

燃料电池供氢组合阀仿真与 拓扑优化研究

焦 杰,张幽彤*,孙立清,李 涛
(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

摘要:针对燃料电池供氢系统管路集成和轻量化开展研究,提出了一种集成式组合阀,建立了该阀 AMESim 模型,仿真研究了阀设计参数与输出量之间的变化规律;以阀体轻量化为目标对阀体结构拓扑优化。结果表明,与原供氢系统相比,集成式组合阀系统体积减少了 43%,具有 0.3 s 的快速响应能力和 2×10^{-4} g/s 的流量控制精度,拓扑优化后的组合阀质量减少了 46.7%。

关键词:供氢系统;组合阀;AMESim 仿真;拓扑优化

中图分类号:TH138.52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)11-0221-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.11.048

Simulation and topology optimization for hydrogen supply combination valves in fuel cell

JIAO Jie, ZHANG You-tong*, SUN Li-qing, LI Tao

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper studies the integration and weight reduction of hydrogen supply system in fuel cell, proposes an integrated combination valve, establishes the AMESim model for this valve and simulates the variation between design parameters of this valve and the output amount. The valve body structure is optimized in topology to reduce the weight of the valve. The results show that the integrated combination valve system has a 43% reduction in volume compared with previous hydrogen supply system and owns a fast response capacity of 0.3 s and a flow control accuracy of 2×10^{-4} g·s⁻¹. Total weight of the combined valve after topology optimization drops 46.7%.

Key words: hydrogen supply system; combination valves; AMESim simulation; topology optimization

燃料电池不受卡诺循环的效率限制^[1-2],具有高效率、低排放、高能量密度等优势。目前供氢系统较多采用多级阀门串联调节实现车载供氢。这种供氢系统存在管路复杂、结构分散、集成度低等问题^[3],导致车内空间利用率低、故障发生率高,进而影响氢气效率,而氢气的压力与流量调节程度对燃料电池堆的效率影响显著^[4-5],因此有必要对燃料电池供氢系统的集成化展开研究。

目前供氢系统组合阀方面相关研究不多,刘扬等^[6]根据逻辑次序关系提出了一种组合阀结构,结构由电磁阀、减压阀、手动阀等组成,为更高压力系统的研制提供了参考经验,但其结构形式与供氢系统的配置调整依存度较大。丰田对阀组结构进行了改进,取消了不锈钢阀套,最终阀质量降低了 25%,部件数量减少 35%,但此举并未涉及供氢系统集成方面的相关工作^[7]。郭志阳等^[8]提出了一种组合瓶阀,包括压力释放装置、电磁阀模块以及高压压力传感器等,但管路需要单独的压力调节器实现降压,

集成度相对较低。本文中针对 1 kW 燃料电池堆,对适用于 35 MPa 供氢系统的集成组合阀结构展开研究,并对阀体结构进行拓扑优化。

1 组合阀工作原理及结构

1.1 供氢系统工作原理

燃料电池汽车对供氢系统具有较高的要求,主要体现在对氢气的控制精度与动态响应方面,现对 1 kW 供氢系统提出如下性能指标^[9]。

(1) 氢流量满足 1 kW 燃料电池需求,额定流量 0.016 g/L,控制精度 5×10^{-4} g/L。

(2) 35 MPa 氢气减压稳压,额定压力 0.05 MPa,控制精度 3×10^{-3} MPa。

(3) 具有过流保护装置,当压力或流量异常时,能自动关断氢气供应。

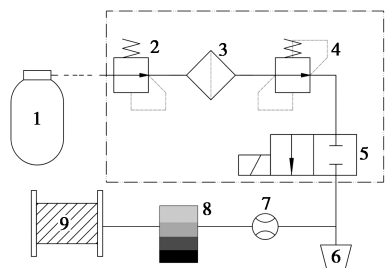
(4) 检测阀体内部的氢气压力、温度。

图 1 为供氢管路系统原理,35 MPa 氢气由 1 通过主减压阀 2 进行减压,氢气过滤网 3 保证氢气的

收稿日期:2018-07-29;修回日期:2018-09-05

作者简介:焦杰(1993-),男,硕士生;张幽彤(1965-),男,教授,主要从事车用动力等方面的研究工作,通讯联系人,010-68915013, youtong@bit.edu.cn。

清洁,定差减压阀 4 实现气体进一步降压,由于直动式电磁阀很难直接克服高压气体,将开关电磁阀 5 放置在远端有利于实现对氢气的控制,紧急时刻也能利用其通断功能切断氢气通道,保护电堆。



1—35 MPa 氢瓶;2—主减压阀;3—过滤网;4—定差减压阀;
5—开关电磁阀;6—压力释放装置;7—流量计;8—加热器;
9—燃料电池堆

图 1 供氢管路系统原理

以某燃料电池供氢系统为例^[10],管路总质量 M_{total} 与总体积 V_{total} 可表示为:

$$M_{total} = m_p + m_q + m_s + m_r \quad (1)$$

$$V_{total} = V_p + V_q + V_s + V_r \quad (2)$$

式中, m_p 、 V_p 为主减压阀质量与体积; m_q 、 V_q 为定差减压阀质量与体积; m_s 、 V_s 为电磁阀质量与体积; m_r 、 V_r 为剩余部分质量与体积,包括管路、传感器等。

当系统采用 R41 型减压阀与 VFN200N 型电磁阀,计算得 M_{total} 为 2 kg, V_{total} 为 500 cm³。

1.2 组合阀结构设计

图 2 为集成式组合阀 3D 模型,分别从强度、可靠性、集成度、加工制造等多方面综合考虑组合阀结构,将主减压阀模块、定差减压阀模块、开关电磁阀模块集成到主阀体内,实现集成式管路设计。

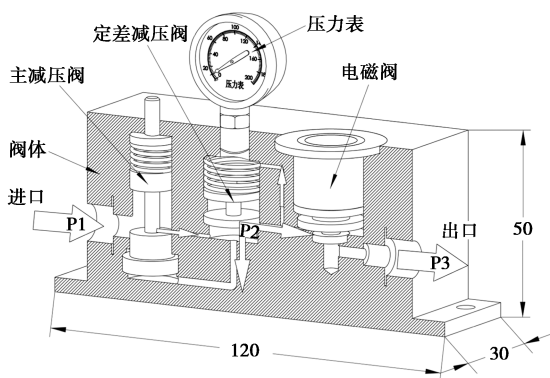


图 2 组合阀 3D 模型

阀体内氢气通道要有足够的壁厚,满足强度条件的最小壁厚 t_{min} 为:

$$t_{min} = 1.5[p_c d / (2S_f - 1.2p_c)] + C \quad (3)$$

式中, p_c 为通道压力; d 为阀体计算直径; S_f 为许用应力; C 为附加裕量。

阀体材料选用铝合金,外形尺寸如图 2。组合阀总质量 $M_{combine}$ 与总体积 $V_{combine}$ 可表示为:

$$M_{combine} = m_v + m_u \quad (4)$$

$$V_{combine} = V_v + V_u \quad (5)$$

式中, m_v 、 V_v 为组合阀阀体质量与体积; m_u 、 V_u 为阀芯、弹簧等质量与体积,计算得 $M_{combine}$ 为 1.267 kg, $V_{combine}$ 为 360 cm³。与分散结构相比,分别降低了 36.6%、28.0%。

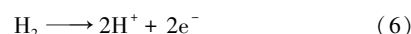
对摩擦副表面进行阳极氧化处理可有效避免不锈钢阀芯与铝合金阀体发生黏附和密封不良。采用 SLM(selective laser melting) 技术的 400 MPa 拉伸强度铝合金^[11],利用金属 3D 打印技术实现阀体的加工。集成组合阀省去了管路的多段连接,令整个系统结构变得紧凑,密封点数量减少,可有效降低机械故障率,提高系统的可靠性。

2 组合阀数学建模

2.1 气路模型

针对满足 1 kW 燃料电池对氢气的需求设计,为方便建模做如下假设:①气体遵循理想气体定律;②各节流口处的气体流动视为绝热过程;③忽略温度影响,环境温度为 293 K;④不计气体泄漏。

燃料电池阳极反应为:



1 kW 燃料电池理论氢气的质量流量为^[12]:

$$M_{H_2} = \rho_{H_2} \cdot (P_c / 2V_c F) \cdot V_m \cdot 60 \quad (7)$$

式中, M_{H_2} 为氢气质量流量; ρ_{H_2} 为氢气密度; P_c 为燃料电池功率; V_c 为燃料电池单体工作电压; F 为法拉第常数; V_m 为气体摩尔体积,带入相关参数计算 M_{H_2} 为 0.016 g/s。

主减压阀入口压力为 35 MPa,出口始终维持 2 MPa,因此通过主减压阀节流口处的出口压力与进口压力之比判定该处为超音速流动^[13-14],质量流量可由方程(8)得到:

$$M_{H_2} = [(A \cdot C_q \cdot p_{in}) / \sqrt{R_{H_2} T_{H_2}}] \cdot \sqrt{[2k' / (k' + 1)] [2 / (k' + 1)]^{2 / (k' - 1)}} \quad (8)$$

式中, A 为节流口面积; C_q 为节流口流量系数; p_{in} 为进口压力; R_{H_2} 为氢气气体常数; T_{H_2} 为氢气绝热温度; k' 为氢气绝热指数。

2.2 减压部分模块计算

主减压阀与定差减压阀阀芯受力分别如图 3(a)、(b)所示,阀芯运动方程满足式(9):

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 - p_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} F_{01} + k_1 \Delta x_1 \\ F_{02} + k_2 \Delta x_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, m_1, m_2 分别为两阀芯质量; x_1, x_2 分别为两阀芯位移; c_1, c_2 分别为阻力系数; p_2 为主减压阀出口压力; p_3 为阀体出口压力; A_2, A_3 分别为阀芯端面积; F_{01}, F_{02} 为各自弹簧预紧力; k_1, k_2 分别为弹簧刚度; $\Delta x_1, \Delta x_2$ 为各自弹簧改变量。

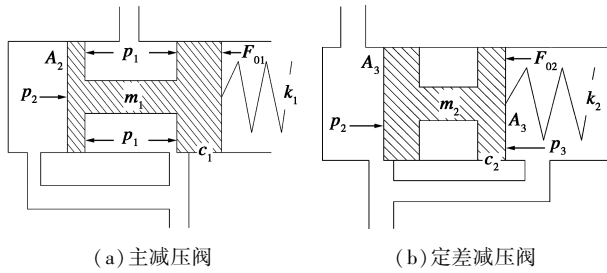


图 3 阀芯受力简图

2.3 AMESim 模型

根据式(1)~(9), 在 AMESim 平台上建立组合阀模型如图 4 所示, 各部分参数设置如表 1。

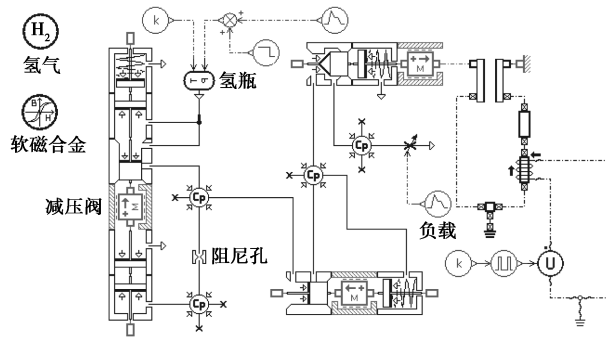


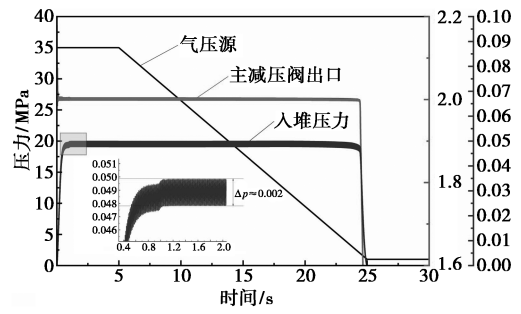
图 4 AMESim 组合阀模型

表 1 AMESim 模型各部分参数

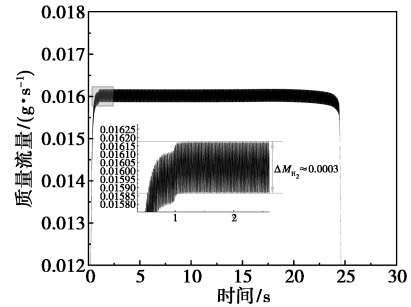
子模型	参数	数值
主减压阀	节流孔径/mm	1
	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	2
	弹簧预紧力/N	98
	阀芯直径/mm	8
定差减压阀	节流孔孔径/mm	0.5
	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	1
	弹簧预紧力/N	97
	阀芯直径/mm	8
电磁阀	驱动电压/V	12
	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	1
	预紧力/N	38.9
	初始气隙/mm	1

2.4 仿真结果

电磁阀控制信号频率 f 为 100 Hz, 占空比 d 为 55%。组合阀压力与流量稳态特性如图 5(a)、(b) 所示。当压力不断降低, 减压阀出口压力保持在 2 MPa 附近, 入堆压力也稳定在 0.05 MPa, 精度达到了 $\pm 2.5 \times 10^{-3}$ MPa; 质量流量为 $0.016 \pm 2 \times 10^{-4}$ g/s。



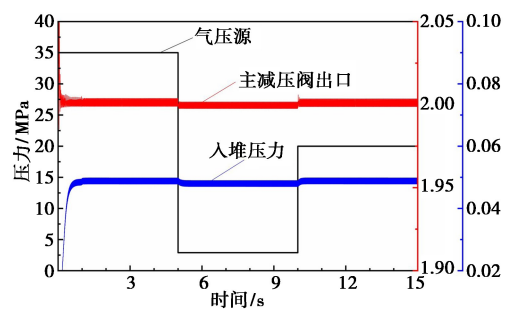
(a) 压力特性曲线



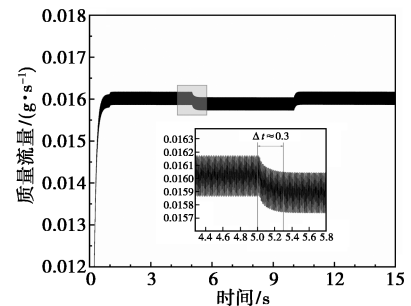
(b) 质量流量曲线

图 5 组合阀稳态特性曲线

瞬态特性如图 6(a)、(b) 所示。采用气压源变阶跃信号, 压力由 35 MPa 到 2 MPa、再到 20 MPa 的



(a) 压力特性曲线

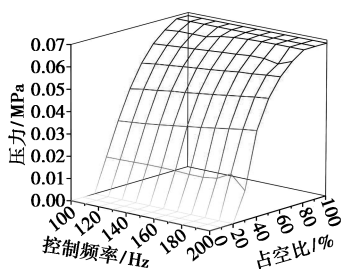


(b) 质量流量曲线

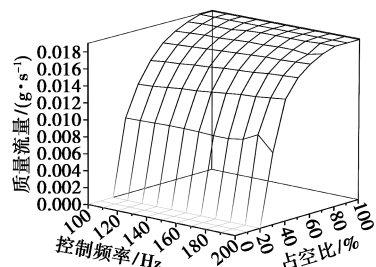
图 6 组合阀瞬态特性曲线

变化过程中,达到稳态所需时间小于 0.3 s,输出精度并无明显影响,质量流量的响应也十分迅速。

入堆压力与流量随 f 、 d 的变化情况如图 7(a)、(b) 所示。当 d 不变 f 增加,二者均呈现缓慢增长的趋势,可见 f 对组合阀的输出特性影响很小,可利用该现象对组合阀进行微调。



(a) 输出压力随频率与占空比变化



(b) 质量流量随频率与占空比变化

图 7 组合阀输出量变化特性

当 f 不变 d 增加,压力与流量呈现如下规律: 0%~20% 为零位死区; 20%~80% 为快速增长区; 80%~100% 为阀门死区。分析发现,存在 2 次死区的根本原因在于占空比的极小与极大极易造成阀芯静止不动,从而导致输出量不发生改变。因此可利用 20%~80% 的有效区间对组合阀的输出量进行大范围快速调节。

综上,在不同的 f 与 d 组合下,能够实现入堆压力与流量的调节,这对将来组合阀的精确控制提供了一定的理论依据。

3 阀体的拓扑优化

3.1 拓扑优化理论基础

拓扑优化理论中对于形状较为复杂的零件一般采用连续体拓扑优化方法。本文中采用密度函数差值模型 SIMP^[15] (solid isotropic material with penalization) 将材料的刚度与相对密度联系起来,插值模型如式(10):

$$E^q(\rho_j) = E_{\min} + \rho_j^q(E_0 - E_{\min}) \quad (10)$$

式中, E^q 为插值后的弹性模量; q 为惩罚因子,一般来说 $q \geq 2$; $\rho_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ 为单元 j 的材料密度,

一般介于 0~1 之间; n 为阀体有限元模型单元总数; E_0 为有材料部分的弹性模量; E_{\min} 为无材料部分的弹性模量。

综合目标函数如式(11):

$$\min F(\rho_j) = \left\{ \lambda^2 \left[\sum_{k=1}^m \omega_k^q \left(\frac{C_k(\rho_j) - C_k^{\min}}{C_k^{\max} - C_k^{\min}} \right)^q \right] + (1 - \lambda)^2 \left(\frac{\Lambda^{\max} - \Lambda(\rho_j)}{\Lambda^{\max} - \Lambda^{\min}} \right)^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (11)$$

式中, $F(\rho_j)$ 为综合目标函数; λ 为柔度目标函数权重; ω_k 为第 k 个工况的权重; $C_k(\rho_j)$ 为第 k 个工况的柔度; C_k^{\max} 、 C_k^{\min} 分别为第 k 个工况下结构柔度的最大值、最小值; $\Lambda(\rho_j)$ 为指定工况下的固有频率; Λ^{\max} 、 Λ^{\min} 分别为一阶固有频率的最大值、最小值。

3.2 模型与边界条件的建立

采用 SolidWorks 进行建模,将 IGS 文件导入 Workbench 中进行前处理,采用 CFD 物理场、Fluent 求解器进行网格划分,节点 1 179 908 个,单元 845 061 个,平均质量达到 0.835,结果较为满意。

进行求解之前需对阀体进行载荷与约束的施加,即边界条件的确定。阀体受到来自安装位置的全约束,受到内部氢气与弹簧等作用力。根据燃料电池堆的工作环境,可将供氢系统分为零流量、小流量与大流量 3 种状态,分别代表氢气切断、低速稳定输出、加速大功率输出 3 种工况,各工况的权值平均化,即 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$; 柔度目标函数和频率目标函数的权值同样平均化,即 $\lambda = 1/2$; 惩罚因子 $q = 2$ 。

3.3 优化结果

利用 Workbench 拓扑优化模块进行阀体拓扑优化,优化结果与模型重构分别如图 8、图 9 所示。

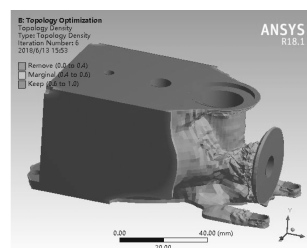


图 8 拓扑优化结果

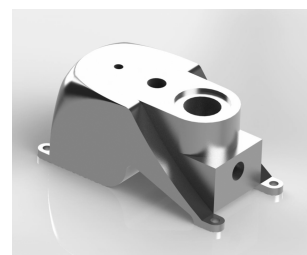


图 9 模型重构

图 10 表示了优化前后的阀体应力应变云图, 可以看出最大应力点降低, 总应变非常小, 阀体强度得到保证。表 2 为阀体优化统计结果。

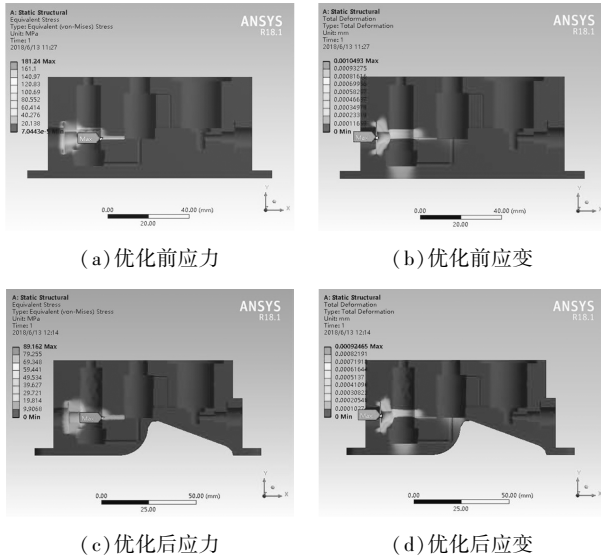


图 10 拓扑优化前后应力应变云图

表 2 阀体优化结果

	分散结构	集成后/集成比例	优化后/优化比例
质量/kg	2	1.267/36.6%	1.066/46.7%
体积/cm ³	500	360/28%	285/43%

4 结论

对燃料电池供氢系统的集成化展开研究。结果表明, 组合阀使系统体积与质量分别降低 36.6%、28%; AMESim 仿真结果显示, 输出压力与流量稳态精度分别达到 2.5×10^{-3} MPa、 2×10^{-4} g/s, 具有 0.3 s 的快速响应能力; 改变电磁阀的频率与占空比可对氢气压力与流量进行不同程度的调节; 对阀体的拓

扑优化使质量与体积得到了进一步降低。受 35 MPa 实验条件的限制, 今后可采用低压试验进行进一步研究工作。

参考文献

- [1] 付甜甜. 电动汽车用氢燃料电池发展综述[J]. 电源技术, 2017, 41(4): 651-653.
- [2] 李星国. 氢与氢能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 何雍, 李亚超, 吴兵, 等. 基于 MotoTron 平台的燃料电池共轨喷射系统的研发[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 133-137.
- [4] 王金龙, 王登峰, 陈书明. 车用燃料电池效率测试及影响因素[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(6): 989-994.
- [5] 洪凌. 车用燃料电池发电系统氢气回路控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [6] 刘扬, 刘汇源. 高压储氢气瓶组合阀的研制[J]. 通用机械, 2008, 6(9): 93-95.
- [7] Yamashita A, Kondo M, Goto S, et al. Development of high-pressure hydrogen storage system for the Toyota "MIRAI" [R]. SAE Tech Paper, 2015.
- [8] 郭志阳, 周鸿波, 陆建山. 一种燃料电池汽车用的供氢系统: CN, 106356544A [P]. 2017-01-25.
- [9] GB/T 34872—2017. 质子交换膜燃料电池供氢系统技术要求 [S].
- [10] 王冰, 侍崇诗, 黄明宇, 等. 燃料电池供氢系统的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(1): 35-39.
- [11] Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 271-278.
- [12] 袁伟, 李宗涛, 潘敏强, 等. 5 kW 氢-空质子交换膜燃料电池系统设计研究[J]. 华东电力, 2008, 36(8): 68-71.
- [13] McCloy D, Martin H. Control of fluid power: Analysis and design [M]. 2nd edition. Ellis Horwood Limited, 1980.
- [14] Blackburn J F, Reethof G, Shearer J L. Fluid power control [M]. M. I.T. Press, 1960.
- [15] 焦洪宇, 周奇才, 李文军, 等. 基于变密度法的周期性拓扑优化 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 132-138. ■

浙江丰利荣获中国颗粒学会智能绿色安全奖

在 2018 年 10 月 17—19 日在上海举行的第十六届中国国际粉体加工/散料输送展览会 (IPB2018) 上, 浙江丰利粉碎设备有限公司荣获中国颗粒学会颁发的智能绿色安全奖。

据悉, 这是粉体行业内首个以绿色安全为主题的行业标杆性奖项, 由中国颗粒学会与纽伦堡会展 (上海) 有限公司联合设置, 表彰在粉体行业内拥有绿色环保意识, 在绿色安全生产领域作出突出贡献的企业。其含金量之高、国际影响力之大, 必将得到终端用户的认可。

此次获奖的产品 QWJ 型气流涡旋微粉机是一种立轴反射型粉碎机, 能同时完成微粉和微粒分选两道加工工序, 适合加工各行业莫氏硬度 4~5 级以下的多种物料, 不停机可调节细度。产品粒度均匀, 细度高达 10~5 μm, 特别适合加工热塑性、纤维性物料, 适用于化工、医药、饲料、塑料、橡胶、烟草、食品、农药、非金属矿等行业的超细粉碎, 是一种高细度、低噪声、高效率的节能理想型粉碎机, 可替代进口设备。(吴红富)