

180 kA 大型铝电解槽力场测试与分析^①

伍洪泽 夏 春 危育蒲 文丕华 唐光炳

(中南工业大学资源开发工程系, 长沙 410083)

摘 要 阐述了 180 kA 大型铝电解槽槽壳的位移现场测试手段、槽壳表面位移特征和槽壳所受内力的计算方法, 并对槽壳结构优化设计做了分析。

关键词 铝电解槽 压力传感器 位移传感器 机械式位移计 内压力

由于 180 kA 大型铝电解槽在生产过程中的高温(970℃以上)、大电流(180 kA)、强磁场(1.5×10^{-2} T 以上)以及由此而引起的物理、化学变化等多种因素的综合作用, 使铝电解槽槽壳承受较大的内压力, 产生较大的变形。国内外资料表明, 目前尚无成熟的计算方法以确定槽壳内壁的真实受力大小, 也很少进行系统而有成效的试验研究。

为了改变我国铝电解槽槽壳结构设计的经验性类比设计状态, 探索槽壳的真实受力状况, 为大型铝电解槽槽壳结构优化设计提供有参考价值的依据。我们承担了贵州铝厂 180 kA 大型铝电解槽开发项目中的槽壳力场研究。由现场测试, 采集了大量实测数据, 通过数值计算, 得到了槽壳的位移特征和内壁受力状况, 并对槽壳结构优化设计进行了初步探讨。

1 测试手段

1.1 压力传感器

压力传感器设计成剪切式, 见图 1(a)。它由上、下两块承压板(35CrNiCo)做成 I 字型截面的弹性元件 I、II, 设计成 S 形状; 四片高温应变片, 与水平成 45°角分别点焊在弹性元件 I、II 上, 构成全桥电路; 外加防护外壳和接线固定座。外形尺寸为 110 mm × 60 mm ×

43 mm, 为铝电解槽内衬一块耐火砖尺寸的大小。

由受力分析, 弹性元件中间部位 C 处于纯剪切应力状态(见图 1(b))。45°方向线应变 ϵ_1 取最大值:

$$\epsilon_1 = \frac{(1+\mu)}{E} \tau_c$$

式中 E 、 μ 分别为弹性元件 I、II 的弹性模量和泊松比。

因两块弹性元件反对称地焊接在上下承压板上, 故压力传感器具有消除偏心载荷的能力。外载荷 p 和线应变 ϵ_1 之间存在着线性关系, 即 $p = A \epsilon_1$ 。式中, A 为与弹性元件材料参数 E 、 μ 及几何尺寸等诸多因素有关的比例系数。

1.2 位移传感器

位移传感器设计成双悬臂梁式, 见图 2。材料采用弹簧钢片, 在其上粘贴 4 片常温电阻应变片。采用全桥接线。为了防止强磁场的干扰, 顶杆和支座均采用黄铜制作。顶杆行程为 10 mm, 外壳用铝板作成盒式。

1.3 机械式位移计

机械式位移计是在槽壁上各测点处焊接一个小铁环和安装一个小滑轮, 在铁环上栓一根镍铬丝, 其下吊一重物, 镍铬丝的上端通过滑轮, 再在槽壳的底架和镍铬丝上分别设置标志零点, 通过测量镍铬丝上标志点的上升或下降

① 收稿日期: 1995-10-20; 修回日期: 1995-12-20 伍洪泽, 男, 58 岁, 副教授

的距离来测量槽壳外壁的法向位移。

1.4 直尺测量

为了定性分析槽壳上沿的位移情况，我们在铝电解槽的上沿四周布置测点。用固定于木板条上的钢卷尺测量槽壳上各测点的法向位移，测量参考零点定于地面，定时读数。此种测量坚持了 1.25a，采集了持续测量的有效数据，为分析槽壳位移提供了有价值的参考。

考虑到槽壳结构的双对称性，我们仅在对称线和 1/4 槽壳内侧与外壁上布置测点。即在 A、B、C、D、E，每一个垂直面上布置 4 个测点。为了验证槽壳位移的对称性在与 A 相对的 F 截面上又布置了 4 个测点。测点布置见图 3。

2 传感器的标定

2.1 压力传感器的标定 2.1.1 热输出标定

热输出是 4 片高温应变片本身以及弹性元件等多种因素的综合效果，将 50 多个压力传感器置入恒温箱内，从常温缓慢升温。表 1 为 25 号压力传感器在不同热循环下的热输出值。

图 3 测点布置及槽壳位移

表 1 25 号压力传感器热输出

热循环	温度/℃				
	50	75	100	125	150
I	28	43	58	75	94
II	29	35	51	62	79
III	30	32	50	58	75

图 1 压力传感器与 C 点应力状态

用一多项式对这些值进行拟合，即 $\epsilon_t = \epsilon_0 + \epsilon_1 t + \epsilon_2 t^2 + \epsilon_3 t^3$

2.1.2 载荷应变输出标定

载荷应变输出是在室内常温下进行的。表 2 为 25 号压力传感器的载荷应变输出值。

表 2 25 号压力传感器 A 系数标定

p/kN	5	10	15	20	25
应变	129	296	496	670	853
* A _i		29.94	25.00	28.74	27.32

$$* A_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \frac{p_i - p_{i-1}}{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}}$$

2.2 位移传感器的标定

图 2 位移传感器结构

在测试之前,对所有位移传感器在现场进行标定,标定是在常温下进行的,在行程 10 mm 范围内线性输出符合要求。

3 防磁场干扰措施和位移特征

180 kA 大型铝电解槽在电解过程中的强大电流在槽壳周围产生高达 $1.5\times 10^{-2} T$ 的强磁场。为避开强磁场的影响,我们在离槽壳 20 m 处设置面积约 $6 m^2$ 的全封闭双层钢板屏蔽室,所有仪器均在屏蔽室内,导线都分组捆扎并固定于支架上,实验结果表明,仪器基本都能正常工作。在数据整理中,以位移传感器的测试数据为主,并参考其他测试手段的测量数据,结果见表 3。

180 kA 大型铝电解槽槽壳位移状态见图 3 中虚线所示,槽壳大面中 1 点、小面中 16 点的时间位移曲线见图 4。

分析图 4 后得出: (1) 槽壳在通电 7 d 内,槽壳表面位移呈直线。(2) 启动后的 5 d 内,槽

壳表面位移仍呈直线,但斜率远大于通电阶段。(3) 启动 5 d 后的 15 d 内,槽壳表面位移速率减小,每天平均只有 0.2~ 0.3 mm 的位移量。(4) 启动 30 d 后,槽壳表面位移基本稳定,1 a 内累计增量约 4~ 6 mm。

图 4 位移与时间关系

4 计算方法^[1, 2]

4.1 由压力传感器测定内压力 p

表 3 测点综合位移一览表 (mm)

测 点		时间/d																		
		预热	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8 启动	9	10	11	12	17	22	32	47	450
A	1	0	0.43	1.14	1.41	1.76	2.32	2.41	2.41	2.41	5.0	6.5	7.5	8.5	9.5	11.0	12.0	13.5	15.0	18.5
	2	0	0.10	0.98	1.06	1.72	2.15	2.42	2.47	2.47	5.0	6.5	7.5	8.5	9.5	11.0	12.0	13.5	15.0	18.5
	3	0	0.59	1.18	1.66	1.97	2.23	2.44	2.46	2.46	4.5	6.0	7.0	8.0	9.0	10.5	11.5	12.5	13.5	15.5
	4	0	0.17	0.50	0.68	1.10	1.30	1.75	1.86	2.05	3.0	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	5.0	5.0	5.0	5.5
B	5	0	0.58	0.99	1.02	1.05	1.20	1.26	1.28	1.48	3.5	5.0	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	15.5
	6	0	0.31	0.45	0.60	0.90	1.03	1.13	1.27	1.59	3.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	14.5
	7	0	0.87	1.06	1.40	1.45	1.46	1.49	1.59	1.72	2.5	4.0	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	12.5
	8	0	0.27	0.50	0.68	1.00	1.20	1.25	1.50	1.82	2.5	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	5.0
C	9	0	0.15	0.23	0.57	0.87	1.04	1.10	1.17	1.45	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.5	8.5	9.0	11.5
	10	0	0	0.08	0.10	0.23	0.38	0.46	0.67	0.85	2.5	3.0	4.0	5.0	5.0	6.5	7.0	8.0	8.0	10.5
	11	0	0	0.10	0.15	0.28	0.50	0.61	0.74	0.89	2.5	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.5	7.0	7.5	9.0
	12	0	0	0.10	0.18	0.20	0.25	0.28	0.32	0.50	1.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	4.0
D	13	0	0.67	1.10	1.80	1.90	2.00	2.20	2.50	2.70	3.50	4.50	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.5
	14	0	0.60	0.89	1.26	1.61	1.83	2.00	2.30	2.60	3.0	4.0	4.5	5.0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.5
	15	0	0.23	0.40	0.62	0.83	1.02	1.18	1.21	1.50	2.5	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.5
E	16	0	1.67	2.20	2.27	2.18	2.25	2.77	3.16	3.48	4.5	5.5	6.5	7.0	7.5	8.5	9.5	10.0	10.5	12.0
	17	0	1.52	2.06	2.06	2.06	2.06	2.66	2.73	2.90	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	9.5	10.0	11.0
	18	0	0.32	0.52	0.78	1.24	1.58	1.06	2.28	2.42	3.0	4.5	5.0	5.0	5.5	5.5	6.0	6.0	6.0	6.5
F	19	0	0.44	0.98	1.25	1.38	1.72	1.92	2.12	2.79	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.5	12.0	13.0	13.5	16.5
	20	0	0.34	1.38	1.65	1.78	1.95	2.52	2.59	2.74	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.5	11.0	12.0	12.5	15.5
	21	0	1.00	1.51	1.58	1.60	1.62	1.76	2.39	2.65	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	12.0	14.0
	22	0	0.15	0.41	0.58	1.00	1.22	1.52	1.75	2.0	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.5	4.5	5.0

压力传感器的现场测试获得两组必要数据,即压力传感器埋设点的温度 t 和应变仪读数 ϵ_t , 通过 t 和 ϵ_t 便可求出压力传感器在该温度下的应变值 ϵ_α 。

由热输出:

$$\epsilon_t = \epsilon_0 + \epsilon_{1t} + \epsilon_{2t^2} + \epsilon_{3t^3} \quad (1)$$

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_t - \epsilon_0 \quad (2)$$

和标定系数 A , 得压力传感器所承受的内压力值为:

$$p = A \cdot \epsilon_\alpha = A (\epsilon_t - \epsilon_0) \quad (3)$$

4.2 由位移反求内压力 q

根据大挠度平板平衡方程^[3]

$$\frac{D}{h} \nabla^2 \nabla^2 w = \frac{q}{h} + \frac{\partial \phi}{\partial y^2} \frac{\partial w}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial \phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial w}{\partial x \partial y} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E} \nabla^2 \nabla^2 \phi = \left[\frac{\partial w}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial y^2} \quad (5)$$

各内力分量由下式确定

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -D \left[\frac{\partial w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial w}{\partial y^2} \right]; \\ M_y &= -D \left[\frac{\partial w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial w}{\partial x^2} \right]; \\ M_{xy} &= -D(1-\mu) \frac{\partial w}{\partial x \partial y}; \\ Q_x &= -D \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 w); \\ Q_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 w); \\ N_x &= \frac{\partial \phi}{\partial y^2} h, \quad N_y = \frac{\partial \phi}{\partial x^2} h, \\ N_{xy} &= \frac{\partial \phi}{\partial x \partial y} h \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在所有计算中采用最小二乘拟合法, 而求解微分方程采用能量法, 有

$$\begin{aligned} & \iint \left(\frac{D}{h} \nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\partial \phi}{\partial y^2} \frac{\partial w}{\partial x^2} - \frac{\partial \phi}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial y^2} + \right. \\ & \left. 2 \frac{\partial \phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial w}{\partial x \partial y} - \frac{q}{h} \right) \delta w \, dx \, dy = 0 \\ & \iint \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial y^2} - \frac{1}{E} \nabla^2 \nabla^2 \phi \right] \delta \phi \, dx \, dy = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$w = \sum A_n w_n(x, y), \quad \phi = \sum B_n \phi_n(x, y) \quad (9)$$

而此时位移函数 w_n 和应力函数 ϕ_n 只要分别满足边界条件即可。

为使计算收敛快, 我们取

$$\left. \begin{aligned} w_n &= A \cos \frac{n\pi}{a} x \cdot y \cdot \sin \frac{m\pi}{b} y \\ \phi_n &= C \cos \frac{n\pi}{a} x \cos \frac{m\pi}{b} y \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

系数 A 、 B 、 C 由边界点数值确定。

最后确定出

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \sum \lambda_n \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y + \\ & \quad \sum \beta_n \cos \frac{n\pi}{a} x \cos \frac{m\pi}{b} y \end{aligned} \quad (11)$$

计算结果表明:

(1) 启动初期, 温度场波动大, 温度应力起主导作用, 此时槽壳位移较小, 见图 5。

图 5 槽壳表面温度与时间关系

(2) 槽壳无明显的应力集中现象, 见图 6。

(3) 槽壳内壁上作用力随时间变化而变化, 但明显趋于一定值, 在小面中部平均压力约为 500 kN/m 。见图 7。

5 槽壳结构优化分析

180 kA 大型铝电解槽槽壳结构设计的特点是变传统的摇篮架式二层围带为摇篮架式一层围带, 且取消了槽壳端部的两根摇篮架, 但在角部采用了相应的补强措施。

图 6 主应力分布之一

为 $f_{\text{小}}=12.00\text{ mm}$, 两者均小于设计许用值 36.36 mm 及 13.66 mm , 同时启动初期热应力起主导作用。因此, 我们认为可以不要围带, 变有围带型为无围带型, 使槽壳上部散热效果更好, 减小热应力对槽壳位移的影响。

(2) 在 180 kA 大型铝电解槽槽壳结构设计的荷载选取中, 碳块水平推力的选取采用了常用的经验数值, 即大面中部取 500 kN/m , 小面中部取 1000 kN/m 。由计算结果知槽壳内壁作用力在小面中部的最大值为 500 kN/m 左右, 这个数值比经验取值小 50% 。为此, 我们认为槽壳设计荷载至少可降低 25% , 即小面中部取 750 kN/m , 大面中部取 375 kN/m 。

参考文献

1 伍洪泽. 中国有色金属学报, 1995, 5(1): 30.
2 伍洪泽. 中南工业大学学报, 1995, (1): 66.
3 徐芝纶. 弹性力学(下册), 北京: 人民教育出版社, 1979, 184~ 192.

图 7 最大线分布荷载与时间的关系

现场测试与计算结果表明该槽壳的结构比较合理, 但我们认为还可以进一步优化设计。

(1) 根据测试结果, 大面中部最大位移约为 $f_{\text{大}}=18.5\text{ mm}$, 小面中部最大位移约

THE TEST AND ANALYSIS OF STRESS FIELD
IN 180 kA ALUMINIUM ELECTROLYZER

Wu Hongze, Xia Chun, Wei Yupu, Wen Peihua, Tang Guangbing
Department of Resources Exploitation Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT The displacement testing method, the surface displacement character and the internal stress on the shell of 180kA aluminium electrolyzer have been described and the optimized structure design of the shell has also been analyzed.

Key words Aluminium electrolyzer stress sensor displacement sensor mechanical displacement instrument internal stress

(编辑 吴家泉)