

[补充信息]

在内衬材料中添加氢氧化铝提升长水口的抗热震性: 内衬材料显微组织与性能及长水口颈部最大热应力数学模型

田响宇^{1,2}, 尚心莲¹, 李红霞¹, 王新福¹, 刘国齐^{1,✉}, 杨文刚¹, 于建宾¹

1 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司, 先进耐火材料国家重点实验室, 洛阳 471039

2 中国航空制造技术研究院, 北京 100024

[Supplementary Information]

Improving Thermal Shock Resistance of Long Nozzle by Adding Aluminum Hydroxide into Lining Material: Microstructure, Properties of Lining Material, and Mathematical Model for Maximum Thermal Stress of Long Nozzle Neck Portion

TIAN Xiangyu^{1,2}, SHANG Xinlian¹, LI Hongxia¹, WANG Xinfu¹, LIU Guoqi^{1,✉}, YANG Wengang¹, YU Jianbin¹

1 State Key Laboratory of Advanced Refractories, Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research Co. Ltd., Luoyang 471039

2 AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024

实验仪器与设备

本研究所采用的特殊实验设备为超声波检测仪 (UT, 生产厂家为 Proceq China, 型号为 Pundit Lab+)。设备外观如图 S1 所示。测量弹性模量过程中将超声波探头置于圆柱形试样 ($\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) 两侧, 探头与试样之间涂抹特殊耦合剂以保证无气泡。根据试样长度和声波传播时间可计算出波速。输出结果如图 S2 所示。



图 S1 超声波设备

Fig.S1 Ultrasonic equipment

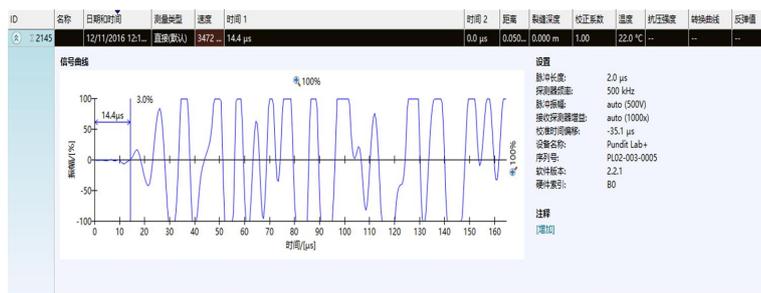


图 S2 超声波数据
 Fig.S2 Ultrasonic data

此外，为确定超声波与传统激振脉冲法测量连铸功能用耐火材料的弹性模量的准确性，本课题组还做了如下实验。

采用激振脉冲法计算公式为：

$$E = 0.9465 \left(\frac{m f_f^2}{\frac{b}{L^3/t^3} \tau_1} \right) \quad (1)$$

式中： E 为弹性模量，Pa； m 为试样质量，g； b 为试样宽度，mm； L 为试样长度，mm； t 为试样厚度，mm； f_f 为试样基频，Hz。

超声声速法主要原理是检测超声波在材料中的传播速度，根据该速度按式（2）计算出材料的弹性模量：

$$E = \frac{2(1+\mu)^3}{(0.87+1.12\mu)^2} \rho v_t^2 \quad (2)$$

式中： E 为材料弹性模量，Pa； μ 为材料泊松比； ρ 为材料密度，kg/m³； v_t 为声波速度，m/s；

为确定何种方式测得的结果更加稳定可靠，接近于真实值，需要对这两种测试方法进行比较。本实验采用了利用两种弹性模量测量方式对机压和等静压成型的铝碳材料进行测量，并对其结果进行比较分析。

表 S1 两种弹性模量测试方法比较
 Table S1 Two methods for testing elastic modulus

Test method	Pulse excitation technology		Ultrasonic velocity method	
	Machine press	Isostatic pressing	Machine press	Isostatic pressing
Mean value/MPa	13.51	24.58	8.23	7.844
standard deviation	0.66	1.54	0.18	0.54

由表 S1 可以看出，等静压直接成型的试样所测得的弹性模量大大超过了其实际值，存在很大的误差，同时，由于尺寸的不规则，各个试样的测量值偏差较大，数据离散度高；而机压试样尺寸规则且统一，所以测试结果的离散度小，但由于试样长厚比小于 20，所以测量值仍然高于实际值，结果并不准确。

通过以上对比可知, 超声声速法要优于激振脉冲法。激振脉冲法若要达到较高的精度, 需使试样的长厚比大于 20, 同时还要求试样的表面形状比较规则, 不能出现扭曲现象, 否则误差将非常大。而超声法要求试样的尺寸较大(端面面积大于探测器面积), 同时要求试样表面平整, 与探测器接触时不能出现大的空隙。对等静压成型的铝碳材料而言, 利用超声声速法制样更加方便, 在测量精度和测量离散度方面, 超声声速法都明显优于激振脉冲法。因此, 最终选择超声声速法进行铝碳材料和内衬材料的弹性模量测量。

内衬作用机理

为研究内衬材料对铝碳本体以及长水口性能的影响机理, 从而为内衬材料的选材提供依据, 许多学者针对内衬的作用机理做出了大量研究。研究发现, 内衬材料的主要作用为缓解浇钢初期的热应力, 从而避免材料长水口在浇钢初期由于热应力而产生裂纹, 影响其使用寿命。本课题组已通过有限元法对复合长水口抗热冲击过程进行了数学模拟, 其结果如下。

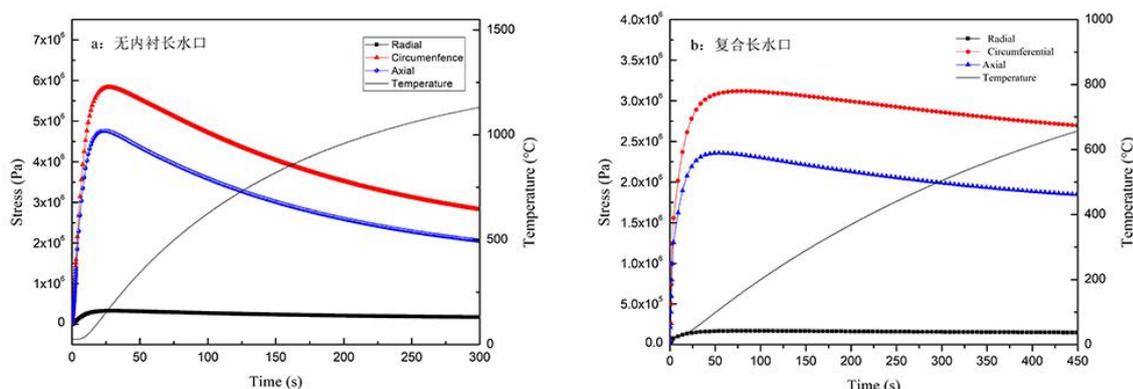


图 S3 长水口热冲击时的应力和温度随时间的变化关系

Fig. S3 Variation of stress and temperature with time during thermal shock at a long nozzle

图 3a 和 b 中曲线分别表示无内衬长水口在受热冲击时三个方向的应力随时间的变化, 分析点为长水口最脆弱的颈部位置。两种长水口均为周向应力(Circumferential)值最大, 轴向应力(Axial)次之, 而径向应力(Radial)最小。三者仅是在应力大小上有所差别, 而随时间的变化趋势是相同的。从图 3a 中可以看出, 无内衬长水口颈部外侧温度在 200 s 内升至 1 000 °C 左右, 随后趋于平稳。在时间为 30 s 处, 颈部应力达到峰值, 随后减小并稳定在一较小的值。图 3b 中, 复合长水口的最大热应力出现的时间为 50 s 左右, 此时, 长水口外壁的温度在 200 °C 以下。复合长水口在 3 s 内, 应力值急剧增加; 之后增加速度稍有减小, 但仍保持比较大的增长速度, 到 50 s 时, 应力增加到最大值; 在 50 s 后, 热应力开始降低, 但降低速度缓慢; 到 150 s 之后, 应力减小速度缓慢, 基本保持不变。对比两图可以发现, 内衬的主要作用为延缓最大热应力出现的时间和减小最大热应力值。