

# 椭圆水管铸铁冷却壁冷却能力和残余应力研究

李加林<sup>1</sup>, 刘迎春<sup>2</sup>, 沈 猛<sup>2</sup>

(1. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北石家庄 050021; 2. 河北天宇高科冶金铸造有限公司, 河北沧州 062350)

**摘要:** 铸体冷却壁是目前最重要的高炉冷却设备, 其冷却能力直接关系到高炉的长寿、安全运行。为了提高铸铁冷却壁的性能, 从冷却比表面积的角度对椭圆水管的冷却能力进行了分析, 并进行了试验验证, 还对压制后的椭圆水管进行了残余应力检测。结果表明, 在水管截面积不变的条件下, 椭圆水管的冷却比表面积比圆形水管的大, 并随着椭圆管的椭圆度的增加而增加; 椭圆水管冷却壁的冷却能力明显高于圆形水管冷却壁; 压制后的椭圆水管的残余应力不会对冷却壁的使用造成不利影响。

**关键词:** 铸铁冷却壁; 椭圆水管; 冷却能力; 残余应力

作为炼铁高炉的主要冷却设备, 冷却壁的性能对高炉的长寿、安全运行是至关重要的<sup>[1-3]</sup>。在经过了十多年“大型高炉建设必须采用铜冷却壁”的热潮以后, 近年来对冷却壁材质的认识变得更为理性, 目前越来越多的高炉采用了铸铁冷却壁, 其在国内外也有许多长寿使用的案例。随着高炉大型化的进程不断加快, 对高炉的长寿命、稳定性提出了越来越高的要求。因此, 如何采取有效措施, 最大限度地提升冷却壁的冷却能力, 是当前铸铁冷却壁的一个主要研究方向。

铸铁冷却壁的结构为铸铁本体内铸入弯制的冷却水管。冷却水管为10钢或20钢的无缝钢管, 截面通常为圆形<sup>[4]</sup>。为了获得更好的冷却能力, 在铸铁冷却壁设计时需要采用较大的冷却比表面积。一些研究认为, 炉缸冷却壁冷却比表面积应控制在1.1以上<sup>[5]</sup>。但是, 为了保证炉壳的强度足够, 常规四进四出冷却壁的炉壳开孔间距不能太近, 冷却比表面积一般仅能达到1.0左右。

近年来, 有研究人员通过热态试验和阻损试验证实<sup>[6-8]</sup>, 采用椭圆水管的铸铁冷却壁可以在不增加炉壳开孔数量和开孔尺寸的前提下, 提高冷却壁的冷却能力, 同时流量阻损并不明显增加, 从而在不增加水泵动力配置的情况下, 最大限度地满足高炉长寿运行的需要。但是椭圆水管在成形过程中有可能形成比较大的残余应力, 甚至开裂, 不仅影响到高炉的长寿, 还威胁到安全生产<sup>[9]</sup>。然而, 到目前为止, 还未见有关冷却壁椭圆水管在成形过程中的残余应力的研究, 同时也缺少从冷却比表面积的角度对椭圆水管的冷却能力进行的理论分析。因此, 本文针对椭圆水管的残余应力以及从冷却比表面积的角度对椭圆水管的冷却能力展开研究, 这对于高性能、长寿命铸铁冷却壁的开发、保证高炉的长寿运行具有参考价值。

## 1 椭圆水管铸铁冷却壁的冷却能力研究

### 1.1 冷却能力理论分析

多年来, 设计上增大冷却壁冷却能力的常用方法有两个: 一是减小冷却水管间距, 二是加大冷却水管直径。但两者均会对炉壳强度带来一定的影响, 前者会增加炉壳开孔密度, 后者将会加大炉壳开孔直径。并且显著增加冷却水量及水泵的动力消耗。因此, 这两种方法都存在明显的弊端。

由于在面积相同时, 圆形的周长最小, 因此采用圆形水管作为冷却水管, 在

作者简介:

李加林(1968-), 男, 高级工程师, 研究方向为先进材料加工技术。电话: 0311-85912374, E-mail: ljlin126@126.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

03-0310-05

收稿日期:

2021-08-27 收到初稿,

2021-11-15 收到修订稿。

水流通道截面积不变的情况下，散热面积是最小的。基于此，可以考虑改变水管的截面形状来提高散热能力。

在铸铁冷却壁的其他工艺参数（冷却壁材质、防渗碳涂层、间隙等）不变的情况下，冷却壁的冷却能力一般采用冷却比表面积来衡量。冷却比表面积定义为：铸入冷却壁内部的冷却水管的外表面积与冷却壁热面面积之比。对于常规的U型管冷却壁来说，也可以认为是冷却水管外周长与冷却水管间距的比值。

实际上，由于冷却壁水管圆周各个方向的散热有很大差别，主要是冷却水管宽度方向在热面的投影决定着冷却壁水管的散热能力。因此，冷却壁的冷却能力也可以采用冷却水管在冷却壁热面的投影面积之和（ $S_{水管}$ ）与冷却壁热面面积（ $S_{热面}$ ）之比来简便计算（见图1），即换热面积比，用A表示，即： $A = S_{水管} / S_{热面} \times 100\%$ 。

因此，椭圆水管的冷却比表面积可以表示为：

$$\sigma = (2b + 4(a-b)) / l \times 100\% \quad (1)$$

式中： $l$ 为水管间距，圆管（ $a=b$ ）时也适用该公式。

水管椭圆度为椭圆水管的内短轴长度与内长轴长度的比值。采取不同的水管椭圆度，可以在一定范围内对冷却比表面积 $\sigma$ 进行调整。以 $\Phi 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆形水管截面形状水管为例，水流通道的截面积为 $1\,963 \text{ mm}^2$ ，在保证水管截面积不变的条件下，不同椭圆度水管的冷却比表面积计算结果见表1（假定水管间距 $l=160 \text{ mm}$ ）。

由表1可以看出，在采用椭圆冷却水管后，在不增加水流通道面积的情况下，可以增加冷却比表面积 $\sigma$ 的值。当椭圆度由1变为0.3时，冷却比表面积 $\sigma$ 由1.178增加到1.553，增加了31.8%。可见，椭圆水管冷却壁的冷却能力明显高于圆形水管冷却壁，并随水管的椭圆度的增加而增强。因此，椭圆形截面水管与圆形截面水管相比，具有明显的技术优势：在截面积相同即冷却水量相同的条件下，椭圆水管有着更强的冷却能力；在冷却能力相同的条件下，椭圆水管有着更小的截面积，即采用较小的冷却水量即可以达到相同的冷却效

果。综合运用这两种优势，采用椭圆水管的铸铁冷却壁可以在不增加炉壳开孔的数量和开孔尺寸的前提下，实现增强冷却能力和减少冷却水量的双重效果，最大限度地满足高炉长寿运行需要，并减少冷却水循环的动力消耗。

## 1.2 冷却能力测试

本研究通过冷却试验，对比验证椭圆水管铸铁冷却壁和圆形水管铸铁冷却壁的实际冷却效果。铸铁冷却壁安装在热态实验炉的正面，其热面直接暴露在炉内，试验中测量炉温、水量和进出水温度。

铸铁冷却壁为四进四出形式，材质为球墨铸铁，外形尺寸为 $1\,680 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$ ，热面设置有11个燕尾槽，槽深 $80 \text{ mm}$ ，槽内镶嵌碳化硅砖。上方两根水管为一组，为圆形水管（ $\Phi 60 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ），水流通道截面积为 $1\,810 \text{ mm}^2$ 。下方两根水管为一组，用 $\Phi 70 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的无缝管制成椭圆形水管，内截面积也为 $1\,810 \text{ mm}^2$ ，长半轴 $40.6 \text{ mm}$ ，短半轴 $14.2 \text{ mm}$ ，椭圆度为0.35。制得的铸铁冷却壁实物见图2。

在冷却水流速 $1 \text{ m/s}$ 、不同炉温时，测得的每根水管的进出水温度如表2所示。

由表2可知，当进水温度一定时，椭圆水管冷却壁的出水温度明显高于圆形水管冷却壁的出水温度，说

表1 不同椭圆度水管的冷却比表面积  
Table 1 Cooling specific surface area of the water pipes with different ovalities

椭圆度	外长轴	外短轴	内截面积	换热面	冷却比表
$2b/2a$	$2a/\text{mm}$	$2b/\text{mm}$	$S_0/\text{mm}^2$	积比A	面积 $\sigma$
1.0	60.0	60.0		0.375	1.178
0.9	62.7	57.4		0.392	1.193
0.8	65.9	54.7		0.412	1.213
0.7	69.8	51.8	$\approx 1\,963$	0.436	1.242
0.6	74.5	48.7		0.466	1.278
0.5	80.7	45.4		0.504	1.332
0.4	89.1	41.6		0.557	1.410
0.3	101.3	37.4		0.633	1.553

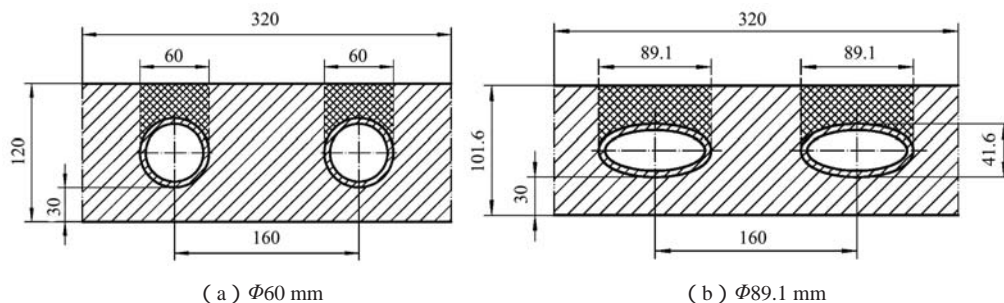


图1 不同水管截面形状的冷却壁断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cooling stove sections with different water pipe section shapes

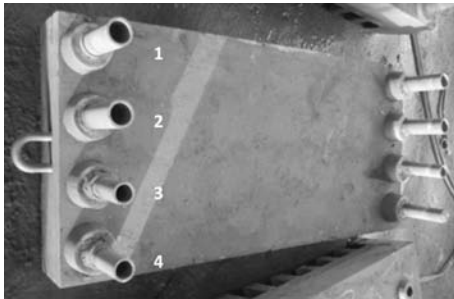


图2 试验用铸铁冷却壁

Fig. 2 Cast iron cooling stove for the experiment

表2 铸铁冷却壁水管的进出水温度

Table 2 Inlet and outlet water temperatures of the cast iron cooling stove water pipe

炉温	进水温度	圆形水管-1	圆形水管-2	椭圆形水管-3	椭圆形水管-4
800	25.7	28.2(2.5)	28.2(2.5)	28.3(2.6)	28.4(2.7)
950	28.0	31.7(3.7)	31.6(3.6)	32.1(4.1)	32.2(4.2)
1 100	26.7	31.0(4.3)	31.0(4.3)	31.7(5.0)	31.7(5.0)

注：表中括号内数值为进出水的温差。

明前者能够带走更多的热量，具有更好的冷却效果。

## 2 椭圆水管的残余应力

椭圆水管的成形可以采用两种方法，一是采用液压机，结合椭圆管压制模具对圆形水管进行压制成形。二是利用滚压模具，在滚压机上对水管进行往复滚压成形。为了生产方便，推荐采用压制的方法进行椭圆管成形。

由于压制时，水管截面会发生塑性变形，因此会伴随着残余应力的产生。为了检测压制后残余应力的数值，本研究采用盲孔法对压制成形的椭圆管进行了残余应力检测，同时也对常规圆形管的90°弯曲部位进行了残余应力检测，以后者做为参照，来判断椭圆管的残余应力对冷却壁使用性能的影响。

### 2.1 常规圆管 90° 弯曲部位的残余应力

采用 $\Phi 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的10钢无缝钢管，按照R100的弯曲半径，用弯管机冷弯90°，在45°方向的环形截面位置设定取样点，沿圆周方向设了8个点，分别编号为A1~A8，如图3所示。对这8个点进行残余应力检测，如图4。对于每个点，均对轴线方向、环线方向进行了检测，检测结果见表3（ $\sigma_1$ 为轴线方向残余应力， $\sigma_2$ 为环线方向残余应力；“-”号为压应力，“+”号为拉应力）。

### 2.2 椭圆管的残余应力

采用 $\Phi 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的10钢无缝钢管，截取长度

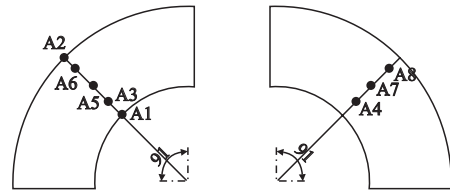


图3 圆管90°弯曲部位残余应力检测点分布图

Fig. 3 Distribution of the residual stress detection points at 90° bending part of the circular pipe

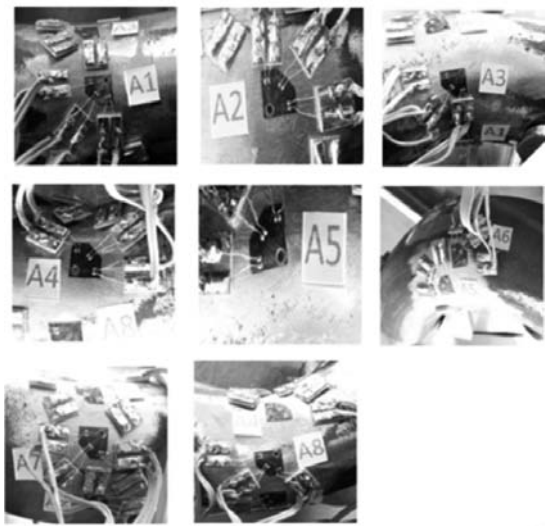


图4 圆管90°弯曲部位残余应力检测现场照片

Fig. 4 Photos of the residual stress detection at 90° bending part of the circular pipe

表3 圆管90°弯曲部位残余应力检测数据

Table 3 Residual stress test data of 90° bending part of circular pipe

检测点	$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_2/\text{MPa}$
A1	-181.03	-85.71
A2	+172.15	+103.14
A3	-121.11	-65.06
A4	-109.07	-59.70
A5	+30.54	-22.30
A6	+127.99	+25.85
A7	+118.76	+22.48
A8	+28.95	-17.70

0.5 m，按照0.4的椭圆度制作模具，在液压机上压制成形，以此做为检测样品。在中间部位的截面位置设定取样点，沿圆周方向设了8个点，分别编号为B1~B8，如图5所示。对这8个点进行残余应力检测，如图6。对于每个点，均对轴线方向、环线方向进行了检测，检测结果见表4（ $\sigma_1$ 为轴线方向残余应力， $\sigma_2$ 为环线方向残余应力；“-”号为压应力，“+”号为拉应力）。

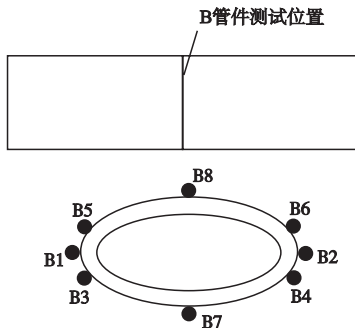


图5 椭圆管残余应力检测点分布图

Fig. 5 Distribution of the residual stress detection points of the elliptical pipe

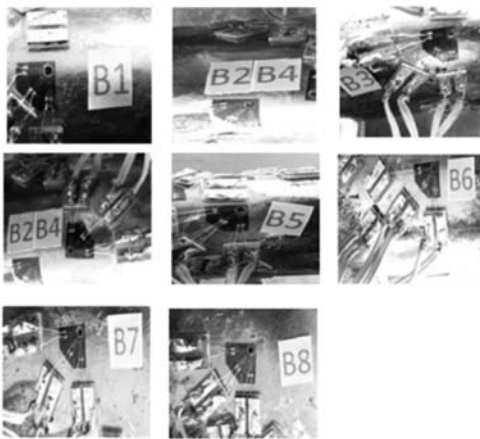


图6 椭圆管残余应力检测现场照片

Fig. 6 Photos of the residual stress detection of the elliptical pipe

表4 椭圆管残余应力检测结果

Table 4 Residual stress test results of the elliptical pipe

检测点	$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_2/\text{MPa}$
B1	+38.38	+149.01
B2	+43.72	+146.25
B3	+18.37	+103.11
B4	+25.34	+93.28
B5	+24.02	+89.43
B6	+16.66	+106.58
B7	-35.21	-41.44
B8	-27.40	-64.08

## 参考文献:

- [1] 王春龙, 祁四清, 全强, 等. 浅谈延长高炉铸铁冷却壁使用寿命的措施 [J]. 炼铁, 2021, 40 (4): 33-36.
- [2] 陈佳伟, 龚小龙, 樊自田, 等. 基于数值模拟的铸钢冷却壁防熔穿工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (7): 716-721.
- [3] 大型高炉铜冷却壁长寿技术研究及应用 [J]. 中国冶金, 2020, 30 (9): 138.
- [4] 段峰, 周俐, 王建军, 等. 高炉冷却壁冷却水管管形研究 [J]. 钢铁, 2008, 43 (2): 18-21.
- [5] 郭光胜, 张建良, 焦克新, 等. 冷却比表面积对高炉炉缸铸铁冷却壁传热的影响研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 542-548.
- [6] 李峰光, 张建良, 左海滨, 等. 极限工况下铸铁冷却壁热态试验研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (4): 391-395.
- [7] 洪军, 左海滨, 张建良, 等. 球墨铸铁冷却壁热态实验与数值模拟 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (11): 2629-2631.
- [8] 郭光胜, 张建良, 焦克新, 等. 椭圆管型铸铁冷却壁热态试验分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (7): 709-712.
- [9] 陈建平, 张玉奎. 高炉冷却壁残余应力测试与分析 [J]. 武钢技术, 2017, 55 (3): 26-29.

## 2.3 残余应力检测结果分析

根据圆管90°弯曲部位的残余应力检测结果来看, 由于弯曲作用对变形部位进行了拉伸或压缩, 因此该部位残余应力发生了明显的变化, 轴向方向的残余应力均大于环线方向的残余应力, 最大残余拉应力为172.15 MPa, 位于弯曲部位的顶点外侧A2位置。根据椭圆管的残余应力检测结果来看, 由于采用压制成形, 钢管表层环线方向发生了拉伸或压缩, 轴线方向没有发生明显变化, 因此环线方向的残余应力均大于轴线方向的残余应力, 最大残余拉应力为149.01 MPa和146.25 MPa, 分别位于椭圆管长轴方向的两个顶点位置。可以看出, 按照0.4的椭圆度将圆管压制后, 椭圆管的残余拉应力小于常规90°弯管的最大残余拉应力, 前者约为后者的85%, 并且两者均明显小于10钢无缝钢管的抗拉强度335~475 MPa。如果椭圆管采取大于0.4的椭圆度, 那么最大残余拉应力无疑将会更小。采用压制方法进行椭圆管成形, 椭圆部位的残余应力明显小于常规圆管的90°弯曲部位。因此, 椭圆管的压制成形不会对无缝钢管造成不良影响, 可以满足冷却壁的使用要求。

## 3 结论

(1) 在冷却壁水管截面积不变的条件下, 当水管的椭圆度由1降到0.3时, 其冷却比表面积由2.355增加到3.065, 增加30.1%, 因此椭圆水管的冷却比表面积比圆形水管的大, 并随着椭圆度的增加而增加。

(2) 冷却试验表明, 当进水温度相同时, 椭圆水管冷却壁的出水温度明显高于圆形水管冷却壁的出水温度, 说明前者具有更好的冷却效果。

(3) 采用压制方法进行椭圆管成形, 按照0.4的椭圆度将圆管压制后, 椭圆管的残余拉应力小于常规90°弯管的最大残余拉应力, 前者约为后者的85%, 并且明显小于10钢无缝钢管的抗拉强度335~475 MPa。因此, 采用压制方法进行椭圆管成形, 不会对无缝钢管造成不良影响, 可以满足冷却壁的使用要求。



---

## Study on Cooling Capacity and Residual Stress of Elliptical Water Pipe Cast Iron Cooling Stave

LI Jia-lin<sup>1</sup>, LIU Ying-chun<sup>2</sup>, SHEN Meng<sup>2</sup>

(1.The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, Hebei, China; 2. Hebei Tianyu High-Tech Metallurgical Casting Co., Ltd., Cangzhou 062350, Hebei, China)

### Abstract:

Cast cooling stave is the most important blast furnace cooling equipment at present, and its cooling capacity is directly related to the long-life and safe operation of the blast furnace. In order to improve the performance of the cast iron cooling stave, the cooling capacity of elliptical water pipe was analyzed from the perspective of cooling specific surface area and experimentally verified, moreover, the residual stress of the pressed elliptical water pipe was detected. The results showed that the cooling specific surface area of the elliptical water pipe was larger than that of the circular water pipe under the condition of constant cross-sectional area of the water pipe, and it increased with the increase of ellipticity of the elliptical pipe. The cooling capacity of the elliptical water pipe cooling stave was significantly higher than that of the circular water pipe cooling stave. The residual stress of the pressed elliptical water pipe will not adversely affect the use of the cooling stave.

### Key words:

cast iron cooling wall; elliptical water pipe; cooling capacity; residual stress

---