

MVR 耙式干燥系统设计 及蒸发性能研究

陈海,程榕*,郑燕萍,杨阿三,孙勤

(浙江工业大学化学工程学院,浙江省生物燃料利用技术研究重点实验室,浙江杭州310014)

摘要:设计的MVR耙式干燥系统采用罗茨蒸汽压缩机替换耙式干燥系统中的真空泵,将干燥过程脱出的二次蒸汽压缩以提高压力和温度后作为热源使用。节省了大量热能,节能效果显著。该系统干燥物料可以是粉粒状、膏状、浆状,也可以是溶液(此时包含蒸发、结晶和干燥过程)。为了探索MVR耙式干燥系统干燥溶液的规律,首先以水为对象进行了实验研究。结果表明,适当减小压缩比、控制过热度、降低干燥压力均有利于提高系统的运行效率。在实验范围内,MVR耙式干燥系统的能效比(COP)为4.4~8.8,单位能耗除湿量(SMER)为2.0~3.4 kg/kWh。按照目前的蒸汽电价比及能源状况,该工艺在干燥中仍有很大的应用前景。

关键词:机械蒸汽再压缩技术;耙式干燥;节能;蒸发;能效比;单位能耗除湿量

中图分类号:TQ051.8+92

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)08-0174-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.08.040

Design and evaporation performance of rake dryer based on mechanical vapor recompression

CHEN Hai, CHENG Rong*, ZHENG Yan-ping, YANG A-san, SUN Qin

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

Abstract: In the designed mechanical vapor recompression (MVR) rake drying system, a Roots steam compressor instead of the vacuum pump in a rake drying system, is used to compress the secondary steam that is removed from the drying process, in order to increase its pressure and temperature, making it become heat resource. This measure can save plenty of heat energy, bringing about significant energy efficiency. This drying system is suitable for materials in the forms of powder, paste, slurry and solution. In order to explore the rule that a solution is dried by the MVR rake drying system, water is at first used as research object in experiment. The results show that properly reducing compression ratio, controlling overheat and descending drying pressure are all selected to improve the operating efficiency of the system. In the range of experiments, the coefficient of performance (COP) of MVR rake drying system is 3.4-8.3 and the specific moisture extraction rate (SMER) is 1.0-3.4 kg·(kW·h)⁻¹. Given the current price ration between steam and electricity as well as current energy situation, this technology still has a great prospect.

Key words: mechanical vapor recompression; rake dryer; energy conservation; evaporation; coefficient of performance; specific moisture extraction rate

干燥是一种高能耗的单元操作,且在我国使用中的干燥设备能源利用率仅为40%~50%^[1-2],远低于国外设备高达70%甚至更高的能源利用率,因此节能的发展前景广阔,越来越多的节能技术被运用到干燥系统中。机械蒸汽再压缩(mechanical vapor recompression, MVR)技术^[3]通过机械压缩的方法将蒸发器内产生的蒸汽压缩,使其压力和温度都上升,从而提高蒸汽的品位,回收二次蒸汽的热量再次利用,减少生蒸汽的使用量,可以有效减少能量的消耗,是一种新型高效的节能技术^[4],近年来越来越多的学者开始探索该技术在干燥领域的应用,并且已经做了一些相应的研究。

在国外, Martin^[5]计算了机械蒸汽再压缩干燥

过程的经济成本,找到影响蒸汽再压缩过程的参数。Peregrina等^[6]计算了3种不同污泥浸油干燥过程的能耗,证明基于机械蒸汽再压缩技术的干燥流程能耗最小且生产成本低于传统干燥过程。Liu等^[7]设计了一套干燥生物质的MVR干燥系统,模拟发现该工艺比传统干燥工艺要节能40%。在国内,戴群特等^[8]最先提出将MVR技术运用于固体干燥领域,并设计了机械蒸汽再压缩固体干燥系统。陈彬^[9]研究并采用机械蒸汽再压缩技术降低新型盘式污泥干燥设备能耗。周雷等^[10]设计了一种MVR热泵低能耗低温干燥系统,模拟表明,该系统的能耗仅为常规低温回热干燥系统的7.7%。张华博等^[11]运用机械蒸汽再压缩技术设计了一种常压下应用于

盘式干燥器的节能工艺。

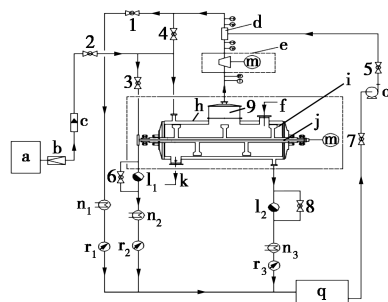
耙式干燥机适合在真空条件下干燥热敏性或含有机溶剂的物料,特点是能耗低,热效率高,可达80%以上,操作方便,适用范围广,目前在国内外有大量的耙式干燥机正在使用中^[12-14]。耙式干燥机是一种传导传热型的干燥机,符合机械蒸汽再压缩技术的适用条件。本文将机械蒸汽再压缩技术应用到耙式干燥工艺中,设计了一套节能环保干燥工艺系统,节能效果明显,符合行业发展趋势,具有重大研究意义。

1 MVR 耙式干燥系统设计

传统的耙式干燥系统用蒸汽(或热水等)通入夹套和中空轴耙齿间接加热物料,一般在真空条件下脱湿,尾气一般有2种处理方法,一是排出后直接排放掉,但是浪费大量热量的同时还污染环境;二是经过冷凝器冷凝收集处理,同样浪费大量热量,且需加大冷凝成本。为了进一步降低真空耙式干燥过程的能耗,使二次蒸汽重复利用并减少尾气处理成本,根据耙式干燥机的特点,结合机械蒸汽再压缩技术,设计了MVR耙式干燥系统。采用罗茨蒸汽压缩机替换耙式干燥系统中的真空

泵,回收利用二次蒸汽并适当补充部分生蒸汽作为热源,只需要补充少量生蒸汽即可稳定运行,能够有效节约热能,极大地提高经济效益。二次蒸汽释放潜热冷凝,不需要额外添加冷凝设备,同时节约大量冷量。

为满足实验研究,确保实验的准确性,设计了一套MVR耙式干燥实验系统,如图1所示为MVR-耙式干燥实验系统的干燥工艺流程。蒸汽发生器产生



a—蒸汽发生器;b—压力调节阀;c—涡街流量计;d—蒸汽减温器;e—罗茨压缩机;f—进料口;g—丝网除沫器;h—加热夹套;i—耙式干燥机;j—中空轴;k—出口口;l—1-2 疏水阀;m—电机;n—1-3 换热器;o—计量泵;P—压力表;q—水槽;r—1-3 旋翼式热水表;T—温度计;l~8—球阀

图1 MVR-耙式干燥实验系统工艺流程

(上接第173页)

- [10] 河南中原绿能高科有限责任公司.重烃吸收脱除天然气中重烃的方法:CN,1743418[P].2006-03-08.
- [11] 岳春静.液化天然气系统中重烃脱除系统的研究[J].广东化工,2013,40(12):221-223.
- [12] 李均方,张瑞春,夏功科,等.原料天然气组分变化对LNG装置的影响及对策[J].石油与天然气化工,2014,43(3):261-265.
- [13] 胡周海,福鹏,张晓松,等.新型LNG重烃去除工艺[J].煤气与热力,2012,32(3):12-15.
- [14] 张立艳.LNG生产工艺探讨[J].辽宁化工,2013,42(9):1153-1156.
- [15] 新地能源工程技术有限公司.天然气液化与重烃处理的方法和装置:CN,201210540638.5[P].2013-04-10.
- [16] 新地能源工程技术有限公司.一种页岩气脱水脱重烃方法及装置:CN,201310224727.3[P].2013-10-16.
- [17] 北京安珂罗工程技术有限公司.一种从天然气液化过程中脱除重烃的方法和系统:CN,201410339103.0[P].2014-10-08.
- [18] 北京安珂罗工程技术有限公司.一种液化天然气生产中回收重烃的方法和系统:CN,201610227660.2[P].2016-07-20.
- [19] 北京安珂罗工程技术有限公司.一种从天然气中脱除重烃的方法和系统:CN,201610227796.3[P].2016-07-06.
- [20] 北京安珂罗工程技术有限公司.一种从天然气液化过程中分离重烃凝液的系统:CN,201620733631.9[P].2016-12-21.
- [21] Bernardo P, Drioli E, Golemme G. Membrane gas separation: A re-

view/state of the art[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(10):4638-4663.

- [22] Naheiri T, Ludwig K A, Anand Mm Roa M B, et al. Scale-up of selective surface flow membrane for gas separation[J]. Separation Science and Technology, 1997, 32:1589-1602.
- [23] Antonio B F. Adsorption-selective carbon membrane for gas separation[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 177:9-16.
- [24] 新地能源工程技术有限公司.一种天然气脱重烃工艺及装置:CN,201310728979.X[P].2014-03-19.
- [25] 新地能源工程技术有限公司.一种天然气干燥及液化的工艺方法和装置:CN,201210128125.3[P].2012-08-22.
- [26] 气体产品与化学公司.用于自天然气进料流去除重烃的设备:CN,201220501255.2[P].2013-07-31.
- [27] 天津市振津工程设计咨询有限公司.一种分步冷凝脱除天然气中重烃的装置及方法:CN,201410311830.6[P].2014-09-24.
- [28] Bern T C L. A study on the solubility of heavy hydrocarbons in liquid methane and methane containing mixtures[D]. Thesis of Master; University of Ottawa, 1977.
- [29] Davenport A J, Rowlinson J S. The solubility of hydrocarbons in liquid methane[J]. Trans of the Faraday Soc, 1963, 59:79-84.
- [30] David L T, James P K, Kraemer D L. Solid hydrocarbon solubility in liquid methane-ethane mixtures along three-phase solid-liquid-vapor loci[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1979, 24(4):300-310. ■

的生蒸汽计量后通过减压阀加入耙式干燥机中充当热源,物料湿分受热蒸发产生二次蒸汽,二次蒸汽经过丝网除沫器去除粉尘和液滴,进入罗茨压缩机增压升温后,蒸汽减温器喷水除去过热使压缩后的二次蒸汽饱和,并加入部分生蒸汽后作为热源重复利用,蒸汽在干燥机夹套和中空轴内释放潜热冷凝,经过疏水阀排出,换热器可以对疏水阀泄漏的部分蒸汽进一步冷凝确保实验准确,热水表对冷凝水计量。

2 MVR 耙式干燥实验

实验测量的主要参数有压缩机进出口的压力和温度,压缩机的工作频率和功率,耙式干燥机的电机频率和功率,加热夹套、中空转轴与压缩机排空阀排出的冷凝水量,生蒸汽通入量。

MVR 热泵系统的主要性能指标有能效比 (COP) 与单位能耗除湿量 ($SMER$)^[15]。

$$COP = Q_v / W$$

$$SMER = m_v / W_{tot} = 3600m_v / Q_{tot}$$

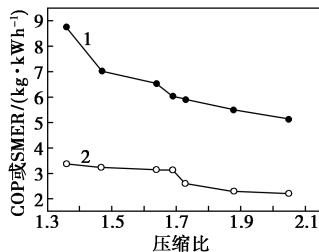
一台有效的热泵性能系数 COP 必须大于 1, COP 越大则热泵效率就越高^[16]。传统干燥器的理论 $SMER$ 值为 1.6 kg/kWh,而实际的 $SMER$ 只有理论的 20%~80%,而热泵除湿干燥器的 $SMER$ 一般为 2.0~3.0 kg/kWh^[16]。由于国内外对于 MVR 技术应用于干燥领域的研究较少,故对实验测试数据与传统耙式干燥、热泵干燥等相关数据进行对比来衡量 MVR 干燥系统的性能。

3 实验结果分析

考虑到该系统的干燥能力受到 MVR 系统的影响,且该系统干燥物料可以是粉粒状、膏状、浆状,也可以是溶液(此时包含蒸发、结晶和干燥过程),故先行使用水作为干燥物料测试该装置的性能。实验中干燥机内水的填充率约为 50%,变更各工艺条件对系统进行测试。

由于压缩机功率限制,压缩比范围为 1.3~2.1。从图 2 中曲线可以看出,随着压缩比的增加, COP 从 8.8 降到 5.1,而 $SMER$ 也从 3.4 kg/kWh 降到 2.2 kg/kWh。从图中曲线变化可以看出 COP 随着压缩比变化逐渐下降到一定值后趋于平稳,由于随着压缩比增大,压缩机出口压力变大,对应的饱和蒸汽温度也将升高,因此传热温差增大,蒸汽焓也增加,蒸汽冷凝放出的潜热也随之增加,但是随压缩比

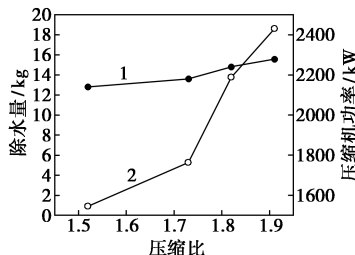
的增大,压缩后蒸汽的冷凝潜热增加不是很明显,但压缩机的功耗却随着频率增加而迅速增加,因此 COP 总体上是减少的趋势;特别是在压缩机功率增加到一定值后,由于干燥室出来的蒸汽量增加没那么多,导致压缩机容积效率与机械效率减小,在压缩比达到约 1.65 后 COP 有一个较为明显的减小趋势。图 3 为除水量、压缩机功率随压缩比变化曲线,由图可知压缩机的功率增加速度比干燥过程水分蒸发速度明显增加更快,故 $SMER$ 也呈下降的趋势。因此结合实验结果分析,适当减小压缩比将有利于提高系统的运行效率。



1— COP ; 2— $SMER$

干燥压力约为 80 kPa, 转轴频率 20 Hz, 蒸汽消除过热

图 2 COP 、 $SMER$ 随压缩比的变化



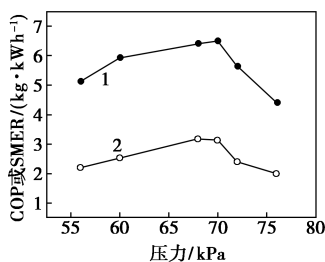
1—除水量; 2—压缩机功率

干燥压力约为 80 kPa, 转轴频率 20 Hz, 蒸汽消除过热

图 3 除水量、压缩机功率随压缩比变化

图 4 为 COP 、 $SMER$ 随干燥压力的变化。从图 4 中曲线可以看出,随着干燥压力的降低, COP 从 5.1 升到 6.5 再降到 4.4,而 $SMER$ 也呈同样趋势,从 2.2 kg/kWh 升到 3.2 kg/kWh 再降到 2.0 kg/kWh。当压缩比一定时,吸入压缩机内蒸汽体积流量不变,而随着干燥压力下降压缩机出口蒸汽压力减小,即蒸汽的比容增大,单位时间内进入压缩机蒸汽的质量流量减小,但由于系统热损失及压缩机效率等原因,低压下为达到相同压缩比压缩机功耗明显较高压时低,因此 COP 、 $SMER$ 会随干燥压力的降低而升高。但由于本系统中使用压缩机代替原耙式干燥系统中的真空泵,当干燥压力达到一定值后,为达

到更低压力需要在二次蒸汽循环前消耗更多的能量,且会排放掉更多二次蒸汽。因此可知当工艺条件允许时,在一定压力范围内干燥室维持在较低的干燥压力下工作有利于提高运行效率。



1—COP;2—SMER

压缩比为 1.6, 转轴频率为 20 Hz, 蒸汽消除过热

图 4 COP、SMER 随干燥压力的变化

二次蒸汽经压缩后可能存在过热, 当过热达到一定值后, 压缩机、干燥机的功率并没有变化, 用于加热的蒸汽需先降到饱和温度再冷凝释放潜热, 而释放显热时远远小于冷凝释放潜热时的传热速率, 这将不利于干燥的进行, 因此需要对压缩后的蒸汽除过热处理。实验还研究了干燥机转轴速度的影响, 由于水作为研究物料, 转轴速度改变导致的换热面更换频率带来的影响较小, 故转轴速度的影响可以忽略不计。

实际热泵的热力学循环往往是在非等熵压缩、不可逆绝热膨胀、非等温下的热传递等情况下进行的, 因此实际热泵的性能系数只有理想热泵的 40%~50%^[16]。实验值较理论计算值的 40%~50% 略小, 主要是因为实际值还受设备操作条件、系统工艺流程及环境等的影响; 且由于市售压缩机都是工业级的, 对于实验研究来说偏大, 造成压缩机效率偏低。虽然实验值较理论值小, 但其节能效果仍明显优于传统耙式干燥机。

4 结论

结合 MVR 技术设计了一套真空耙式干燥节能工艺系统, 用罗茨蒸汽压缩机替换耙式干燥系统中的真空泵, 干燥过程脱出的湿分(二次蒸汽)经罗茨蒸汽压缩机压缩, 再经增湿(消除过热)、补充少量生蒸汽后作为热源使用, 不仅节省了大量热能, 还节省了冷量。对 MVR 耙式干燥系统进行实验研究, 在实验条件下, COP 为 4.4~8.8, SMER 为 2.0~3.4 kg/kWh, 该数值虽然明显小于理论值, 但对比

传统耙式干燥、热泵干燥及目前市场的蒸汽电价比, 该系统工艺仍具有可观的实际价值。根据实验结果发现, 选择适当小的压缩比、适当低的干燥压力、控制蒸汽过热度均有利于提高系统的运行效率, 对 MVR 耙式干燥系统应用于干燥领域具有参考意义。尽管目前 MVR 技术运用于干燥领域还有待于进一步研究, 但是可以继续优化加强相关技术的开发, 使该系统应用于实际。

参考文献

- [1] Mujumdar A S, Wu Z H. Thermal drying technologies: New developments and future R&D potential [C]. Hong Kong: Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference, 2007: 1-8.
- [2] Mujumdar A S. Industrial drying: Innovation, situation and developing needs [J]. Drying Technology & equipment, 2007, 4 (2): 60-69.
- [3] Tadeusz Kudra, Arun S Mujumdar. Advanced drying technologies [M]. CRC Press [Imprint]; Taylor & Francis Group; Taylor & Francis Group [Distributor], 2010.
- [4] 李伟, 朱曼利, 洪厚胜. 机械蒸汽再压缩技术(MVR)研究现状[J]. 现代化工, 2016, 36(11): 28-31.
- [5] Martin Fehlau. Optimization of vapor compression for cost savings in drying processes [J]. Chem Eng Technol, 2000, 23 (10): 901-908.
- [6] Peregrina Carlos, Rudolph Victor, Lecomte Didier, et al. Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge: An economic assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86 (1): 246-261.
- [7] Liu Y, Aziz Muhammad, Kansha Y, et al. Application of the self-heat recuperation technology for energy saving in biomass drying system [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 117: 66-74.
- [8] 戴群特, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 蒸汽再压缩热泵系统用于固体干燥节能分析 [J]. 节能技术, 2011, 29(4): 353-356.
- [9] 陈彬. 节能型盘式污泥干燥设备研发 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
- [10] 周雷, 韩东. 基于蒸汽再压缩技术的低温干燥系统设计与节能分析 [J]. 节能技术, 2014, 32(1): 60-64.
- [11] 张华博, 张继军, 刘燕, 等. 机械蒸汽再压缩技术在盘式干燥器中的应用 [J]. 化学工程, 2015, 43(5): 1-5.
- [12] 邵康乐. 耙式干燥器的设计 [J]. 江苏化工, 1991, 1(3): 49-53.
- [13] 刘广文. 干燥设备设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] 徐成海, 张伟伟, 关奎之. 真空干燥 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [15] 陈东, 谢继红. 热泵干燥装置 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [16] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2006. ■