

文章编号:1671-6833(2009)03-0052-04

水泥回转窑筒体裂纹模型的建立和安全评定

杨根喜, 李菊丽

(徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 回转窑是水泥生产系统的关键设备之一, 其服役状况直接影响水泥的产量和质量。针对某水泥回转窑筒体焊缝沿筒体轴线方向开裂问题, 对轮带与筒体进行力学分析, 得出引起垫板处筒体焊缝开裂的应力主要包括弯曲应力、温度应力、残余应力等。结合断裂力学和弹塑性力学构建筒体焊缝裂纹的力学模型, 按应力强度因子建立筒体焊缝的断裂判据, 对裂纹进行安全评定, 并通过现场裂纹统计证实了模型和评定的准确性, 裂纹临界尺寸为 141 mm。

关键词: 回转窑; 断裂力学; 裂纹; 安全评定

中图分类号: TG 457

文献标识码: B

0 引言

回转窑是水泥厂的关键设备, 其服役状况和状态直接影响水泥的产量、质量以及企业的效益。筒体焊缝开裂是回转窑常见运行故障之一, 根据国内外研究可知焊接缺陷、筒体应力过大是引起焊缝开裂的主要因素。某水泥厂回转窑 1990 年投产运行, 该窑为四档支撑, 由窑头至窑尾分别为 I、II、III、IV 档。1996 年第一次出现轮带处筒体垫板焊缝开裂, 根据现场检查, 发现裂纹总数约为 15 条, 最长的达 100 mm, 基本上都处于同一方向(沿筒体轴线方向)。由于裂纹成因复杂^[1-3], 为了有效指导设备操作和故障诊断工作, 必须对裂纹进行安全评定。

1 筒体裂纹力学分析

1.1 托轮、轮带与筒体的受力分析

托轮对筒体的支反力是通过轮带传递的, 在求解筒壁的内力时, 需要确定轮带作用于筒体的压力。计算时做以下假设: ①物料、筒体自重等作用轮带的载荷为 Q (即托轮的合力); ②轮带作用于筒体的压力沿圆周方向呈余弦规律分布; ③轮带作用于筒体的压力沿筒体轴向是均匀分布, 而且集中于所截取的轮带部位的单位长度的筒体上。

1.1.1 筒壁内力的计算模型

取单位长度的筒体为隔离体, 如图 1 所示, 鉴于剪力、轴力及弯矩产生的应力对轮带垫板的焊缝开裂影响很小, 计算时略去, 只考虑轮带对筒体的压力 $p(\theta)$ 以及物料和筒体的自重。事实上筒体自重及物料重量会减少轮带压力产生的筒壁切向弯矩, 单位长度内的数值很小, 故在计算筒壁内力时也可以略去。计算筒壁内力的模型如图 2 所示。

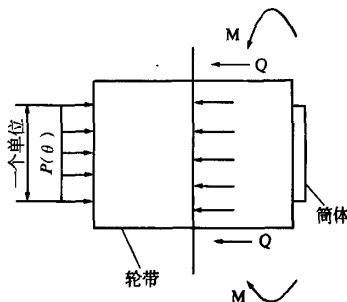


图 1 筒壁内力的计算模型

Fig. 1 Calculation model of silo internal forces

1.1.2 多余约束力的计算

采用能量法计算多余约束力。按卡氏定理, 截面 A 处的转角和水平位移为:

$$\begin{cases} \theta_A = \frac{\partial u}{\partial M_0} = \int_l \frac{M(\theta)}{EI} \frac{\partial M(\theta)}{\partial M_0} ds \\ u_A = \frac{\partial u}{\partial H_0} = \int_l \frac{M(\theta)}{EI} \frac{\partial M(\theta)}{\partial H_0} ds \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2009-02-16; 修订日期:2009-03-15

基金项目:江苏省 2007 年技术攻关重大项目(BE2007023)

作者简介:杨根喜(1966-)男, 江苏泰州人, 徐州工程学院副教授, 博士, 主要从事设备状态监测及故障诊断等方面的研究, E-mail: ygx@xzit.edu.cn

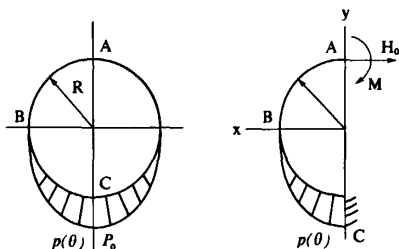


图2 筒壁内力图

Fig. 2 Distribution for silo internal forces

根据截面 A 处的变形,应有条件 $\begin{cases} \theta_A = 0 \\ u_A = 0 \end{cases}$

可求得

$$\begin{cases} H_0 = 0.716Q \\ M_0 = 0.712QR \end{cases} \quad (2)$$

根据筒壁内力绘出筒壁切向弯矩图,如图3所示。

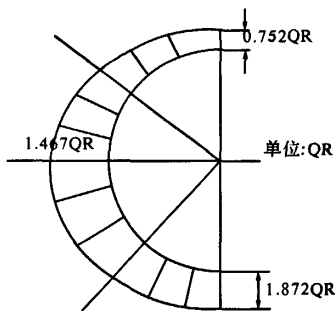


图3 弯矩图

Fig. 3 Bending mome $M(\theta)$

1.2 筒壁应力

1.2.1 弯曲应力

弯曲应力是重复变化的,对某一个固定截面,截面位于下端时,弯曲应力最大,计算简图如图4所示。任意截面(用角度 θ 表示)上任意点(用 p 表示)的弯曲应力为

$$\sigma_{\theta}^v = \frac{M(\theta)p}{I_s} = \frac{12M(\theta) \cdot p}{\delta^3} \quad (3)$$

式中: δ 为筒壁厚度。

1.2.2 温度应力

设筒体内半径为 R_i ,外半径为 R_o ;内壁温度为 T_i ,外壁温度为 T_o ;筒壁任意点为 r ;温度为 T ,根据傅立叶热传导定律,温度沿筒壁厚度的分布为^[4]

$$T = \frac{T_i \ln R_o - T_o \ln R_i}{\ln \frac{R_o}{R_i}} - \frac{T_i - T_o}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \cdot \ln r \quad (4)$$

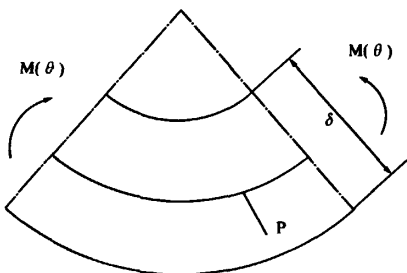


图4 筒壁弯曲应力模型

Fig. 4 Alternate stress model in silo

因 $R_o/R_i < 1.5$,可采用直线分布近似代替,即有:

$$T = \frac{T_i R_o - T_o R_i}{R_o - R_i} - \frac{T_i - T_o}{R_o - R_i} r;$$

$$\text{令 } A = \frac{T_i R_o - T_o R_i}{R_o - R_i}; -B = \frac{T_i - T_o}{R_o - R_i}$$

则可简化为 $T = A + Br$ 。

假设筒壁内外壁温度差对称于筒体轴线,对于任意点(r, θ)处所截的应力单元体上温度应力如图5所示。以径向位移 u 为基本未知量,得

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - u = (1 + \mu) \lambda B r^2 \quad (5)$$

式中: μ 为筒体材料的泊松比; λ 为线膨胀系数。

$$\sigma_{\theta}' = \frac{E}{1 - \mu^2} \left[\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} - (1 + \mu) \lambda T \right]$$

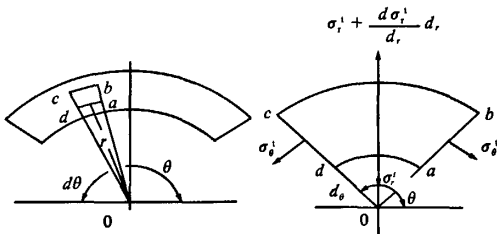


图5 筒壁温度应力单元体

Fig. 5 Temperature stress unite in silo

由边界条件: $\sigma_r' |_{r=R_i} = 0; \sigma_r' |_{r=R_o} = 0$,得

$$\text{内壁: } \sigma_{\theta}' |_{r=R_i} = -\frac{E\lambda(T_i - T_o)}{3} \left(\frac{2R_o + R_i}{R_o + R_i} \right) \quad (6)$$

$$\text{外壁: } \sigma_{\theta}' |_{r=R_o} = -\frac{E\lambda(T_i - T_o)}{3} \left(\frac{R_o + 2R_i}{R_o + R_i} \right) \quad (7)$$

1.2.3 残余应力-焊接温度应力

在焊接轮带处的挡块和垫板时,由于焊缝和基体之间的温度梯度,使得筒体施焊处产生压应力,局部产生塑性变形;而温度降低时,焊缝处因受周围的约束,筒体不能自由收缩,产生拉应力,该应力是引起垫块角焊缝开裂的主要影响因素。根据英国 BSI PD6493 文件及 CVDA - 1984 文件

《压力容器缺陷评定规范》,提出如下换算公式:

$$\sigma_r = \alpha_r \sigma_s \quad (8)$$

式中: $\alpha_r = 0.6$, 为换算系数; σ_s 为屈服强度。

2 筒体疲劳裂纹安全评定

断裂力学按照裂纹与载荷的相互关系和裂纹上下表面的相互位移概括成三类裂纹: 张开型(I型)、滑开型(II型)、撕开型(III型)。回转容筒体为薄壁大直径, 筒体类裂纹尺寸相对于筒体直径非常小, 故可以采用无限大平板裂纹理论来分析筒体焊缝裂纹。筒体应力主要包括轴向应力、沿筒体切向(圆周方向)的应力, 轴向应力对裂纹无贡献, 切向应力垂直于裂纹开裂方向, 属于张开型(I型)裂纹, 故对筒体裂纹开裂可采用I模型来分析研究。

2.1 平面裂纹的应力场和位移场

弹性力学平面问题, 归结为选取 Airy 应力函数 $U(x, y)$, 使其满足双调和式(9)和边界条件。

$$\nabla^2 \nabla^2 U = 0 \quad (9)$$

分析图6所示的平面裂纹体。裂纹面为自由边界, 远场有给定的面内外力或面内位移。坐标系原点选在裂纹右尖端O处。如把裂纹看作一部分边界, 用弹性力学的方法求得裂纹体的应力场和位移场。

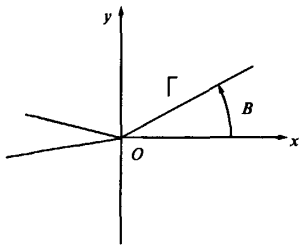


图6 平面裂纹体

Fig.6 Planar crackle body

裂纹面上边界条件为:

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0, \quad (\theta = \pm \pi) \quad (10)$$

按 G. C. Sih 的分析方法, 裂纹体在直角坐标下的应力场和位移场可写成如下形式:

$$\sigma_{ij}^{(N)} = \frac{K_N}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(N)}(\theta) \quad (11)$$

$$u_i^{(N)} = K_N \sqrt{\frac{r}{\pi}} g_i^{(N)}(\theta) \quad (12)$$

式中: $\sigma_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 为应力分量; $u_i (i = 1, 2, 3)$ 为位移分量; $N = \text{I, II, III}$, 表示裂纹类型; $f_{ij}^{(N)}(\theta)$ 和 $g_i^{(N)}(\theta)$ 分别是极角 θ 的函数。

由于裂尖应力应变场的奇异性, 不能再用应力作为裂尖场强度的描述参量, 为此引入应力强度因子的概念, I型裂纹强度因子可定义为:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \quad (13)$$

相应地可类似地定义 II 型、III 型裂纹的应力强度因子。

$$\begin{cases} K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, 0) \\ K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{yz}(r, 0) \end{cases} \quad (14)$$

2.2 裂纹模型

线弹性断裂理论中的断裂概念, 是指局部区域的裂纹产生失稳扩展而导致的断裂, 这种断裂是在低应力作用下, 材料在断裂前没有塑性变形, 故称为脆性断裂。断裂力学的基本假设是认为材料内部总是存在缺陷, 这些缺陷的力学效应可以用裂纹模型来描述。因为裂纹的尺寸比单元体小得多(至少在两个量级以上), 可以将单元体看成无限大平板, 内部存在长度为 $2a$ 的裂纹, 为计算方便, 将裂纹抽象成一个长轴为 $2a$, 短轴为零的扁平椭圆形裂缝, 在平板的边界上作用载荷 σ 、 σ' , 这些载荷是零件上的外载荷在裂纹部位产生的应力, 图7为评定缺陷的力学效应所建立的裂纹模型^[5-8]。

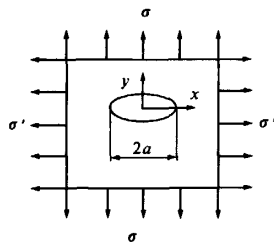


图7 裂纹模型图

Fig.7 Crack model

2.3 裂纹断裂的评定条件

2.3.1 材料的断裂判据

表征载荷在裂纹尖端产生的力学效应引入应力强度因子的概念, 应力强度因子的大小表示了裂端应力场的强弱, 而不是某个应力分量的大小, 应力强度因子用字母 K 表示。于是, 按应力强度因子的概念建立了零件的断裂判据为

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (15)$$

按文献[4]对于无限大物体表面有半椭圆裂纹, 远处受均匀拉伸时的应力强度因子 K_I 的表达式为

$$K_I = \frac{1.1 \sigma \sqrt{\pi a}}{\phi} = Y \sigma \sqrt{a} \quad (16)$$

式中： $Y = \frac{1}{\phi} \sqrt{\pi}$ ； ϕ 为裂纹的第二类椭圆积分； a 为裂纹深度； σ 为裂纹体承载的应力； Y 为裂纹形状系数。

2.3.2 脆性断裂评定

按文献[4]的断裂 K 判据有： $K_I \geq K_{IC}$ 。由式(16)得临界裂纹尺寸的计算公式为

$$a_c = \frac{1}{Y^2} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma} \right)^2 \tag{17}$$

根据材料的 K_{IC} 可以评定材料的脆断倾向,但是,对回转窑筒体来说,在一定工作应力下,用临界裂纹尺寸 a_c 更能明确表示筒体的脆断倾向。在回转窑筒体中常见的裂纹是表面半椭圆裂纹,从安全考虑取 $Y = 2$ 。如果再忽略塑性区的影响,则由式(17)可得

$$a_c = 0.25 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma} \right)^2 \tag{18}$$

2.4 回转窑筒体焊缝裂纹安全评定

(1) 筒体材料为 15 MnVR,其基本力学性能见表 1。

表 1 15 MnVR 基本力学性能
Tab. 1 Basic mechanical properties

性能类别	范围	给定值
屈服极限 σ_s /MPa	333 ~ 412	350
强度极限 σ_b /MPa	490 ~ 549	350
冲击韧度 a_k /($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$)	7 ~ 9	8
延伸率 δ /%	17 ~ 19	18
弹性模量 E /GPa	206	206
断裂韧度 K_{IC} /MPa	152 ~ 166	158

(2) 裂纹体应力。回转窑 IV 号挡轮附近处筒体焊缝裂纹如图 8 所示。由于引起裂纹扩展的应力有:载荷工作应力 σ_θ^w 、温差温度应力 σ_θ^t 、残余应力 σ_θ^r 等,它们之和就是作用于裂纹体的应力,即:

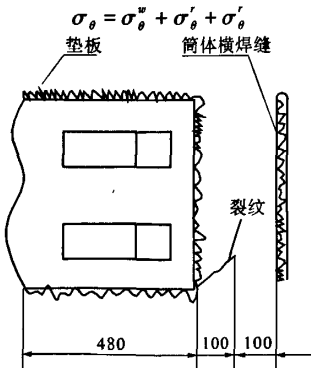


图 8 IV 挡附近裂纹示意图
Fig. 8 Shelves IV near crack

计算得到 IV 号挡轮附近处筒体等效拉应力为 210 MPa。

(3) 确定裂纹临界尺寸 a_c 。由公式(18),可得

$$a_c = 0.25 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma} \right)^2 = 0.25 \left(\frac{158}{210} \right)^2 = 0.141 \text{ m}$$

由于裂纹临界尺寸为 141 mm,而回转窑 IV 号挡轮附近处筒体厚度仅为 90 mm,所以筒体在开裂的过程中不会产生失稳扩展。从现场裂纹扩展统计看,筒体焊缝裂纹的扩展速度都比较平稳,而非失稳扩展。

3 结论

笔者针对某水泥厂筒体焊缝开裂,通过力学分析,表明引起垫板处筒体焊缝开裂的筒壁应力是沿筒体切向(圆周方向)的应力,一般包括弯曲应力 σ_θ^w 、温度应力 σ_θ^t 、残余应力 σ_θ^r 等。并从工程应用价值出发,采用基于断裂力学理论对筒体某具体焊缝进行计算,得出只有裂纹深度大于 141 mm 的裂纹,才会产生失稳扩展,由于筒体厚度为 90 mm,故筒体焊缝裂纹不会产生失稳扩展,这正与现场裂纹统计情况相符。

参考文献:

[1] 刘 媛,吕运冰,黄 婧. 疲劳裂纹扩展公式中材料常数的统计相关性及其疲劳扩展寿命预测[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2004,28(6): 870 ~ 872.

[2] 周 驰,崔维成. 用现有疲劳试验数据确定疲劳裂纹扩展率[J]. 中国造船,2003,44(3): 71 ~ 79.

[3] 张洪才,陈举华,黄克正. 使用疲劳裂纹扩展数据的疲劳裂纹扩展的可靠性分析方法[J]. 机械科学与技术,2003,22(3): 384 ~ 385.

[4] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,1994.

[5] 杨根喜. 大型选粉机故障振动诊断及回转窑筒体裂纹研究[D]. 北京:中国矿业大学博士学位论文,1997.

[6] KIHHL D P, SARKANI S, BEACH J E. Stochastic fatigue damage accumulation under broadband loading [J]. Int. J. Fatigue, 1995, 17(5): 321 ~ 329.

[7] AHMED A, IWONA J. Crack initiation and propagation in materials with randomly distributed holes [J]. Engng. Fract. Mech, 1997, 58(5): 395 ~ 420.

[8] XING J, ZHONG Q P, HONG Y J. A simple log normal random rocess approach of the fatigue crack growth considering the distribution of initial crack size and loading condition [J]. Int. J. Fatigue, 1997, 74(1): 7 ~ 12.

能够得到克服或改善,从而使纵扭型超声电机在工程中能够获得广泛的应用。

参考文献:

- [1] 赵淳生. 21 世纪超声电机技术展望[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 120(1): 7-8.
- [2] 陈永校, 郭吉丰. 超声波电动机[M]. 杭州: 浙江大学出版社.

- [3] 王矜奉, 姜祖桐, 石瑞达. 压电振动[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 123(5): 80-85.
- [4] 郭吉丰, 魏燕定. 纵扭复合型超声波电机的力传递模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 123(5): 80-85.
- [5] 赵横兵, 刘晓东, 陈永校. 大扭矩超声电机的结构分析[J]. 微特电机, 1999, (4): 15-18.

Comparison of the Traveling-wave Ultrasonic Motor with the Ultrasonic Motor Using Longitudinal and Torsional Vibration Model

TAO Zheng, LIU Ben-xue

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on current development of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration modes and the traveling-wave ultrasonic-motor, this paper analyze them in detail from three aspects: driving mechanics of the ultrasonic-motor, energy conversion based on convert piezoelectric effect of piezoelectric ceramic and contact form between stator and rotor; it points out that the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration models has more dominance to improve performance of the motor than the traveling-wave types; also, it briefly illustrates some disadvantages on preventing the development of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration modes. Finally, this paper indicates that the perspective of the ultrasonic-motor using longitudinal and torsional vibration model is beautiful.

Key words: ultrasonic motor; convert piezoelectric effect; elliptical movement; model

(上接第 55 页)

Establishment and Security Evaluation of Crack Model on Cement Rotary Kiln

YANG Gen-xi, LI Ju-li

(Mechanical and Electronic Engineering Department, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The rotary kiln is one of the key equipment in the cement production line, which greatly affects the yield and quality of product. Focusing on the question of the cement rotary kiln's weld line crack along the axis of the tube body, the mechanics analysis was made based on the belt and the tube body. The result indicated that the stresses which bring forth the weld line crack mainly include bending stress, temperature stress, residual stress, etc. This paper established a mechanics model of weld line crack on tube body, while the fracture mechanics and elastic and plastic mechanical were taken into account, and the fracture criterion of weld line crack was made according to the stress intensity factor. Through the security evaluation of the crack, the spot crack statistics verified the accuracy of the model and the evaluation method, and the crack critical size was proved to be 141 mm.

Key words: rotary kiln; fracture mechanics; crack; security evaluation