

新型脱模剂在生产中的安全性研究

程亚楠, 张黎夫, 李雪飞, 李睿, 吕世丞

(西安航天化学动力有限公司, 西安 710025)

摘要: **目的** 分析新型脱模剂(B脱模剂)在生产过程中应用的安全性能。**方法** 从新型脱模剂的成分、稳定性与安全方面入手,借助红外检测、DSC热分析、溶解度测试等测试方法,从理论上验证新型脱模剂的安全性能。在不同型号上应用聚氨酯脱模剂(A脱模剂)与B脱模剂,对比分析2种脱模剂在生产过程中的脱模力及固体发动机的燃速,探究其工艺性能及其对发动机燃速的影响,从实际应用方面验证新型脱模剂在固体发动机生产中的可靠性。**结果** 通过对比分析2种脱模剂的红外谱图、DSC谱图及溶解度,发现B脱模剂的有效成分与A脱模剂相同,且B脱模剂具有良好的热稳定性。B脱模剂的工艺性能结果显示,它具有良好的成模性。使用2种脱模剂测试其脱模力及燃速,发现B脱模剂能大幅度降低生产过程中的脱模力,并且对燃速没有影响。**结论** B脱模剂在固体发动机生产过程中具有良好的安全性能,可以推广使用。

关键词: 固体发动机; 脱模剂; 脱模力; 燃速; 工艺性能; 安全性

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)10-0050-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.007

Safety Research of New Release Agent in Production

CHENG Ya-nan, ZHANG Li-fu, LI Xue-fei, LI Rui, LYU Shi-cheng

(Xi'an Aerospace Chemical Propulsion Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze the security of new release agent (B release agent) in the production process. Starting with the composition, stability and safety of the new release agent, the security of the new release agent is theoretically verified by means of infrared detection, DSC thermal analysis and solubility test. Polyurethane release agent (A release agent) and B release agent are applied on different models, the ejection force of the two release agents in the production process and the burn rate of the solid motor are compared and analyzed, their technical feature and influence on burn rate of the motor are explored, and the reliability of the new release agent in the production of the solid motor is verified from the practical application. By comparing the infrared spectrum, DSC spectrum and solubility, it is found that the effective components of B release agent are the same as that of A release agent, and B release agent has good thermal stability. The results of process performance of B release agent show that it has good molding ability. Two kinds of release agents are used to test the ejection force and burn rate, and it is found that B release agent can greatly reduce the ejection force in the production process, and B release agent has no effect on the burn rate. B release agent has good security in the production process of solid motor and can be widely used.

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-09-20

Received: 2022-08-15; Revised: 2022-09-20

作者简介: 程亚楠(1996—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为应用化学。

Biography: CHENG Ya-nan (1996-), Female, Master, Assistant engineer, Research focus: applied chemistry.

通讯作者: 李雪飞(1983—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为高分子材料。

Corresponding author: LI Xue-fei (1983-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: macromolecular material.

引文格式: 程亚楠,张黎夫,李雪飞,等. 新型脱模剂在生产中的安全性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 050-054.

CHENG Ya-nan, ZHANG Li-fu, LI Xue-fei, et al. Safety Research of New Release Agent in Production[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 050-054.

KEY WORDS: solid motor; release agent; ejection force; burn rate; technical feature; safety

固体火箭发动机^[1-2]是导弹的关键部件, 而固体推进剂是固体火箭发动机的能源^[3], 它是一种含能材料, 具有燃烧和爆炸的危险性^[4]。固体发动机燃烧室脱模过程则是芯模和推进剂药面分离的过程, 该过程涉及芯模与药面的摩擦^[5], 危险等级较高^[6]。脱模力的大小则直接反应脱模的难易程度及危险程度^[7]。目前, 为减小脱模力, 提升脱模过程的安全性, 采用的方法是在芯模表面涂敷脱模剂^[8-10]。脱模剂是一种介于模具和成品之间的功能性物质, 是防止类似橡胶、塑料等弹性体和其他材料的模制品粘接到模具表面上, 起到易于脱模的一种加工助剂^[11-12]。脱模剂又分为 2 种类型: 为了在成形加工时制品能从模具中容易取出, 在芯模表面涂上的一层涂剂, 称为外脱模剂^[13-14]; 内用型脱模剂, 简称内脱模剂, 一般都以助剂形式加入胶料, 在硫化时部分迁移到制品表面形成隔离膜^[15]。例如将内脱模剂加到 PU 配方中, 在每次模塑成形时, 迁移到泡沫和模具的交界面, 从而达到脱模效果^[16]。较为理想的脱模剂应具有较好的热稳定性和化学稳定性^[17], 其不会腐蚀模具, 在模具表面也不会残存分解物^[18-19]。由于固体火箭发动机常使用的外脱模剂为聚氨酯脱模剂^[20] (A 脱模剂), 在高温高湿季节, 经常出现燃烧室脱模的困难事件。脱模困难主要表现为脱模力大, 芯模难以脱出, 这不仅会进一步增大燃烧室脱模的安全风险^[21], 还会影响生产进度, 占用工位, 使得整条产线的生产进度都受到影响。因此, 本文研制出了一种新型外脱模剂 (B 脱模剂), 它可以降低脱模难度, 并且具有较好的热稳定性和化学稳定性, 不会腐蚀芯模, 也不会与推进剂发生反应或者互溶, 不会对燃烧室的燃速及药面质量产生影响, 提高了燃烧室生产过程中的安全性能及生产效率。

1 脱模剂理化性质分析方法

1.1 红外检测

对新配制脱模剂能够降低脱模力的作用原理进行分析, 为确定聚氨酯脱模剂 (A 脱模剂) 与 B 脱模剂的有效组分是否一致, 将 2 种脱模剂同时在室温下放置 2 d, 待溶剂完全挥发后, 将剩余的白色固体送样进行红外检测, 确定 2 种组分的有效成分。

1.2 DSC 热分解测试

为了进一步确定 B 脱模剂在测试温度范围内的稳定性, 有没有相分离或者其他反应的发生, 对 B 脱模剂进行 DSC 热分解测试。将 B 脱模剂样品温度从 25 °C 上升至 80 °C (高于推进剂固化温度), 确定

样品有无明显的吸热或放热峰出现, 以此来判断 B 脱模剂是否稳定。

1.3 溶解度测试

脱模剂的使用特点就充分说明了分散性对脱模剂的使用非常重要, 因此 B 脱模剂的溶质需要在溶剂中有较高的溶解度, 且分散均一, 使脱模剂在涂覆过程中可以涂覆均匀。由此对 B 脱模剂进行溶解度测试, 按一定质量分数, 将定量的溶质溶解到定量的溶剂中, 观察混合物溶液的状态。

1.4 工艺性能测试

脱模剂应具有良好的工艺性能, 其使用不能影响发动机药面的表观质量。由于对脱模剂的成膜性和流挂情况无法进行量化评价, 因此采用目视法, 对 2 种脱模剂的成膜性及流挂情况进行测试。

取 2 个体积较小、形状结构简单、表面直观可见的工装作为实验对象, 用 2 个容器分别取等质量的 A、B 脱模剂, 按照涂敷工艺要求, 对每个工装进行 2 遍涂敷, 间隔 15 min。为观察脱模剂在翼片表面的流动情况, 每个工装只对上半部分涂敷, 以便于观察脱模剂是否会向无脱模剂区域流动。

涂有脱模剂的 2 个工装放在常温环境进行晾置, 观察其晾置后的成膜性。晾置过程中, 工装竖直放置, 使涂有脱模剂的面与地面垂直, 观察晾置过程脱模剂是否会流动, 分别在脱模剂晾置 12 h、硫化间保温 8 h 后的时间节点, 对涂敷了脱模剂的工装表面进行观察, 对比 A、B 脱模剂之间的差异。

1.5 燃速测试

脱模剂的使用不能影响发动机的燃速。使用脱模剂涂覆标准试验发动机的芯模, 汇总标准试验发动机燃速的变化, 对比其与燃速指标值的差距。选取 2 发标准试验发动机, 分别使用 A、B 脱模剂, 通过跟踪 2 发标准试验发动机的试车曲线, 来观察 B 脱模剂是否会对发动机的燃烧过程造成影响。

2 结果与分析

2.1 红外检测

A 脱模剂和 B 脱模剂 (B-1、B-2) 的红外检测图对比如图 1 所示。由图 1 可以看出, A 脱模剂和 B 脱模剂在 2 962、1 295、1 015、794 cm^{-1} 处的吸收峰高度重合, 峰形和峰位置的一致性较好。由此可知, A、B 脱模剂的有效成分是相同的, 进一步说明它们的脱

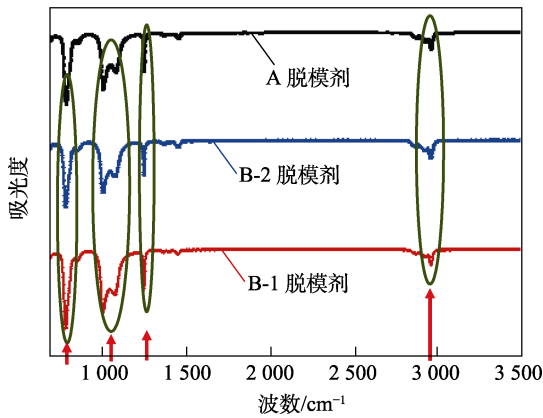


图1 A、B脱模剂的红外图谱

Fig.1 Infrared spectroscopy of release agent A and B

模作用原理是相同的，均是其有效成分发挥作用。

2.2 DSC 热分解测试结果

B 脱模剂的热分析实验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，以 3 °C/min 的升温速率将 B 脱模剂温度从 25 °C 上升至 80 °C（高于推进剂固化温度）时，样品无明显的吸热或放热峰出现。结果表明，B 脱模剂在测试温度范围内较稳定，没有相分离或者其他放热、吸热反应发生。由此证明 B 脱模剂在使用工艺条件下具有良好的热稳定性。

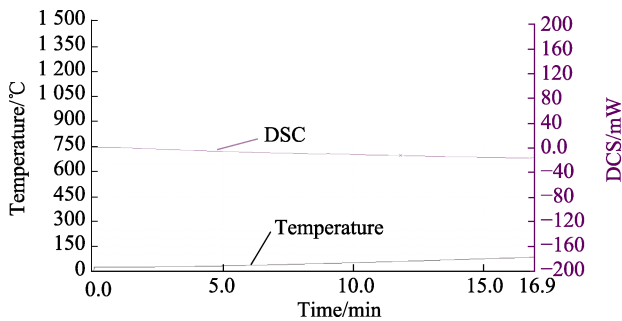


图2 B脱模剂的DCS图谱

Fig.2 DSC spectroscopy of release agent B

2.3 溶解度测试结果

将制备好的 A、B 脱模剂，分别放置在 2 个小烧杯中，对比 2 个溶液的均匀程度。可以发现，与 A 脱模剂相比，B 脱模剂是颜色较深、分散比较均匀的乳白色液体，这是 B 脱模剂溶液中的有效组分浓度比 A 脱模剂高造成的。这说明，B 脱模剂中溶剂在溶质中具有较好的溶解性。

2.4 工艺性能测试结果

用 A、B 脱模剂涂敷完工装表面后，脱模剂在工装表面均分布均匀，无堆积，具有良好的分散性。通过观察图 3 可以看出，晾置 12 h 后，2 种脱模剂均在工装表面形成一层均匀的膜，并且涂敷区域与未涂敷区域的分界线明显。表面晾置阶段脱模剂未出现流动

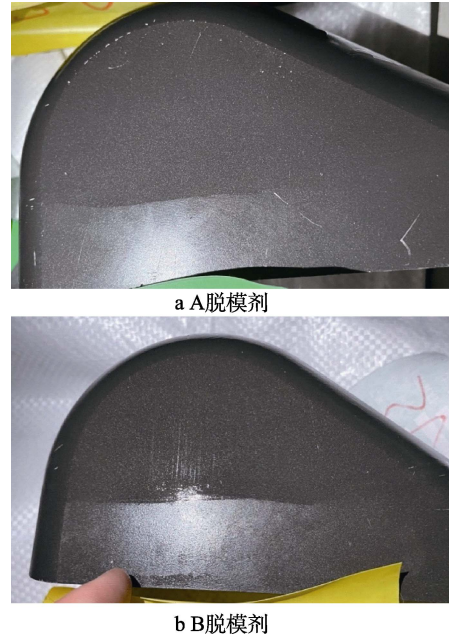


图3 晾置 12 h 后涂敷表面对比

Fig.3 Comparison of coating surface after 12 h airing: a) release agent A; b) release agent B

现象，表明 2 种脱模剂均具有良好的成膜性。将 2 个工装放入 50 °C 的硫化间保温 8 h 后，再将工装取出，观察其表面脱模剂表现情况。结果发现，在 50 °C 保温 8 h 后，工装表面涂敷区域脱模剂分布均匀，2 种脱模剂均未出现流动现象，涂敷区域与未涂敷区域分界明显。这说明 B 脱模剂的分散性、成膜性以及流挂情况较为良好，与 A 脱模剂对比无明显区别，不会出现由于脱模剂堆积造成药面质量的问题。

2.5 燃速测试结果

选取 6 组，每组 3 个标准试验发动机使用 B 脱模剂，汇总 6 组标准试验发动机样品的燃速数据，结果见表 1。从表 1 中可以看出，测试的燃速均符合(19.6±0.7) mm/s 的指标要求，数据并未出现较大偏差。因此，使用 B 脱模剂不会对标准试验发动机的燃速产生影响。为探究 B 脱模剂是否会对燃烧性能产生影响，开展了对比试验。2 发标准试验发动机的试车曲线如图 4 所示，表示燃烧过程中压强随时间的变化。结果显示，2 种脱模剂的试车曲线基本一致，可以判断使用 B 脱模剂不会对发动机的燃烧性能造成影响。

表1 标准试验发动机燃速数据汇总

Tab.1 Summary of the standard testing motor burn rate data mm/s

序号	燃速	每组均值	指标要求
1	18.973, 19.046, 19.116	19.0	19.6±0.7
2	19.774, 19.917, 19.649	19.8	
3	19.403, 19.515, 19.234	19.4	
4	19.539, 19.705, 19.747	19.7	
5	19.040, 19.080, 19.144	19.1	
6	19.442, 19.623, 19.422	19.5	

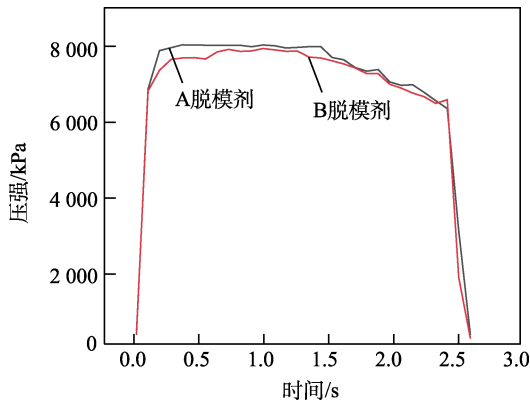


图 4 标准试验发动机试车曲线
Fig.4 Standard testing motor test curve

3 B 脱模剂应用试验

3.1 标准试验发动机 B 脱模剂试验

在标准试验发动机上开展 A、B 脱模剂脱模力的对比试验。在不同季节, 分别将相同质量的 2 种脱模剂涂敷在标准试验发动机的芯模表面, 然后进行标准试验发动机的浇注, 固化后, 测试标准试验发动机脱模难易情况。

在夏、冬季, 将 2 种脱模剂使用在标准试验发动机上的脱模力大小如图 5 所示。夏季使用 A 脱模剂

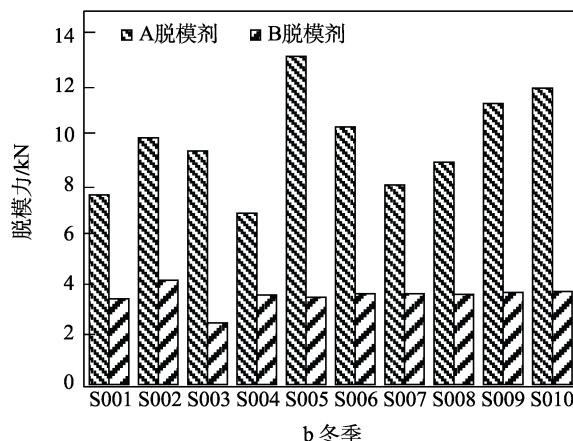
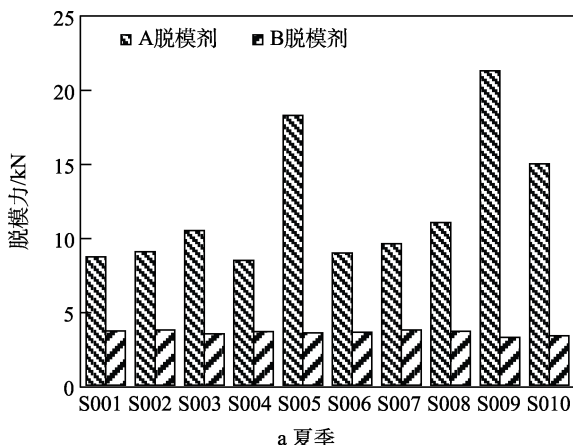


图 5 标准试验发动机 2 种脱模剂的脱模力

Fig.5 Standard testing motor ejection force of two release agents

的脱模力在 8 624~21 129 N, 使用 B 脱模剂的脱模力在 3 214~3 704 N。冬季使用 A 脱模剂的脱模力在 7 644~13 240 N, 使用 B 脱模剂脱模力在 2 479~4 194 N。结果显示, 无论是夏季还是冬季, 使用 B 脱模剂的脱模力远小于 A 脱模剂, 并且 B 脱模剂能将脱模力降低 50%~80%, 降低了脱模过程中的风险, 提高了脱模的安全性。

3.2 某大型燃烧室 B 脱模剂试验

B 脱模剂在标准试验发动机上验证成功, 遂决定进一步将 B 脱模剂, 应用于某大型燃烧室芯模的整体涂敷。某大型燃烧室使用 B 脱模剂, 该燃烧室脱模力仅为 4 900 N。同年进行的该大型燃烧室芯模涂敷时, 使用 A 脱模剂, 脱模力达 411 600 N。B 脱模剂的脱模力远小于 A 脱模剂的脱模力 (见图 6), 说明 B 脱模剂有着明显降低脱模力的作用, 这大大降低了脱模过程中的风险。因此, B 脱模剂可应用于标准试验发动机或者大型燃烧室的芯模涂敷。

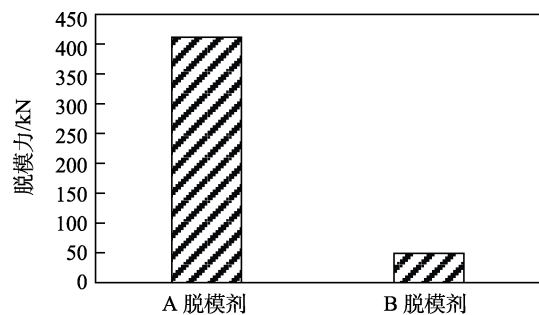


图 6 A、B 脱模剂脱模力对比

Fig.6 Ejection force comparison of A and B release agents

4 结语

文中对 2 种脱模剂从物化性质方面进行了对比, 结果表明, B 脱模剂具有良好的热稳定性和工艺性能, 它还能大幅降低燃烧室脱模过程中的脱模力, 提高固体发动机燃烧室脱模过程中的安全性能, 在生产过程中有很高的应用价值, 应该推广使用。

固体推进剂生产是高危行业, 生产过程应该慎之又慎, 我们应从不同方面入手, 分析生产过程中可能存在的安全隐患, 并利用科学手段, 从根本及机理方面研究它, 提出相应的整改措施, 力求解决存在的安全风险, 提高生产过程的安全性。

参考文献:

[1] 朱号锋, 苏昌银, 王秀菊, 霍跃西. 小型固体火箭发动机药柱连续浇注工艺技术研究[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(2): 130-132.
ZHU Hao-feng, SU Chang-yin, WANG Xiu-ju, et al. In-

- vestigation on Continuous-Casting Technology of Propellant for Small Solid Rocket Motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(2): 130-132.
- [2] 刘建平. 国外固体推进剂技术现状和发展趋势[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(1): 22-26.
LIU Jian-ping. Current Situation and Trend of Solid Propellant Technology Abroad[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2000, 23(1): 22-26.
- [3] 涂乘崑, 庄宇倩, 李映坤, 等. NEPE推进剂燃烧过程及铝团聚特性[J/OL]. 航空动力学报, 2022-09-07: 1-8. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKDI20220725002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
TU Cheng-yin, ZHUANG Yu-qian, LI Ying-kun, et al. Combustion Process and Aluminum Agglomeration Characteristics of NEPE Propellant[J/OL]. Journal of Aerospace Power, 2022-09-07: 1-8. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKDI20220725002&dbna me=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [4] 庞爱民. 固体推进剂性能与技术[J]. 含能材料, 2022, 30(8): 758.
PANG Ai-min. Solid Propellant Performance and Technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(8): 758.
- [5] 朱传俊, 李文岛, 许力莱. 高燃速发动机脱模静电安全性分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 663-668.
ZHU Chuan-jun, LI Wen-dao, XU Li-lai. Electrostatic Safety Analysis on Mandrel Removing of a High Burning Rate SRM[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2007, 27(6): 663-668.
- [6] 单健民. 安全脱模系统设计与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
SHAN Jian-min. Design and Application of Safety Demolding System for High-Energy Motor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [7] 刘圣, 耿兴国, 欧修龙, 等. 常温固化防粘涂料的研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 31-35.
LIU Sheng, GENG Xing-guo, OU Xiu-long, et al. A Study of Ambient Curable Anti-Stick Coatings[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(2): 31-35.
- [8] 舒凯凯, 李换朝, 邓安华, 等. 一种用于火箭发动机药柱成型的芯模材料及其制备方法: CN113997476A[P]. 2022-02-01.
SHU Kai-kai, LI Huan-chao, DENG An-hua, et al. Core Mold Material for Forming Rocket Engine Grain and Preparation Method of Core Mold Material: CN113997476A[P]. 2022-02-01.
- [9] 李颖妮. 常温固化不粘涂料的研制与性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
LI Ying-ni. Development and Study on Ambient Curable Non-Stick Coating[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [10] 孙燕铭. 聚四氟乙烯涂料在固体发动机装药上的应用[J]. 宇航材料工艺, 1990, 20(4): 26-29.
SUN Yan-ming. Application of Polytetrafluoroethylene Coating to Solid State Engine Charge[J]. Aerospace Mate-
rials & Technology, 1990, 20(4): 26-29.
- [11] 陆艳红, 陈哲. 脱模剂的研究及应用[J]. 硅谷, 2009, 2(20): 148-149.
LU Yan-hong, CHEN Zhe. Research and Application of Release Agent[J]. Silicon Valley, 2009, 2(20): 148-149.
- [12] 君轩. 橡胶阻燃剂[J]. 世界橡胶工业, 2011(1): 46.
JUN Xuan. Release Agent[J]. World Rubber Industry, 2011(1): 46.
- [13] 魏秀珍, 崔秀琴. 聚氨酯脱模剂概况[J]. 天津化工, 1996, 10(2): 16-19.
WEI Xiu-zhen, CUI Xiu-qin. Overview of Polyurethane Release Agents[J]. Tianjin Chemical Industry, 1996, 10(2): 16-19.
- [14] 张宁, 耿志刚, 李聪, 等. 一种脱模剂在固体火箭发动机燃烧室壳体绝热材料成型中的应用[J]. 航天制造技术, 2019(5): 10-13.
ZHANG Ning, GENG Zhi-gang, LI Cong, et al. Application of a Kind of Release Agent in Forming of Insulation Material of Solid Rocket Motor Combustion Chamber[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(5): 10-13.
- [15] 陈美华, 周建强, 高小刚. 内脱模剂 AT-16-III 在半钢子午线轮胎胎侧胶中的应用[J]. 橡胶科技, 2016, 14(12): 34-36.
CHEN Mei-hua, ZHOU Jian-qiang, GAO Xiao-gang. Application of Internal Releasing Agent AT-16-III in Sidewall Compound of Steel-Belted Radial Tire[J]. Rubber Science and Technology, 2016, 14(12): 34-36.
- [16] 佚名. 聚氨酯水性脱模剂的用途[J]. 塑料科技, 2010, 38(6): 52.
Nameless. Use of Polyurethane Waterborne Release Agent[J]. Plastics Science and Technology, 2010, 38(6): 52.
- [17] 汪志清. 固体推进剂的新型脱模剂——室温硫化硅橡胶[J]. 推进技术, 1982, 3(2): 17-21.
WANG Zhi-qing. A New Release Agent for Solid Propellant—RTV Silicone Rubber[J]. Journal of Propulsion Technology, 1982, 3(2): 17-21.
- [18] 贺英, 刘斐, 徐雯. 聚氨酯脱模剂的研制[J]. 陕西化工, 1990, 19(6): 12-15.
HE Ying, LIU Fei, XU Wen. Preparation of Polyurethane Release Agent[J]. Shaanxi Chemical Industry, 1990, 19(6): 12-15.
- [19] 周海滨. 用半永久性脱模剂帮助脱模及防止模具污染[J]. 世界橡胶工业, 2007, 34(1): 33-36.
ZHOU Hai-bin. Use Semi-Permanent Release Agent to Help Release Mold and Prevent Mold Contamination[J]. World Rubber Industry, 2007, 34(1): 33-36.
- [20] 江永飞. 聚氨酯用脱模剂[J]. 黎明化工, 1993(3): 25-27.
JIANG Yong-fei. Release Agent for Polyurethane[J]. Liming Research Institute of Chemical Industry, 1993(3): 25-27.
- [21] 李昂. 脱模剂及其作用机理[J]. 特种橡胶制品, 2002, 23(4): 26-29.
LI Ang. Release Agent and Its Mechanism of Action[J]. Special Purpose Rubber Products, 2002, 23(4): 26-29.

责任编辑: 刘世忠