

机电与自动化

FBCDZ-10-No36 型通风机进气风道气流稳定性分析

陈庆光, 郭自超, 王默晗

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:根据某矿压入式轴流主通风机在进气风道入口安装片式消声器, 在运行 1 个月后, 第 1 级部分叶片表面出现裂纹的情况, 探讨了影响叶轮入口气流不稳定的主要因素, 据此对吸声片尾部和进气风道结构进行了改进, 并对改进前后风道内的流场进行数值模拟。结果表明: 进气风道入口安装消声器后, 在吸声片尾迹中卡门涡街阵列、弯曲风道内流动和风道拐弯处分离流动的共同作用下, 叶轮入口截面主流速度分布不均匀程度增强、截面气流压力脉动明显加剧, 成为引起叶片疲劳破坏的主要原因; 结构改进显著提高了风道内以及叶轮入口截面气流的均匀性和稳定性, 从而保证了叶片工作的安全性。

关键词:矿用轴流主通风机; 压入式通风; 进气通道; 气流稳定性

中图分类号: TD441

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)11-0155-06

Analysis on stability of air flow in intake air duct of FBCDZ-10-No36 mode ventilator

CHEN Qingguang, GUO Zichao, WANG Mohan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: According to an axial main ventilator with a forced ventilation in a mine, a piece type muffler was installed at the entrance of the air intake duct. After one month of the operation, the cracks were occurred on some board surfaces at the first stage. The paper had a discussion on the main factors affected to the air flow instability at the entrance of the impeller. Thus a construction was conducted on the sound absorption board tail and the air intake duct structure and a numerical simulation was conducted on the flow field within the air duct after and before the reconstruction. The results showed that after a muffler was installed at the entrance of air intake duct, under a joint role of the array of Karman vortex street in the wake of the sound absorption board, air flow within the bending air duct and the separated flow at the turning corner of the air duct, the uniformity of the cross sectional main flow velocity distribution at the entrance of the impeller would be increased and the cross sectional airflow pressure pulse would be obviously increased and would become the main causes of the blade fatigue failure. The structure improved could obviously increase the uniformity and stability of the cross sectional air flow within the air duct and at the entrance of the impeller and could ensure the safety of the blade.

Key words: mine axial main ventilator; forced ventilation; air intake duct; air flow stability

0 引 言

弯管作为通风机进气管道时, 其本身内部流动复杂, 会导致下游叶轮的进口速度场变得不均匀, 严重时会影响风道内相关机械设备的正常使用^[1-5]。文献[6-8]分析了入口弯管引起的离心压机进口

畸变及其对压缩机性能的影响。文献[9]以 9-26No4A 型高压离心通风机为研究对象, 得到通风机与弯管之间附加直管段为管道直径 1 倍或 2 倍长度时, 进口弯管下游产生回流, 使通风机进口气流不均匀, 通风机性能恶化明显。文献[10-12]分析了轴流式通风机进气箱气流流动。然而, 检索文

收稿日期: 2017-04-11; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.11.026

基金项目: 山东省应用基础型特色名校建设工程资助项目(10424); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEM017)

作者简介: 陈庆光(1969—), 男, 山东莒南人, 教授, 博士。E-mail: chenqingguang03@tsinghua.org.cn

引用格式: 陈庆光, 郭自超, 王默晗. FBCDZ-10-No36 型通风机进气风道气流稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 155-160.

CHEN Qingguang, GUO Zichao, WANG Mohan. Analysis on stability of air flow in intake air duct of FBCDZ-10-No36 mode ventilator[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 155-160.

献发现,目前有关矿用压入式轴流主通风机带有90°弯管的进气风道内气流均匀性和稳定性方面的研究却非常少。

国内某煤矿以压入式工作的轴流主通风机,在进气风道的入口安装了片式消声器,运行仅1个月后,发现第一级叶轮有多个叶片表面出现了裂纹。结合消声器中吸声片的结构和加装消声器前后的通风机运行情况,分析认为,叶片表面出现裂纹可能是第一级叶轮上游风道内不稳定性气流引起的激振力对叶片造成的疲劳破坏所致。为此,笔者首先从理论上分析引起第一级叶轮入口气流不稳定的因素,据此对安装消声器后的进气风道进行改进。然后,对安装消声器前、后和结构改进后进气风道内的流场进行数值模拟,对比风道内流场与叶轮入口截面气流压力脉动幅值的大小。从而证实进气风道内气流的不稳定性是引起通风机叶片表面出现裂纹的原因。

1 进气风道几何建模及气流不稳定性影响因素分析

1.1 进气风道入口安装消声器后的几何模型

研究对象为以压入式工作的FBCDZ-10-No36型矿用轴流主通风机的进气风道。安装消声器后的通风机进气风道(第一级叶轮前)的几何尺寸如图1所示,采用SolidWorks进行几何建模,其三维结构如图2所示,其中,消声器安装于原进气风道的入口处,与拐弯段采用阶梯段连接,吸声片厚度为140 mm,相邻吸声片间距为271 mm。进气风道进口断面的尺寸为7 700 mm×4 400 mm。为了减少计算量,出口边界选在进气风道内邻近第一级叶轮入口的上游截面,其直径与叶轮直径相同,为3 600 mm。

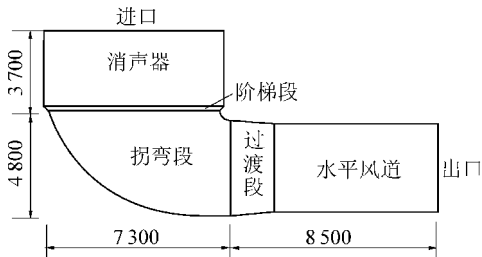


图1 安装消声器后的风道入口段几何尺寸

Fig. 1 Geometric dimensions of air intake duct after installation of muffler

1.2 进气风道内气流不稳定性影响因素分析

由图1和图2的进气风道结构分析可知,可能

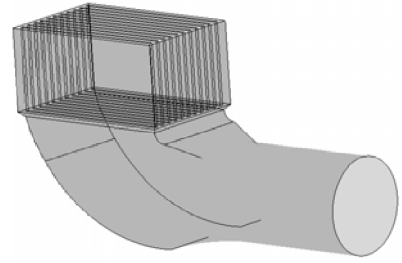


图2 安装消声器后的风道入口段三维几何模型

Fig. 2 Three-dimensional geometric model of air intake duct after installation of muffler

引起叶轮上游气流不稳定的主要因素有以下2个方面:一是吸声片为非流线体,气体绕流后通常会在其尾部产生卡门涡街^[13],消声器吸声片排尾部的卡门涡街阵列相互干涉,在下游形成具有强烈脉动特征的不稳定性气流^[14-15],尤其当第一级叶轮入口上游风道的长度不足时,这种脉动的不稳定气流将会延伸到叶轮入口,成为引起叶片疲劳破坏的主要因素;二是在进气风道入口加装消声器后,与原有风道形成了一个90°的弯道,如果拐弯段的结构不合理,容易引起流动分离^[16],同样会引起下游气流的不稳定性。当上述2个方面的因素同时存在时,二者相互作用,将会进一步加剧下游风道内气流的不稳定性和不均匀性,进而影响叶片工作安全性。

1.3 进气风道结构改进及其几何模型

基于上述关于进气风道内气流不稳定性的因素分析,对吸声片尾部和进气风道拐弯段的结构进行改进。

1)将吸声片尾部截面形状由原来的矩形(图3a)改成三角形的尖劈状(图3b),头部夹角为30°。

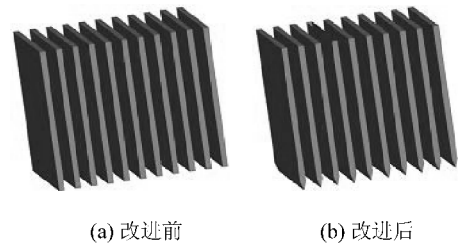


图3 改进前后吸声片的几何结构

Fig. 3 Geometry of acoustic boards before and after the structural improvement

2)改进了消声器与拐弯段的连接方式和拐弯段的几何形状,图4、图5分别为改进后进气风道的几何尺寸和三维模型。

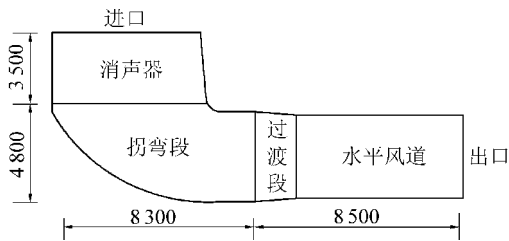


图 4 结构改进后的风道入口段几何尺寸

Fig. 4 Geometric dimensions of air intake duct after structural improvement

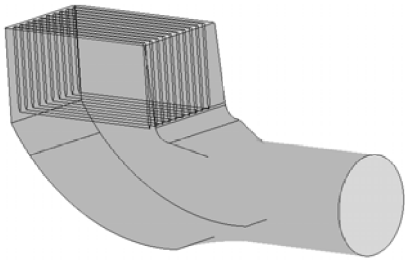


图 5 结构改进后的风道入口段三维几何模型

Fig. 5 Three-dimensional geometric model of air intake duct after structural improvement

2 网格划分与边界条件

采用 ICEM-CFD 软件^[17]对通风机进气风道的几何模型进行网格划分,选用适应性强的非结构化网格单元^[18],采用大涡模拟 (LES) 方法模拟通风机进气风道流场。

计算区域的边界条件设置如下:通风机进气风道进口通大气,采用压力进口边界条件,设置进气风道进口相对总压为 0 Pa;进气风道出口(紧邻叶轮的上游截面)给定静压边界条件,该静压值是根据通风机在计算工况下产生的实际流量为 $376 \text{ m}^3/\text{s}$ 而确定的,经反复试算后得到的风道出口相对静压为 -655 Pa 。

3 计算结果分析

3.1 风道内气流流动分析

图 6 和图 7 分别为吸声片尾部结构改进前后尾迹区的速度和涡量分布。可以看到,安装消声器后,在每一个吸声片的尾部都形成了卡门涡街,消声器尾迹区内则形成了卡门涡街阵列,由于相邻卡门涡街之间的相互干涉,恶化了风道入口条件;吸声片尾部结构改进后,在吸声片尾部没有发生明显的流动分离和形成卡门涡街,从而可大幅提高下游风道内气流的均匀性和稳定性。

通风机进气风道垂直对称中心截面上的流线分布如图 8 所示。从图 8a 可知,在安装消声器前,整个进气风道内的流线分布比较平滑顺畅,仅在风道内侧拐弯处形成了一个很小范围的旋涡区,风道内气流比较均匀、稳定;如图 8b 所示,安装消声器后,在消声器尾迹中形成的卡门涡街阵列和风道内侧拐弯处,因流动分离产生的旋涡区的共同作用下,进气风道下游气流的紊乱程度明显加剧,且紊乱一直延伸到叶轮入口,严重时就可能使叶片产生疲劳破坏;如图 8c 所示,结构改进后,吸声片尾部以及风道拐弯处的气流情况都有明显改善,从而提高了通风机风道内气流的均匀性和稳定性,保证了叶片的安全性。

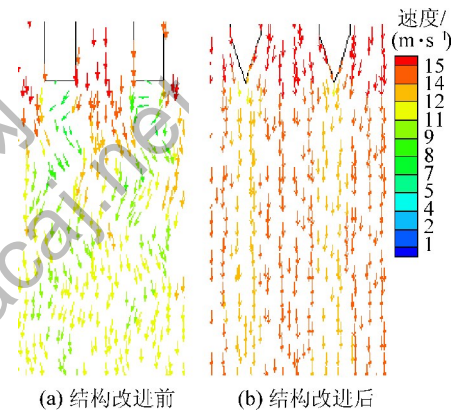
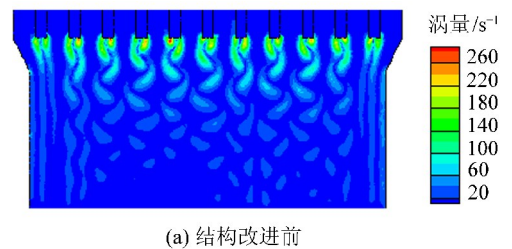


图 6 吸声片尾部结构改进前后尾迹区内的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution in wake region of acoustic boards before and after structural improvement



(a) 结构改进前

(b) 结构改进后

图 7 吸声片尾部结构改进前后尾迹区内的涡量分布

Fig. 7 Vorticity distribution in wake region of acoustic boards before and after the structural improvement

3.2 叶轮入口截面气流流动分析

为了定量考察第一级叶轮入口上游进气风道内气流的稳定性,在邻近进气风道出口(即第一级叶轮入口)的上游位置选取了一个监测面,同时在圆

形风道的监测面上,沿直径方向选取了如图9所示的5个监测点,用来显示不同半径处气流压力脉动的幅值,并依此分析该监测面上气流的稳定性。

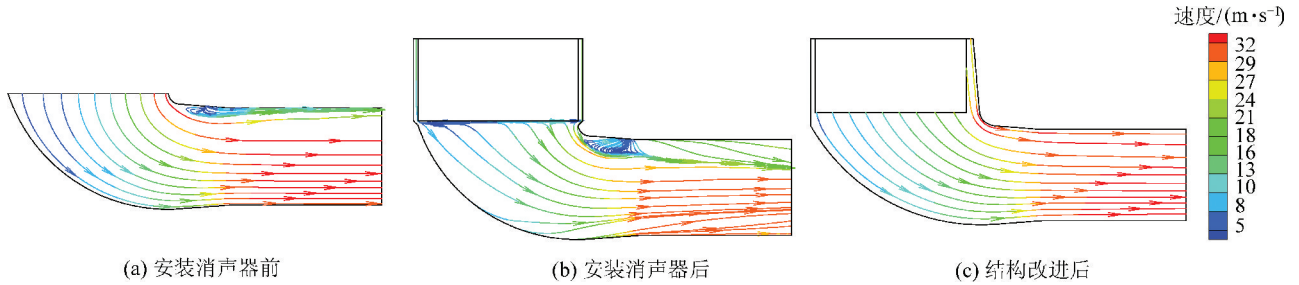


图8 进气风道垂直对称中心截面上的流线分布

Fig. 8 Streamlines distribution on vertical symmetrical section of air intake duct

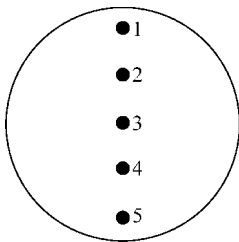


图9 风道监测面上监测点的布置

Fig. 9 Arrangement of monitoring points on the monitoring surface of the air intake duct

进气风道监测面气流的主流速度分布如图10所示。从图10可知,在监测面上部速度分布不均匀;安装消声器后和结构改进后,在吸声片尾部卡门涡街与风道内侧分离流动的共同影响下,监测面上部速度分布不均匀程度增加,严重恶化了叶轮入口条件。结构改进后,监测面速度分布变得均匀,提高了叶轮入口气流的均匀性与稳定性。

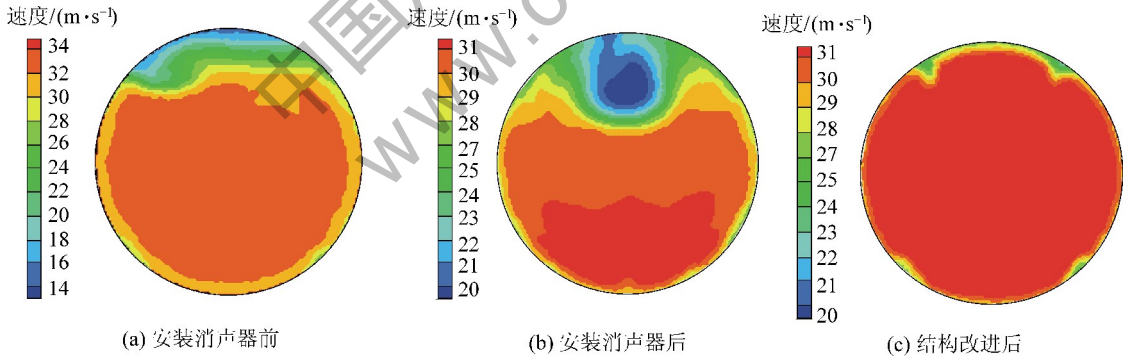


图10 风道监测面主流速度分布

Fig. 10 Mainstream velocity distribution on monitoring surface of the air intake duct

监测面上5个监测点处压力脉动幅值随时间的变化曲线如图11所示。由图11可知,安装消声器前,气流压力脉动幅值非常小,监测面上气流稳定;安装消声器后,气流压力脉动的幅值显著增大,表明叶轮入口截面的气流具有强烈的不稳定性,为引起叶片表面裂纹的主要原因^[19-20];结构改进后,监测面上的气流压力脉动幅度显著降低,说明采取结构

改进措施后,改善了进气风道内的气流状况,提高了叶轮入口气流的稳定性,从而可保证叶片工作的安全性。

另外,比较安装消声器后监测面上各个监测点的压力脉动幅值可知,自下而上从5到1各监测点的压力脉动幅值逐渐增大,即叶轮入口截面的上部气流不稳定性明显高于下部。

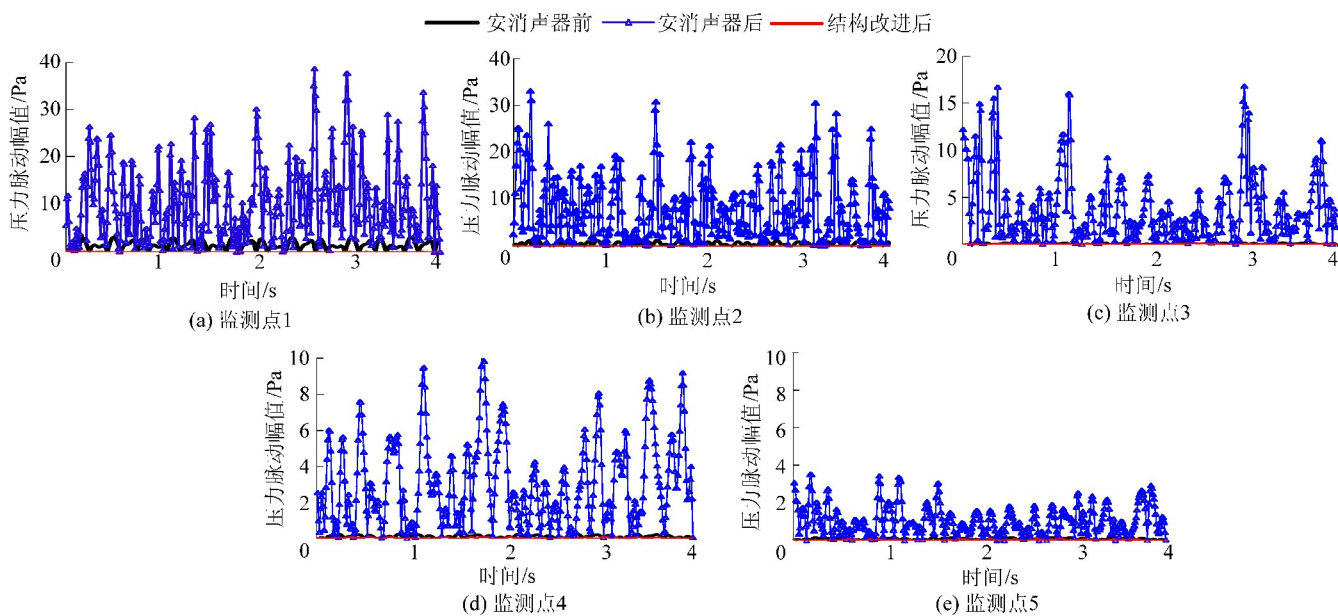


图 11 风道监测面上各监测点的压力脉动幅值

Fig. 11 Pressure fluctuation amplitude of each monitoring point on monitoring surface

4 结 论

针对某煤矿以压入式工作的轴流主通风机,在进气风道的入口安装片式消声器并运行一段时间后,第一级叶轮叶片表面产生裂纹的情况,从分析进气风道内可能引起叶轮入口截面气流不稳定性的因素出发,对吸声片尾部和进气风道拐弯段进行了结构改进和数值模拟分析,得到以下主要结论。

1) 进气风道进口安装消声器后,在消声器尾迹中形成的卡门涡街阵列、弯曲风道和风道拐弯处因流动分离产生的旋涡区的共同作用下,进气风道内流场紊乱。

2) 安装消声器后,叶轮入口截面气流的主流速度分布不均匀程度加剧,气流压力脉动幅值也明显增大,为引起叶片表面疲劳裂纹的主要原因。

3) 结构改进后,吸声片尾部没有产生显著的流动分离和形成卡门涡街,风道拐弯处也没有发生明显的流动分离和形成旋涡区,邻近叶轮入口的上游监测面上的气流压力脉动幅值大幅度降低,说明笔者采取的结构改进措施可显著提高进气风道内和叶轮入口截面气流的均匀性和稳定性,从而保证叶片工作的安全性。

参考文献 (References):

[1] 刘 飞,吴克启.大型轴流风机来流条件对内流影响的数值分析[J].工程热物理学报,2006,27(S1):145-148.

LIU Fei, WU Keqi. Numerical analysis of internal flow effect from inlet flow conditions in large axial fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(S1): 145-148.

[2] WANG L, YANG C, ZHAO B, *et al.* The change of the inlet geometry of a centrifugal compressor stage and its influence on the compressor performance [J]. Journal of Thermal Science, 2013, 2(3): 197-208.

[3] 程邦勤,陶增元,李 军.某型涡扇发动机进气畸变压力脉动分析[J].航空动力学报,2003,18(1):65-69.

CHENG Bangqin, TAO Zengyuan, LI Jun. Pulsatile analysis of inlet pressure distortion in turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 65-69.

[4] 刁安娜,王 宇,冯健美.天然气压缩机管路系统气流脉动及管道振动分析[J].流体机械,2008,36(5):39-42.

DIAO Anna, WANG Yu, FENG Jianmei. Analysis on gas pulsation and piping vibration in the piping system of natural gas compressor [J]. Fluid Machinery, 2008, 36(5): 39-42.

[5] 王明奎.煤矿用主通风机的振动特性研究[D].太原:太原理工大学,2009.

[6] 张 军,马宏伟,何 洪,等.进口管道对离心压气机性能影响的数值模拟[J].航空动力学报,2009,24(8):1785-1791.

ZHANG Jun, MA Hongwei, HE Hong, *et al.* Numerical simulation of effects of the inlet pipe on the performance of a centrifugal compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(8): 1785-1791.

[7] 李 杜,杨 策,陈 山,等.带90°弯管的离心压气机进口畸变数值研究[J].航空动力学报,2010,25(11):2556-2563.

LI Du, YANG Ce, CHEN Shan, *et al.* Numerical simulation on inlet distortion of centrifugal compressor with 90° bent pipe [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2556-2563.

[8] 陈旭江.弯管进气条件下离心压气机性能实验与流动特性研究[D].北京:北京理工大学,2015.

- [9] 张俊林.进口弯管对离心通风机能影响的研究[D].上海:华东理工大学,2014.
- [10] 何向艳.轴流式风机通流部件特性研究[D].北京:华北电力大学(北京),2012.
- [11] 石汇林,刘飞,吴克启.轴流引风机进气管不同配置的性能比较[J].流体机械,2007,35(6):41-44.
SHI Huilin, LIU Fei, WU Keqi. Performance comparison of different configuration on inlet box of a axial induced draft fan[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(6): 41-44.
- [12] 李景银,黄靓,吕峰.带有进气管的轴流风机性能变化数值分析[J].工程热物理学报,2007,28(S1):161-164.
LI Jingyin, HUANG Liang, LYU Feng. Numerical studies of the effect of an inlet box on the performance of an axial flow fan[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(S1): 161-164.
- [13] 邵传平.钝体尾流控制机理及方法研究进展[J].力学进展,2008,38(3):314-328.
SHAO Chuanping. Advances in the study of methods and mechanism of bluff body wake control[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(3): 314-328.
- [14] Shadaram A, Fard M, Rostamy N. Experimental study of near wake flow behind a rectangular cylinder[J]. American Journal of Applied Sciences, 2008, 5(8): 917-926.
- [15] 高洋洋.多柱体系统静止绕流与涡激振动的试验及数值研究[D].青岛:中国海洋大学,2011
- [16] 安帮贤.压气机进气管弯内部流动的气动计算和优化设计[D].大连:大连理工大学,2002.
- [17] 丁源,王清.ANSYS ICEM CFD从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [18] 纪兵兵,陈金瓶.ANSYS ICEM CFD网格划分技术实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [19] 冀春俊,李彩华,庸洪杰.叶片断裂破坏与气动非正常脉动的关联分析[J].风机技术,2012(2):9-11.
JI Chunjun, LI Caihua, YONG Hongjie. Collaborated analysis of blade failure mechanism and unstable flow of centrifugal compressor[J]. Compressor Blower and Fan Technology, 2012(2): 9-11.
- [20] 贺长波,李宏坤,张晓雯.流体激振下叶片疲劳失效机理与检测方法综述[J].风机技术,2015(5):69-77.
HE Changbo, LI Hongkun, ZHANG Xiaowen. Review of blade fatigue failure mechanism and detection method based on flow induced vibration[J]. Compressor Blower and Fan Technology, 2015(5): 69-77.

(上接第148页)

- [12] 刘勇,梁博臣,何岸,等.自进式旋转钻头钻孔修复理论及关键参数研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(2):39-44.
LIU Yong, LIANG Bochen, HE An, et al. Research on theory and technical parameter of borehole restoration for self-propelling and rotating drill[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(2): 39-44.
- [13] 雷丰勋.松软突出煤层长钻孔装备及钻进工艺研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):93-97.
LEI Fengli. Study on long borehole drilling equipment and drilling technique of soft outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 93-97.
- [14] 林府进,徐贵发,董钢锋.松软突出煤层顺层长钻孔成孔技术研究[J].矿业安全与环保,2006,33(2):10-11,14.
LIN Fujin, XU Guifa, DONG Gangfeng. Study on hole formation technique of long holes along loose outburst seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(2): 10-11, 14.
- [15] 韩颖,张飞燕,杨志龙.煤层钻孔孔壁稳定性分析[J].中国安全科学学报,2014,24(6):80-85.
HAN Ying, ZHANG Feiyan, YANG Zhilong. Analysis of stability of coalbed borehole wall[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 80-85.
- [16] 王振,梁运培,金洪伟.防突钻孔失稳的力学条件分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):444-448.
WANG Zhen, LIANG Yunpei, JIN Hongwei. Analysis of mechanics conditions for instability of outburst-preventing borehole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 444-448.
- [17] 杨磊,李义敬,张旭.煤层瓦斯抽采钻孔失稳的延迟效应分析[J].煤矿安全,2013,44(9):178-181.
YANG Lei, LI Yijing, ZHANG Xu. Delayed effect analysis of gas extraction boreholes instability in coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 178-181.
- [18] 范超,李贤忠,苏现波.“三软”煤体抽采钻孔水力修复增透技术研究[J].煤炭技术,2015,34(1):209-212.
FAN Chao, LI Xianzhong, SU Xianbo. Studying technology of equipment by hydraulic flushing for drilling of “Three Soft” coal seam[J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 209-212.