

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.010

碟式分离机转鼓应力的无线测试与仿真对比研究

王森哲¹, 张永政², 李文俊², 吕卓建², 梁利华^{1*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江轻机实业有限公司, 浙江 杭州 311401)

摘要:针对碟式分离机转鼓在运行情况下应力测试难的问题,在碟式分离机转鼓试验台上,对两种不同的结构(单个转鼓和转鼓组件)开展了无线动态应力测试,并结合有限元仿真进行了对比研究。采用WiFi无线通讯技术进行电阻应变测试实验,直接获得不同位置不同转速下的转鼓内壁应力应变数据,并与行业标准JB/T 8051-2008《离心机转鼓强度计算规范》和有限元仿真分析得到的结果进行对比分析。研究结果表明,将有限元法的计算结果和实验数据进行了比较,两者基本吻合;空转鼓旋转时,转鼓组件鼓壁内的环向应力大于单个转鼓鼓壁内的环向应力,而且随着分离机转速的提高,两者相差越大;单个转鼓的应力情况跟规范基本吻合,说明直接使用规范中的公式会有一定偏差。

关键词:分离机转鼓;动态测试;有限元;电测法

中图分类号:TH16;TS223.6;O348.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0740-05

Comparison of wireless testing and simulation of disc separator drum stress

WANG Sen-zhe¹, ZHANG Yong-zheng², LI Wen-jun², LV Zhuo-jian², LIANG Li-hua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Qingji Industry Co., Ltd., Hangzhou 311401, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of testing the stress of the disc separator drum under running condition, in the disc separator drum test bed, two different structures (single drum and drum assembly) were subjected to wireless dynamic stress testing, and compared with finite element simulation. Using the WiFi wireless communication technology for resistance strain testing experiments, the stress and strain data of inner wall of drum were obtained directly under different positions and different rotating speed, and compared with the results of comparative analysis of JB/T 8051-2008 "centrifuge drum strength calculation norms" and finite element simulation analysis. The results indicate that the calculated results of the finite element method are in good agreement with the experimental data. It finds that the hoop stress in the drum wall is larger than that of the single drum cylinder when the empty drum is rotating, and with the increase of the rotation speed, the difference is bigger; but the stress condition of the single drum is basically consistent with the specification, indicating that the formula in the direct use of the specification will have a certain deviation.

Key words: separator drum; dynamic testing; finite element; electrical measurement

0 引言

碟式分离机是利用转鼓高速旋转产生的离心力,

将由两种不同比重的物质所组成的混合物(液—液、固—液等)分离开来。它被广泛地应用于化工、轻工、医药等领域。分离机工作时,由于高速旋转,使转鼓等

收稿日期:2016-12-15

作者简介:王森哲(1991-),男,浙江诸暨人,硕士研究生,主要从事应力测试、有限元仿真、结构强度方面的研究. E-mail:780137192@qq.com

通信联系人:梁利华,男,教授,博士生导师. E-mail:lianglihua@zjut.edu.cn

部件承受极大的离心应力作用。分离机械行业所使用的 JB/T 8051-2008《离心机转鼓强度计算规范》^[1],是在薄壁圆筒模型的基础上,对零件的受力情况进行计算,但是转鼓组件由筒体、钵盖、大螺帽等组成,所以标准不能完全满足实际情况计算要求。

为了能够更精确地获得转鼓部件的受力情况,近几年国内外研究人员对分离机转鼓开展了仿真研究,取得了大量有价值的成果^[2-4]。基于有限元仿真技术,虽然能为工程问题提供较高的计算精度,但由于涉及边界条件和模型简化问题,未经实验测试与验证,很难得到工程界的肯定和应用。有科研机构利用实验台对离心机转鼓进行电测试验^[5],由于试验台设计成卧式,且在轴刚性条件下工作,跟实际情况有所不同。吴家骥等^[6]利用原机进行全转速应力测试,但是集流环容易损坏而且振动容易产生误差等影响。无线应力应变测试具有测试稳定性强、精度高、低功耗、高效率、高可靠性等优点,在特种设备检测中得到了越来越广泛的应用^[7]。

本研究将以浙江轻机实业有限公司生产的 LX460 碟式离心机为例进行仿真分析与应力测试,探讨转鼓筒体和转鼓组件的不同应力应变状态,为转鼓应力计算的工程应用提供参考。

1 分析对象与测试工况

碟式分离机的转鼓组件主要由筒体、钵盖、大螺帽等零件组成,组件结构、粘贴位置图如图 1 所示。

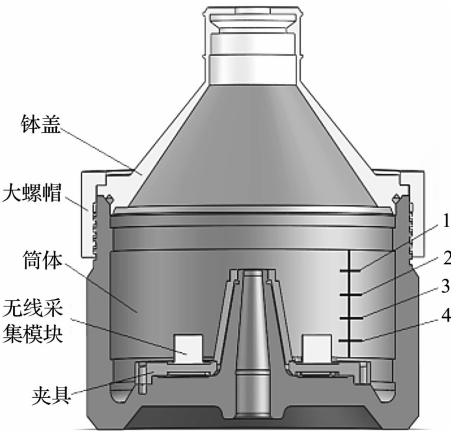


图 1 组件结构、粘贴位置图

笔者以 LX460 碟式分离机的转鼓及转鼓组件为研究对象,其筒体材料为 00Cr13Ni5Mo 马氏体/铁素体不锈钢,转鼓筒体内径为 395 mm,平均半径 $r_2=213.75$ mm。

材料性能参数如表 1 所示。

表 1 材料性能参数

材料	密度/ kg · m ⁻³	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa
00Cr13Ni5Mo	7 790	210	0.3	810	850

1.1 测试装置

应变片型号为 BX120-2AA。敏感栅尺寸:长 2 mm,宽 1 mm;基底尺寸:长 4.5 mm,宽 2.5 mm;电阻值 $120 \pm 0.2 \Omega$;灵敏系数 $2.08 \pm 1\%$ 。

本次试验采用某电子设备公司制造的型号 TST5923 的无线动态信号测试分析系统。无线动态信号测试分析系统主要是基于无线应变传感器节点的一种数据采集系统,主要由数据采集软件、无线应变节点、导线及应变片组成。无线动态信号测试分析系统如图 2 所示。



图 2 无线动态信号测试分析系统

其主要原理是将应变片的阻值变化通过无线应变传感器节点(采集模块)转变为电压信号,无线传输给计算机,利用应用软件对采集到的电压信号进行处理分析,采集模块由电源模块进行供电。实验前采用等效应变源对该系统进行静态数据采集,得到系统的静态总误差不大于 0.5%,符合预期。

为固定采集模块和电源模块,本研究在不破坏转鼓结构的基础上同时需要考虑不影响转鼓筒体正常运转时的受力情况,设计专用夹具,如图 1 所示。夹具材料选用强度较高,质地较轻,牌号为 2A02 的铝合金。由于夹具是额外加上去的,需要进行动平衡试验(配重法),待动平衡符合要求后再进行后续试验。

1.2 测试方案

为得到实验数据,本研究将碟式离心机转鼓安装到立式转轴上,根据有限元分析得到的理论解,测试随转速变化的环向应变值。在转鼓筒体内壁相应位置用 502 胶粘贴应变片并从上到下编号为 1、2、3、4,分别对应距离上边沿 24 mm,48 mm,72 mm,96 mm,图 1 为模型上的粘贴位置,相应的实际粘贴位置如图 3 所示。

选取这些点的原因有二:



图 3 实际粘贴位置

(1) 这些位置壁厚均匀, 又容易贴片, 能够得到相对正确的数据;

(2) 筒体轴向均匀间隔选取位置, 可以对轴向上的应力数据进行对比。

检查合格后进行紫外线灯烘干处理, 用兆欧表测试绝缘性是否良好, 一般在 50 MΩ 以上为宜。应变片桥路采用半桥连接, 进行温度补偿。并使用屏蔽电缆作导线, 捆扎牢靠, 防止松动。待粘结固化后, 开启由变频器控制的转鼓电机。同时开启软件设置相关参数, 平衡, 清零, 采集数据。实时观测数据并记录, 最后进行数据处理。

本次试验转速分别设定为 720 r/min, 1 080 r/min, 1 440 r/min, 2 160 r/min, 2 520 r/min。需要说明的是, 试验转速一直控制在 3 000 r/min 以下, 其原因为:

(1) 多次试验表明, 高转速下对应变片的影响较大, 导致测试不准确;

(2) 只要在一定条件下进行实验测试, 并与有限元结果仿真对比, 验证有限元模型, 则当材料处于线弹性范围内, 基于应力分析方法和有限元仿真可以很好地开展评定。

本研究对单个转鼓筒体鼓壁内的环向应力与转鼓组件的环向应力两种工况, 分别进行测试。试验时组件实际工作图如图 4 所示。

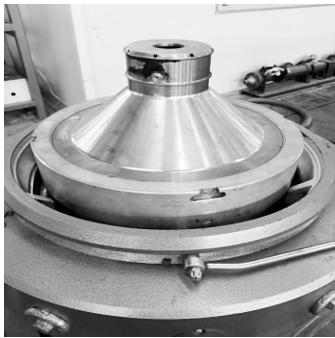


图 4 组件实际工作图

2 分离机转鼓应力分析方法

2.1 基于 JB/T8051-2008

由于转鼓质量、物料质量和筛网质量作用于转鼓上产生的总应力是三者的叠加, 并不存在相互影响的关系^[8-9], 本研究在建立模型时只计算转鼓自身质量所引起的鼓壁应力。根据《JB/T8051-2008 离心机转鼓强度计算规范》, 空转鼓旋转时鼓壁内的环向应力, 按下式计算:

$$\sigma_1 = 10^{-9} q \rho_1 r_2^2 \omega^2 \tag{1}$$

式中: q —转鼓开孔引起的表观密度减小系数, 对于不开孔转鼓, $q = 1$; ρ_1 —转鼓材料的密度, g/cm^3 ; r_2 —转鼓壁平均半径, mm ; ω —角速度, rad/s ; σ_1 —公式计算得到的环向应力, MPa 。

值得注意的是, 规范仅提供转鼓的计算公式, 并没有考虑组装后其它部件对其的约束和影响。

不同转速下的解析解如表 2 所示。

表 2 不同转速下的解析解

	不同转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)				
	720	1 080	1 440	2 160	2 520
应力值/MPa	2.02	4.55	8.09	18.21	24.79
应变值/ μ	9.64	21.68	38.54	86.72	118.03

2.2 基于有限元分析

为了对转鼓组件鼓壁内的环向应变与单个转鼓筒体的环向应变进行对比, 本研究分别针对这两种工况进行有限元分析。

(1) 工况一。对于单个筒体结构相对简单, 对整个模型进行分析。筒体的有限元模型如图 5 所示。

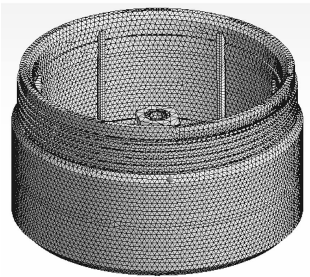


图 5 有限元模型图

(2) 工况二。对转鼓组件的结构和受力进行分析可以发现, 它们承受的载荷是轴对称的。因此, 为节省计算时间, 建立 1/4 模型进行分析。

涉及到边界条件时, 将筒体, 钵盖和大螺帽两两

之间的接触类型为有摩擦接触,摩擦系数为 0.2,其余为绑定接触,比如夹具和筒体的接触等。转鼓筒体与转轴相连处施加轴向约束。转鼓组件旋转时由于自身质量而引起离心力作用。另外,由于 Ansys 在处理圆角和倒角会产生大量的单元,所以本分析模型忽略非重点分析区域的圆角和倒角等局部微小特征,进行模型简化。为使分析结果更加准确,将几何模型进行映射网格划分,单元总数为 37 312,节点总数为 116 314。

有限元模型如图 6 所示。

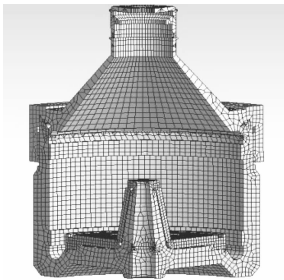


图 6 有限元模型

3 结果对比和分析

考虑实验误差,比如应变片和仪器二者的灵敏系数不一致,可用下式进行修正:

ε = (K采 / K应) * ε采 (2)

式中:ε—真实应变值,ε采—测量的原始读数,K采—采集模块的灵敏系数,K应—应变片的灵敏系数。

3.1 工况一的试验结果和分析

1~4 号测点的试验测得的环向应变,有限元分析得出的环向应变和对比如表 3 所示。

表 3 实验值、有限元解、解析解对比

位置	对比项目	转速/(r·min ⁻¹)				
		720	1 080	1 440	2 160	2 520
1	有限元/μ	10.76	24.10	42.9	95.96	130.82
	实验/μ	11.54	26.33	43.02	97.16	128.97
	对比/(%)	7.28	9.24	0.28	1.25	-1.42
2	有限元/μ	10.58	23.62	41.76	93.48	126.23
	实验/μ	11.43	23.24	44.09	95.05	127.12
	对比/(%)	8.05	-1.63	5.59	1.68	0.71
3	有限元/μ	9.89	21.24	39.26	87.60	117.61
	实验/μ	9.03	22.92	37.26	93.98	112.56
	对比/(%)	-8.73	7.89	-5.09	7.29	-4.29
4	有限元/μ	9.01	20.23	35.50	79.35	108.31
	实验/μ	8.73	21.23	36.83	82.49	101.07
	对比/(%)	-3.13	4.94	3.74	3.96	-6.68

根据表 3 可得以下结论:

(1)对比实验值,有限元理论解,以及根据标准《JB/T8051-2008 离心机转鼓强度计算规范》所得的解析解,得出最大总误差控制在 10% 左右,此误差在可接受范围内。但是有限元解和实验值更加接近,说明有限元法适合用来进行结构强度计算;

(2)此工况下,实验值和有限元值对比解析解,相差不大,说明标准解释的薄壁圆筒模型在一定条件下可以作为转鼓筒体的力学模型。

3.2 工况二的试验结果和分析

1~4 号测点的试验测得的环向应变,有限元分析得到的环向应变以及对比如表 4 所示。

表 4 实验值、有限元解对比

位置	对比项目	转速/(r·min ⁻¹)				
		720	1 080	1 440	2 160	2 520
1	有限元/μ	11.70	26.04	46.74	105.09	143.59
	实验/μ	10.94	24.33	44.21	101.83	139.65
	对比/(%)	-6.48	-6.55	-5.41	-3.10	-2.74
2	有限元/μ	11.07	25.36	46.18	103.59	141.31
	实验/μ	10.18	23.62	43.88	100.76	138.01
	对比/(%)	-8.06	-6.85	-4.98	-2.73	-2.34
3	有限元/μ	11.11	24.13	44.37	99.65	135.40
	实验/μ	10.49	23.30	43.44	98.24	134.08
	对比/(%)	-5.60	-3.42	-2.09	-1.42	-0.97
4	有限元/μ	10.28	22.24	41.23	91.51	126.80
	实验/μ	10.00	20.97	39.89	89.91	125.41
	对比/(%)	-2.75	-5.70	-3.25	-1.75	-1.10

根据表 4 可得以下结论:

(1)实验值和有限元理论值吻合的很好,说明有限元分析有一定的可靠性;

(2)不同位置(距离)的环向应变在相对低转速时变化不大,随着转速的提高变化明显;

(3)转鼓组件应变值比单个转鼓筒体应变值要大,而且和解析解相差比较大,说明应力直接用标准中的公式求解不完全适应实际情况的计算要求。

以位置 3 为例,比较表 3 和表 4 的有限元数据,发现转鼓组件鼓壁内的环向应力比单个转鼓筒体的环向应力大 12%~15% 左右,而且随着转速的提高,差值越大。试验结果验证了这样的变化趋势。出现这样的情况,主要原因是安装其他部件以后,相互之间的约束和影响,导致转鼓鼓壁环向应力发生变化。

转速-环向应变图如图 7 所示。

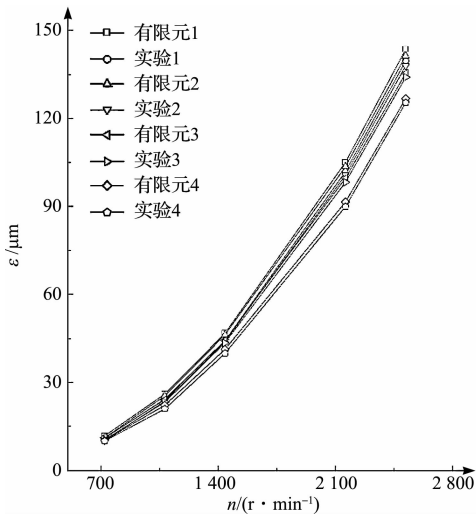


图7 转速-环向应变图

距离-环向应变图如图8所示。

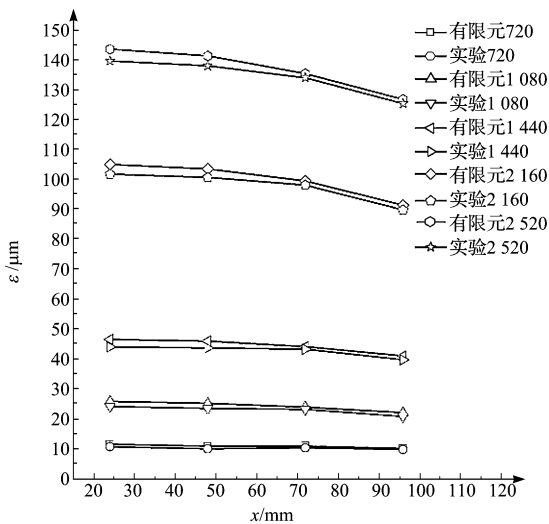


图8 距离-环向应变图

4 结束语

本研究提供了一种在旋转工况下的电测方法。从实验的角度验证了有限元法的合理性,试验结果表明,

该套采集系统和夹具可以用于旋转机械的应力应变信息采集。对比单个转鼓筒体和转鼓组件发现,转鼓组件鼓壁的环向应力和单个转鼓筒体不同,更是和解析解不同,说明:JB/T8051-2008《离心机转鼓强度计算规范》提出的环向应力计算公式用于转鼓组件有一定偏差,需要进一步的修正才能更好地适应工程应用。

在下一阶段,本研究将在减少试验误差,完善边界条件的基础上,将在有操作液和处理液的正常工况条件下进一步开展电测试验。同时根据有限元计算和实验结果进行强度评定研究。

参考文献 (References):

- [1] JB/T 8051-2008. 离心机转鼓强度计算规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 张元祥,梁利华,吴将天. 分离机转鼓强度评定方法的对比研究[J]. 轻工机械,2014,32(2):28-32.
- [3] 陈科,黄海元,郑红梅,等. 基于Workbench的碟式分离机转鼓应力等效线性化分析[J]. 流体机械,2014(9):31-34.
- [4] ANGHEL C I. A study concerning elastic analysis of disk centrifugal separators[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering**, 1997, 144(3-4):275-285.
- [5] 杨龙祥,高淑之. 离心机转鼓应力电测技术的研究[J]. 流体工程,1986(3):5-10,65.
- [6] 吴家骥,周涌泉,彭惠苓,等. 碟式分离机原机全转速转鼓应力测试的研究[J]. 流体工程,1990(5):8-13.
- [7] 王晓亮,陈卫卫,马东云. 无线应力应变测试技术在游乐设施检验中的应用[J]. 中国特种设备安全,2016,32(9):39-44.
- [8] 姜毓圣,袁惠新,付双成,等. 卧式螺旋卸料次降离心机内部流场与分离性能的研究[J]. 流体机械,2016(4):29-35.
- [9] 谭蔚,周连刚,朱企新. 离心机转鼓强度计算规范中开孔系数的讨论[J]. 化工机械,2007,34(3):148-150.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王森哲,张永政,李文俊,等. 碟式分离机转鼓应力的无线测试与仿真对比研究[J]. 机电工程,2017,34(7):740-744.

WANG Sen-zhe, ZHANG Yong-zheng, LI Wen-jun, et al. Comparison of wireless testing and simulation of disc separator drum stress[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(7):740-744.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>