

矿用自动复位式风井防爆门研究

范喜生^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 矿山安全技术研究分院, 北京 100013;

2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 (煤炭科学研究总院), 北京 100013)

摘要: 针对煤矿井下发生爆炸时, 传统防爆门飞离井口、容易造成井下大范围人员伤亡的问题, 研发了自动复位式风井防爆门系列产品, 介绍了其防漏风措施, 提出了由风机叶片强度反求防爆门受到的爆炸冲击载荷的方法, 给出了防爆门梁 (柱) 和门板与梁 (柱) 连接部位强度的计算式以及根据风井负压确定门板厚度的计算式等。该产品平时密封可靠; 停风时自动开启实施自然通风, 恢复供风时自动关闭; 发生爆炸时迅速开启保护主要通风机, 爆炸过后自动复位, 迅速恢复通风系统, 给遇险人员自救和应急救援创造有力条件。

关键词: 防爆门; 自动复位; 回风井; 瓦斯爆炸; 煤尘爆炸; 应急救援

中图分类号: TD72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336 (2012) 06-0058-04

Research on Mine Automatic Resetting Type Flame Proof Door of Ventilation Shaft

FAN Xi-sheng^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. National Key Lab of High efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to prevent the personnel casualties caused by the traditional flame proof door flying from the mine shaft mouth when a underground mine explosion made, a series products of the automatic resetting type flame proof door of the mine ventilation shaft were re-researched and developed. The paper introduced the air leakage measures, proposed that the blade strength of the fan was applied to calculate the explosion impact load on the flame proof door. Thus the formula of the connection part strength between the beam (column) and the door plate and beam (column) of the flame proof door and the formula of the door plate thickness set with the negative pressure of the ventilation shaft were provided. The automatic resetting type flame proof door of the mine ventilation shaft was reliably sealed in normal time. When the mine ventilation stopped, the door would be automatically opened for natural ventilation. When the mine ventilation reset, the door would be automatically closed. When a explosion occurred, the protection for the main ventilators would be rapidly opened. When the explosion passed, the door would be automatically reset and the mine ventilation system would rapidly recovered. Thus a powerful condition would be created for the self rescue and emergency rescue of the refugees.

Key words: flame proof door; automatic resetting; mine air returning shaft; gas explosion; coal dust explosion; emergency rescue

煤矿回风井防爆门是地下煤矿通风系统的一个重要组件。《煤矿安全规程》^[1]涉及防爆门的条文主要有2条: 防爆门应每6个月检查维修1次; 主要通风机停止运转期间, 对由1台主要通风机担负全矿通风的矿井, 必须打开井口防爆门和有关风

门, 利用自然风压通风等。通常, 发生爆炸后, 现有的防爆门飞离井口, 通风机受到保护并继续运转, 但此时大部分风量从风井进入 (即风流短路), 造成井下微风或风流紊乱, 有毒有害气体四处弥漫, 极易造成大范围人员中毒、窒息、死亡

收稿日期: 2012-01-19; 责任编辑: 王晓珍

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2011CB201206, 2010CB735508); 国家科技重大专项资助项目 (2011ZX05040-001-1)

作者简介: 范喜生 (1963—), 男, 河北行唐人, 高级工程师, 博士。Tel: 010-84261178, E-mail: xsfan@163.com

网络出版时间: 2012-06-15 10:27:00; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.58_016.html

引用格式: 范喜生. 矿用自动复位式风井防爆门研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (6): 58-61.

等。因此,《煤矿安全规程专家解读》^[2]要求“高压气流过后防爆门自动关闭。同时,为井下遇险人员的撤退和抢险救灾提供有利条件。”具体要求有6条:①防爆门应布置在出风井同一轴线上,断面积不应小于出风井的断面积。②出风井与风硐的交叉点到防爆门的距离,比该点到主要通风机吸风口的距离至少要短10 m。③防爆门应依据主要通风机的负压保持关闭状态。④防爆门的结构必须有足够的强度,并有防腐和防抛出的设施。⑤防爆门应封闭严密不漏风。采用液体密封时,冬季应选用不燃的防冻液。⑥装有摩擦轮提升设备井楼的立风井,防爆门可不设于出风井同一轴线上,应设于井楼合适的位置,在两侧设卸压防爆门。一旦发生爆炸事故时爆炸的冲击波可以冲开防爆门而卸压。

基于此,研发了自动复位式风井防爆门产品,包括立风井防爆门、斜风井防爆门2种情况。笔者总结了研发过程中一些主要参数的设计计算方法,可供防爆门设计、加工制造等人员参考。

1 自动复位式矿井防爆门工作原理

立风井防爆门为2扇半圆形门,横梁(门轴)过圆心,即门扇从两侧向中间旋转。横梁上方固定有带缓冲材料的缓冲板,利用同步机构确保2扇门同时与缓冲材料碰撞。横梁可沿导向柱向上运动,导向柱上安装有缓冲弹簧。平时在负压和自重的作用下,防爆门密封良好;停风时利用重力将门扇吊起实施自然通风。配重质量、落高等可根据通风机情况进行调节、确定,确保恢复供风时防爆门自动关闭;防爆门的开启压力很小,发生爆炸时,防爆门迅速开启以保护通风机,爆炸过后在重力、弹力等的作用下自动复位,使通风系统迅速恢复正常,且可重复使用。斜风井(平硐)防爆门与立风井防爆门的主要区别在于门的形状为矩形(或圆拱形),门轴为立柱,采用从两侧向中间开的方案。此外,自动复位主要靠扭簧的扭矩;缓冲作用主要靠安装在门扇上的缓冲材料、缓冲器,确保碰撞后板面变形较小、复位后密封性好等。

传统的立风井防爆门采用油封防漏风,防爆门为锅盖式,门边深入油槽内,密封效果较好;本次研发的立风井防爆门采用抗老化橡胶作为密封件,密封件嵌入凹槽内,如图1所示。密封作用主要来自于通风机负压,也能起到很好的密封作用,且可

重复使用。传统的斜风井(平硐)防爆门采用橡胶条密封,效果较差;本次研发的斜风井(平硐)防爆门采用W型抗老化橡胶密封件(图1),密封件变形较大,能够适应爆炸后门扇变形的要求,密封效果较好。

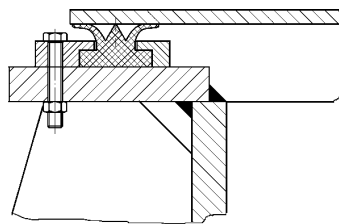


图1 防爆门密封原理

2 防爆门结构设计受力计算

防爆门的结构设计受力计算需要考虑平时运行、爆炸过程中以及爆炸后3种工况。平时运行过程中重点需要考虑的是门扇承受通风系统的负压作用;爆炸过程中重点需要考虑的是门扇抗冲击载荷的能力;爆炸过后需重点考虑的是门扇的变形、漏风量不能太大等(适当变形是允许的,否则成本太高)。

2.1 爆炸冲击载荷的确定

试验测定瓦斯煤尘的爆炸压力、火焰传播速度等是比较容易的^[3-7];目前,对于单纯的瓦斯爆炸,借助于数值模拟软件,也可获得较理想的结果。这是由于试验装置的形状、大小、可燃混合物的体积、浓度、点火源的位置、强度等都是人为设定的、已知的,而煤矿的实际情况要复杂得多,如发生瓦斯煤尘爆炸的可燃混合物的位置、体积、浓度、点火源的位置、强度等都是不确定的,其次,巷道断面的形状、大小、长度、变化情况、分叉情况、支护情况等也是不确定的,而这些因素都会影响传播、作用到防爆门上的爆炸载荷,目前缺乏这方面的可用数据。

另一方面,发生瓦斯煤尘爆炸时,通风机的主要破坏形式为叶片变形、断裂等。因此,粗略来说,可令防爆门的强度近似等于风机叶片的强度,依此确定防爆门受到的冲击载荷,可绕开爆炸载荷不确定这一难题。事实上,进一步增大防爆门的强度是没有意义的,因为此时风机叶片已损坏,即使防爆门自动复位,通风系统也已陷入停顿状态。当然,减小防爆门的强度也是不可取的,因为有可能

发生风机完好而防爆门破坏、通风系统不能恢复正常的情况。

风机叶片在冲击载荷作用下的破坏过程比较复杂,首先,叶片本身是一个三维结构,其次,爆炸波与叶片相互作用,发生反射、绕射等,情况比较复杂,需要做专门研究。实际上,每个矿井风机叶片的情况是已知的,可以根据风机叶片的具体情况计算,即叶片强度不是一个常量(而是一个系列)。为简化计算,这里将叶片简化为一个承受均布动载荷的悬臂梁,意在说明其计算方法。

记悬臂梁的长度为 L ,宽度为 b ,厚度为 χ ,冲击载荷正反射的反射压力为 ΔP_{ry} ,动载荷系数取2,则根据材料力学,最大拉应力发生在叶片根部,易求得,

$$\Delta P_{ry} \leq (\chi/L)^2 \sigma_{sy}/6 \quad (1)$$

式中, σ_{sy} 为叶片材料的屈服极限。

根据冲击波理论^[8],入射压力 ΔP_{my} 与反射压力 ΔP_{ry} 之间存在如下理论关系:

$$\Delta P_{ry} = 2\Delta P_{my} + 6\Delta P_{my}^2 / (\Delta P_{my} + 7p_0) \quad (2)$$

其中, p_0 为初始大气压,近似等于0.1 MPa。

由此可计算入射压力 ΔP_{my} 。

考虑到通风机和防爆门到风井与风硐交叉点的距离大致相当且均较短,可忽略沿程损失,认为入射到防爆门上的冲击载荷与入射到风机叶片上的冲击载荷存在某种关系。根据前苏联的试验结果^[9],入射到防爆门上的冲击载荷 ΔP_{mm} 可以按式(3)进行估算。

$$\Delta P_{mm} \approx 2.155\Delta P_{my} \quad (3)$$

再根据式(4)即可计算作用到防爆门上的冲击载荷 ΔP_{mm} 。

$$\Delta P_{mm} = 2\Delta P_{my} + 6\Delta P_{my}^2 / (\Delta P_{my} + 7p_0) \quad (4)$$

实际计算时,为简化计算,也可取动载荷系数为2,将动力学问题简化为静力学问题。

如假设 $\chi=0.02$ m, $L=1$ m, $\sigma_{sy}=1\ 000$ MPa,由式(1)至式(4)分别得 $\Delta P_{ry}=0.067$ MPa、 $\Delta P_{my}=0.03$ MPa、 $\Delta P_{mm}=0.065$ MPa、 $\Delta P_{rm}=0.163$ MPa。取动载荷系数为2,对应的静载荷为0.326 MPa。

设计防爆门时,通风机叶片的 χ 、 L 和 σ_{sy} 是已知的,根据上述公式,即可估算防爆门梁(柱)受到的冲击载荷 ΔP_{mm} 或等效静态载荷 $2\Delta P_{mm}$,进行强度设计计算等。

2.2 梁(柱)的设计计算

防爆门梁(柱)的两端一般是固定的,爆炸过程中发生弯曲变形,需要按上述爆炸冲击载荷(或等效准静态载荷)设计计算。首先考虑简单梁,即跨度为 $2R$ 、宽度为 b 、厚度为 χ 的固支梁(两端焊牢),承受峰值压力为 ΔP_r 的爆炸载荷的作用。梁中的最大应力 σ_{max} 在梁中部表面处,

$$\sigma_{max} = 6(R/\chi)^2 \Delta P_r \quad (5)$$

取 $R=5$ m, $\chi=0.2$ m, $\Delta P_r=0.163$ MPa,则 $\sigma_{max}=611.25$ MPa,大于普通钢材的屈服极限。如果再增大 χ ,梁自身的质量也很大,不便于加工、制造、运输、安装等。因此,一般情况下,矩形截面简单梁有可能不能满足要求。为此,研发了箱型结构楔形梁。图2为箱型结构楔形梁横截面,记长度仍为 $2R$ (垂直于纸面方向),宽度为 b ,侧板宽为 L ,厚度为 χ ,其特点是 $L \gg b/2$,受力主要在侧板上,且可以不考虑反射作用,式(5)变为

$$\sigma_{max} = 3(L/\chi)^2 \Delta P_m/2 \quad (6)$$

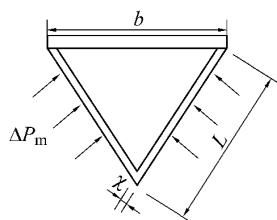


图2 箱型结构楔形梁横截面

其中, ΔP_m 为不考虑反射的最大爆炸超压。仍考虑 $R=5$ m的情况,取 $L=1$ m, $\chi=0.02$ m, $\Delta P_m=0.065$ MPa,则 $\sigma_{max}=243.75$ MPa,与普通钢材的屈服极限相当,说明采用箱型楔形梁一般能满足要求。这里用梁理论代替板理论是为了简化计算。式(5)和式(6)以弹性理论为基础,对于矩形截面简单梁,若发生塑性变形,会影响门的密封性,因此,以屈服极限作为设计准则是合理的;对于箱型楔形梁,侧板发生局部塑性变形是允许的,这里没有考虑反射作用,但仍取动载荷系数为2,是偏于安全的,试验也证实了这一点。

式(6)与 R 无关,正板(即宽度为 b 的板)受到的作用力较小,容易满足要求,凭经验可确定 b 及其厚度。当采用箱型楔形梁不能满足要求时,可考虑采用弹簧缓冲技术。关于缓冲弹簧的高度与刚度等,可通过经验类比法确定。高度过小,起不到缓冲作用,且容易破坏限位装置,影响防爆门正

常复位; 高度过大, 导向杆稳定性差, 容易变形, 也影响复位。刚度系数过小, 弹簧起不到吸能缓冲作用; 刚度系数过大, 对提高楔形梁抗冲击的作用减小, 失去采用弹簧缓冲的意义。另外, 楔形梁组件要焊牢, 否则易开裂。

2.3 门扇的设计计算

门扇的强度主要体现在门板与梁(柱)的连接部位和门板的强度。由于门板可以转动, 爆炸载荷对其冲击作用明显减小, 但连接部位抗剪的强度应予验算。考虑圆形井筒、直径为 $2R$ 的情况。假设连接部位受剪的截面积为 A (单侧), 则应有

$$\Delta P_r < A\tau_s / (\pi R^2) \quad (7)$$

式中: τ_s 为连接材料的剪切强度, $\tau_s \approx \sigma_s / \sqrt{3}$; σ_s 为连接材料的拉伸屈服极限。

门板的强度可按系统负压条件确定。记负压的绝对值为 p_v , 对于立风井防爆门, 在负压及自重的作用下, 门板有向下凹陷的趋势, 由于横梁的支持作用, 容易想象, 距横梁最远的半径方向凹陷的趋势最大, 当负压太大或门板的厚度太小时, 门板会凹陷下去, 可以此作为确定门板厚度的条件。

为简化计算, 考虑半径为 $R/2$ 、周边简支的圆板的极限载荷, 根据塑性力学, 应有^[10]

$$p_v + \delta \rho g < 6(\delta/R)^2 \sigma_s \quad (8)$$

其中: δ 为门板厚度; ρ 为板材的密度; g 为重力加速度。由此得门板最小厚度 δ_{\min} 的计算式为

$$\frac{\delta_{\min}}{R} = \frac{\rho g R}{12\sigma_s} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{24\sigma_s p_v}{(\rho g R)^2}} \right) \quad (9)$$

对于低碳钢, $\sigma_s = 225$ MPa, 矿井负压的绝对值一般为 $1\ 000 \sim 3\ 000$ Pa, $\rho = 7\ 800$ kg/m³, $g = 9.8$ m/s², R 为 5 m 量级, $24\sigma_s p_v / (\rho g R)^2 \gg 1$, 式(9)可简化为

$$\delta_{\min}/R \approx \sqrt{p_v / (6\sigma_s)} \quad (10)$$

假设 $R = 5$ m, $p_v = 3\ 000$ Pa, $\sigma_s = 225$ MPa, 则 $\delta_{\min} \approx 7.45$ mm。当然, 这是极限情况, 实际取值要考虑一定的富裕系数, 例如取 1 倍甚至更高, 门板厚度应在 15 mm 以上, 甚至设计成带有筋板的箱型结构。为了减小板厚, 也可采用十字梁等。对于斜风井(平硐)防爆门, 显然式(10)也是适用的。这里需要重点考虑的是门板的刚度, 即碰撞过程中门板的变形不能过大, 否则, 即使强度满足要求, 复位后的密封性也会大打折扣。主要对策

措施有: ①碰撞、缓冲面应为平面。采用带缓冲板结构时, 缓冲材料应布满缓冲板; 采用两扇门直接碰撞方案时, 应采用同步机构, 确保面接触。②缓冲材料、缓冲器等应固定牢固; 焊接件应焊牢; 密封管(垫)应固定在凹槽内等, 以防碰撞过程中破碎、开裂、掉下、飞出等。传统的防爆门采用锅盖式, 也是为了提高其刚度。

实际设计时, 在满足强度、刚度要求的前提下, 防爆门的质量应尽可能地小, 以便减小开启压力。对于立风井防爆门, 开启压力近似等于克服门扇的自重所需的转动力矩; 对于斜风井(平硐)防爆门, 开启压力近似等于扭簧的扭矩。

3 结 语

成功研发的自动复位式风井防爆门克服了传统防爆门的缺点, 平时密封可靠, 停风时能自动开启实施自然通风、恢复供风时自动关闭, 发生爆炸时迅速开启保护风机、爆炸过后自动复位、能使通风系统迅速恢复正常, 给遇险人员自救和应急救援创造了条件, 有助于最大限度地减小瓦斯煤尘爆炸造成的人员伤亡, 消灭重特大瓦斯煤尘爆炸事故。

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 67-69.
- [2] 煤矿安全规程专家解读编委会. 煤矿安全规程专家解读 [M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011: 134.
- [3] Nagy J, Verakis H C. Development and Control of Dust Explosions [M]. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc, 1983: 15-25.
- [4] Field P. Dust Explosions [M]. Amsterdam: Elsevier, 1982: 27-31.
- [5] Bartknecht W. Dust Explosions [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 45-49.
- [6] Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries [M]. Butterworth-Heinemann, 1991: 120-135.
- [7] 伯纳德刘易斯, 埃尔贝京特冯. 燃气燃烧与瓦斯爆炸 [M]. 王 方, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 181-345.
- [8] 亨里奇 J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 134-136.
- [9] 萨文科 C K. 井下空气冲击波 [M]. 龙维祺, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1979: 98-109.
- [10] 王 仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 356-397.