

异形水管对高炉冷却壁温度和应力场的影响

陆祖安, 吴俐俊, 孙国平, 周伟国

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 利用 ANSYS 软件分析了各种异型管(椭圆、矩形、正六边形、双圆形及三圆形)对冷却壁温度场及热应力场的影响。结果表明:与圆管同周长时,各异型冷却水管冷却壁的热面最高温度和最大热应力变化幅度不大;与圆管同截面积时,各异型管冷却壁热面最高温度和最大热应力均有所下降。这说明冷却水管由圆管改成异型管后,提高了冷却壁的传热性能,从而延长了高炉的使用寿命。采用最优管形——长短轴比为 0.6 的椭圆管,可以减少冷却水流量和减薄冷却壁壁厚,从而达到降低炼铁成本的目的。

关键词: 高炉冷却壁;异型冷却水管;温度场;热应力场

中图分类号: TF066.7

文献标识码: A

Influence of Special Pipe on Temperature Field and Thermal Stress Field of Cooling Stave for Blast Furnace

LU Zu'an, WU Lijun, SUN Guoping, ZHOU Weiguo

(College of Mechanic Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The influence on temperature field and thermal stress field of cooling stave with different kinds of special pipes (elliptical, rectangular, orthohexagonal, double circle and triple circle pipes) was analyzed by ANSYS. The results show that when the circular pipe's perimeter is kept as a constant, the rise of maximum temperature and thermal stress on the hot surface of cooling stave is not high. In the case of keeping circular pipe's sectional area as a constant, the maximum temperature and thermal stress on the hot surface of cooling stave decrease. This illustrates that when circular pipe is replaced by different sorts of special pipes, the heat transfer ability of the stave is improved. Consequently, the lifetimes of blast furnace are extended. Through use of elliptical pipe with the proportion of 0.6 between the longer axis and shorter as the optimum tubular, the flow of cooling water and thickness of the cooling stave can be reduced and

therefore to reduce ironmaking costs.

Key words: cooling stave of blast furnace; special pipe; temperature field; thermal stress field

高炉冷却壁是安装在高炉内部的重要冷却设备,它的寿命不但直接影响高炉炼铁的成本,更关系到高炉炼铁的一代炉龄,而影响高炉冷却壁寿命的直接因素就是冷却壁温度场和应力场的分布。专家和学者对高炉冷却壁的传热学分析作了大量的研究工作,并分析了各种因素对高炉冷却壁温度和应力场分布的影响^[1-11],但基本都是在冷却水管是圆管的基础上进行的。最早提出冷却水管优化的是德国的 Peter Heinrich^[12],通过类椭圆冷却水管代替圆管来降低冷却水流速、提高冷却水换热效率以提高铜冷却壁的传热性能。国内学者^[13]基于冷却水管优化的基本思想,开展了冷却水管管形变化下的高炉冷却壁传热分析的研究,得出了椭圆代替圆管不会造成冷却壁热面最高温度大幅升高的结论,这为冷却水管由圆形改成椭圆形提供了理论依据。但国内外研究高炉冷却壁水管的形状仅限于圆管和椭圆管,而对于各种异形冷却水管的研究还鲜有报道。为了进一步探讨冷却水管的优化结构,各种异形管(椭圆、矩形、正六边形、双圆形及三圆形)对冷却壁温度场及热应力场的影响就显得尤为重要。

1 高炉冷却壁传热及热应力稳态数学模型

高炉冷却壁传热及热应力模型与文献^[11]一致。计算冷却壁选取:冷却壁材质为 20 号钢,冷却壁本体宽为 900 mm,厚为 125 mm,高为 2 535 mm。填充层厚度为 50 mm,炉壳厚度为 50 mm,耐火材料镶

收稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(50974097)

第一作者: 陆祖安(1981—),男,博士生,主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: luzuan@163.com

通讯作者: 吴俐俊(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: lijwu@tongji.edu.cn

砖梯形尺寸为 $52\text{ mm} \times 62\text{ mm}$, 镶砖间距为 104 mm , 水管间距为 220 mm , 水速为 $2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 物理模型如图 1 所示, 计算所需材料的热物性参数和力学性能参数分别如表 1 及表 2 所示. 表 1 中 t 表示温度.

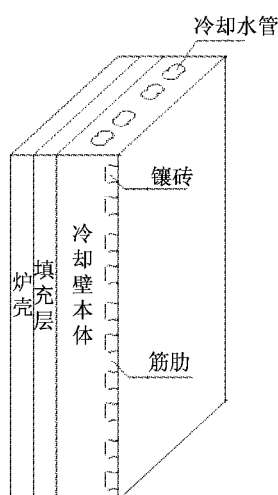


图 1 冷却壁 3 维结构示意图

Fig.1 Three-dimensional schematic of the blast furnace stove

表 1 材料热物性参数

Tab.1 Physical parameters of materials

名称	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热容/($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
炉壳	钢板	7 840	$52.2 - 0.025t$	465
填充层	填充层	330	$31.96 - 0.0295t$	876
冷却壁本体	铜冷却壁	8 930	$399 - 0.0552t$	386
炉渣	炉渣	2 000	1.2	983
镶砖	碳化硅结合氮化硅砖	2 640	16.8	1 000

表 2 材料力学性能参数

Tab.2 Mechanical properties of materials

名称	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
炉壳	钢板	80	0.3	5.87×10^{-6}
填充层	填充层	15	0.1	4.70×10^{-6}
冷却壁本体	铜冷却壁	84	0.3	1.66×10^{-5}
炉渣	炉渣	15	0.1	4.70×10^{-6}
镶砖	SIC 结合 SIN 砖	15	0.1	4.70×10^{-6}

2 水管同周长时冷却壁传热特性的分析

冷却水管内水与冷却壁本体的对流换热系数公式为

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} = 0.023(\alpha d_1/\gamma)^{0.8}Pr^{0.4}$$

$h_{wb} = Nu\lambda_w/d_1 = 0.023(v^{0.8}Pr^{0.4}\lambda_w)/(d_1^{0.2}\gamma^{0.8})$ 式中: Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; v 为冷却水管内水流流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; d_1 为冷却水管当量直径, m ; γ 为冷却水的运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; λ_w 为冷却水的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$.

其中, 查得 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时饱和水的物性参数 λ_w 为 $0.618\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, γ 为 $0.805 \times 10^{-6}\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, Pr 为 5.42, 水速 v 为 $2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

为了综合评价, 找到最为优化的管型, 将管道的湍流换热与流阻特性纳入考虑范围之内. 将各种异形截面冷却水管与圆管作比较的前提是认为两种流动的泵功率相等, 其强化传热评价准则按下式定义:

$$\eta = (Nu_i/Nu_o)/(f_i/f_o)^{1/3}$$

式中: Nu_i, Nu_o 分别为各异形管及圆管的努塞尔数; f_i, f_o 分别为椭圆形管及圆管的阻力系数;

$$Nu_i = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} = 0.023(\alpha d_1/\gamma)^{0.8}Pr^{0.4}$$

圆管的阻力系数则采用 Blasius 公式, 即

$$f_o = 0.3164 Re^{-0.25}, Re < 10^5$$

$$f_o = 0.1840 Re^{-0.2}, Re > 10^5$$

2.1 各种椭圆水管冷却壁传热特性分析

周长不变的椭圆管降温效果并不理想, 但圆管改成椭圆管后, 由于水管截面积大幅减少, 就可以减少冷却水流量, 也即可以大量节约冷却水, 这极大地提高了企业的经济效益^[11-13]. 因此, 从传热强化综合评价指标来考虑, 选择 $b/a=0.6$ 的椭圆管为最佳管型.

2.2 各种矩形水管冷却壁传热特性分析

图 2 为同周长时, 不同短长轴比例 (b/a) 的矩形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力图.

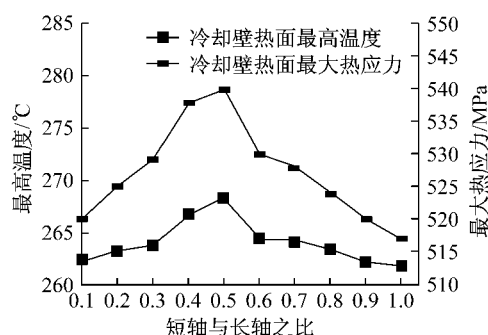


图 2 周长相同情况下各短长轴比例矩形冷却水管冷却壁热面最高温度及最大热应力

Fig.2 The maximum temperature and thermal stress of the hot surface of the cooling stove with different proportions of the minor axis to major axis of the rectangular pipe of which the perimeter is set as a constant

图3为不同短长轴比例的矩形冷却水管的效率系数和对流换热系数图。

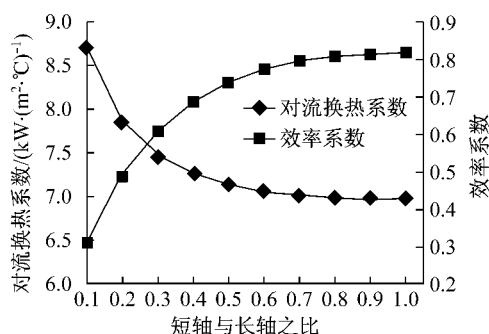


图3 同周长不同短长轴比例矩形管对流换热系数与效率系数

Fig. 3 The convection heat transfer coefficient and efficiency coefficient with different proportions of the minor axis to major axis of the rectangular pipe of which the perimeter is set as a constant

对于矩形冷却水管来讲,其温度与热应力与同周长的圆管相比,有小幅降低。

如图2所示, $b/a=0.2\sim 0.5$ 时,冷却壁热面最高温度和最大热应力随着 b/a 的增加而增加。这是因为虽然在周长不变的情况下,冷却水流量随 b/a 增加而增加,即水与管道的换热量增加,有利于降低冷却壁热面最高温度。但由图3可知,换热系数随 b/a 的增加而减小,不利于降低冷却壁热面最高温度。即冷却水流量与换热系数对冷却壁温度场有相反的影响。所以 $b/a=0.2\sim 0.5$ 时,换热系数对温度场的影响大于冷却水流量对温度场的影响。

在 $b/a=0.6$ 时,温度开始下降,表明从 $b/a=0.6$ 开始,冷却水流量对温度场的影响开始超过换热系数对温度场的影响。

从换热效率系数 η 来看,在 $b/a>0.6$ 时,随着 b/a 的增大, η 值增长幅度缓慢减少,并基本维持在0.8左右;而当 $b/a<0.6$ 时,随着比值的不断减小, η 值快速下降,这意味着在此范围内,对流换热的改善不能抵消流动阻力所产生的负面影响。

因此,从传热强化综合评价指标来考虑,选择 $b/a=0.6$ 的矩形冷却水管为最佳管形。

2.3 各异型水管冷却壁温度场及热应力场分析

图4为同周长时各种异型冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力图。各种异型冷却水管的效率系数和对流换热系数如图5所示。

由图4可知,同周长下,各种异型管(除矩形外)

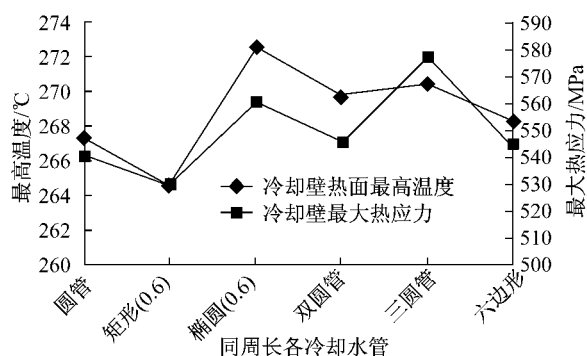


图4 周长相同情况下各异形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力

Fig. 4 The maximum temperature and thermal stress of the hot surface of the cooling stave with different proportions of the minor axis to major axis of all sorts of special pipes of which the perimeter is set as a constant

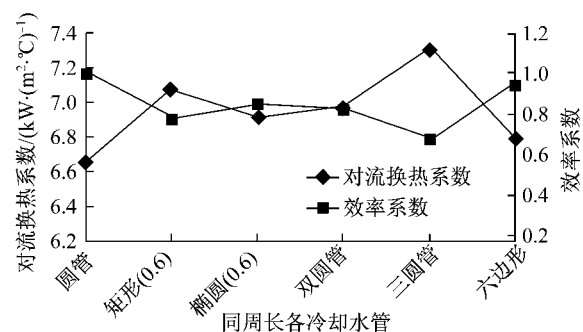


图5 同周长各异形管对流换热系数与效率系数

Fig. 5 The convection heat transfer coefficient and efficiency coefficient with different proportions of the minor axis to major axis of all sorts of special pipes of which the perimeter is set as a constant

的冷却壁热面最高温度和最大热应力与同周长下的圆管相比,有小幅上升。而矩形管($b/a=0.6$),与圆管相比,其冷却壁热面最高温度和最大热应力分别下降1.2%和2.1%。

由图5可知,同周长下,各异型管道之间对流换热系数大小都较为接近。与圆管相比,温度场和应力场表现较好的矩形管($b/a=0.6$)其效率系数在各异型管中表现不好,仅为77%。而椭圆($b/a=0.6$)和六边形管的效率系数与圆管的相差无几,分别为85%和94%,取得了较为满意的结果。

3 水管同面积时冷却壁传热特性的分析

3.1 各种椭圆水管冷却壁传热特性分析

与圆管同截面积时,椭圆管的热面最高温度和

最大热应力均有所降低,而且越扁的水管热面最高温度越低.当椭圆管长短轴之比为0.6时,最高温度降低了2.8%,最大热应力降低了7.5%.综合各因素,把圆管改成截面积相同的长短轴之比为0.55~0.65的椭圆管,可以取得比较好的冷却效果.对于减少冷却水流量,减薄冷却壁厚度,降低煤炼铁成本也有重大意义^[11-13].

因此,从传热强化综合评价指标来考虑,选择 $b/a=0.6$ 的椭圆管为最佳管型.

3.2 各种矩形水管冷却壁传热特性分析

图6为面积相同情况下各短长轴比例矩形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力.图7为面积相同情况下不同短长轴比例矩形管对流换热系数与效率系数图.

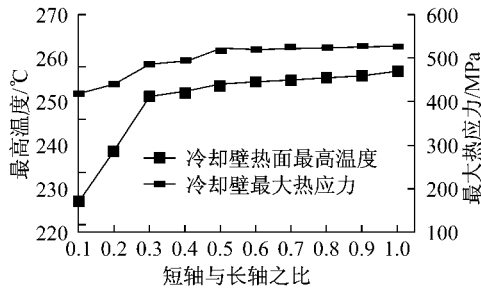


图6 面积相同情况下各短长轴比例矩形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力

Fig.6 The maximum temperature and thermal stress of the hot surface of the cooling stave with different proportions of the minor axis to major axis of the rectangular pipe of which the sectional area is set as a constant

在横截面积保持不变的情况下,冷却水流速是恒定的,所以冷却水流量保持不变.在 $b/a < 0.3$ 时,热面最高温度随 b/a 的增大快速增加;当 $b/a > 0.3$ 时,热面最高温度增幅平缓,热应力是由温度差而产生的应力,因此所得到的最大热应力走势与最大温度保持一致,如图6所示.

如图7所示,当 $b/a > 0.6$ 时,随着 b/a 值的增加,对流换热系数降幅平缓,但在 $b/a < 0.6$ 时,对流换热系数随着 b/a 值的增大快速降低.同时,效率系数在 $b/a > 0.6$ 后增幅减少,在 $b/a < 0.6$ 时增大幅度加大.

因此,从传热强化综合评价指标考虑问题,选择 $b/a=0.6$ 的矩形管为最佳管型.

3.3 各异型水管冷却壁温度场及热应力场分析

图8为面积相同情况下各异形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力图,同面积各异形管

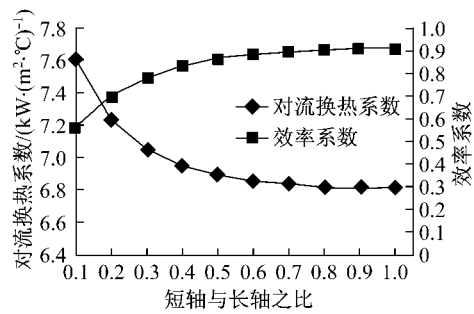


图7 面积相同情况下不同短长轴比例矩形管对流换热系数与效率系数

Fig.7 The convection heat transfer coefficient and efficiency coefficient with different proportions of the minor axis to major axis of the rectangular pipe of which the sectional area is set as a constant

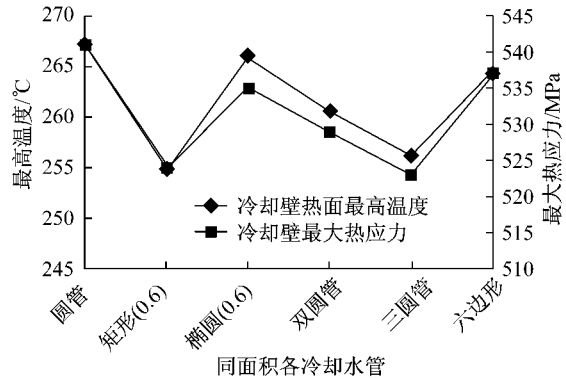


图8 面积相同情况下各异形冷却水管的冷却壁热面最高温度及最大热应力

Fig.8 The maximum temperature and thermal stress of the hot surface of the cooling stave with different proportions of the minor axis to major axis of all sorts of special pipes of which the sectional area is set as a constant

对流换热系数与效率系数如图9所示.

由图8可知,各异型管与同截面积的圆管相比,温度和热应力均有小幅下降,其中矩形($b/a=0.6$)及三圆管形最为明显,其温度分别降低了4.8%和4.1%.热应力分别降低了3.2%和3.4%.

图9说明,同截面积时,各异型管道之间对流换热系数值大小都较为接近,其中矩形和三圆管相较之圆管有小幅增加,大约为3.1%和4.7%,然而其综合效率系数在各异型管中欠佳,仅为88%和83%,但与周长保持不变时相比,有了比较明显的增长.

椭圆($b/a=0.6$)和六边形管的效率系数与圆管的相差不大,分别为93%和97%,取得了较为满意的结果.

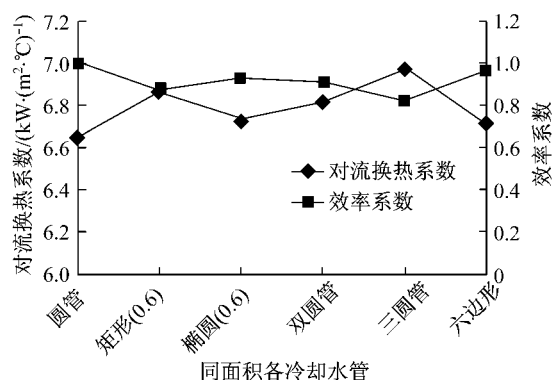


图9 同面积各异形管对流换热系数与效率系数

Fig. 9 The convection heat transfer coefficient and efficiency coefficient with different proportions of the minor axis to major axis of all sorts of special pipes of which the sectional area is set as a constant

因此,从传热强化综合评价指标考虑问题,选择 $b/a=0.6$ 的椭圆形管为最佳管型。

4 结论

(1)与圆管同周长时,各种异型冷却水管(除矩形外)的冷却壁的热面最高温度及最大热应力有所升高但幅度不大。而矩形冷却水管的冷却壁,其热面最高温度和最大热应力有所降低,降幅分别为 1.2% 和 2.1%。

(2)与圆管同周长时,流阻特性分析中,与圆管相比,温度场和应力场表现较好的矩形(0.6)水管其效率系数在各异型管中表现较差,仅为 77%。而椭圆(0.6)和六边形管的效率系数均与圆管有着不大的差距,分别为 85% 和 94%,取得了较为满意的结果。因此,与圆管同周长时,选择 $b/a=0.6$ 的矩形管为最佳管型。

(3)与圆管同截面积时,各种异型管的冷却壁热面最高温度和最大热应力均有所下降,其中矩形($b/a=0.6$)及三圆管形最为明显,其温度分别降低了 4.8% 和 4.1%,热应力分别降低了 3.2% 和 3.4%。且椭圆管与矩形管的温度场分布为,越扁的水管热面最高温度越低。

(4)与圆管同截面积时,流阻特性分析中,温度场和应力场表现较好的矩形和三圆管形的综合效率系数表现一般,仅为 88% 和 83%,但与周长保持不变时相比,有了比较明显的增长。椭圆(0.6)和六边形管的效率系数均与圆管有着不大的差距,分别为 93% 和 97%,取得了较为满意的结果。因此,与圆管

同截面积时,选择 $b/a=0.6$ 的椭圆形管为最佳管型。

(5)冷却壁冷却水管由圆管改成异形管(椭圆、矩形、正六边形、双圆形及三圆形)后,水管截面积减少,从而减少冷却水流量,减薄冷却壁体厚度,降低炼铁成本;与圆管同截面积时,各种异型管的冷却壁热面最高温度和最大热应力均有所下降,说明冷却水管由圆管改成异型管后,提高了冷却壁的传热性能,从而延长了高炉的使用寿命。

参考文献:

- [1] Steiger, Robert W Braun, Robert E Grundtisch, et al. Utilization of computer analysis in blast furnace refractory lining and shell design [C] // Ironmaking Conference Proceedings. Detroit: Iron & Steel Soc of AIME, 1985:485-504.
- [2] Wang G X, Yu A B, Zulli P. Three-dimensional modelling of the wall heat transfer in the lower stack region of a blast furnace[J]. ISIJ International, 1997,37(5):441.
- [3] 程素森,贺友多,吴启常. 高炉凸台冷却壁的温度场计算[J]. 钢铁,1994,29(1):52.
CHENG Susen, HE Youduo, WU Qichang. Temperature field computation of stove in blast furnace operation[J]. Iron and Steel, 1994, 29(1):52.
- [4] 吴懋林,王立民,刘述临. 高炉冷却壁和炉衬的三维传热模型[J]. 钢铁,1995,30(3):6.
WU Maolin, WANG Limin, LIU Shulin. Three-dimensional heat transfer model for stove and lining of blast furnace[J]. Iron and Steel, 1995,30(3):6.
- [5] 宋阳升,杨天钧,吴懋林,等. 高炉冷却壁冷能力的计算和分析[J]. 钢铁,1996,31(10):9.
SONG Yangsheng, YANG Tianjun, WU Maolin, et al. Calculation and analysis on cooling capacity of blast furnace stove[J]. Iron and Steel,1996,31(10):9.
- [6] 程素森,薛庆国,苍大强,等. 高炉冷却壁的传热学分析[J]. 钢铁,1999,34(5):11.
CHENG Susen, XUE Qingguo, CANG Daqiang, et al. Heat transfer analysis of blast furnace stove[J]. Iron and Steel, 1999,34(5):11.
- [7] 程素森,杨天钧,杨为国,等. 高炉铜冷却壁传热分析[J]. 钢铁,2001,36(2):8.
CHENG Susen, YANG Tianjun, YANG Weiguo, et al. Analysis of heat transfer and temperature field of blast furnace copper stove[J]. Iron and Steel,2001,36(2):8.
- [8] CHENG Susen, XUE Qingguo, YANG Weiguo, et al. Designing for long campaign life blast furnace (1)—the mathematical model of temperature field for blast furnace lining and cooling apparatus and new concept of long campaign ship blast furnace cooler design [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,1999,6(3):178.

(下转第 1438 页)