

高炉冷却壁热应力试验分析

陈先中¹⁾ 陈海勇¹⁾ 白浩¹⁾ 徐春保¹⁾ 苍大强¹⁾ 曹传根²⁾

1)北京科技大学冶金学院,北京 100083 2)宝山钢铁(集团)公司,上海 201909

摘要 采用脆性涂层法和电阻应变法实际测量了高温状态下高炉冷却壁的应力和应变.实测结果表明:由于冷却水管的非均匀布置,冷却壁中心位置应力较高,而四周应力较低,高炉冷却壁的应力分布,与有限元的应力分布计算结果的趋势和数量级相同.这种测量方法的应用为应力应变的理论计算提供了一种新的校验方法.

关键词 冷却壁;高温;应力应变

分类号 TM 938.82

目前,基于差分或有限元计算冷却壁温度场和应力场的数值模拟方法已有较多的研究^[1,2],但其结果均以假定的数学模型、边界条件和参数为计算的依据,选取的数学模型、边界条件和参数的不同,对计算结果影响较大.进行热态试验,要花费巨大的人力和物力.为了将理论与实际情况相对照,进行了现场条件下1:1的热态模拟试验,完成了不同水速、不同进出水温度、不同炉温、有渣无渣、镶砖非镶砖条件下的热态试验.该试验结果对于数学模型的确定和理论计算的验证都具有重要的意义.

本文将重点讨论冷却壁热态应力应变的变化情况,通过实际测量了解高炉冷却壁在稳态及非稳态条件下热应力对冷却壁可测部位的应力影响,并与理论计算进行比较和评价,从而为合理的理论计算提供正确的计算模型和验证手段.

1 试验方案

1.1 试验环境和对象

为准确模拟高炉冷却壁的受热状态,砌模拟试验高炉,炉内下侧砌3个拱顶,炉底在正面及侧面位置各安装2台可调烧嘴,炉顶安装风门,用于模拟高炉内的温度环境.试验对象选宝钢3号高炉S3段冷却壁,灰色球墨铸铁(FCD)铸造.冷却结构由本体系和强化系组成.本体系为5进5出的冷却水管结构,强化系为2进2出的冷却水管结构,强化系的凸台部分由于煤气流的冲刷以及

上部承重耐火砖的双重作用,应力比较大.本部分根据记录曲线来看:当炉内温度达到稳态时,炉内最高温度可达1250℃,砖面温度1050℃,而炉外冷面温度最高达385℃,最低135℃,冷面温度的差异主要是冷却水管的非均匀分布造成的.

1.2 试验方法

如果为了解凸台的热应力分布,测量点的布置应选择本体与凸台的交接处,但该处温度达1000℃以上,难以测量,因此只能选冷面测量.为了合理布置冷面测量点,节省应变测量的时间,提高工作效率,事先采用脆性涂层法进行定性的研究.其基本原理是^[3]:将专门配制的涂料涂刷在被测构件表面上,经充分干燥后,形成紧附在构件表面的脆性薄膜,当构件受力发生形变时,涂层薄膜也随之形变,当应变达到某一临界值时,涂层即出现裂纹,最先出现裂纹的部位表示构件拉伸应力最大,而裂纹的方向与最大拉伸主应力的方向垂直,在一定条件下,应变越大,裂纹越密.该法可大致了解冷面的应力分布情况,属全域性测量方法,结果的整体性、直观性较强,但测量精度和灵敏度较低.

试验中通过涂层的裂纹分析发现:裂纹的出现均以冷却壁垂直中心线对称布置;升温开始时,裂纹在冷却壁中心位置沿水平方向扩展、增大,然后随温度升高,裂纹在壁面中心的周围出现,并开始出现除横裂纹之外的纵裂纹,当温度达到热平衡时,进出水管周围也出现细密的裂纹,这说明,壁面的最大主应力在中心的垂直方

向,四周的应变较小,尤其在水管附近,应变很小,因此按涂层裂纹选主应力方向贴片,位置为如图1①,②,③所示。

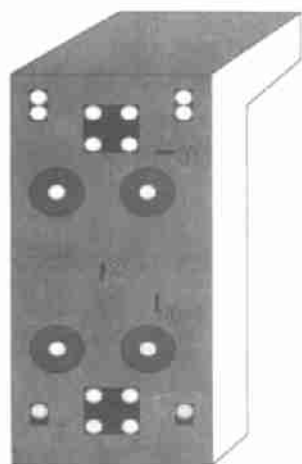


图1 冷却壁结构及布片示意图

1.3 粘贴工艺与测量方法

与常温应变片 ($-30^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$) 相比,高温应力的测量需要特别考虑以下测量因素的影响: 测量点的温度范围,应变片灵敏度与温度的关系,高温应变的测量极限与蠕变、零漂、热输出等。采用热电偶测量点①,②,③的表面温度,最高值分别为 180°C , 350°C 和 230°C , 根据以上温度,点②采用焊接式应变片,应变片安装用电容储能点焊机在测量应变片基底四周点焊两圈,补偿片只点焊一点固定在测点处。点①,③温度较低,采用丝绕式胶基应变片,用补偿应变片半桥补偿。

高温状态下胶基应变片的应力测量,采用了严格的粘贴工艺:首先是砂轮机打磨,去污除锈,然后砂纸先粗后细,沿贴片方向抛光,用丙酮清洗;在电阻片基底上和测试面均匀涂刷一层薄薄的粘结剂,微干后用应变片拖匀粘压,垫上聚四氟乙烯薄膜滚压;干燥后,用红外线灯烘烤至 200°C ,升温 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,然后保温 4h ;胶层固化后,检查应变片的外观及电阻绝缘的情况。应变片导线经接线端子固定至测量导线,由康铜丝外套浸有机硅树脂石英丝套管绝缘而成。

测量仪器选用华东电子仪器厂 YJD-1 型电阻应变仪, P20R1 型预调平衡箱及 WY-1 型电源箱。电压和电阻测量采用英国 Thurlby 公司 1905 型 intelligent multimeter 电压测量精度 $1\mu\text{V}$, 量程 210.000mV 时,温漂 $\leq 1.5 \times 10^{-4}\text{r/d}$, 电阻测量度 $1\text{m}\Omega$, 量程 210.000Ω 时,温漂 $\leq 1.5 \times 10^{-4}\text{r/d}$ 。

2 试验结果

2.1 电阻应变法

在光板冷却壁、水速 $2.0\text{m}/\text{min}$ 的情况下,分别对应力点①,②,③进行了测试,其中:表面中心点②的温度最高,为 350°C ,最大应变 520×10^{-6} ;点①温度为 180°C ,最大应变 107×10^{-6} ;点③的温度为 230°C ,最大应变 300×10^{-6} 。图2,图3为炉温从 600°C 上升到 1120°C 并稳定一段时间时,测量点②,③的温度和表面应力值变化曲线。

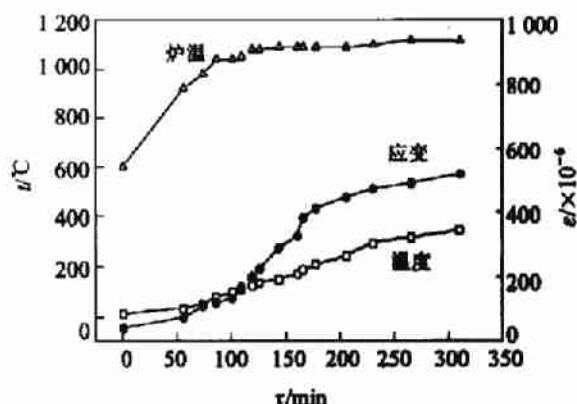


图2 ②点应力点的应变与表面温度及炉温的变化曲线

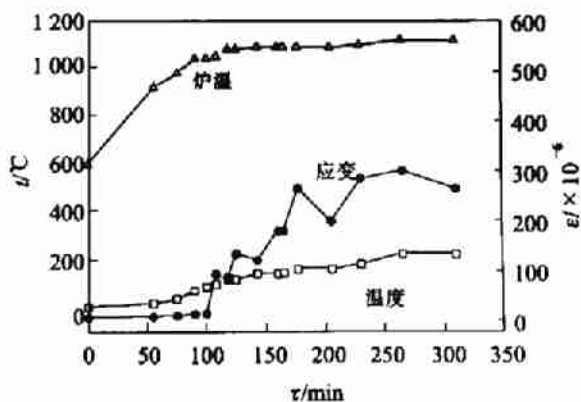


图3 ③点应力点的应变与表面温度及炉温的变化曲线

从图2,3可得到如下的结果:

(1) 表面应力总体上随炉温升高而增大,用焊接式应变片测量,应变值升幅稳定,效果较好;而粘贴式应变片的测量值,在时间 τ 为 125 和 200min 附近时应力波动的比较大,最大达 75×10^{-6} ,而在时间 $\tau = 320\text{min}$ 时,应变反而有所下降。这估计与温度有关,当温度达到 200°C 以上时,壁面温度与高温胶的基底固化温度接近,造成了粘结层的蠕变和松弛。

(2) 炉温达到稳定时,②点表面温度比③点高出 120°C ,其应变也比③高出 220×10^{-6} ,这是因为

②中心部位没有冷却水管,而③内部有冷却水管,所以,冷却水管布置的不均匀,导致表面温度相差较大,应变也有较大差别。

2.2 应力的计算

由于冷却壁材质为球墨铸铁,属脆性材料,由计算公式^[4]:

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (1)$$

式中, σ 为冷却壁表面测点不同温度时的应力, ε 为应变, E 为材料的弹性模量。

其应力的强度极限 σ_b 应符合第一强度理论^[4]。

$$\sigma_1 = \varepsilon \times E = 107 \times 10^{-6} \times 100 \text{GN} / \text{m}^2 = 10.7 \text{MN} / \text{m}^2, \\ \leq \sigma_b(300 \text{MN} / \text{m}^2);$$

$$\sigma_2 = \varepsilon \times E = 520 \times 10^{-6} \times 160 \text{GN} / \text{m}^2 = \\ 83.2 \text{MN} / \text{m}^2 \leq \sigma_b(200 \text{MN} / \text{m}^2);$$

$$\sigma_3 = \varepsilon \times E = 300 \times 10^{-6} \times 150 \text{GN} / \text{m}^2 = \\ 45 \text{MN} / \text{m}^2 \leq \sigma_b(280 \text{MN} / \text{m}^2).$$

式中, σ_b 为冷却壁材质在不同温度时的最大许用应力值。

根据计算,由于 σ 小于球墨铸铁最大许用应力,因此其工作是安全可靠的。

为了与理论计算结果有一个比较,我们利用现成的冷却壁的应力有限元计算结果^[5]与本次试验结果进行了对比(其计算的边界条件与本次试验相同),见表1。

表1 理论计算与测量值的对比

测点	表面温度/℃		$\varepsilon / \times 10^{-6}$		误差
	计算	测量	计算	测量	
①	168	180	125	107	14.40
②	326	350	646	520	19.50
③	221	230	382	300	21.46

由表1可见:当炉温达到1120℃并稳定时,冷却壁表面温度的计算值比测量值偏小,这种误差可能与实际冷却壁的周边并非理想的绝热状态有关.应力的计算比测量值偏大,最大误差达21.46%,误差的原因主要是计算剪切弹性模量和热膨胀系数选取得偏大,以及主应力测量位置与真实位置并非完全吻合而造成的。

2.3 误差分析

试验结果的综合误差由两部分组成:一部分是绝对误差,它取决于仪器的绝对误差、预调箱接触电阻的变化以及温度补偿不完全等;另一部分取决于测量应变量的相对误差,它取决于电阻片 K 值的误差、贴片角度误差及仪器本身相对误差等.误差符号及数值决定如下。

δ_K 为电阻片 K 值的误差; δ_θ 为贴片角度不准确引起的测量误差,估计贴片方向误差不超过 2° ,故采用2%; δ_r 为电阻应变仪的相对误差,小于 $\pm 2\%$; $\Delta\delta_1$ 为电阻应变仪绝对误差,经过标定为 $\pm 5 \times 10^{-6}$; $\Delta\delta_s$ 为预调箱接触电阻变化引起的读数变化,经过标定为 $\pm 2 \times 10^{-6}$; $\Delta\delta_t$ 为温度补偿不完全的读数变化,经过标定为 $\pm 5 \times 10^{-6}$; $\Delta\delta_H$:为防潮不良引起的读数变化,经过标定为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。

试验中, $\varepsilon_1 = 107 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_2 = 520 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_3 = 300 \times 10^{-6}$.灵敏度与温度关系如表2和表3所示。

表2 焊接式高温电阻应变片性能表

$t / \text{℃}$	20	100	200	300	400
灵敏系数 K	1.90 ± 0.038	1.85 ± 0.038	1.79 ± 0.033	1.72 ± 0.032	1.66 ± 0.030

表3 丝绕式胶基高温电阻应变片性能表

$t / \text{℃}$	20	50	100	150	200
灵敏系数 K	2.07 ± 0.014	2.06 ± 0.014	2.04 ± 0.013	2.02 ± 0.020	1.90 ± 0.033

以百分符号(%)表示的综合误差为^[6]:

$$\delta = [(\delta_K^2 + \delta_\theta^2 + \delta_1^2 + (\Delta\varepsilon_1^2 + \Delta\varepsilon_s^2 + \Delta\varepsilon_t^2 + \Delta\varepsilon_H^2))^{1/2}] \quad (2)$$

把前面数据代入得 $\delta_1 = 9.37\%$, $\delta_2 = 4.46\%$, $\delta_3 = 5.26\%$ 。

以绝对值($\times 10^{-6}$)表示的综合误差为:

$$\Delta\varepsilon = [(\delta_K^2 + \delta_\theta^2 + \delta_1^2) \varepsilon^2 \times 10^{-4} + \Delta\varepsilon_1^2 + \Delta\varepsilon_s^2 + \Delta\varepsilon_t^2 + \Delta\varepsilon_H^2]^{1/2} \quad (3)$$

则得: $\Delta\varepsilon_1 = 10.03 \times 10^{-6}$, $\Delta\varepsilon_2 = 23.21 \times 10^{-6}$, $\Delta\varepsilon_3 = 15.78 \times 10^{-6}$ 。

3 结论

(1) 采用脆性涂层法和电阻应变法测量冷却壁的高温应力应变是可行的,但必须选择合理的涂料以及耐高温的电阻应变片。

(2) 采用理论计算的应变值比实际测量的数值偏小,这与计算参数的选取有关,适当根据具体情况修正计算参数是必要的。

(3) 造成测量误差的主要原因是高温下的灵敏系数、测量仪器和环境变化的影响选择良好的高温应变片是减小测量误差的关键。

参考文献

1 杨为国.高炉冷却壁三维温度场的计算:[硕士论文].北京:北京科技大学,1997.3

