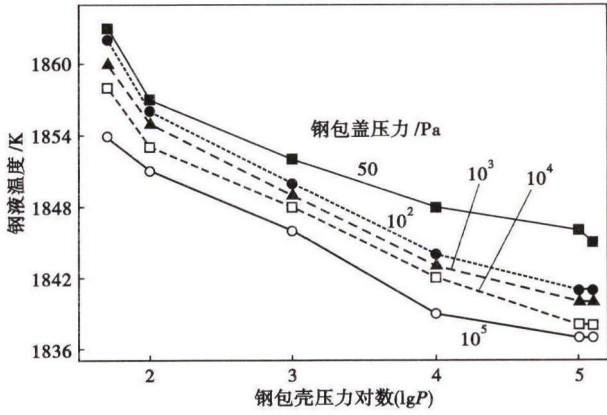


图 3 不同钢包壳和钢包盖组合的真空室压力对 30 min 后 500 kg 钢液温度的影响，钢液初始温度 1 873 K

Fig. 3 Effect of various combined pressures in vacuum chamber of combined ladle shell and lid on temperature of 500 kg liquid steel after 30 min, and liquid initial temperature- 1 873 K

因此传热流强，钢包盖热流散失比钢包热流损失强。

钢包盖真空室真空绝对压力设置为 10^5 Pa，而钢包壳真空室真空绝对压力分别设置为 50， 10^2 ， 10^3 ， 10^4 Pa。 T_1 、 T_2 和 T_3 温度值如图 4 所示。

2.2 包体导热系数

计算导热系数见图 5。图 5(a) 表明，随着时间钢液不断地向真空室辐射传热，真空室内气体的导热系数增加，气体导热系数不受压力影响但受温度影响较大^[12]。导热系数的大小反映物质导热能力的大小。导热系数越大，物质导热能力越强。反之，越弱。图 5(b) 表明，转化对流辐射附加因素受真空绝对压力影响较大，转化对流附加因素在压力为 10^4 Pa 是在压力为 50 Pa 的 200 倍。同时，随着时间对流附加因素受温度影响较小。

传统钢包包体层的导热系数与其材质和温度有关，如表 1。包体层材质的导热系数，如图 6(a) 所

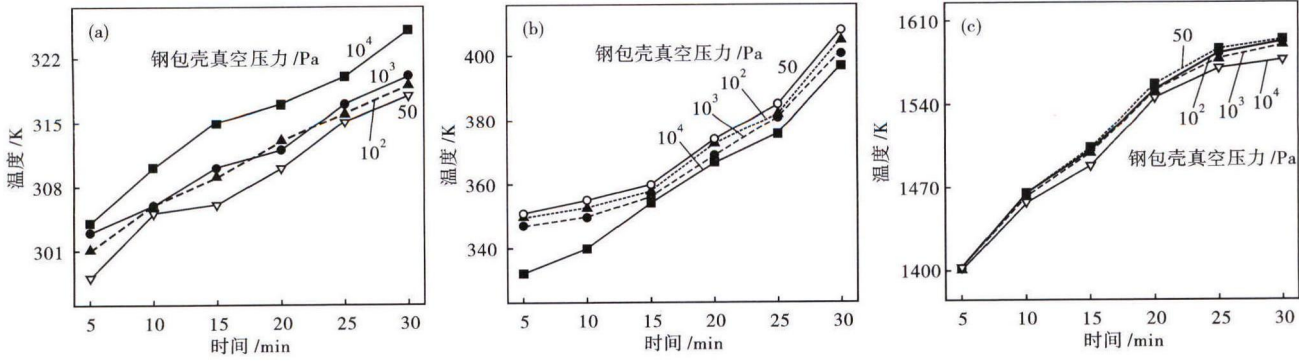


图 4 钢包真空壳不同绝对压力下的测量点温度随时间变化，测量点：A- 温度 T_1 (a)；B- 温度 T_2 (b)；C- 温度 T_3 (c)

Fig. 4 Change of temperature at measured spots in ladle with different absolute pressures in chamber of shell with time, measuring spots: A- temperature T_1 (a)；B- temperature T_2 (b) and C- temperature T_3 (c)

示。在包体耐火材料导热传热达到稳态之前,随着时间增加,工作层、永久层和绝热层的导热系数增加。

新型包体层的导热传热分别在钢包壳真空室真空绝对压力为 50,10²,10³,10⁴ Pa 时达到稳态,得到真空层的导热系数,如图 6 (b) 所示。真空层的综合导热系数随着真空室气压增加而增大,综合导热能力主要受气体分子对流强度影响,而对流主要受气体压力和气体分子数量决定,较高真空绝对压力,分子数量多,同时真空层的综合传热未到达稳态之前,真空室的温度会随着时间升高,温度越高,气体对流运动加快;同理,真空层的综合导热系数随着时间增加而增大。因此,真空室在低绝对压力下,真空层的综合导热能力差。在高绝对压力下,真空层的综合导热能力强。在导热系数中,传统钢包工作层的导热系数最大,真空层的导热系数最小;传统钢包绝热层的导热系数是综合导热系数在真空室绝对压力为 50 Pa 时的 11 倍,传统钢包工作层的导热系数是综合导热系数在真空室绝对压为 50 Pa 的 116 倍。因此,真空层具有强烈的绝热能力。

2.3 钢包壳真空层热流

钢包壳真空室内高、低温度作为计算真空室内导热系数的测量温度。其计算热流基于图 4 中的 T₁ 和 T₂ 温度,测量和计算热流如图 7 所示。

图 7 表明,在任意时刻,低压下的热流远小于在较高压力下的热流。随着真空绝对压力的增加,热流增加。另外,真空室内的热流随着真空室内温度增大而增大,主要受高温钢液不断向真空室辐射传热和真空绝热的缘故。高温面温度增加速率快于低温面温度增加速率,真空层在低真空压力时热流损失较小,进而保

温效果好。在第 5 min,热流在真空绝对压力为 10⁴ Pa 是在 50 Pa 的 4.5 倍。在第 30 min,热流在真空绝对压力为 10⁴ Pa 是在 50 Pa 的 5 倍。热流在高压下的增加速率比在低压下增加速率快;高压下,气体分子数量多,对流运动剧烈,热散失多。在

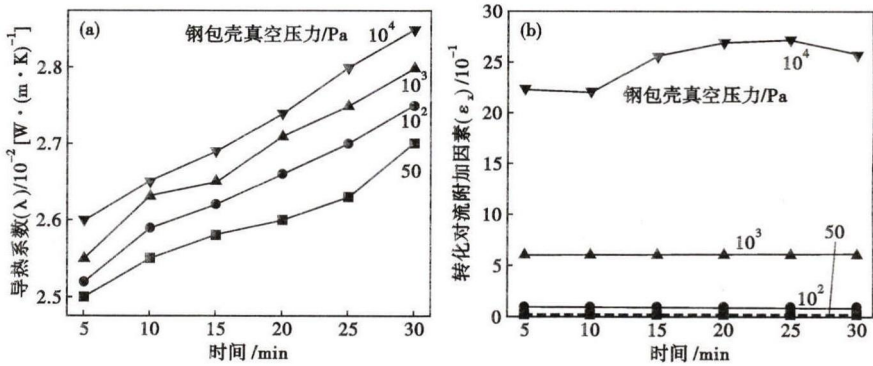


图 5 真空室压力和钢包中钢水停留时间对真空室气体导热系数(a)和转化对流附加因素(b)的影响
Fig.5 Effect of pressure in chamber of shell and holding time of liquid in ladle on thermal coefficient of gas in vacuum chamber (a) and conversion convection additional factor value (b)

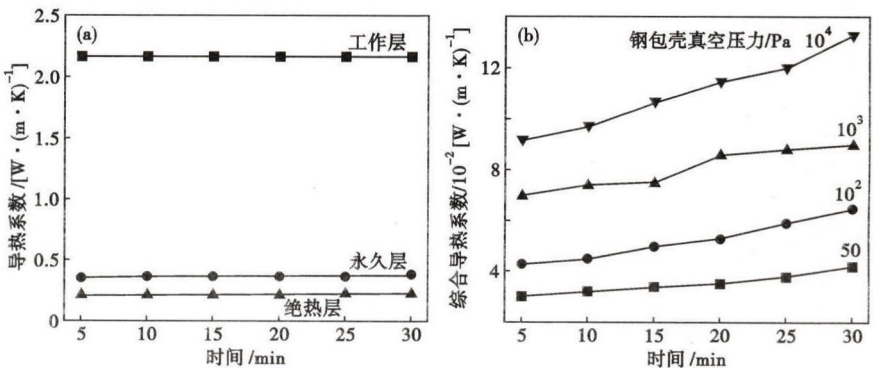


图 6 传统钢包包体(a)和在不同压力真空层的钢包壳(b)的导热系数随时间的变化
Fig.6 Change of thermal coefficient of conventional ladle wall (a) and ladle shell with different pressures in vacuum chamber (b) with liquid holding time

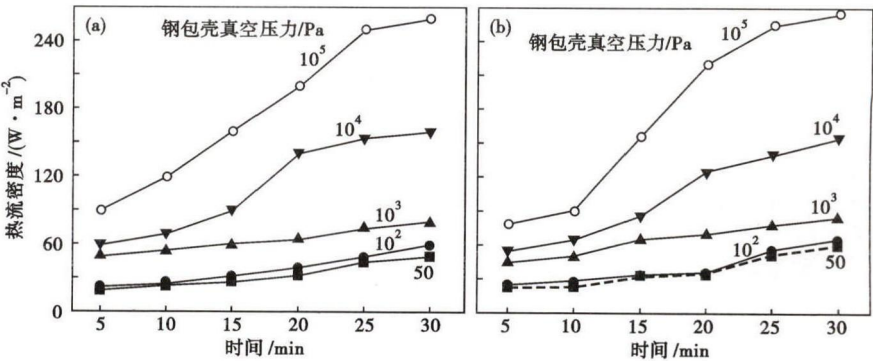


图 7 真空室热流在不同压力下的测量值(a)和计算值(b)
Fig.7 Measured values (a) and calculated values (b) of heat flux in vacuum chamber with different pressures

较低压力下,气体分子数量稀少,对流运动较弱。因此,热流随着真空绝对压力的增加而增加。

2.4 钢包壳和钢包盖组合热流

真空室中每一组热流分布比例,如图 8 所示。当钢包壳和钢包盖真空室中的真空绝对压力设置为 50 Pa 时,热流占据了最小比例,为 15.38%。在较低绝对压力下,钢包壳和钢包盖真空室有较强的绝热能力。真空室中的绝对压力越大,热流占据的比例越大。在每一组中,绝对压力为 10^5 Pa 时的热流占据最大比例,从而钢包壳和钢包盖在高绝对压力下的绝热能力差;当钢包盖真空室中的真空绝对压力分别为 50 Pa 和 10^2 Pa 时,随着增加钢包壳真空室内的绝对压力热流增加,然而真空绝对压力分别为 10^4 Pa 和 10^5 Pa,随着增加钢包壳真空室内的绝对压力热流增加。当钢包盖真空室中的真空绝对压力设置为 10^3 Pa 时,随着增加钢包壳真空室内的绝对压力热流保持稳定。

实际生产中,尽管没有钢包盖,但本文论述的是钢包壳配对钢包盖,其目的是保证试验钢水能在较长时间下,保持钢液不凝固为目的,而不是必须要添加钢包盖。可以这样来看,都在加钢包盖的情况下,真空室内的绝对压力越低,其钢液温降越小,说明低真空绝热性较好;同理,在钢包盖分别配套使用真空壳钢包和普通钢包时,普通钢包组合其保温效果相对于真空壳钢包而言较差,则说明普通钢包传热和散热的能力强于真空壳钢包。这也就说明,若钢包都不使用包盖的前提下,装入同样的钢液,在相同时间间隔内,真空壳钢包比普通钢包的墙体散热小,热损失小,进而保温效果好。故对实际应用具有一定

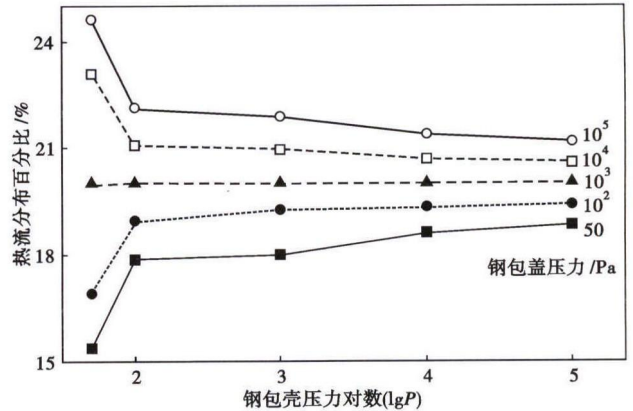


图 8 不同绝对压力的钢包壳和盖在真空室中热流分布
Fig. 8 Distribution of heat flux in vacuum chamber of ladle shell and lid with different absolute pressures

的效果。

3 结论

(1) 钢包壳和钢包盖真空室内绝对压力越低,钢液温降越小,保温效果越好。

(2) 无论真空室内压力为何值,钢包壁耐火材料层的导热系数远大于真空层的导热系数。因此,在低真空压力时,真空层具有强烈的绝热能力。

(3) 考虑实际现场操作,应遵循钢包壳真空室高真空,钢包盖真空室低真空原则。真空室内压力维持在 50 ~ 100 Pa,效果较好。新型真空钢包体在保温效果上远优于传统钢包体。

致谢 感谢武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室经费支持,武汉花山合金钢有限责任公司提供试验场所。

参考文献

- [1] Izatt S R, Izatt N E, Bruening R L. Metal Separations of Interest to the Chinese Metallurgical Industry [J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(1): 22-29.
- [2] Piro L S, Piro I L. Reprocessing of Metallurgical Slag into Materials for the Building Industry [J]. Waste Management, 2004, 24(4): 371-379.
- [3] Gupta R C. Chapter 4. 2-Energy Resources, Its Role and Use in Metallurgical Industries [J]. Treatise on Process Metallurgy, 2014, 3(9): 1425-1458.
- [4] 贺道中. 连续铸钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 18-19.
- [5] 王新华. 钢铁冶金 (炼钢学) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 100-113.
- [6] Chakraborty S, Sahai Y. Effect of Slag Cover on Heat-Loss and Liquid Steel Flow in Ladles before and during Teeming to a Continuous Casting Tundish [J]. Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy, 1992, 23(2): 135-151.
- [7] 周建安, 周鹏, 李旭. 一种带有真空装置的冶金包. 中国专利, 201110054782.3 [P]. 2012.
- [8] 达道安. 真空设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 2, 226-54.
- [9] Jaksic N, Greuner H, Herrmann A, et al. Results of High Heat Flux Tests and Structural Analysis of the New Solid Tungsten Divertor Tile for ASDEX Upgrade [J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 98-99: 1333-1336.
- [10] Jang C, Kim J, Song T H. Combined Heat Transfer of Radiation and Conduction in Stacked Radiation Shields for Vacuum Insulation Panels [J]. Energy and Buildings, 2012, 43(12): 3343-3352.
- [11] Wakil K G, Bindi R, Binder B. Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panel [J]. Building Research and Information, 2004, 32(4): 293-299.
- [12] 那威, 邹平华. 钢外护管真空复合预制直埋管道真空层热力分析 [J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 1-5.

谢剑波 (1989-), 男, 硕士生 (2016 年武汉科技大学), 2014 年攀枝花学院 (本科) 毕业, 冶金资源节能环保控制。
E-mail: xjbhwust@163.com

收稿日期: 2016-12-05