

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.06.006

碟式分离机高速转鼓 ANSYS 应力分析及实测验证

薛晓宁^{1*}, 倪植¹, 牟富君², 刘焕牢¹, 张青华³, 陆文², 何建华¹

(1. 广东海洋大学机械与动力工程学院, 广东 湛江 524088;
2. 江苏巨能机械有限公司, 江苏 宜兴 214261; 3. 北京睿拓时创科技有限公司, 北京 100029)

摘要:为了分析碟式分离机的转鼓体应力分布的情况,课题组应用 ANSYS 有限元分析法建立了转鼓的分析模型。锁环螺纹联接、转鼓内装件都会对转鼓体应力分布及大小产生直接影响,因此,对包含内装件的真实转鼓进行了建模仿真分析。探讨了薄厚碟片组对转鼓体应力场与位移场的影响,并利用光学法数字图像相关(DIC)非接触测量仪器及专用软件,对空载转鼓体外圆壁面的位移场分布进行了实测。研究结果表明:该碟式分离机转鼓体的应变(位移)场的仿真分析结果与实测结果的位移场分布规律相近;转鼓体内侧底部处的应力负荷最大处位于靠近碟片架内侧处;依据实测数据有待对有限元分析模型的建模方法做进一步的改进。研究结果对碟式分离机转鼓的结构优化、复杂组合结构的转鼓总成的有限元建模具有直接的参考作用。

关键词:碟式分离机;转鼓;有限元;应变;应力;数字图像相关技术

中图分类号:TQ051.84;TH140.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)06-0037-06

ANSYS Stress Analysis and Measuring Verification on Disc Separator's High Speed Bowl

XUE Xiaoning^{1*}, NI Zhi¹, MOU Fujun², LIU Huanlao¹,
ZHANG Qinghua³, LU Wen², HE Jianhua¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;
2. Jiangsu Juneng Machinery Co., Ltd., Yixing, Jiangsu 214261, China;
3. Beijing Ruituo Technology Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: In order to analyze the strain distribution of the bowl body in disc separator, a finite element analysis (FEA) simulation model of the bowl was established by using ANSYS finite element analysis technology. The threaded connection of the lock ring and the bowl fittings were in effect on the strain distribution and the size of the bowl body. Therefore, simulation analysis was carried on and the influence of thin and thick disc group on the strain and displacement field of the bowl body was discussed. By means of optical non-contacting measurement instrument digital image correlation (DIC), the displacement field distribution of the bowl body outside the round wall was measured. The results show that the displacement field distribution stimulation results of the bowl body of the disc separator is similar to that of the measured results. The maximum strain load is located near the inner side of the disc frame at the bottom of the bowl body. According to the measured data, the modeling method of finite element analysis model needs the further improvement and optimization.

Keywords: disc separator; bowl; FEA (finite element analysis); stress; strain; DIC (digital image correlation technology)

收稿日期:2021-06-27;修回日期:2021-09-23

基金项目:国家自然科学基金(52175458);广东省自然科学基金(2021A15150110591)。

第一作者简介:薛晓宁(1962),男,青海西宁人,硕士,副教授,主要从事碟式分离机离心流场流体动力学、高速转鼓结构应力的仿真与实测、转子动力学、转鼓动平衡的应用基础研究,高性能胶乳分离机研发。E-mail: gdouxue@126.com

碟式分离机具有分离效率高、结构紧凑及处理量大等优势,广泛应用于生物工程、石油、化工、乳品加工、食品、饮料、制药、天然橡胶浓缩及油脂等行业^[1-3],是应用最广的离心分离机械之一。研究者通过转鼓关键结构、结构参数和工作参数的设计来实现不同物性参数物料、特别是难分离流体物料的高效分离。江苏巨能机械有限公司提供的碟式分离机转鼓额定工作转速为11 600 r/min,转鼓体外表面直径为223 mm,转鼓外壁面的线速度达到135.8 m/s。转鼓体是转鼓总成中的关键零件之一,在高速旋转离心力作用下,转鼓体不仅受到自身质量离心力产生的环向应力和分离物料产生离心液体压力,而且还必须考虑与其接触的其他零部件对其施加的载荷。为保障碟式分离机在高速工况下的强度及运行安全,开展转鼓体应力研究十分必要。

学者们对碟式分离机转鼓的力学特性进行了大量的相关研究。曲淑艳等^[4]分析了碟式分离机工作转速升高后转鼓内固体物料积渣对分离机振动的影响,得到转速升高后转鼓体底部最先出现损伤的结论。季梅莲等^[5]研究表明转鼓转速提升后密封腔受到剧烈的离心循环载荷易产生疲劳破坏。因此,准确预测转鼓体的环向应力分布情况是评估碟式分离机承载能力的重要指标。在碟式分离机转鼓应力研究方面,近年薛晓宁带领团队做了较系统的研究^[6-9],综合考虑了流体力学压力、内装件质量离心力及装配接触行为并进行了有限元分析,发现实际裂纹、变形产生部位与有限元分析结果相吻合。赵志国等^[10]针对油水分离机进行三维模型的有限元计算,分析了转鼓的转鼓体应力与应变的分布情况。张元祥等^[11]将仿真分析结果与JB/T 8051—2008标准对比,发现该标准设计的转鼓强度偏于保守。王森哲等^[12]利用无线动态信号测量系统测取胶乳分离机转鼓体内壁环向应变值并进行了仿真分析。由于胶乳分离机转鼓内部装有碟片架、碟片和碟片压盖等110多个零部件组成的内装件,无线遥测的数据采集发射及电源模块在不拆除内装件的情况下根本无法安装,故王森哲的实测数据是在拆除所有内装件和低速的情况下进行的。由于无线遥测从工作原理上只适合开放空间中信号的传输,而敷设在转鼓内壁的应变片测得的应变信号是靠采集模块从高速旋转的转鼓盖顶直径约50 mm的孔口“钻出去”以通信方式传输信号。因此信号在传输过程中受到转鼓内部结构阻挡和高速旋转产生的噪声及气流扰动等干扰。这2个因素影响了信号的精度、稳定性和可靠性。另外,胶乳分离机工作转速一般为7 200 r/min,而测试时转鼓最高转速取到

2 500 r/min,即便在2 500 r/min的转速下元器件受到的离心应力负荷对测试数据可靠性的影响也不容忽视。因此需要寻找其他方法来完成转鼓内壁的应变测试。

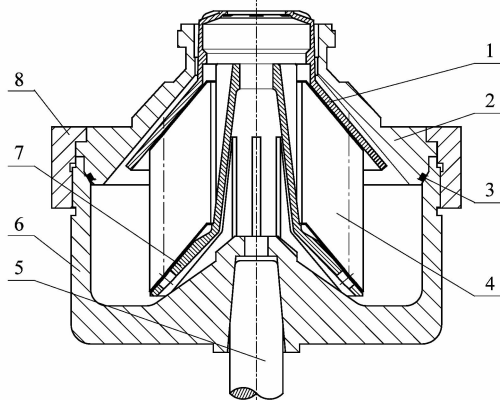
DIC技术具有非接触、高精度和使用方便等优点,所以课题组采用了一种非接触式的光学测量方法+数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)。DIC精密测量应变时,通过高速相机系统捕捉采集运动过程中结构表面的特征散斑图,分析变形前后的灰度值^[13],与双目立体视觉技术相结合,能够测量物体三维结构的运动状况和变形情况。潘济宇等^[14]使用3D-DIC技术对船用螺旋桨系统外部参数进行标定,消除了由于桨毂偏移引起的刚体位移,获得了螺旋桨叶根部在旋转下的变形点云相。

课题组采用ANSYS Workbench分析某型号碟式分离机在额定转速下转鼓体应力-应变场,并利用美国CSI公司VIC-3D测量系统实测数据,与仿真数据进行对比分析。

1 分析用分离机及测试

1.1 转鼓的结构及参数

碟式分离机为外悬外重心立式结构,传动系统通过立轴带动转鼓高速旋转,测试台架通过变频器实现无级调速。测试台架用的碟式分离机是经过仔细测试挑选,整机制造、装配及动平衡精度指标均达到优等品要求,机器运行非常平稳,工作转速时机身靠近上轴承处径向振动烈度小于1.6 mm/s。转鼓如图1所示,由转鼓体、碟片架、碟片组、碟片压盖、转鼓盖和锁紧环等部件组成。转鼓体和转鼓盖为2507不锈钢,碟片架、碟片压盖和碟片为316不锈钢,锁紧环为14Cr17Ni2,转鼓零件材料参数如表1所示。



1—碟片压盖;2—转鼓盖;3—橡胶密封圈;4—碟片组;5—立轴;6—转鼓体;7—碟片架;8—锁紧环

图1 转鼓结构

Figure 1 Structure of bowl

表1 转鼓材料参数
Table 1 Parameters of bowl

材料名称	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa
SAF2507			0.300	650	800
316L	7 900	189	0.300	205	520
14Cr17Ni2	7 750	193	0.300		1 080

1.2 测试原理

DIC 技术源自 20 世纪 80 年代日本和美国的科学家相继独立提出的数字散斑相关方法^[15-16],通过 2 台不同方位相机同时对一个目标进行数据采集,比较试件变形前后散斑图像的灰度值,再采用抗干扰能力强的零均值归一化最小平方距离函数^[17-18]对变形前后的散点位置进行相关匹配计算,获得材料瞬态变形过程的光学全场信息,该函数计算公式为^[19]:

$$C_{f,g}(\mathbf{p}) = \sum_{(i,j) \in M} [F(x_i, y_j) - G(x_i^*, y_j^*)]^2.$$

其中:

$$\mathbf{p} = (u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}).$$

式中: $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 表示变形后图像子区的位移梯度;

u 和 v 分别为 x 轴与 y 轴方向的位移; $C_{f,g}(\mathbf{p})$ 为变形前后的散点平均最小平方距离; $F(x_i, y_j)$ 为变形前区域中任意点坐标 (x_i, y_j) 的标准化函数; $G(x_i^*, y_j^*)$ 为变形后区域中任意点坐标 (x_i^*, y_j^*) 的标准化函数; $\mathbf{p}$ 为测量目标的计算变形矢量。

$F(x_i, y_j)$ 和 $G(x_i^*, y_j^*)$ 的表达如下:

$$F(x_i, y_j) = \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in M} [f(x_i, y_j) - f_m]^2}};$$

$$G(x_i^*, y_j^*) = \frac{g(x_i^*, y_j^*) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in M} [g(x_i^*, y_j^*) - g_m]^2}}.$$

式中: $f(x_i, y_j)$ 是变形前区域中的点 (x_i, y_j) 的灰度值; $g(x_i^*, y_j^*)$ 是变形后区域中的点 (x_i^*, y_j^*) 的灰度值; M 代表子区内所有组成的集合; f_m 和 g_m 是变形图像的灰度平均值。

f_m 和 g_m 计算公式为:

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(x_i, y_j)}{n(M)};$$

$$g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(x_i^*, y_j^*)}{n(S)}.$$

式中 $n(M)$ 是集合 M 内点的总数。

由于获得可靠的 DIC 分析结果与合适的散斑分布及大小密切相关,采用 DIC 散斑设计软件“光绘”来设计数字散斑图像。

1.3 测试方案

图 2 所示为转鼓测试系统示意图,拆除台架分离机的进出料系统、上机身,让转鼓完全暴露以便拍照,在安装平台上调试确保立轴呈垂直状态,将 2 台高速摄像机放置在两台大功率无影照明灯前方。

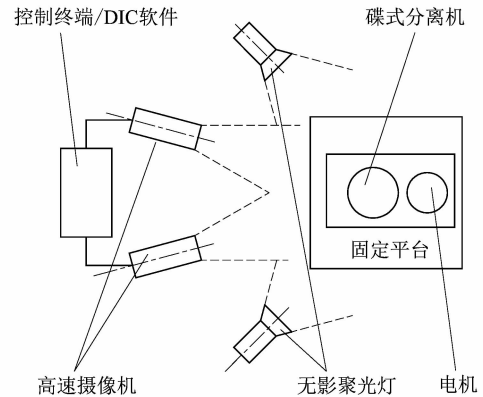


图2 转鼓测试系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of bowl test system

2 转鼓应力有限元分析

2.1 网格划分

考虑到转鼓和螺纹结构的复杂性,为了在保证精度的前提下计算能够收敛,转鼓锁紧环与筒体之间的螺纹副建模时需通过忽略非重要的圆角及倒角特征加以简化,模型的网格划分如图 3 所示。采用 Solid187 非结构网格单元对转鼓体、碟片、碟片架和碟片压盖进行网格划分,转鼓盖与锁紧环采用 Solid95 结构网格单元划分。

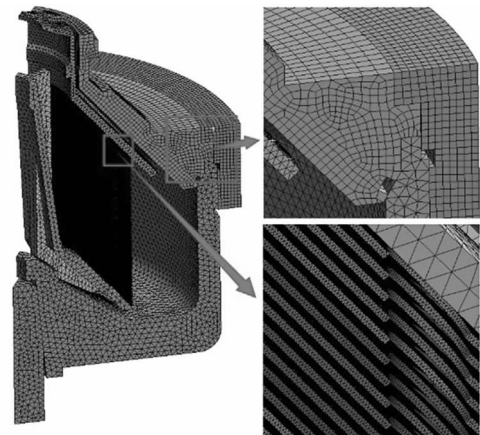


图3 转鼓网格划分

Figure 3 Bowl mesh division

Solid187 作为一种高阶三维 10 节点的单元,且该单元上每个节点都有 3 个空间方向的自由度,具有塑性、超弹性、蠕变、应力加劲、大挠度和大应变能力等特点,比较适用于非结构网格的建模。Solid95 单元可容忍不规则的形状,不会造成很大的精度损失,而且具有相容的位移形状,更适合模拟弯曲边界。由于碟片、碟片架以及碟片压盖上都有 6 条均布的筋条,每张碟片上都有 6 个均布的中性孔,都沿中心线呈现周期性对称,因此转鼓可用 1/6 模型进行简化分析,该模型的单元总数为 26 928 808,节点总数为 42 742 960。

2.2 载荷分析及边界条件

转鼓组件主要承受以下载荷:

- 1) 高速旋转时转鼓结构件的自身质量离心力;
- 2) 锁紧环与转鼓体之间螺纹连接处的预紧力;
- 3) 碟片压盖筋条对转鼓盖的压力;
- 4) 自身质量所产生的重力(可忽略);
- 5) 立轴对转鼓的轴向支撑力。

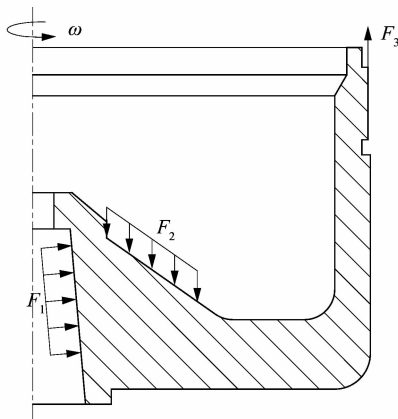
根据转鼓中各零部件之间的接触关系,将转鼓体与锁紧环螺纹之间的接触类型设置为摩擦接触,摩擦因数为 0.25;接触几何修正设置为螺栓接触,螺距为 6 mm,牙型角为 60° 的单头左旋螺纹;其余零部件的接触关系均为摩擦接触,摩擦因数设置为 0.2。固定的立轴(全约束)与活动的转鼓体(仅有轴向移动与轴向转动)之间采用不可分离接触关系。

3 仿真结果及分析

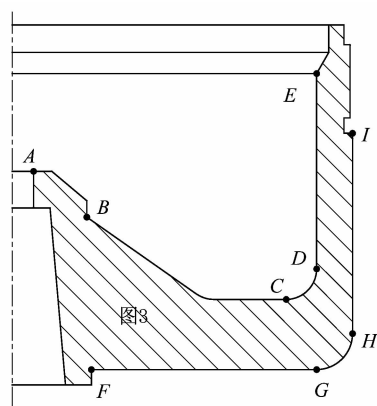
3.1 转鼓体仿真分析

为了探究碟片厚度对额定转速下转鼓应力分布规律,对 2 种不同厚度的碟片进行分析,如图 4 所示。

1) 方案 I:碟片厚度 0.39 mm、筋条厚度 0.60 mm,碟片数为 57。



(a) 受力分析



(b) 测点分布

图 4 转鼓体受力分析与测点分布

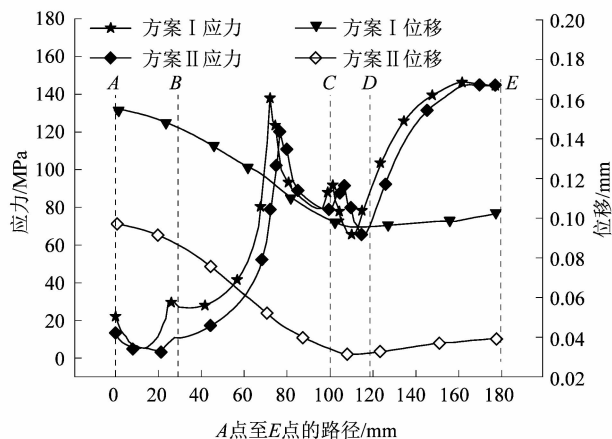
Figure 4 Force analysis and measurement points of bowl body

2) 方案 II:碟片厚度 0.6 mm、筋条厚度 0.6 mm,碟片数为 47。

图 4(a) 为转鼓体的受力分析。其中: F_1 为立轴对转鼓体的支撑力; F_2 为碟片架传递到转鼓体的压力,其中包括所有碟片的总重力、锁紧环对碟片压盖的预紧力; F_3 为螺纹副对预紧力的反作用力。因实测数据是空载转鼓的转鼓体外圆壁面的位移场分布数据,仿真分析对应的是转鼓体内壁未受液体压力的情况。

通过有限元分析分别测量转鼓内壁与外壁的应力和应变的分布规律,测量路径如图 4(b) 所示。内壁路径为 A 至 E,外壁路径为 F 至 I,测量的应力值如图 5 所示。

已知碟片 316 不锈钢材质,计算出方案 I 和方案 II 碟片组的质量分别为 $m_I = 3.038$ kg 和 $m_{II} = 3.832$ kg,其对应的惯性阻力矩见表 2。



(a) 转鼓体内壁

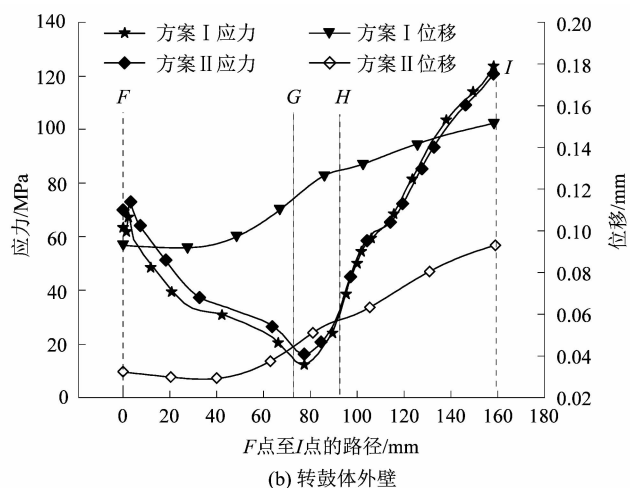


图5 不同方案转鼓体内壁面应力与位移曲线
Figure 5 Stress and displacement curves of inner and outer wall surfaces of bowl body with different schemes

表2 不同方案的惯性阻力矩

Table 2 Inertia resistance moments of different schemes

方案	$\text{kg} \cdot \text{mm}^2$		
	p_x	p_y	p_z
I	5 931.56	5 931.62	7 275.53
II	7 632.23	7 632.27	9 247.19

注: p_x, p_y, p_z 分别为 x, y, z 轴的惯性阻力矩。

结合表2与图5,经计算得知:方案I薄碟片组最大应力145.05 MPa,最大位移为0.155 mm;方案II厚碟片最大应力146.48 MPa,最大位移为0.097 mm。

分析图5可归纳出如下几点:

1) 转鼓体内侧壁面BC段上应力值有明显增大趋势,转鼓体与碟片架底部相接触的区域为高应力负荷区,在CD段上应力值略有回落,而在DE段上应力值再次出现增大的趋势;

2) 转鼓体外侧壁FG段上应力值有明显地递减趋势,在GH段上出现应力值最低点,而在HI段上又回归递增趋势;

3) 对比转鼓体底部区域内侧壁面BC段上与外侧壁面FG段上的应力值可知,内侧壁面的平均应力值要更大些,且数值变化波动更为明显;

4) 转鼓体内侧的整个壁面AE段上,位移值呈递减趋势,而外侧壁面FI段上位移值呈明显递增趋势,因此,测量转鼓体外壁面的位移值更容易获得较为准确的数据信息;

5) 对比方案I和方案II,在转鼓体内侧与外侧壁面上,方案I薄碟片组位移值都要比方案II高0.05~

0.06 mm,且2种方案的应力值都相差不大。

造成上述情况的原因有待在后续的研究中加以进一步考察,值得注意的是,从表2可知,厚碟片组转鼓 z 轴的惯性阻力矩 p_z 要比薄碟片组的大1 971.66 $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$,似是造成厚碟片组转鼓在高速旋转时的应力值、位移值比薄碟片转鼓更小一些的原因。为此,实测时采用薄碟片转鼓,以便获得更为敏感的位移的测量数据。

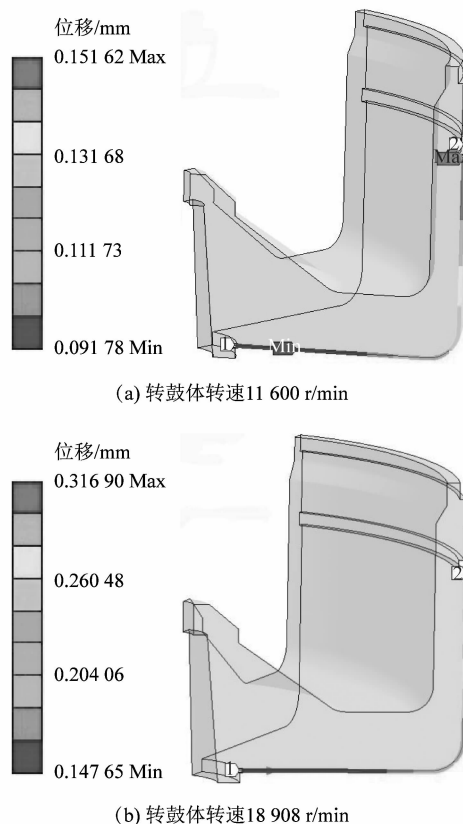


图6 转鼓体外壁面位移的仿真
Figure 6 Simulation of external wall displacement of bowl body

3.2 位移实测及分析

高速摄像机采集大量样本数据,利用专业软件分析出转鼓(含内装件)在6 000 r/min下的位移场云图,如图7(a)所示;图7(b)所示为转鼓外壁面位移三维分布情况(y 轴为旋转轴方向),所取数值为图中 z 轴最高处沿 y 轴方向上的位移。从图7所选云图中5个采样点看,实测应变分布规律与仿真结果相近。

测试时在6 000 r/min的转速下测得的垂直方向上的最大位移值为0.316 mm,计算机仿真额定转速11 600 r/min下的最大位移值为0.152 mm,只有将转速升至18 908 r/min时才能与试验结果0.316 mm匹

配。有限元仿真计算结果与实测应变、位移的数值变化规律趋势相近,但仿真数据尚与实测值有差距,说明在一定程度上分析模型建模、边界条件、载荷施加对转鼓的实际装配情况有反映,但还需要依据实测数据,继续对分析模型等做进一步研究与优化。

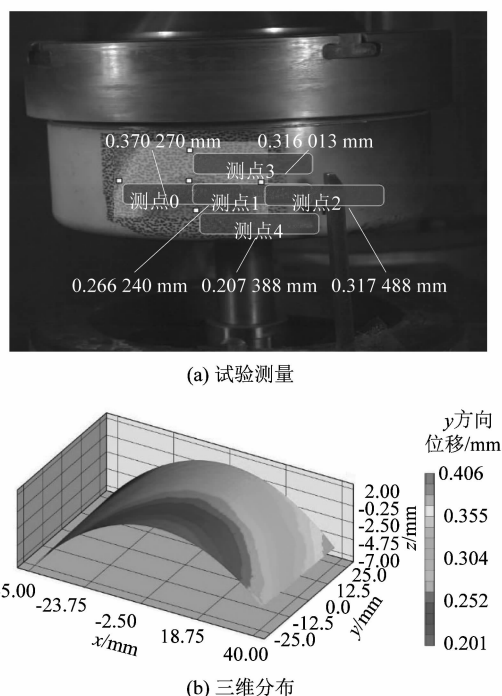


图7 转鼓体外壁位移测量

Figure 7 Measurement of external wall displacement of bowl body

4 结语

1) 课题组对某型碟式分离机含有内装件转鼓的转鼓体进行了应力分析,考察了不同厚度碟片对转鼓体应力变化规律的影响,分析计算结果表明:在额定工况下转鼓体内侧与外侧的底部应力负荷偏高,转鼓内侧壁面底部斜面、转鼓体螺纹处应力负荷较大。

2) 薄碟片组、厚碟片组转鼓的转鼓体的最大应力分别为 146.48 和 145.05 MPa,最大位移分别为 0.155 和 0.097 mm。

3) 利用 VIC-3D 测量系统对高速碟式分离机转鼓位移/应变进行了测量,测试结果表明该测量技术是解决高速转子应变测量的有效精密测量手段之一,得到的数据对完善分析模型具有直接指导意义。

4) 转鼓由 60 多个零部件组装而成,其分析模型的构建、边界条件的设置及载荷的施加均存在相当的复杂性和难度,这是导致仿真结果与实测值存在一定

差异的原因,对此将依据实测数据对模型等继续做进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] RÖLVER M, KUZGUNOGLU-HENNECKE M, STITTERICH E, et al. Blue tron-electrically driven disc separator for passenger car applications[J]. MTZ Worldwide, 2017, 78(11): 64-69.
- [2] ZHAO Z G. The influence of structural changes on the interior flow field's characteristics of disc separator[J]. Procedia Engineering, 2011, 15, 5051-5055.
- [3] LOEGERING K, MUELLER C, VOSS J P, et al. An integrated scale-down plant for optimal recombinant enzyme production by *Pichia pastoris*[J]. Biotechnology Journal, 2011, 6(4): 428-436.
- [4] 曲淑艳,寇佳迅,赵海东. 浅谈碟式分离机的运行与维护[J]. 机械, 2011, 38(增刊1): 165-166.
- [5] 季梅莲,郑加洲,吕敬,等. 基于有限元碟式分离机密封腔底断裂分析[J]. 过滤与分离, 2014, 24(2): 29-31.
- [6] 薛晓宁,李盼,何真. 胶乳离心机高速转鼓有限元接触分析[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 233-242.
- [7] 薛晓宁,石凯. 胶乳离心机高速转鼓应力研究[J]. 轻工机械, 2015, 33(4): 1-6.
- [8] 李盼,薛晓宁. 基于有限元的锁环静态分析与结构优化[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(2): 6-9.
- [9] 石凯,薛晓宁. 高速胶乳离心机转鼓体结构优化[J]. 轻工机械, 2016, 34(6): 26-31.
- [10] 赵志国,石博强,王力,等. 基于 ANSYS 的润滑油碟式分离机转鼓应力分析[J]. 煤矿机械, 2011, 32(2): 93-95.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] HUANG Y, JI J J, LEE K M. Model-based digital image correlation for non-contact deformation measurement of strain field and mechanical property [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 15(9): 5109.
- [14] 潘济宇,张水强,苏志龙,等. 基于数字图像相关方法的水下螺旋桨三维变形测量[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1212001.
- [15] YAMAGUCHI I. Simplified laser-speckle strain gauge[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213436.
- [16] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213427.
- [17] TONG W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. Strain, 2005, 41(4): 167-175.
- [18] PAN B, XIE H M, WANG Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [19] 朱天天,付中男,张梅,等. 基于特征匹配的数字图像相关法在变形测量中的初值估计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 148.