

玉米淀粉工业中多效蒸发工艺的模拟分析与优化

李 义¹,李明鑫²,刘 俊¹,李伟达²,贾中文¹,王少靖²,赵国兴¹,刘琳琳²,刘海军¹,
都 健²,佟 毅^{3*},修志龙⁴,李大勇¹

(1.吉林中粮生化有限公司,吉林 长春 130400; 2.大连理工大学化工学院,辽宁 大连 116024;
3.玉米深加工国家工程研究中心,吉林 长春 130031; 4.大连理工大学生物工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:玉米浆蒸发工序是湿磨法玉米淀粉工艺下游生产的关键过程。国内某玉米淀粉生产企业在该工序采取多效蒸发技术脱除水分。应用化工流程模拟软件 Aspen Plus 对该厂现有的六效蒸发工艺进行模拟,通过分析讨论玉米浆多效蒸发工序的用能状况,提出了两种优化策略:一是在进料前增设 1 台预热器;二是将工艺流程由混流改为逆流。采用策略二改造后的工艺流程较原有工艺节省了 1.67 t/h 新鲜蒸汽用量,模拟结果可以为工厂的节能改造提供参考。

关键词:玉米湿法加工;多效蒸发;节能改造;流程模拟

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)S-0187-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.S.043

Simulation and optimization on multi-effect evaporation process for corn starch production

LI Yi¹, LI Ming-xin², LIU Jun¹, LI Wei-da², JIA Zhong-wen¹, WANG Shao-jing², ZHAO Guo-xing¹,
LIU Lin-lin², LIU Hai-jun¹, DU Jian², TONG Yi^{3*}, XIU Zhi-long⁴, LI Da-yong¹

(1.Jilin COFCO Biochemistry Co., Ltd., Changchun 130400, China;

2.School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3.National Engineering Research Center of Corn Deep Processing, Changchun 130031, China;

4.School of Bioengineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract:The evaporation of corn steep liquor is a crucial process in the downstream production of the wet corn starch milling process.A certain corn starch factory in China employs multi-effect evaporation technology in this process. Aspen Plus chemical process simulation software is used to simulate the existing six-effect evaporation process in the factory.Through analyzing and discussing the energy consumption situation of the multi-effect evaporation process for corn steep liquor,two optimization strategies are proposed.One is to add a preheater before feeding,and the other is to change the process from the mixed flow method to the countercurrent flow.The second modified process saves 1.67 t·h⁻¹ of fresh steam.The simulation results can provide reference for the energy-saving renovation for similar factories.

Key words:wet corn milling processing; multi-effect evaporation; energy-saving renovation; process simulation

近年来,中国玉米淀粉工业正以年产量 19.8% 的增速迅速发展^[1]。湿磨法玉米淀粉生产工艺凭借其淀粉收率高、生产工艺简单等优势,占据了主要份额^[2]。其中,玉米浆蒸发工序是湿磨法的重要环节。

在玉米浆加工工序中,玉米浆稀浸泡液中的水含量高,而干物质含量很低,所以为了充分回收玉米浆稀溶液中的有机成分和营养物质,去除玉米浆稀溶液中多余的水分,使蒸发浓缩后的玉米浆浓度能够满足产品及下游生产要求,必须要对其进行蒸发

浓缩。

在蒸发工序中,比较成熟的节能技术有蒸汽机械再压缩(MVR)技术、蒸汽热力再压缩(TVR)技术、多效蒸发技术等。其中,MVR技术是使用超高速直接式蒸汽压缩机将浓缩产生的二次蒸汽升温、升压后返回蒸发器壳程重新使用,其节能效果明显,连续生产时可以完全不产生蒸汽,仅使用电力驱动浓缩过程;TVR技术中锅炉蒸汽进入多效蒸发器1效壳程时必然要减压,利用文丘里效应将原本引入2效壳程的二次闪蒸汽回收一部分,与主蒸汽一

收稿日期:2019-04-04;修回日期:2019-07-09

作者简介:李义(1964-),男,硕士,研究方向为玉米现代化精深加工,li-yi1@cofco.com;佟毅(1963-),男,博士,高级工程师,研究方向为玉米现代化精深加工,通讯联系人,tongyi@cofco.com。

起送进 1 效壳程,节约新蒸汽用量,该工艺虽然节能效果有限,但投资相对较低^[2];多效蒸发浓缩技术的原理是溶液沸点随着压力的降低而降低,当前一效蒸发单元产生的二次蒸汽温度高于后一效的溶液沸点(压力较前一效低)且满足传热温差即可换热^[3],实现蒸发操作。与单效蒸发相比,多效蒸发技术节能效果显著,而如果将管束废气引入玉米浆多效蒸发器作为热源,在连续运行的情况下则可以实现降低蒸汽消耗的同时几乎不增加电耗,是最佳的节能方式。

在多效蒸发研究中,杨凯业等^[4]应用 Aspen Plus 对制糖工业中的多效蒸发单元进行模拟,采用换热模块 HEATX、降压阀模块 PDROP 和分流器 FSPLIT 组合建立蒸发器模型,通过对比,验证了五效蒸发模型的可行性。史航等^[5]利用 Aspen Plus 模拟了基于 MVR 技术的多效蒸发过程,并利用有效能分析法对多效蒸发效数、MVR 加入位置进行了分析,最终得出六效蒸发的有效能效率最高,达到 0.568,且 MVR 在多效蒸发中的加入位置越靠前,节能效果越好。梁虎等^[6]提出了一种多效蒸发系统优化设计模型,以年度总费用最小为目标,建立了多效蒸发的热经济学模型,并采用该模型对 NaOH 蒸发工序进行优化设计,年度总费用节省 10%以上。

多效蒸发作为一种高效节能的分离技术在实际工业中应用广泛,但在不同的生产工艺中,多效蒸发系统的实际配置与操作情况各不相同,需要有针对性地开展系统评价与优化。我国北方某玉米淀粉生产企业在玉米浆蒸发工序中采用多效蒸发技术脱除水分,本文基于该厂的实际生产数据,深入探究多效蒸发工序的技术要点,利用 Aspen Plus 软件 (Version 10.0) 对该过程进行建模和优化分析,以期得到更好的节能效果,为实际生产过程提供参考。

1 玉米浆稀浸泡液多效蒸发工艺

1.1 多效蒸发工艺简介

蒸发器在生产过程中需要消耗大量蒸汽,为节约新鲜蒸汽,将多台蒸发器串联组成多效蒸发器,多效蒸发要求后一效的操作压力小于前一效,前一效蒸发产生的二次蒸汽作为后一效蒸发器的加热蒸汽,二次蒸汽在后一效中冷凝,为溶液的蒸发提供热量。多效蒸发技术的优点是可以多次利用二次蒸汽,仅需在第 1 效使用新鲜蒸汽。单效与多效蒸发器新鲜蒸汽消耗量对比如表 1。

表 1 单效与多效蒸发器新鲜蒸汽消耗量对比^[2]

效数	1	2	3	4	5
理论最小值/(t·h ⁻¹)	1	1/2	1/3	1/4	1/5
实际最小值/(t·h ⁻¹)	1.1	0.57	0.4	0.3	0.27

蒸发器按操作压力可分为常压、加压和减压操作;按溶液在蒸发器中的运动情况可分为循环型、单程型和直接接触型。其中,循环型指沸腾溶液在加热室多次通过加热表面,根据循环运动的驱动力又可进一步分为自然循环和强制循环型;单程型指沸腾溶液在加热室中一次通过加热表面,可分为升膜式、降膜式、搅拌薄膜式和离心薄膜式;直接接触型指加热介质和溶液直接接触传热,例如浸没燃烧式蒸发器^[7]。

多效蒸发工艺有并流、逆流和混流 3 种流程。混流加料是逆流加料和并流加料的交叉组合。

并流加料时溶液流向和加热蒸汽流向相同,并流加料的优点有:①溶液从压力(温度)较高的蒸发器流向压力(温度)较低的蒸发器,溶液可依靠各效间的压差流动而不需泵送;②溶液进入压力(温度)较低的下一效时处于过热状态,因而会产生额外的气化,得到较多的二次蒸汽;③完成液在末效排出,其温度最低,故总的热量消耗较低。并流加料的缺点是,由于各效中溶液的浓度依次增高,而温度依次降低,因此溶液的黏度增加较快,使加热室的传热系数依次下降,这将导致整个蒸发装置生产能力的下降或传热面积的增加。

逆流加料时溶液流向和加热蒸汽流向相反,其优点是,溶液浓度在各效中依次增高的同时,温度也随之增高,因而各效内溶液的黏度变化不大,这种流程适用于黏度随浓度和温度变化较大的溶液蒸发^[8]。逆流加料的缺点有^[9]:①溶液在效间是从低压流向高压的,因而必须用泵输送;②溶液在效间是从低温流向高温,每一效的进料相对而言均为冷液,没有自蒸发,产生的二次蒸汽量少于并流流程;③完成液在第 1 效排出,其温度较高,带走热量较多而且不利于热敏性料液的蒸发。

在蒸发浓缩过程中,玉米浆稀浸泡液中的可溶性物质会在加热管表面粘附而形成积垢,使传热效率下降。而且玉米浆稀浸泡液中含有热敏性物质,在高温下停留时间过长会引起蛋白质变性,所以应该减少溶液在蒸发器中的停留时间,提高溶液的流动速度。同时,查看蒸发器结垢情况,定时和及时清洗蒸发器是提高蒸发器蒸发效率、保证生产正常运

行的重要措施。

多效蒸发工序的研究和应用虽然已经很成熟,但是针对不同的工序仍然存在着不同的优化和节能要点。

1.2 玉米浆多效蒸发工艺节能技术要点

(1)在第1效蒸发器前增加1台以废气为热源的预热器,使进入2效蒸发器的物料温度提高,减少1效和2效蒸发器的生产负荷,这台预热器使用前效的废气加热,提高蒸汽利用率。

(2)将其他产品干燥过程产生的废气,经过过滤、洗涤后产生的余热气与新蒸汽混合后进入3效蒸发器使用,这些废气的使用能够降低新鲜蒸汽的消耗。

(3)将各种干燥机、换热器排出的二次蒸汽加入2/3效蒸发器中使用,该技术的重点是高温冷凝蒸汽的回收和二次蒸汽的生产。在玉米浆蒸发浓缩节能技术中,管束干燥机的废气回收洗涤是技术的关键,废气首先经过旋风分离器分离干物质,然后再进入洗涤塔洗涤,这样才能与新鲜蒸汽混合使用^[2]。

2 工艺流程与模拟计算

本文研究的工艺是在玉米浆蒸发浓缩阶段采用由6台升降膜式蒸发器串联组成的多效蒸发系统,为降低新鲜蒸汽的用量,引入经过洗涤后的干燥尾气作为部分蒸发器的热源。该工艺节能效果显著,显著降低了新鲜蒸汽的用量,极大地提升了企业的经济效益。该工艺采用错流法,工艺流程如图1所示,其中每台蒸发器的温度和压力如表2所示。工程中采用5 t/h(0.8 MPa)的新鲜蒸汽作为第1效蒸发器的热源,同时引入了44.1 t/h(压力为101.325

kPa、温度为90℃)的干燥废气(干燥废气主要由空气和水组成,其中水的摩尔分数为0.688)作为第3效蒸发器的热源,玉米浆稀溶液的组成及浓缩后的组成如表3所示。

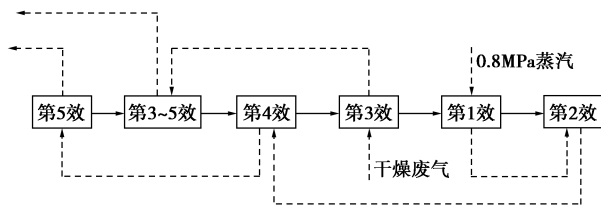


图1 多效蒸发示意图

表2 多效蒸发器操作条件

项目	第1效	第2效	第3效	第4效	第5效	第3~5效
温度/℃	81.8	74.7	73.8	62.0	59.2	69.9
真空度/kPa	38.78	50.10	60.73	63.14	77.91	80.21

表3 玉米浆含量

	水含量/(t·h ⁻¹)	干物含量/(t·h ⁻¹)	温度/℃
玉米浆稀溶液	52.5	2.965	50
浓缩玉米浆	4.83	2.965	82

Aspen Plus 作为应用最为广泛的大型流程模拟软件,拥有完整的单元操作模块和强大的物性数据库,能够对大部分化工流程进行物料衡算和能量衡算。本文采用 Aspen Plus 对上述玉米浆稀溶液多效蒸发过程进行模拟与优化,选用 NRTL 作为全局物性方法^[10],选取换热器 HeatX、泵 Pump 和闪蒸罐 Flash 3 个模块组成一个基本单元,模拟一台升降膜式蒸发器^[11],并根据图1所示的工艺流程进行建模,建模流程如图2所示。

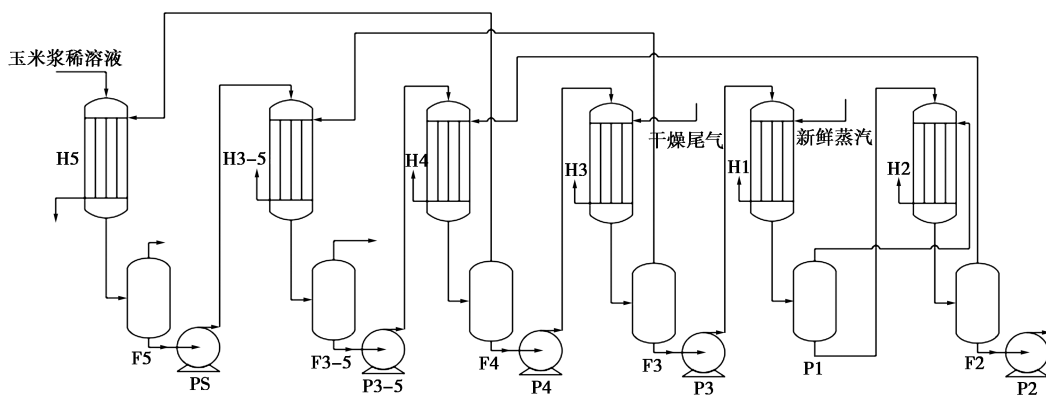


图2 多效蒸发模拟流程图

模拟结果见表4。其中,由干燥废气直接或间接提供热源的蒸发器的蒸发水量在15 t/h左右,而由新鲜蒸汽直接或间接提供热源的蒸发器的蒸发水

量小于5 t/h。该数据满足热力学定律,且与工厂实际数据接近,数据误差在允许范围内,可以在该模型的基础上对工艺过程进行优化。

表 4 模拟结果

项目	第 5 效	第 3~5 效	第 4 效	第 3 效
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	2.78	15.47	4.07	15.50
项目	第 1 效	第 2 效	总蒸发水量	
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	4.89	4.96	47.67	

表 5 加预热器后模拟结果

项目	第 5 效	第 3~5 效	第 4 效	第 3 效
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	3.91	15.47	3.72	15.50
项目	第 1 效	第 2 效	总蒸发水量	
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	4.50	4.58	47.67	

3 优化与讨论

3.1 进料温度优化

进料温度是影响多效蒸发效果的重要参数,利用 Aspen Plus 对玉米浆稀溶液温度进行灵敏度分析,保持每一效操作压力不变,得到了玉米浆稀溶液中水的总蒸发量随进料温度的变化情况,如图 3 所示。

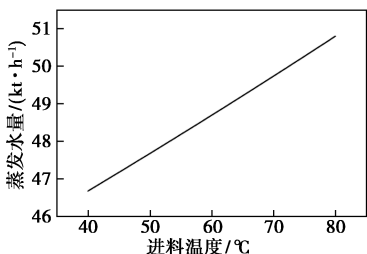


图 3 进料温度对蒸发水量的影响

由图 3 可知,进料温度越高则总蒸发水量越多,即蒸发效果越好。因此在进料前增加 1 台预热器,对待蒸发的稀浸泡液进行预热,可减小多效蒸发系统的生产负荷,降低新鲜蒸汽的使用量。对原工艺进行改进,可采用换热后的干燥尾气作为预热器热源,根据热量衡算,经换热后玉米浆稀溶液可被预热至 66℃。规定总的蒸发水量仍为 47.67 t/h,每效的压力也保持不变,对改进后的流程进行模拟,结果见表 5。由模拟结果可知新鲜蒸汽用量为 4.61 t/h,较原工艺减少了 0.39 t/h。

将增设预热器前后的多效蒸发系统中每一效蒸发水量进行对比,如图 4 所示。通过对玉米浆稀溶液进行预热,导致第 1 台蒸发器(即第 5 效蒸发器)的蒸发量提高,降低了其生产负荷。由于新鲜蒸汽用量减少,所以由新鲜蒸汽作为热源的第 2 效以及由其二次蒸汽作为热源的第 2、4 效的水分蒸发量减少。由此可见,预热温度的选择不仅能够影响新鲜蒸汽的用量,还能够显著影响各效之间的协调与配合。

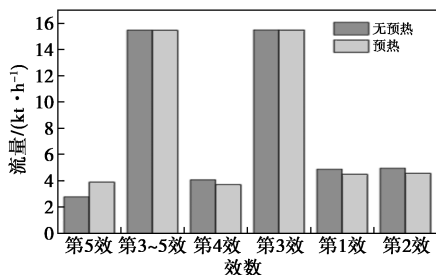


图 4 每效蒸发水量对比

3.2 工艺流程优化

该厂在多效蒸发工序所采用的混流加料法中存在局部并流加料。由 1.1 节可知,并流加料过程玉米浆黏度增加较快,容易导致积垢,不仅降低换热器的传热效率,而且会加大蒸发器清洗的费用和负担^[12],所以本文将该多效蒸发工艺流程改为纯逆流,新鲜蒸汽由第 2 效蒸发器加入,干燥尾气由第 3~5 效蒸发器加入,保持水分蒸发量不变,改进后的工艺流程如图 5 所示,模拟结果见表 6。通过模

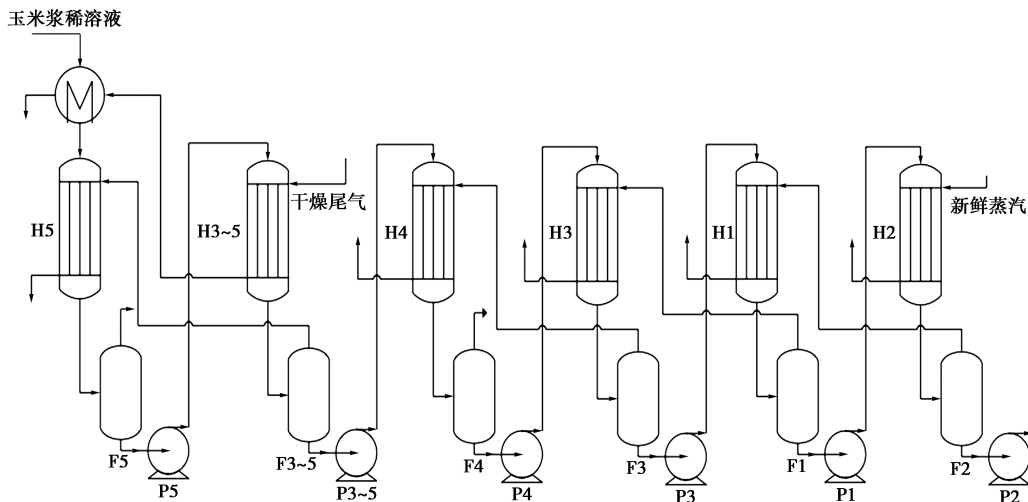


图 5 改进后工艺流程图

表6 优化后工艺流程模拟结果

项目	第5效	第3~5效	第4效	第3效
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	17.75	17.35	2.79	3.17
项目	第1效	第2效	总蒸发水量	
蒸发水量/(t·h ⁻¹)	3.23	3.38	47.67	

拟结果可知,新鲜蒸汽用量为 3.33 t/h,较原工艺(未加预热器前)节约了 1.67 t/h。

分析原因可知,在原混流多效蒸发工艺中,干燥尾气由第3效蒸发器加入,该效的压力为 40.6 kPa,此时玉米浆的饱和温度约为 77℃,经过该换热器,干燥尾气中约 40.74%的水蒸气被液化;而在优化后的逆流多效蒸发工艺中,干燥尾气由第3~5效加入,该换热器的压力为 23.4 kPa,此时玉米浆饱和温度约为 64℃,经换热后,干燥尾气中约 48.31%的水蒸气被液化,由于汽化潜热比较大,干燥尾气中水蒸气被液化的量增加,放出的热量也会大量增加,相应地减少了新鲜蒸汽的用量。

4 结论

本文介绍了玉米淀粉蒸发工序和多效蒸发工序中的节能技术,并采用 Aspen Plus 对企业现运行的六效蒸发系统进行模拟。模拟结果接近工厂真实数据,证明了模型的有效性,可基于该流程进行工艺参数的调整和优化。为了提高多效蒸发系统的节能效果,提出了两种节能策略:一是在六效蒸发系统前增设 1 台板式预热器,预热玉米浆稀溶液,可节约

0.39 t/h 蒸汽;二是将工艺流程由混流改为逆流,增大了干燥尾气的利用率,节约了 1.67 t/h 新鲜蒸汽的用量。该模拟流程对于指导现场操作具有一定意义,优化方案也为实际生产的节能改造提供了参考。

参考文献

- [1] 王奕娇,张庆柱,朱金鸣.我国玉米深加工现状及其发展建议[J].农机化研究,2010,32(9):245-248.
- [2] 白坤.玉米淀粉工程技术[M].北京:中国轻工业出版社,2009.
- [3] 赵文华.多效蒸发技术在煤化工废水工程领域的应用[J].煤炭加工与综合利用,2018,(12):45-48.
- [4] 杨凯业,陈砺,严宗诚,等.制糖多效蒸发过程的模拟与分析[J].节能技术,2016,34(3):195-199.
- [5] 史航,施云海,陈迎,等.MVR与多效蒸发联用的有效能分析[J].节能技术,2018,36(3):270-275.
- [6] 梁虎,王黎.多效蒸发系统优化设计研究[J].化学工程,1997,25(6):48-51.
- [7] 李咏梅.玉米化工用多效蒸发器的优化分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [8] 高妍,沈延顺,张帆,等.低温余热回用的逆流三效蒸发节能工艺设计[J].石化技术与应用,2018,36(6):58-62.
- [9] 邓超,包艳珍,张嫚,等.三效降膜蒸发器在糖精钠生产中的应用[J].河南科技,2014,(8):72-72.
- [10] 张怀庆.基于 Aspen Plus 平台资源节约型木质纤维素乙醇生产工艺流程模拟[D].上海:华东理工大学,2011.
- [11] 管东强.三效逆流降膜蒸发装置的 Aspen Plus 模拟[D].上海:上海交通大学,2013.
- [12] 李博,张晓冬,喻果.一种复合阻垢剂在玉米浆蒸发器上的应用研究[J].当代化工,2017,46(5):995-997.■

中国专利申请数量继续在全球领先

联合国专门机构世界知识产权组织于 10 月 16 日发布《2019 年世界知识产权指标》指出,2018 年全球专利、商标和工业品外观设计申请量再创新高,其中亚洲的专利、商标和工业品外观设计申请量占全球总量的 2/3 以上,中国在世界知识产权多个指标居世界领先地位,并继续推动全球知识产权需求的整体增长。

在世界知识产权组织此前举办的新闻吹风会上,“中国”成为发布方介绍情况和记者们提问中的高频词。该机构总干事高锐及首席经济学家芬克多次提到中国在世界知识产权事业中的突出地位。高锐表示,2018 年亚洲在专利、商标、工业品外观设计和其他知识产权申请量上继续超越其他地区,仅中国就占了世界专利申请量近一半,印度也取得了令人瞩目的增长,亚洲已经成为全球创新枢纽。

报告显示,中国专利申请数量继续在全球领先。2018 年中国受理专利申请数量为全球最多,达到创纪录的 154 万件,占全球总量的 46.4%,其数量相当于排名第二位至第十一位申请量之和。排在中国之后的是美国(59.7 万件)、日本(31.4 万件)、韩国(21 万件)和欧洲(17.4 万件),上述前五名受理申请数量占世界总量的 85.3%。

报告指出,亚洲是全球专利申请的枢纽,其全球专利申请最活跃地区的地位得到巩固。2018 年亚洲受理的专利申请量占世界总量的 2/3(66.8%),相比 2008 年的 50.8% 增幅显著,这主要得益于中国经济增长的推动。北美受理的专利申请量占 2018 年世界总量近 1/5(19%),欧洲的占比略超 1/10(10.9%),非洲、拉美和加勒比地区以及大洋洲的份额合计占全球总量的 3.3%。(经济日报)