

# 烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂研究及应用进展

韩钰沅\*, 梁云, 李颖

(中石化(北京)化工研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 聚烯烃催化剂技术是聚烯烃树脂新牌号研发、质量提升与成本控制的关键核心。烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂具有颗粒形态易于调控、氢调性能优异、粉料堆积密度高等优点, 在当前淤浆法聚乙烯工艺中广泛应用。调控烷氧基镁载体的结构以及给电子体, 可提高载体型催化剂的乙烯聚合性能, 促进催化剂升级与技术迭代。目前国内外已有多种烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂投入使用, 其国内产品尚未完成对进口催化剂的全面替代, 有待深入研究催化剂的构效关系, 不断提升综合性能。

**关键词:** 聚乙烯; 烷氧基镁; 载体; 载体型催化剂; Ziegler-Natta 催化剂

**中图分类号:** TQ325.1+2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)S1-0077-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.014

## Recent advances in the application of magnesium alkoxide-supported polyethylene catalysts

HAN Yi-hang\*, LIANG Yun, LI Ying

(Sinopec Beijing Research Institute of Chemical Industry, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Polyolefin catalyst technology serves as the key cornerstone for the development of new grades, quality improvement, and cost control of polyolefin resins. Alkoxy-magnesium-supported polyethylene catalysts exhibit prominent advantages including easily tunable particle morphology, excellent hydrogen regulation performance, and high powder bulk density, thus being widely applied in the current slurry-phase polyethylene process. Regulating the structure of alkoxy-magnesium supports and electron donors can enhance the ethylene polymerization performance of supported catalysts, and facilitate catalyst upgrading and technological iteration. At present, various alkoxy-magnesium-supported polyethylene catalysts have been put into service both domestically and internationally. However, domestic products have not yet achieved full replacement of imported catalysts, and thus remain to be further developed to continuously improve their comprehensive performance.

**Key words:** polyethylene; alkoxy-magnesium; support; supported catalyst; Ziegler-Natta catalyst

低压淤浆聚乙烯工艺是全球高密度聚乙烯(HDPE)产业的主要生产工艺, 全球产能占比可达60%以上<sup>[1]</sup>。我国作为全球聚乙烯主要生产与消费国, 近几年大量引进 LyondellBasell 公司先进级联工艺(advanced cascade process, ACP)装置, 虽有效提高了总产能, 但也造成产品同质化竞争激烈、利润率下降的局面。催化剂技术作为聚烯烃新牌号研发、质量提升与成本控制的核心关键技术, 是当前形势下驱动聚烯烃树脂向高端化迈进的核心变量和实现聚烯烃高质量发展的关键支撑。

烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂是一类以烷氧基镁为原料制备的 Ziegler-Natta 催化剂, 是目前大宗聚烯烃产业常用的催化剂之一。烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂具有制备工艺简单、催化活性高、聚合物颗粒形态易于调控、氢调性能优异等优点, 其粉料球

形度高、堆积密度较高, 但也存在催化剂粒径分布较宽、聚合物细粉与大颗粒数量多等问题<sup>[2]</sup>, 需持续优化改进以适配工业需求。目前该类催化剂已报道的优化方案主要围绕载体制备、氯化载钛、催化剂活性中心调控等多个方面进行。本文中梳理目前烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂的技术进展与商业化情况, 提出未来的改进方向, 为催化剂技术迭代升级给出可借鉴的思路。

## 1 烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂的性质与研究进展

烷氧基镁载体的化学式为  $Mg(OR)_2$ , 在聚烯烃催化剂制备过程中作为反应原料, 经氯化后形成  $MgCl_2$  并负载钛原子活性中心, 形成 Ziegler-Natta 催化剂(以下简称 Z-N 催化剂), 如图 1 所示。烷氧

基镁载体的结构与性能间接影响其制备的 Z-N 催化剂的催化性能。载体氯化时,其尺寸与外形特征通常可得到一定程度的保留;将催化剂应用于烯烃聚合时,由于结构复制效应,催化剂颗粒可将结构、尺寸与形状特征传递至聚合物颗粒。结构复制效应为 Z-N 催化剂在烯烃聚合反应中的特殊性质,聚合物最初形成于烯烃分子扩散进入的浅层孔隙中,使催化剂颗粒内部积累机械应力并触发颗粒破碎,此时催化剂内部未容纳烯烃分子的孔隙被暴露在表面并催化烯烃聚合<sup>[3]</sup>。这一特性使工业催化剂能够在数小时内保持稳定的聚合活性,且由于催化剂中每个活性中心都以相近的体积倍率向外延伸生长,使得生长出的聚合物颗粒保留催化剂的结构特征。因此,烷氧基镁载体型催化剂研究需分别围绕载体制备、氯化载钛、催化剂性质调控 3 方面进行,进而使聚合物颗粒的大小、形状、堆积密度符合装置的实际要求,满足聚合装置长周期稳定运转的需要。

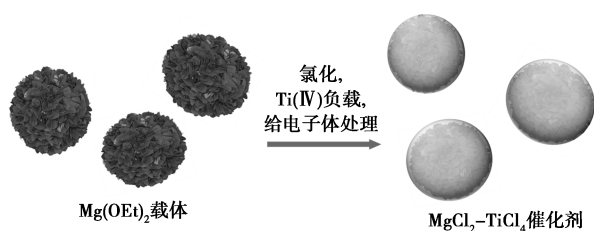


图 1 烷氧基镁载体及其制备 Z-N 催化剂过程示意图

### 1.1 烷氧基镁载体的结构特征与研究进展

用于聚烯烃催化的烷氧基镁载体通常为微米颗粒,常用的制备方式分为以下几种:①机械粉碎,使用镁单质与醇反应制备体相烷氧基镁后,经球磨、超声等方式粉碎至微米尺度;②喷雾干燥,例如将烷氧基镁羧化再脱羧以制备微米颗粒等;③分散相中的可控合成,精细控制底物种类、比例、反应温度、添加剂种类以针对性调控烷氧基镁载体颗粒的尺寸与表面微观结构<sup>[4]</sup>。

目前聚乙烯工业中常用的乙氧基镁载体通常采用体相研磨与分散相合成法制成,后者对颗粒尺寸分布的条件效果更优。分散相合成法使用乙醇、镁粉与引发剂进行反应,在引发剂的作用下,镁粉表面的镁原子与乙醇不断发生置换反应,形成半游离状态的二乙氧基镁  $Mg(OEt)_2$ ,待二乙氧基镁达到特定浓度后析出结晶,并聚集成为类球形微米颗粒。 $Mg(OEt)_2$  晶体具有层状结构,其结晶生长使乙氧基镁载体表面具有特征的片晶堆积结构,颗粒内部

含有较多纳米尺度的孔道,具有较大的比表面积<sup>[5]</sup>。聚烯烃用烷氧基镁载体的商业化生产销售最早由日本东邦钛公司、日本出光兴产公司于 1980—1990 年代实现,目前国际上主要有日本曹达公司、韩国三星公司、欧洲利安德巴赛尔公司、美国陶氏化学公司,国内主要有中石化(北京)化工研究院、任丘利和科技发展有限公司、营口向阳催化剂有限公司等企业实现了载体的商业化。由于聚乙烯与聚丙烯化学性质差异,二者对催化剂/载体结构、性质的具体需求不同,目前商业化烷氧基镁载体主要围绕聚丙烯催化剂工艺研发,仅有利安德巴赛尔、任丘利和、营口向阳等企业的烷氧基镁载体适用于聚乙烯催化剂体系。

### 1.2 烷氧基镁载体型催化剂研究进展

烷氧基镁载体具备显著的多级结构特征,初级结构单元是边长、厚度均为纳米尺度的纳米片,纳米片经特定模式自组装成为微米尺度的类球形颗粒,内部存在多种尺寸的孔道结构<sup>[6]</sup>。当载体经氯化转化为催化剂时,形成的 Z-N 催化剂也具有多级结构,载体  $MgCl_2$  以尺寸 1~10 nm 的纳米晶形式存在,Ti(IV)活性中心负载在载体纳米颗粒表面缺陷位点上,并与外加的路易斯碱(通常称为给电子体)配位形成具有催化活性的配合物。Toshiaki 等<sup>[7]</sup>通过压汞法、氮气分子吸附法、扫描电子显微镜等手段详细探究了载体与催化剂多级结构的关联性,并通过乙烯/1-己烯共聚实验讨论了该类催化剂的构效关系:①当载体颗粒转化为催化剂时,颗粒的尺寸与球形度基本不变,但微观结构发生一定程度改变。②载体/催化剂中的孔道根据尺寸可分为大型(50~200 nm)、中型(2~50 nm)和微型(0~2 nm),将使用不同方法制备的 4 种载体(孔道体积基本没有差异)转化为催化剂后,4 种催化剂的微孔体积区别不大,但大/中孔体积差异明显。③催化剂的粒径越小,催化活性越高,因为聚合过程中单体分子在小尺寸颗粒内部迁移的阻力更小。④催化剂中的大/中型孔道直接影响催化性能,尤其是共聚性能。在聚合初始阶段,大/中孔可同时容纳乙烯与 1-丁烯 2 种单体分子进行竞争反应,而微孔结构的位阻效应导致 1-己烯无法扩散进入,因此大孔、中孔对催化性能影响更明显。

综上所述,为调控催化剂粒径与孔道结构,可从载体制备阶段添加不同物质以调控载体的片晶结构。Hamedani 等<sup>[8]</sup>利用  $MnCl_2$  掺杂调控烷氧基镁载体结构,详细对比了不同 Mn/Mg 投料比例对载体

结构的影响:  $\text{MnCl}_2$  掺杂到特定比例后可以明显使载体中片状晶体尺寸增大、载体和催化剂粒径增大,如图 2 所示;制备成催化剂后,活性相比不掺杂  $\text{MnCl}_2$  的样品提高 10%~20%。Funako 等<sup>[5]</sup>报道了一种在烷氧基镁载体合成阶段使用异丙醇等外加醇类调控载体结构的方法。异丙醇的掺杂使得载体中片晶结构消失,转化为体积较大的棒状纳米晶(尺寸 300~700 nm),XRD 谱图中特征峰的裂分和位移证明异丙醇的掺杂有效改变了  $\text{Mg}(\text{OEt})_2$  的晶体结构。转化为催化剂后,纯  $\text{Mg}(\text{OEt})_2$  样品表面变光滑,而异丙醇掺杂样品表面保留清晰的孔洞结构。经表征,2 种催化剂内部孔道结构特征不同,因此聚合性能也表现出显著差异,证明改变载体立体结构可有效调控催化剂的结构与性能。

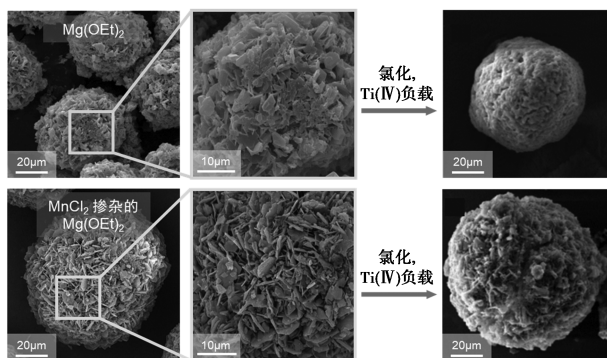


图 2 不同方法制备的烷氧基镁载体及催化剂的 SEM 图像

除载体结构外,给电子体对烷氧基镁载体型催化剂的性质也有显著的调控效果。Chumachenko 等<sup>[9]</sup>研究了给电子体的加入对于催化剂性质的影响,研究方法为取催化剂合成过程不同阶段的中间体测试结构与催化性能。在加入给电子体二丁基邻苯二甲酸酯(DBP)以前, $\text{Mg}(\text{OEt})_2$  与  $\text{TiCl}_4$  反应形成了非晶态  $\text{MgCl}_2$  与副产物  $\text{TiCl}_3(\text{OEt})$ ,此时颗粒具有相当大的比表面积和清晰的孔结构,但活性很低;加入 DBP 后,没有催化活性的  $\text{TiCl}_3(\text{OEt})$  与 DBP 分子结合并去除,其余的 DBP 与  $\text{Ti}(\text{IV})$  配位,并参与促进非晶态  $\text{MgCl}_2$  转化为粒径 5 nm 的纳米晶。当转化完成后,形成的 Z-N 催化剂虽表面积比中间态减少 50%以上,但活性与丙烯聚合物等规度均显著提高。该团队后续基于该方法对比不同溶剂(氯苯、正庚烷、正癸烷)、不同载钛温度条件以及是否添加 DBP 对催化剂性能的影响<sup>[10]</sup>,其中给电子体的加入对于催化剂的活性和立体选择性具有决定性作用。

## 2 进口烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂的应用现状与局限性

### 2.1 TH 系列催化剂

TH 系列催化剂是 LyondellBasell 公司于 20 世纪 80 年代针对 Hostalen 双搅拌釜淤浆法聚乙烯工艺开发的钛系催化剂,包含 THT、THE、THB 等。TH 系列催化剂的制备工艺为:氮气保护下在有机相中分别加入乙氧基镁与四氯化钛,经加热搅拌、洗涤、干燥后得到固体粉末,向其已烷悬浊液中加入三异丁基铝溶液预还原活化后表现出乙烯聚合活性。THE 催化剂用于生产窄分子质量分布的聚乙烯产品,适用于生产注塑等牌号的产品;THT 催化剂是经过高温回火阶段制备的更高活性的催化剂,适用于生产双峰膜料、管材料和小吹塑等牌号的树脂产品;THB 催化剂是经过制备条件改进获得的低活性的催化剂,适用于生产大型吹塑牌号的树脂产品。TH 系列的催化剂虽具有氢调敏感性强、抗杂质能力强等优势,但与国产的 BCE-H 系列催化剂相比,聚合活性较低,细粉含量高,导致产品灰分高、色泽度差等显著缺点<sup>[11]</sup>。此外,TH 系列的催化剂需要在企业进行配制,在生产不同 HDPE 牌号时必须切换催化剂种类,使生产流程繁复、操作复杂性高,增加了企业运行成本。例如,国内 Hostalen 装置反馈 2014 年应用 TH 催化剂后,由于自配催化剂重复性差,导致系统内细粉含量高、浆液输送困难,影响长周期稳定运行;使用 THT 催化剂又出现催化剂流量波动大的问题,难以稳定生产<sup>[12]</sup>。目前 TH 系列催化剂已多被成熟的催化剂技术取代。

### 2.2 Avant Z501 催化剂

LyondellBasell 公司的 Avant Z501 催化剂是基于 TH 系列催化剂的问题针对性优化改进而成,在优化催化剂性能的同时,通过少量预聚合提高聚合抗破碎性能。Z501 催化剂主要应用于 Hostalen ACP 装置,该装置使用流化床干燥器,对粉料的堆积密度、粒径与球形度具有较高要求。Z501 催化剂具有氢调性能优异、活性维持时间长等特点,可生产多种 HDPE 产品,其多峰产品具有高刚度、抗冲、抗蠕变性能等优秀的力学性质与加工适应性<sup>[13]</sup>,尤其是高性能的管材专用料,例如 PE100 级双峰高密度聚乙烯。这种材料具有耐腐蚀、抗环境应力开裂、熔融焊接性好的特征,以及良好的耐快速裂纹增长能力,适用于承压水管及各种工业用管,产品附加值高<sup>[14]</sup>。例如,中国石油吉林石化公司曾使用进口高

活性 Z501 催化剂开发出国家认证 PE100 级双峰管材料 JHMGC100S<sup>[15]</sup>。

Z501 催化剂虽然与 Hostalen 系列装置适配性良好,但在实际应用中仍存在问题。

(1) 产品质量方面,在生产 PE100 级管材料时细粉较多、低聚物占比高、管材麻点明显,而采用中石化(北京)化工研究院溶解析出型催化剂 BCE-H100 生产相同管材料无麻点<sup>[16]</sup>。该现象的本质是聚乙烯树脂高相对分子质量部分在高于临界剪切应力作用下从模具挤出时发生的表面熔体破裂,表现为麻点、粗糙、鲨鱼皮或形变等现象,影响材料的加工性能,这些问题表明催化剂本征性能仍有待改进<sup>[17]</sup>。此外,Z501 催化剂虽牌号覆盖面广,但不能用于生产膜料产品,在实际工业生产中需切换至 Z509 催化剂,增加生产工序的同时,因催化剂切换带来的原料成本会显著增加。

(2) 综合性能方面,与国产高性能催化剂,如 BCE-H200 相比,Z501 催化剂具有粒径分布宽、分子质量分布宽等问题<sup>[18]</sup>,限制了高性能、高附加值新牌号的开发。

(3) 装置运行方面,Z501 催化剂生产过程中的预聚合步骤导致粒径分布较宽,进而使进料流量波动较大,需在催化剂储罐与计量罐之间增加二级过滤流程<sup>[19]</sup>,增加了装置的复杂性、降低了计量准确性,且容易引起催化剂活性降低<sup>[20]</sup>。

### 3 国产烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂的研究现状

#### 3.1 JM-1 催化剂

JM-1(又名 THG)催化剂是中国石油辽阳石化公司研究院于 2006 年针对 Hostalen 工艺开发的载体型聚乙烯催化剂,基于 THB 催化剂的核心技术针对性优化改进而成<sup>[21-22]</sup>。制备方式为:将乙氧基镁载体在己烷溶剂中搅拌形成悬浮液,于一定温度下慢速滴加四氯化钛,洗涤、干燥后得到粉末状催化剂。JM-1 催化剂在试用时表现出比 THB 催化剂更优的活性与氢调敏感性,活性释放时间长,装置适配性良好,适合生产注塑、挤塑、吹塑和双峰 HDPE 产品等。使用 JM-1 催化剂生产的氯化聚乙烯专用料产品 L0555P 和 L0135P 的综合性能优秀,氯化后的氯化聚乙烯(CPE)产品综合性能达到优级品水平<sup>[21,23]</sup>;JM-1 催化剂生产的交联聚乙烯专用料 J0253P 产品在加工性能方面达到韩国 LG XL1800 的相当水平<sup>[23]</sup>。JM-1 催化剂虽有效实现了对 TH

系列催化剂性能的全方位超越,但其活性、聚合物堆积密度等综合性能相比迭代后的 Z501 催化剂仍有待改进与提高。

#### 3.2 XY-H 系列催化剂

XY-H 系列催化剂是辽宁向阳科化集团于 2001 年针对淤浆法聚乙烯工艺开发的载体型 Ziegler-Natta 催化剂<sup>[24]</sup>。据报道,XY-H 系列催化剂已发展出 XY-H1/2/3 等多个产品<sup>[25]</sup>。XY-H1 由  $MgCl_2 \cdot 2.8(C_2H_5OH)$  加合物制备,主要应用于 Mitsui(三井)公司 CX 淤浆法聚乙烯工艺;XY-H2 由  $MgCl_2(2-乙基己-1-醇)$  制备,适用于 CX 和 Hostalen 工艺;XY-H3 以乙氧基镁为原料制备,该催化剂也主要用于 CX 和 Hostalen 工艺。XY-H 系列催化剂活性较高、氢调性能良好,在国内淤浆法 HDPE 装置试用时产品性能优秀,例如 5000S 拉丝料的粒度分布、拉伸强度与断裂伸长率均比进口参比催化剂更优<sup>[26]</sup>。从近几年在国内试用情况分析,XY-H3 虽相比同系列另 2 种催化剂具有氢调敏感性高、聚合物堆积密度高等显著优点,但聚合物堆积密度相比 Z501 等进口催化剂仍存在差距,有待继续优化改进。

#### 3.3 SEL 系列催化剂

SEL 催化剂由任丘市利和科技发展有限公司基于乙氧基镁载体氯化、载钛工艺制备的一种窄分布的乙烯聚合用催化剂(SPAN-1.3)<sup>[27-30]</sup>,目前已于国内 Hostalen/Hostalen ACP 釜式淤浆聚合装置、Innovene S 环管淤浆聚合装置进行推广试用。据报道,在 Hostalen 装置试用时<sup>[30]</sup>,SEL 催化剂的聚合活性、氢调敏感性略高于进口参比催化剂,但共聚性能略差;聚合物粒径分布更集中、大颗粒与细粉较少,聚合物产品的拉伸断裂应变、落镖冲击强度、拉伸屈服应力较好。在 Hostalen ACP 装置试生产管材料 23050 和中空吹塑料 ACP5531B 时<sup>[29]</sup>,SEL 催化剂的共聚单体消耗量比参比剂低 4%,但聚合活性和氢调性能略低于参比催化剂(氢气单耗高 30%左右),且大颗粒( $>300 \mu m$ )和细粉( $\leq 63 \mu m$ )含量较高;聚合物树脂的刚性指标优于参比树脂。在 Innovene S 环管装置试用时,与进口催化剂相比,SEL 催化剂可使装置负荷提高,且树脂产品的力学性能(拉伸断裂应变、拉伸屈服应力、简支梁冲击强度等)合格<sup>[30]</sup>。整体而言,SEL 系列催化剂粒径分布较窄,可用于不同的淤浆聚合工艺,但催化剂的综合性能在不同装置与进口参比催化剂相比各有优劣,目前仍在持续推广应用中。

### 3.4 BHA 催化剂

BHA 催化剂是中石化(北京)化工研究院新开发的高性能烷氧基镁载体型聚乙烯催化剂,如图3所示。BHA 具有催化剂粒径分布窄、聚合活性高、氢调性能和共聚性能优异等特点,所得聚合物的堆积密度高、细粉含量少,且分子质量分布可调。目前 BHA 催化剂正处于催化剂应用推广阶段,有望应用于 Hostalen ACP 工艺实现注塑料、膜料、拉丝料、管材料、纤维料等牌号树脂产品的生产,助力企业在降低树脂生产成本的同时,加快新产品开发力度。

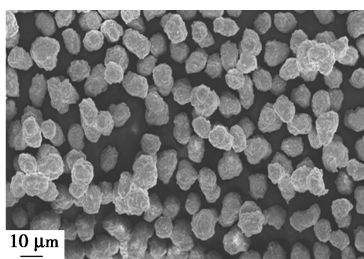


图3 BHA 催化剂的 SEM 图像

## 4 总结与展望

聚烯烃新牌号研发、质量提升与成本控制的核心是聚烯烃催化剂技术。面对国内经济下行和同质化竞争的市场形势,开发高性能、定制化国产催化剂具有重要意义。烷氧基镁载体型催化剂使用类球形载体作为原料,经氯化载钛制备而成,在粉料颗粒形貌与堆积密度方面具有显著优势。研究表明,烷氧基镁载体的形貌与内部结构显著影响催化剂的综合性能,可围绕反应原料、溶解体系、外加组分等多个方面调控载体结构,进而持续优化催化剂性能。目前已有多种国产自主研发烷氧基镁载体型催化剂投入试用阶段,试图打破国外专利商的垄断,如 SEL 系列、XY-H 系列、JM-1 等。国产催化剂虽然在粒径集中度、氢调敏感性、共聚性能、活性等方面接近或超越进口 Z501 催化剂,但在堆积密度、装置长周期运行稳定性、分子质量分布宽度、牌号覆盖范围等方面仍存在差距,有待进一步优化烷氧基镁载体合成、催化剂制备、预聚合等工艺,以实现进口催化剂的全面替代,助力国内生产企业降本增效。

### 参考文献

[1] Burdett I D, Eisinger R S. Handbook of Industrial polyethylene and technology, definitive guide to manufacturing, properties, processing, applications and markets[M]. Beverly: Wiley, Scrivener Publishing, 2017:62-94.  
[2] 张宁波,郭子芳,梁云,等.烷氧基镁载体结构与性能的影响因

素[J].石油化工,2023,52(3):317-324.

- [3] Takasao G, Wada T, Thakur A, et al. Insight into structural distribution of heterogeneous Ziegler-Natta catalyst from non-empirical structure determination[J]. Journal of Catalysis, 2021, 394: 299-306.  
[4] Dashti A, Ramazani S A A, Hiraoka Y, et al. Kinetic and morphological study of a magnesium ethoxide-based Ziegler-Natta catalyst for propylene polymerization[J]. Polym Int, 2009, 58: 40-45.  
[5] Funako T, Chammingkwan P, Taniike T, et al. Alternation of pore architecture of Ziegler-Natta catalysts through modification of magnesium ethoxide[J]. Macromol React Eng, 2015, 9: 325-332.  
[6] Shohjiro T, Kiyokazu K, Susumu I, et al. Particle growth of magnesium alkoxide as a carrier material for polypropylene polymerization catalyst[J]. Applied Catalysis A: General, 2008, 350(2): 197-206.  
[7] Toshiaki T, Toshiki F, Minoru T. Multilateral characterization for industrial Ziegler-Natta catalysts toward elucidation of structure-performance relationship[J]. Journal of Catalysis, 2014, 311: 33-40.  
[8] Hamedani N G, Behrouzi-Fardmoghdam M, Abedini H, et al. Optimization of starting material composition in the synthesis of highly active magnesium ethoxide-supported ziegler-natta catalysts for propylene polymerization[J]. J Polym Sci, 2025, 63: 1580-1591.  
[9] Chumachenko N N, Zakharov V A, Bukatov G D, et al. A study of the formation process of titanium-magnesium catalyst for propylene polymerization[J]. Applied Catalysis A: General, 2014, 469: 512-516.  
[10] Chumachenko N N, Zakharov V A, Sergeev S, et al. Effect of the synthesis conditions of titanium-magnesium catalysts on the composition, structure and performance in propylene polymerization[J]. Polyolefins J, 2017, 4(1): 111-122.  
[11] 张元礼,姜明,闫成玉,等.高效催化剂在淤浆法 HDPE 装置上的应用[J].合成树脂及塑料,2007,(4):49-51.  
[12] 张敏锋,李东义,周欣,等.SEL 催化剂在淤浆法聚乙烯装置中的应用[J].石化技术与应用,2019,37(3):180-183.  
[13] 程林杰,王鹏,李泽博,等.Hostalen ACP 工艺装置上采用 SEL 催化剂生产的 PE100 级管材专用树脂的性能[J].合成树脂及塑料,2023,40(1):42-45.  
[14] 李连鹏,林柏吉,马野,等.模试评价在聚乙烯管材生产中的应用[J].弹性体,2020,30(2):61-64.  
[15] 王书卫,曹晶磊,于现建,等.双峰管材专用料 JHMG100S[J].石油科技论坛,2014,33(1):58-60.  
[16] 贾凡,黄庭,曹昌文,等.BCE-H100 催化剂制备的 PE100 级管材专用树脂的性能[J].石油化工,2019,48(5):466-471.  
[17] 吴晨波,陈光岩,李连鹏,等.PE100 管材树脂的质量改进和提高[J].弹性体,2013,23(5):49-52.  
[18] 邓起垚,吴希,辛麟,等.催化剂 BCE-H200 在高密度聚乙烯装置上的应用[J].石化技术与应用,2024,42(1):40-44.  
[19] 张敏锋,马宝军,孙丽娜,等.Hostalen 工艺生产聚乙烯管材料的工艺改进[J].石化技术与应用,2017,35(5):388-391,403.  
[20] 马宝军. Hostalen 工艺 HDPE 装置催化剂活性低的影响因素[J].合成树脂及塑料,2021,38(5):48-51.  
[21] 姜明,闫成玉,李倩倩,等.聚乙烯高效催化剂 JM-1 的开发及工业应用[J].化工科技,2006,(5):11-15.  
[22] 宁英男,范娟娟,毛国梁,等.釜式淤浆法生产高密度聚乙烯工艺及催化剂研究进展[J].化工进展,2010,29(2):250-254.  
[23] 胡学悦.淤浆法聚乙烯工艺高效催化剂的工业应用[J].炼油与化工,2014,25(4):22-24,62.

(下转第 87 页)