

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.027

膜生物反应器在工业废水处理中的应用

任增珊, 张国亮, 范 铮*

(浙江工业大学 化学工程与材料学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要:文中综述了膜生物反应器在工业废水处理中的工艺特点,分析了影响膜生物反应器运行状态的因素:曝气强度、有机负荷、污泥龄(SRT)、水力停留时间(HRT)、溶液pH、水温以及污泥浓度等。认为该种新型生物反应器具有处理效率高、出水水质好、设备紧凑、体积小、运行管理简单的优点,且易与其他预处理方法结合实现自动控制,大大提高工业废水处理的效率,在工业生产中表现出明显的优势。同时分析了膜生物反应器在实际应用中仍存在的膜的生产成本较高、使用寿命较短、更换膜组件费用较高等问题,提出膜材料改性、与料液预处理技术有效结合、探索优化操作参数等方面是今后研发的重点。

关 键 词:膜生物反应器;工业废水;影响因素;有机负荷;曝气强度

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)02-0106-05

Application of Membrane Bioreactor in Industrial Wastewater Treatment

REN Zengshan, ZHANG Guoliang, FAN Zheng*

(College of Chemical Engineering and Materials, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The characteristics of MBR in the industrial wastewater treatment was reviewed, and the influence factors of membrane bioreactor were analyzed, such as aeration intensity, organic loading, sludge age, the hydraulic retention time, pH, temperature sludge concentration, etc. The kind of new reactor has the advantages of high processing efficiency, good out-water quality, compact device, convenience operation and management, easily combining with other equipment, and greatly improving the efficiency. That shows obvious advantages in the industrial wastewater treatment. The membrane bioreactor still exists the problems of high production cost, short service life, high replacement cost in the practical application. The membrane modification, the effective combination with liquid material pretreatment and optimization of the operating parameters are the focus of future research.

Key words: membrane bioreactor; industrial wastewater; influencing factors; organic loading; aeration intensity

随着现代工业的发展,排放废水的量越来越大,环境污染日益严重,工业废水具有以下几个特点:①排放量大,污染范围广;②生产工艺千差万别,产品品种繁多,生产过程排出的污染物种类多、差异大;③许多排放物有强烈毒性、刺激性、腐蚀性;④排放废水经迁移、转化,造成二次污染,使污染的危险性进一步增加。因此急需一种分离效率高、处理量大的处理方式,膜生物反应器(MBR)应运而生,MBR是一种由膜分离单元与生物处理单元相结合的新型水处理技术,以膜组件取代生物反应池,通过保持高活性污泥浓度来减少污水

处理设施,同时保持低泥负荷来达到减少污泥量的目的。1969年,美国Smith等人将活性污泥法与超滤膜组件相结合,成功地用于城市污水处理。上世纪80年代后,随着材料学的发展及制膜水平的提高,使MBR技术得到大发展。MBR主要具有以下特点:处理效率高、出水水质好;设备紧凑、占地面积小;易实现自动控制、运行管理简单。文中结合处理工业废水常用的分体式和一体式膜生物反应器,以及好氧、厌氧膜生物反应器在工业废水领域的应用进行分析研究。

收稿日期:2013-10-10;修回日期:2013-12-02

基金项目:国家自然科学基金(21176226);国家自然科学基金(21177115)

作者简介:任增珊(1987),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为膜材料与水处理技术。通信作者:范铮,E-mail:fanzh@zjut.edu.cn

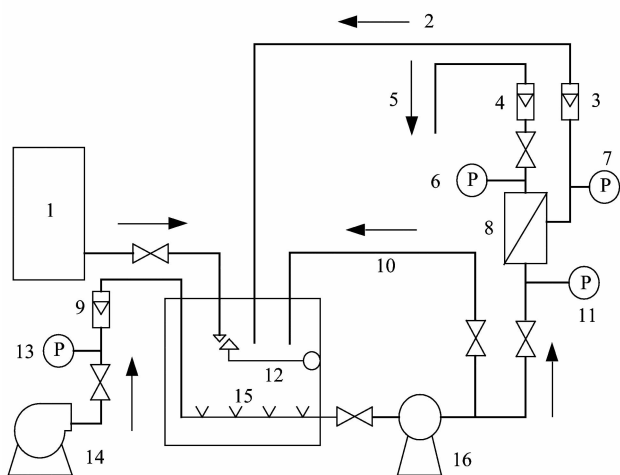
1 膜生物反应器的工艺特点

膜生物反应器有多种分类方法,以膜组件与生物反应器的组合可分为分体式和一体式膜生物反应器;根据生化水处理技术中生物处理方式分为好氧膜生物反应器、厌氧膜生物反应器。

1.1 分体式膜生物反应器

分体式膜(RMBR)工艺,生物反应器与膜组件是两个相对独立单元,其工作流程见图1,工业废水经泵16增压后进入膜组件8,在压力作用下工业废水经过膜分离器处理得到干净出水,处理水回用或排放而随浓缩液回流到生物反应器内继续处理;活性污泥被膜截留。

在RMBR工艺中,膜组件作为二沉池的替代单元。该工艺利用循环泵回流的强化过程,具有处理量较大,易操作控制,运行平稳的优点,且膜清洗更换较容易。吕红等^[1]用分体式膜生物反应器处理废水,工艺流程如图1所示。



1—原水箱;2—混合液循环管路;3,4,9—流量计;5—膜出水管路;6,7,11,13—压力表;8—膜组件;10—旁路;12—浮球液位阀;14—曝气泵;15—生物反应器;16—混合液循环泵

图1 RMBR 工艺流程

Figure 1 Schematic diagram of recirculated membrane bioreactor

实际操作中由于污染物会在膜的表面沉积,使膜的清洗次数变多,同时需用泵加压冲洗,需要较高的膜面错流流速,才能使膜表面清洁,造成水流循环量大、动力费用高、水流高速旋转产生的剪切力会使某些微生物菌体失活的问题,以及带来较高的能耗和设备磨损,因此也称为第一代 MBR。

1.2 一体式膜生物反应器

一体式 MBR 是将生物反应器与膜组件组装在一起,工艺如图2所示,通过出水泵抽吸得到过滤液,曝

气器设置在膜组件的正下方,空压机鼓出空气产生搅动使膜表面得到清洗,混合液随气流向上流动,在膜表面产生剪切力,以减少膜的污染。胡雪利等^[2]采用该流程处理规模为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 维生素制药废水,试验结果表明:工艺对 COD 和 NH_4^+-N 的去除率分别达到 80% 和 90% 以上,出水水质稳定良好。

一体式膜生物反应器减少了处理系统的占地面积,与分置式膜生物反应器相比,动力消耗费用较低,该工艺称为第二代 MBR。但由于膜分离器浸没在生物反应器的工业废水中,膜表面污染较快,又由于膜分离器装在污水处理设备底部,清洗需要将膜组件从设备中取出,这就使清洁保养工作不方便。另外也有单位膜的处理能力小,膜污染较重,透水率较低的缺点,因此限制了它的应用。

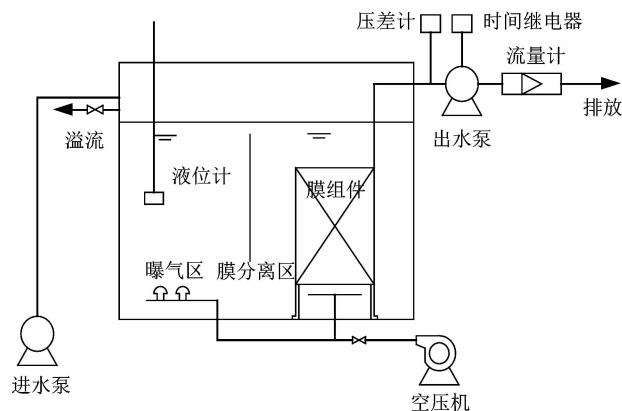


图2 一体式膜生物反应器工艺流程

Figure 2 Schematic diagram of integrated membrane bioreactor

1.3 好氧膜生物反应器

好氧膜生物反应器的工艺是在膜生物反应器中使用活性污泥,该 MBR 能处理较高浓度的工业废水,但要求有较高的气量。曝气造成的紊流和剪切力使污泥难以积聚,用该类 MBR 能处理一些含特别的污染物的工业废水,如油脂类污染物。

柏云杉^[3]设计的好氧管式膜生物反应器处理不同含盐浓度的有机废水,研究结果表明具有以下特点:①进水 COD 浓度在 $2\ 000 \sim 3\ 000 \text{ mg/L}$ 时,出水 COD 在 $179 \sim 223 \text{ mg/L}$ 之间,COD 平均去除率在 89.5% 以上;②MBR 处理高盐度有机废水耐冲击负荷的能力较强,出水水质稳定;③当膜的跨膜压差为 0.1 MPa ,盐度为 1.0%,1.5% 和 2.0% 时,管式膜的稳定运行通量分别为 $30, 24$ 和 $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,整个运行过程中可以不进行膜清洗。这些优点使好氧膜生物反应器在工业

废水处理中具有独特的优势。

1.4 厌氧膜生物反应器

厌氧膜生物反应器将膜生物反应器布置在无氧或缺氧条件下使用,它在运行时具有水力停留时间短,污泥停留时间长,使污泥浓度高的优点,已成为一种高效、低能耗、易控制的新型厌氧生物处理技术。在厌氧膜生物反应器中,通过膜对厌氧污泥的高效截留,解决了污泥容易从 MBR 中流失导致出水水质降低的问题,也优化了厌氧反应器的结构,使处理效果增强,同时也使投资与运行费用降低。

周保昌^[4]开发了处理能力为 20 m³/d 的浸没式厌氧 MBR,其内置 40 m²的旋转膜组件,采用环形布水管路设计,以保证分离效果和布水的均匀性,并能够实现在线反冲洗。采用该反应器处理食品废水,在长达 5 个月的运行期间对有机物的去除率可达 95% 以上(出水 COD < 50 mg/L)。与传统外置式膜生物反应器相比,至少节能 32%。在实际运用中这几类膜生物反应器既可以单独使用,也可以几种形式联合使用,取得较好的降解效果。

2 MBR 中运行参数的影响分析

2.1 曝气强度及溶解氧(DO)

在 MBR 单元操作中,曝气过程水中的溶解氧,由于对悬浮生长和附着生长的微生物及其絮状物产生影响,从而对生物膜的厚度造成影响。在 MBR 中控制适宜的曝气强度非常重要。

溶解氧(DO)浓度的高低对生物膜的结构及组成产生一定影响,同时影响 MBR 的污染物处理效率及膜的污染情况。Yun 等^[5]在 DO 浓度分别为 6.0 mg/L 和小于 3.0 mg/L 两种条件下,利用 MBR 处理印染废水,结果显示:缺氧条件下 MBR 的膜污染速率是好氧条件下的 5 倍。Jin 等^[6]研究了中空纤维膜浸没式 MBR 在不同溶解氧条件下膜结构的影响,DO 变化速率随污泥浓度的下降而升高;DO 的变化对 COD 色度的去除效果影响较显著,由此可见高 DO 浓度有助于降低的膜污染速率,有效降低 MBR 的成本。

2.2 有机负荷

在膜生物反应器中,有机负荷是指单位体积反应器在单位时间内所能去除的有机物量,它是生物滤池(或曝气池)设计和运行的重要参数。吴志超等^[7]在采用膜生物工艺(好氧曝气-超滤)对生产废水的降解进行有机负荷实验研究,当其它条件确定时,膜的水通量随着污泥浓度和滤纸过滤液 COD 浓度的提高而减少。何义亮等^[8]采用厌氧 MBR 和板框式 UM 组件

对高浓度食品废水进行处理,考察厌氧 MBR 的处理效果及其对负荷等的稳定性,结果表明,COD 负荷在 2 ~ 3 kg/(m³ · d)时,膜出水 COD 去除率可达 80% ~ 90%;当 COD 负荷超过 4.5 kg/(m³ · d)时,有机负荷出现积累,COD 去除率下降至 70%,从上述相关研究说明厌氧 MBR 出水有机负荷受 COD 浓度与水力停留时间的影响较大。

2.3 污泥浓度(MLSS)

污泥浓度影响 MBR 运行时有机的去除率及膜通量大小。宋志伟^[9]作了用不同浓度的污泥在 MBR 中的运行情况,试图寻找污泥浓度对反应器去除率的影响。实验表明:污泥浓度为 4 000 mg/L 时降解效果最佳,其中出水污泥的酚类浓度为 5.88 mg/L 时,去除率达 98.39%。当污泥浓度在 3 000 ~ 5 000 mg/L 时,膜通量变化幅度较小,把污泥浓度提高到 6 000 mg/L 后,膜通量急剧下降。说明污泥浓度超过一定浓度对膜通量影响很大,会造成 MBR 操作困难。

由此可见,污泥浓度对 MBR 的影响很大,经优化后,该工艺对较高污泥(大于 3 000 mg/L)处理效果较好,说明 MBR 处理工业废水有较好的弹性。

2.4 pH 值

在膜生物反应器中,pH 值是一个重要的运行参数,如废水的硝化反应需要消耗碱(OH⁻),随着生物反应的进行,pH 值会快速下降,而硝化细菌对 pH 值十分敏感。胡九如等^[10]在循环流化床加膜组件构成膜生物反应器,用其处理焦化废水,研究发现 pH 值在 7.8 ~ 8.4 时,对 NH₃-N 的去除率基本均在 95% 以上,随着 pH 值的继续增加,对 NH₃-N 的去除率有下降的趋势,说明 pH 值过高对硝化菌的生长有抑制作用。所以要保证良好的硝化效果,应严格控制 pH 值在 7.8 ~ 8.4 之间,此时硝化菌的比增殖速率和活性最大。

2.5 水温

温度的变化能导致混合液黏度的变化,影响膜通量和过滤阻力,研究发现在一定范围内,随着污水温度的提高,膜通量也增大。吕红等^[1]对分体式膜生物反应器(RMBR)处理废水进行了研究,发现污水温度在 22 ~ 30 °C 时,透膜压力 70 kPa,膜侧流速 1.3 m/s 的条件下,每提高 1°C 可提高膜通量 1.9%。因此,选择合适的污水温度能获得较高的膜通量,减少膜污染程度,降低 MBR 运行成本。

2.6 污泥龄(SRT)及水力停留时间(HRT)

污泥龄(SRT)是指反应系统中微生物细胞的平均停留时间,也就是反应系统内的微生物全部更新一

次所需的时间。How 等^[11]利用人工合成废水研究了短 SRT 条件下 MBR 的性能及反应器内的生物特性,发现在 HRT 为 3 h 和 6 h 两种情况下, SRT 在 0.25 ~ 5 d 内变化, MBR 均能获 COD 97.3% ~ 98.4% 的去除率。

杜志刚^[12]在气提升循环流化床内安装膜组件构成 MBR,用其处理焦化废水,考察其对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果,结果如下: HRT 在 5.4 ~ 9.1 h 时,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率增长很快,从 53.65% 增加到 91.71%,当 HRT > 9.1 h 时,去除率基本在 92% 左右波动。

2.7 膜通量

膜通量是指单位时间通过单位膜面积上的流体量,是 MBR 的重要运行参数之一,能表征膜污染程度,其值越大表明膜污染小,设备运行正常,越小表明膜污染越严重,工程上设计达到较大的膜通量是实现运行费用处于最低值的必然选择。人们用多种组合使设备的膜通量增大。Abdessemed 等^[13]发现使用超滤膜负载 FeCl_3^+ 进行预处理时,废水中 COD 的去除率能达到 77%,膜通量却增加 46.6%。Shon 等^[14]将 MBR 与絮凝和吸附技术结合起来,实验证明在超滤膜运行 18 h 后,经过絮凝和吸附预处理的膜通量是未经处理膜的 3 倍,TOC 去除率达到了 90% 的,这些指标均好于絮凝和吸附单独作用时的效果。因此,通过选择适合的工艺组合,有效降低膜污染程度使膜通量维持较高水平,进而扩大膜生物反应器的应用范围。

3 应用

由于工业的迅速发展,每天产生的工业废水量很大,水体污染很严重。MBR 作为近年来新发展起来的高效废水处理工艺,已经在制药、石化、食品、屠宰等工业废水处理中取得了大量成功。

发酵法生产肌苷工艺中,发酵提取洗涤分离等工序都产生大量的废水,主要是发酵残液洗罐废水等,含有大量难降解物质。李振红等^[15]在原污水处理工艺后采用浸没一体式 MBR 工艺对此制药厂废水进行深度处理中试试验。试验结果表明浸没一体式 MBR 工艺在 DO 质量浓度分别为 2, 4, 6 mg/L 时出水 COD 去除率分别为 63%, 75% 和 80%。

海带深加工生产具有生物活性的褐藻酸钠,但是生产 1 t 褐藻酸钠,需消耗自来水 1 000 t,排放废水 800 t,仅此一种海带深加工产品,每年至少排放的废水、废渣达 3×10^7 t,陈为裕等^[16]采用自行设计制作浸没式膜生物反应器(MBR),进行海带加工废水的处理实验,通过好氧微生物分解污水中的污染物,依靠膜的

过滤作用获得净化水,对 COD_{Cr} 700 ~ 1 600 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 10 ~ 50 mg/L 的海带废水,相应的水质指标的平均去除率分别达到 95.2% 和 93.8%。优化反应器中水力停留时间、容积负荷和好氧 MBR 系统运行稳定。

MBR 不仅可用于单个企业,也能在大规模的城市工业废水治理中发挥作用,如太湖边的无锡梅村污水处理厂采用了处理量为 100 000 m^3/d 的 GE 公司 ZeeWeed 膜生物反应器系统,减少了排放工业废水和市政废水中化学和有机污染物排入太湖的量,取得很好的生态环保效应。解决了太湖水质长期以来一直遭受富营养化的影响,使太湖周边的 3000 万人口的饮用水源质量得到保证。该套 MBR 系统荣获由国际水务情报局颁发的 2009 年度全球水务奖的最佳工业类水处理项目奖。

4 展望

综上所述,可以看到 MBR 运行过程中曝气强度、DO、SRT、HRT、污泥浓度、有机负荷、pH 及水温对废水处理效果都会产生重要影响。通过这些年的反复探索和工业实践,MBR 已取得了极大的成功,与传统水处理工艺相比,MBR 具备诸多优点,但在其应用过程中也存在一定局限性,如膜的生产成本较高,使用寿命较短,更换膜组件费用较高,此外膜污染也是 MBR 工艺中普遍存在的问题,这些问题阻碍了膜生物反应器的进一步的使用。今后将在下面几个方面进行研究:

1) 膜材料改性。对膜材料、膜结构进行优化,国内外研究方向现主要集中在开发新型无机膜材料、提高膜的亲水性及制造有机-无机结合膜;提高膜的使用寿命,降低膜组件的更换成本。

2) 与料液预处理技术有效结合。通过在料液预处理中加入适当的药剂,改变料液的性质,进行更有效的絮凝、过滤;并调整料液的 pH 值以去除给膜带来污染的物质,适当的预处理方法有助于减轻膜的负荷,提高膜通量,使膜的工作效率提高,使用时间变长。

3) 研究探索优化操作参数。如进水水质、污泥龄、污泥负荷、曝气强度等操作工艺,改变料液的流体力学数据,优化料液中微生物的种群和代谢过程,从而减轻微生物、凝絮物对膜的污染程度,实现延长 MBR 寿命、稳定运行的目的。

4) 研发多种膜清洗技术:通过改进清洗水流的压力、喷水方式、调节料液的水流状态等提高物理清洗的效能;研发、使用高效化学洗涤剂清洗,达到减轻膜污染,恢复膜通量,延长膜使用寿命的目的。

随着膜材料及膜技术的发展,对膜生物反应器的

工艺设计和运行参数的不断优化, MBR 在工业废水处理中将得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 吕红, 徐又一, 朱宝库, 等. 分体式膜-生物反应器在废水处理中的工艺条件[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 61-65.
- [2] 胡雪利, 买文宁, 牛娜. 一体式平板膜生物反应器处理维生素制药废水中试研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(3): 85-88.
- [3] 柏云杉, 柏文彦. 好氧管式膜生物反应器处理高含盐有机废水的研究[J]. 化工时刊, 2003, 17(12): 23-26.
- [4] 周保昌, 陆晓峰, 卞晓镨, 等. 浸没式厌氧膜生物反应器的研发及其除污效能[J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 29-31.
- [5] YUN M A, YEON K M, PARK J S, et al. Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment[J]. Water Research, 2006, 40(1): 45-52.
- [6] JIN Y L, LEE W N, LEE C H, et al. Effect of DO concentration on biofilm structure and membrane filterability in submerged membrane bioreactor[J]. Water Research, 2006, 40(15): 2829-2836.
- [7] 吴志超, 王士芬, 高廷耀. 巴西基酸生产废水膜生物工艺处理试验研究[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 165-168.
- [8] 何义亮. 厌氧 MBR 处理高浓度食品废水的应用[J]. 环境科学, 1999, 20(6): 53-55.
- [9] 宋志伟, 杨帆, 赵楠楠. 污泥浓度对膜生物反应器的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(4): 209-212.
- [10] 胡九如, 姚亮, 蔡建安, 等. 膜生物反应器去除焦化废水中氨氮的试验研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 71-77.
- [11] HOW Y N, SLAWOMIR W H. Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics [J]. Water Research, 2005, 39(6): 981-992.
- [12] 杜志刚. 膜生物反应器在废水处理中的研究及应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2011(1): 86-87.
- [13] ABDESSEMED D, NEZZAL G. Treatment of primary effluent by coagulation-adsorption-ultrafiltration for reuse [J]. Desalination, 2002, 152(1/3): 367-373.
- [14] SHON H K, VIGNESWARAN S, KIM I S, et al. Effect of pretreatment on the fouling of membranes: application in biologically treated sewage effluent [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 234(1/2): 111-120.
- [15] 李振红, 徐洪斌, 王磊, 等. 膜-生物反应器在制药废水深度处理中的应用[J]. 环境科技, 2011, 24(2): 35-37.
- [16] 陈为裕, 蔡邦肖. 海带工业废水的好氧膜生物反应器处理研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 329-345.

(上接第 105 页)

踏之间加装隔离片, 以保证儿童的腿脚部安全。研究为电动自行车儿童座椅标准的制定提供了相关依据。

参考文献:

- [1] 黄靖远. 电动自行车的发展历史及市场前景展望[J]. 电气时代, 1999(9): 11-13.
- [2] 刘旭东. 关于电动车安全现状的分析[J]. 科技探索, 2012(5): 167-170.
- [3] 孙明. 儿童座椅普及难厂家呼吁强制使用[J]. 汽车维修, 2012(10): 47.
- [4] 徐飞燕. 电动车安全性能低, 搭载儿童隐患多[N/OL]. 桐乡新闻. 2012-3-21. <http://txnews.zjol.com.cn/txnews/system/2012/03/21/014853545.shtml>.
- [5] 石臣鹏. 电动自行车交通现状分析及对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007.
- [6] 蔡敦权. 2012年电动自行车产业: 需求回落、增长放缓[J]. 中国自行车, 2012(12): 32-33.
- [7] 上海自行车集团研究所. GB17761-1999 电动自行车通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [8] 浙江省经济贸易委员会轻工纺织行业管理办公室. DB33/572-2005 电动自行车安全技术要求[S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2005.
- [9] 胡仁喜, 康士廷. SolidWorks2012 有限元、虚拟样机与流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 193-202.
- [10] 陈瑞祥, 王惠方. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的自行车车架分析[J]. 轻工机械, 2011, 29(6): 18-21.

[信息·简讯]

· 技术信息 ·

台达 REG 电能回馈单元助力电梯节能升级

日前, 台达电能回馈单元 REG 2000 系列成功应用于电梯行业, 一方面减低了电梯动力系统的散热需求, 另一方面产生的电能可以供其他用电设备使用, 有效节约了电能, 帮助电梯行业真正实现绿色节能, 安全升级。

电梯系统由曳引系统、导向系统、轿厢、门系统、重量平衡系统、电力拖动系统、电气控制系统以及安全保护系统组成。一般传统电梯使用交流变频器驱动电机, 当运动瞬间或频繁刹车时, 直流链电压会因瞬间能量回升冲击过大, 而超过所设定的 DC BUS 电压准位, 会使直流链电容烧毁, 因此传统方式会使用并联安装高瓦数的制动电阻来吸收过多的回升能量, 来解决负载能量回升, 但此方法效率差且增加硬件额外的费用与空间。

而将台达电能回馈单元 REG 2000 系列应用于电梯的电力拖动系统之中, 即可完美解决该问题。台达电能回馈单元配线与制动电阻一样简单, 但是只要制动电阻所占体积的一半, 就可以达到电能回生, 并且省去额外的散热装置, 制动能力也优于传统制动电阻, 是真正提高性价比与绿色节能的最佳选择。

(中达电通股份有限公司)