



移动阅读

汽车内饰材料中的阻燃剂和阻燃标准概述 及其问题探讨

管懿¹, 刘玉敏², 黄伟¹, 匡建武^{1,3*}

(1. 苏州贝斯特装饰新材料有限公司, 江苏 苏州 215400; 2. 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201;
3. 中国轻工业联合会, 北京 100833)

摘要:随着中国汽车产业年产销突破 3000 万辆大关, 汽车内饰材料的阻燃安全性已成为行业核心议题。自上世纪 80 年代起, 卤系、磷系、氮系、金属氢氧化物、硼系、锑系等阻燃剂被相继用于汽车内饰材料。近年来, 阻燃剂的应用正逐步趋向于环保化、可持续化方向发展。阻燃剂是影响内饰材料阻燃性能的主要因素之一。阻燃标准则是影响阻燃结果的另一主要因素, 尤其是是否使用支撑线。对于阻燃结果的评判, 各个国家/主机厂有不同的阻燃标准。最后, 从环保、可持续、经济成本、法律法规四个方面指出锑系阻燃剂的局限性, 并建议车企降低锑在内饰材料中的添加, 亦或是加速开发使用其它阻燃体系。

关键词:汽车内饰; 阻燃剂; 阻燃标准; 支撑线; 锑

中图分类号:TQ630 **文献标志码:**A

Summary of Flame Retardants and Flame Retardant Standards in Automobile Interior Materials and Discussion on their Problems

GUAN Yi¹, LIU Yumin², HUANG Wei¹, KUANG Jianwu^{1,3*}

(1. Beston Decorative Products co., ltd, Suzhou 215400, China; 2. Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China; 3. China National Light Industry Council, Beijing 100833, China)

Abstract: With the annual production and sales of China automobile industry exceeding 30 million vehicles, the flame retardant safety of automotive interior materials has become the core issue of the industry. Since 1980s, flame retardants such as halogen, phosphorus, nitrogen, metal hydroxide, boron, and antimony have been used in automobile interior materials. Recent application of flame retardants is gradually tending to be environmentally friendly and sustainable. Flame retardants and anti-flaming test methods, especially whether the support wire is used, are two main factors that affect the flame retardant results. As for the evaluation of flame retardant results, different countries/automobile manufacturers have different flame retardant standards. Finally, the limitations of antimony-based flame retardants were pointed out from four aspects of environmental protection, sustainability, economic cost, and laws and regulations. It is suggested that automobile manufacturers reduce the addition of antimony in interior materials or accelerate the development and use of other flame retardant systems.

Key words: automobile interior; flame retardant; flame retardant standard; support line; antimony

收稿日期: 2025-03-07 修回日期: 2025-06-06 接受日期: 2025-06-09

第一作者简介: 管懿(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 汽车内饰表皮技术研究。E-mail: y.guan@newbeston.com。

* 通信作者: 匡建武(1962-), 男, 博士, 主要研究方向: 汽车内饰智能化及个性化设计研究。E-mail: jared.kuang@newbeston.com。

引言

汽车作为现代社会不可或缺的工具,其保有量持续增长。据中国汽车工业协会数据显示,2023年中国汽车产销量分别为3016.1万辆和3009.4万辆,同比分别增长11.6%和12.1%。随着汽车产业的蓬勃发展,汽车内饰材料的安全性愈发受到关注。汽车内饰材料种类繁多,涵盖座椅面料、地毯、顶棚织物、仪表板、隔音材料等,这些材料大多由聚合物、纺织品、塑料等构成,在一定条件下存在燃烧风险^[1-3]。汽车内饰材料一旦起火燃烧,产生的熔融滴落物会使火焰迅速蔓延,同时燃烧过程中会释放出烟尘与有毒气体,严重损害人类的生命与财产安全^[4]。因而,如何降低内饰材料的可燃性是汽车行业亟需解决的重要技术问题。

1 阻燃剂

阻燃剂是影响汽车内饰材料阻燃结果的主要因素之一。阻燃剂的历史最早可以追溯到公元前83年,古希腊人用经钒溶液处理过的木材构建了具有阻燃性能的木制城堡。在此基础上,英国人Wyld在1735年用掺杂着硼砂及硫酸亚铁的钒溶液处理木材和纺织物,并获得了世界上第一个阻燃纤维专利。1820年,Gay-Lussac受法国皇室委托,用铵盐(硫酸铵、磷酸铵及氯化铵)与硼砂的混合物对巴黎剧院的幕布(亚麻、黄麻材质)进行了阻燃处理,这是世界上第一例应用阻燃技术的公共工程。1913年,化学家W. Perkin同时用锡酸盐(或钨酸盐)和硫酸铵浸渍绒布,显著提高了其阻燃性能。此外,他对阻燃机理的理论研究也被认为是近代阻燃技术的开端^[5]。

汽车内饰材料主要由聚合物构成。现阶段对于聚合物材料阻燃性能的改性主要有三种手段^[6-7]。第一种是阻燃剂与聚合物共混。Chen等^[8]通过缩合反应制备了一种氮-磷-硅超支化阻燃剂,并将其添加到双马来酰亚胺中,提高了其阻燃性及热稳定性。Amirabadi等^[9]利用六方氮化硼对弹性体纳米纤维增强聚苯乙烯基复合材料进行阻燃改性,使其总放热量从212 MJ降至189 MJ,同时氮化硼的添加还降低了复合材料的机械性能损失。共混法的优点在于工艺简单、材料易于获取、阻燃效率高,但其高阻燃效率往往是通过增加阻燃剂添加量获取的,这会降低材料的机械性能和加工性能,并导致严重

的析出问题。第二种是将阻燃基团嵌入到聚合物中。例如,Cedric等^[10]将含磷基团接入由间苯二胺和三丙烯酸季戊四酯组成的氨基酯网络中,显著提高其阻燃性能,总放热量和总排烟量分别降低43%和46%。Li等^[11]利用生物基香草醛和酪胺开发了一种能与环氧树脂形成交联网状结构的磷基阻燃固化剂,提高了环氧树脂的阻燃性能以及紫外线屏蔽性能。嵌入法能够有效改善燃烧过程中的熔滴问题,且对材料的加工性能几乎无影响,但其设计合成路线繁琐、成本高昂,同时会影响材料的结晶度。第三种是阻燃层结构设计。Tan等^[12]利用涂层技术将氮-磷-硅阻燃剂涂敷在聚苯乙烯表面,将聚苯乙烯的氧指数提高到52.5%。Wang等^[13]受玻璃吹制启发,在线性低密度聚乙烯表面覆盖一层陶瓷炭化层,大大提高了其阻燃性、抑烟性和耐水性。层结构设计具有耐用、多样、简单、友好的优点,但它会严重影响基材的透明度和颜色,层结构的可设计性较弱,过程工艺参数控制也较严苛。

尽管实验室内已经开发了各种具有优异性能的阻燃剂,但出于成本、工艺条件、安全性等因素的考虑,这些阻燃剂无法在短期内应用于实际生产中。此外,汽车内饰在实际应用中会面临低温、潮湿、强光照射、风化等各种复杂环境的考验,这些在实验室阶段也无法得到全面验证。并且,现阶段的汽车内饰仍然以聚氯乙烯、聚氨酯等材质为主,提高其阻燃性的方法仍然以共混法为主,阻燃剂也以卤系、磷系、氮系、金属氢氧化物、硼系、锑系等传统阻燃剂为主^[14-15]。例如,比亚迪海豹系列在内饰材料中使用磷系阻燃剂Exolit® OP 1400(产自科莱恩公司),蔚来ET7使用氢氧化镁阻燃改性门板、仪表盘等内饰部件。

1.1 卤系阻燃剂

氯化石蜡是最早的卤系阻燃剂,然而其会降低材料在加工过程的结晶性,尤其是包括汽车内饰材料在内的热塑性塑料,这驱使了人们对于卤系阻燃剂的进一步开发研究^[16]。氯系阻燃剂得克隆(Dechlorane Plus)于上世纪60年代中期最先被合成出来,随后人们又制备出阻燃性能更高效的溴系阻燃剂,如四溴醚、八溴醚、五溴二苯醚、八溴二苯醚、十溴二苯醚、四溴双酚A等^[17]。卤系阻燃剂的阻燃机理主要在于通过碳-卤键断裂生成的卤素自由基捕获 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{H}$ 。换言之,卤系阻燃剂在燃烧过程中能够

产生低能自由基以作为链终止剂。同时通过脱氢促进焦炭的形成,从而隔绝可燃性气体和基体之间的接触,结束燃烧进程^[18]。尽管卤系阻燃剂的阻燃效果高效,且兼有价格低廉、用量少、相容性好等优点,但其在燃烧时会释放出有毒气体,严重污染环境并危害人体健康。例如,五溴二苯醚和八溴二苯醚在裂解过程中会产生二英和呋喃等致癌物质。欧盟因此发布法规禁止在电子显示器的外壳和支架中使用卤系阻燃剂,这一举措也反映出卤系阻燃剂在环保方面面临的严峻挑战。随着人们环保意识的提高和相关法规的日益严格,卤系阻燃剂在汽车内饰领域的应用逐渐减少,寻找环保型的替代阻燃剂成为行业发展的必然趋势。

1.2 磷系阻燃剂

磷系阻燃剂因其阻燃效果好、热稳定性高、低毒无污染等优点,已在汽车内饰领域广泛应用。磷系阻燃剂的阻燃机理为:磷系阻燃剂在高温下会生成具有强脱水作用的聚偏磷酸,促进炭层的形成并覆盖在材料表面,从而起到阻燃作用;此外其产生的水汽能够吸收热量,降低体系整体的温度;同时磷系阻燃剂产生的含磷自由基能够与材料燃烧时产生的 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 等自由基发生终止反应,从而减缓燃烧强度^[19]。目前市场上的磷系阻燃剂主要分为有机和无机两大类。无机类包括红磷(P)、磷酸、磷酸盐及聚磷酸铵等^[20];而有机类则包括磷酸三甲苯酯、磷酸二苯丁酯、磷酸三苯酯、磷酸三丁酯等^[21]。此外,磷酸酯类阻燃剂还兼具增塑剂的功效,可在提供阻燃性能的同时改善材料的柔韧性和加工性能。

1.3 氮系阻燃剂

氮系阻燃剂是另一种常见的阻燃剂,现阶段工业生产上主要使用的氮系阻燃剂包括三聚氰胺、胍盐类、氨基脒、氨基甲酸盐、异氰酸酯、尿素等^[22]。氮系阻燃剂的阻燃机理主要为气相阻燃作用。即氮系阻燃剂在受热时会分解出 CO_2 、 NH_3 、 N_2 、 H_2O 等气体,稀释燃烧体系中 O_2 的浓度,并且分解反应作为吸热反应会降低体系的温度。此外, N_2 可以捕获游离基团,终止链式反应进行,从而限制燃烧过程的进行^[23]。尽管氮系阻燃剂因环保、无毒、不易挥发等优点,已被广泛应用于聚丙烯、聚氨酯、聚对苯二甲酸丁二酯、尼龙、环氧树脂等汽车内饰材料,但其阻燃效果并不理想。例如三聚氰胺极易吸潮,在高温下易升华并失效。因此,在实际应用中,氮系阻燃

剂往往与磷系阻燃剂复配使用,以增强阻燃效果。

1.4 金属氢氧化物阻燃剂

常用的金属氢氧化物阻燃剂主要包括氢氧化镁(MH)和氢氧化铝(ATH)。其主要优势在于能够有效地减缓燃烧速度和降低热释放量,从而降低火灾事故的发生概率和危害程度。具体而言,ATH和MH在高温下分解为水蒸气,吸收燃烧体系热量的同时稀释气体氛围,从而延缓燃烧进程。分解出的 Al_2O_3 和 MgO 则会附着在材料表面以隔绝氧气与基材的接触,抑制燃烧进行。并且两者均能作为催化剂促进聚合物的热氧交联反应,促进炭层的形成,进一步阻碍燃烧过程。此外,ATH和MH还能吸附烟尘颗粒,起到抑制烟气的作用^[24]。然而,为了完全发挥ATH和MH的阻燃效用,其在聚合物中的添加量往往较大,但由于金属氢氧化物与聚合物的相容性较差,导致聚合物的力学性能大幅下降。因而其在实际生产中需要与其它阻燃剂复配使用^[23]。

1.5 硼系阻燃剂

硼系阻燃剂同样分为无机类和有机类。无机类主要为偏硼酸铵、偏硼酸钠、偏硼酸钡、硼酸锌等,其阻燃机理主要在于硼酸盐在高温下会熔化成玻璃体覆盖在燃烧物表面,隔绝氧气;同时高温下释放的结晶水能够吸收燃烧体系热量,使温度降低。有机硼类阻燃剂除上述阻燃效用外,还能够释放自由基作为链式反应终止剂,从而进一步抑制燃烧反应^[25]。目前,市场上使用的有机类硼系阻燃剂主要为硼酸三(2,3-二溴)丙酯^[26]。

1.6 锑系阻燃剂

对于含卤聚合物聚氯乙烯,锑系阻燃剂三氧化二锑是最常用的一种阻燃剂。三氧化二锑与聚氯乙烯之间存在卤锑效应。聚氯乙烯在高温下会分离出 HCl , HCl 与三氧化二锑反应生成 SbCl_3 和 SbOCl_3 。高密度的 SbCl_3 蒸汽会隔绝空气与可燃物的接触,从而抑制燃烧。同时, SbCl_3 能捕获气相中的活泼自由基,抑制燃烧的进行。此外, SbOCl_3 会进一步转化为 SbCl_3 ,该过程为吸热过程,能够有效降低燃烧体系的温度和分解速度,从而提升材料的阻燃性能^[27]。

2 阻燃标准

2.1 各国阻燃标准比较

汽车内饰材料的阻燃性能主要通过水平燃烧试

验进行评估。水平燃烧试验的过程如下:将试样夹持在U形支架上,在燃烧箱中用38 mm高火焰点燃试样自由端15s;随后确认试样是否继续燃烧,在火焰经过第一标线后开始计时,并在熄灭后测量熄灭点至第一标线的距离,同时计算燃烧速度;最后根据燃烧情况进行评级。对于这项测试,各国制定了不同的标准,例如美国的FMVSS 571.302和SAE J369-2019,欧盟的ISO 3795-1989,日本的JIS D1021以及国内的GB 8410-2006。这些标准均对燃烧试验的取样、样件预处理、设备、结果评估等方面作出了详细的要求与说明。其中,JIS D1021等同采用欧盟ISO 3795-1989。故在此只比较FMVSS 571.302、SAE J369-2019、ISO 3795-1989及GB 8410-2006四者的异同点。

2.1.1 取样

①整幅宽取样

GB 8410-2006和ISO 3795-1989对整幅宽取样作出了说明,FMVSS 571.302和SAE J369-2019则没有这方面的要求。前两者均要求截取长度至少500 mm的整幅宽样品,并将距边缘100 mm的裁掉,随后在其余部分均匀取样。

②方向选取

SAE J369-2019、ISO 3795-1989及GB 8410-2006均要求当不同方向存在不同燃烧速度时,不同方向各取至少五个试样;FMVSS 571.302则要求在阻燃性能最差的方向裁切至少五个试样。

③试样厚度

四个标准都对层基复合材料和单一材料的定义做出了阐述,并提出厚度不超过13 mm的要求。此外,四者均对试样厚度超出13 mm的情形作了说明,且说法一致。以GB 8410-2006举例说明(图1),A为单一材料,需单独测试阻燃性能;B+C为层积复合材料,需取自B上表面以下13 mm进行检测。

④试样尺寸

GB 8410-2006和ISO 3795-1989规定的试样标准尺寸为100 mm×356 mm,FMVSS 571.302和

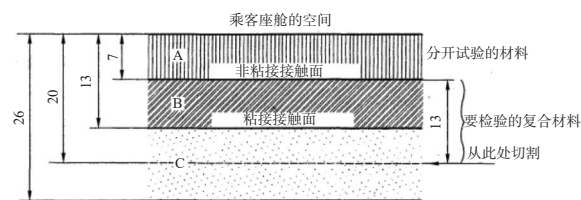


图1 GB 8410-2006 取样示例^[28]
Fig.1 Examples of sampling in GB 8410-2006^[28]

SAE J369-2019的则为102 mm×356 mm。对于非标尺寸,FMVSS 571.302规定当长宽中任一尺寸不能满足102 mm(宽)或356 mm(长)时,以所能取的最大尺寸进行测试。SAE J369-2019则分别规定了试样的最大最小尺寸为102 mm×356 mm和95 mm×300 mm。GB 8410-2006和ISO 3795-1989对非标尺寸的说明一致,均规定:当零件宽度介于3~60 mm时,长度至少356 mm;当宽度大于60 mm时,长度至少138 mm;其余未满足上述尺寸区间的样品则不能用于样品阻燃性能的评估。此外,GB 8410-2006和FMVSS 571.302额外对弯曲零件的取样作了说明,GB 8410-2006要求样件拱高需小于13 mm,FMVSS 571.302则要求任一点厚度不超过13 mm。

2.1.2 样件预处理

对于绒毛或簇状表面样品,所有标准均要求用金属梳逆向梳理两次。对于预处理的环境参数,四个标准略有不同(表1)。所有标准均规定样品预处理的湿度需控制在50%左右。对于温度,除FMVSS 571.302规定温度为21℃外,其余标准均要求(23±2)℃。对于预处理时间,所有标准均要求至少24 h,GB 8410-2006和ISO 3795-1989还额外要求时间不得超过168 h。此外,SAE J369-2019还建议预处理后和测试前,试样可密封在聚乙烯袋中1 h。

2.1.3 设备

①燃烧箱、试样支架、燃气灯

燃烧箱、试样支架、燃气灯的差异主要在尺寸方面,具体如表2所示。

②燃气

GB 8410-2006建议使用35~38 MJ/m³的液化

表1 各标准预处理条件对比
Tab. 1 Comparison of pretreatment conditions of various standards

标准	GB 8410-2006	SAE J369-2019	FMVSS 571.302	ISO 3795-1989
湿度(%RH)	50±5	50±5	50	50±5
温度/℃	23±2	23±2	21	23±2
时长/h	24-168	24	24	24-168

表 2 各标准燃烧箱、试样支架、燃气灯尺寸差异
Tab. 2 Differences among standards in dimensions of combustion box, sample holder and gas lamp

标准	GB 8410-2006	SAE J369-2019	FMVSS 571.302	ISO 3795-1989
燃烧箱/mm ³	385×204×360	381×203×356	381×203×356	385×204×360
试样支架/mm ²	100×356	102×356	102×356	100×356
燃气灯/mm	9.5	9.5±0.3	10	9.5

气。SAE J369-2019 和 ISO 3795-1989 对燃气种类未作明确要求,只对燃气热值作了规定,分别是 (37±1) MJ/m³ 和 38 MJ/m³。FMVSS 571.302 则要求使用与天然气具有同等热值的燃气。

③试验环境

FMVSS 571.302 只对试验环境提出了需具备通风条件的要求。GB 8410-2006、SAE J369-2019 和 ISO 3795-1989 则要求在通风橱中完成试验,且对通风橱的尺寸或空气流速作出了数值要求。例如,GB 8410-2006 和 ISO 3795-1989 均对通风橱的尺寸作出了说明,两者均规定通风橱容积为燃烧箱的 20~110 倍,且长宽高任一尺寸不得超过另两尺寸的 2.5 倍。对于通风橱内的空气流速,GB 8410-2006 和 ISO 3795-1989 要求燃烧箱前后 100 mm 处垂直方向的空气流速应为 0.1~0.3 m/s, SAE J369-2019 则要求通风橱表面速度不超过 0.4 m/s。此外,对于燃烧箱内的环境参数,SAE J369-2019 要求燃烧箱内温度和湿度分别保持在 15~35 °C 和 45%~75%RH, ISO 3795-1989 和 GB 8410-2006 则只要求箱内温度和支架温度不超过 30 °C。

④支撑线

ISO 3795-1989 默认装夹试样时使用支撑线。GB 8410-2006、SAE J369-2019 和 FMVSS 571.302 均规定:当试样燃烧端柔软、弯曲造成不稳定燃烧时,应使用支撑线。此外,GB 8410-2006 和 SAE

J369-2019 还规定当试样宽度不足时,应使用支撑线。但两者对宽度不足的说明略有不同,SAE J369-2019 要求不超过 51 mm, GB 8410-2006 则未给出明确的限值要求,只规定试样宽度不足时应使用支撑线进行阻燃测试。

⑤其它

所有标准均对表面处理时使用的金属梳作了说明,使用的金属梳每 25 mm 内需有 7~8 个光滑圆齿。并且,除 FMVSS 571.302 外,其它标准均要求金属梳长度至少 110 mm。在测量设备方面,FMVSS 571.302 未作特殊说明,SAE J369-2019 规定使用精确度为 0.1 s 的秒表来计时,ISO 3795-1989 和 GB 8410-2006 则要求精确到 0.5 s。此外,GB 8410-2006 还额外规定了温度计的量程应大于 150 °C,精确到 1 °C;钢板尺的量程应在 400 mm 以上,准确度 1 mm。

2.1.4 燃烧等级评定

如表 3 所示,SAE J369-2019 和 GB 8410-2006 对从未燃烧到燃烧速度过快的各类情形进行了详细的等级划分。而 FMVSS 571.302 和 ISO 3795-1989 只要求计算试件的燃烧速度 B (mm/min),并未像前两者那样对燃烧情形进行细致的划分。此外,ISO 3795-1989 提出未燃烧情形应记作 0 mm/min,火焰熄灭后样品未点燃或是在到达第一标线前停止燃烧,皆算作此类情形。

表 3 各国阻燃标准燃烧等级评定对比^[29]
Tab. 3 Comparison of combustion grade evaluation of flame retardant standards in various countries^[29]

燃烧情形	等级评定			
	GB 8410-2006	SAE J369-2019	FMVSS 571.302	ISO 3795-1989
未燃烧	A-0	DIN		0
样品在到达第一标线前停止燃烧		SE/0		
样品在到达第一标线前停止燃烧,且燃烧距离不超过50 mm,时间不超过60 s	B	SE/NBR		B-燃烧速度
标线前样品在到达第一停止燃烧,但燃烧距离超过50 mm,或时间超过60 s	C-燃烧速度	SE/B-燃烧速度	B-燃烧速度	
完全燃烧	D-燃烧速度	B-燃烧速度		
燃烧速度过快	E	RB		

2.2 各主机厂阻燃标准比较

阻燃测试方法是除阻燃剂外影响阻燃结果的另一主要因素。根据 3.1 部分对各国阻燃标准的比较结果可知,各国在阻燃测试方法上并无特别大的差异。唯一影响阻燃结果的操作细节在于是否使用支撑线,尤其是针对材质较软的内饰材料。软质材料在燃烧过程中会产生弯曲、软化,若没有使用支撑线,燃烧过程会由水平燃烧转化为垂直燃烧,从而严重影响阻燃评判。严格意义上讲,这样测得的阻燃结果是不准确的。此外,支撑线的使用对于

阻燃结果不未必是绝对的正向作用。例如,对于以凝聚相阻燃机理为主的阻燃剂,在进行水平燃烧测试时,部分燃烧产物会附着在支撑线上,可能导致无法产生有效的炭层以终止燃烧进程。表 4 比较了各主机厂对支撑线使用情形的规定,大部分主机厂都规定在试样宽度不足时或是燃烧端弯曲、软化易导致不水平或不稳定燃烧时,使用支撑线;丰田和日产则规定在测试特定的材质时使用支撑线;而福特则默认在进行阻燃测试时使用 0.25 mm 的支撑线。

表 4 各主机厂阻燃测试支撑线使用情形比较

Tab. 4 Comparison of the use of flame retardant test support lines in various main engine plants

主机厂	阻燃标准	支撑线使用说明
大众	TL 1010	试样宽度小于51 mm&试样火焰中弯曲、卷起&燃烧不呈水平状
福特	ISO 3795	默认使用0.25 mm支撑线
现代	MS300-08	试样软化、凹陷导致不水平燃烧&试样长宽小于标样尺寸
丰田	TSM 0500G	真皮、PVC、织物、地毯、橡胶、泡沫等异常燃烧材料
通用	GMW 3232	小尺寸试样&测试过程中软化、弯曲试样
三菱	ES-X60410	试样软化、凹陷导致不水平燃烧&试样长宽小于标样尺寸
日产	NES M0094	试样受热软化、变形导致不水平燃烧&橡胶、织物、地毯等受热凹陷材料
本田	HES D 6003-99	试样宽度小于50 mm&U型架无法固定试样&当事人同意
上汽	SMTC 5400008	试样宽度小于51 mm&试样火焰中弯曲、卷起&燃烧不呈水平状
沃尔沃	VCS 503119	试样燃烧端软化、弯曲导致不水平燃烧&试样长宽小于标样尺寸
马自达	MES CF 050D	试样最大宽度不超过51 mm&试样燃烧软化、弯曲
比亚迪	GB8410	试样宽度不足&试样自由端柔软和易弯曲造成不稳定燃烧

3 问题与建议

锑系作为目前汽车内饰领域中使用最广泛的阻燃材料,其本身也存在一定局限性。

①残留及污染

锑是一种重金属,其主要以三价态和五价态形式存在于自然界中,故其难以降解。高浓度的锑环境会严重影响人体健康,Sb 在进入人体后会与人体组织中的巯基发生反应,通过抑制酶促作用和扰乱细胞离子平衡导致细胞缺氧,导致神经系统和重要器官的代谢功能障碍和损伤,诱发癌症、心血管疾病、肝病、肺病和呼吸系统疾病等。在自然环境中,锑系阻燃剂的存在也可能对生态系统产生危害。当汽车内饰材料废弃后,锑元素可能会通过土壤、水体等途径进入生态系统,影响植物及水生生物的生存和生长发育。例如,在一些锑矿开采地区的周边水体中,锑的污染使得水生生物的种类和数量明显减少,破坏生态平衡。长此以往,锑会在食物

链中逐渐富集,进一步对整个生态系统的健康构成威胁。

②储量

锑是一种不可再生的稀有资源,其在地壳中的丰度极低,且分布不匀,极难富集。目前全球锑资源储量约为 220 万吨,其中中国占据其中的 30%(约 64 万吨),是全球锑资源最丰富的国家。然而,我国的储采比却与其它锑资源大国有较大差距,例如我国的年开采高达 4 万吨,而俄罗斯(储量 35 万吨)却只有 0.43 万吨/年。为巩固锑资源的优势,保护锑矿资源,我国出台了一系列严格的环保政策和资源管控措施,对锑矿的开采和冶炼进行了规范和限制,导致国内锑矿产量逐年下降(图 2),进一步加剧了锑原料的获取难度。

③价格

由于长期的大规模开采,中国的锑矿资源正逐渐面临枯竭的风险,部分锑矿的品位也在不断下降,导致开采成本上升,锑锭的价格也随之涨幅。尤其

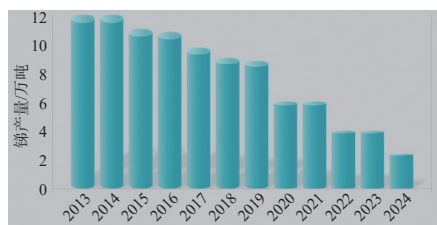


图 2 2013~2024 年锑产量
Fig.2 Antimony output in 2013–2024

是 2024 年,最高涨至 160 000 元/吨,接近年初的两倍(图 3,数据来源: Mysteel.com),并至年底前稳定在 140 000 元/吨左右。这加重了锑系阻燃剂的采购成本,给相关材料生产企业带来较大经济压力。

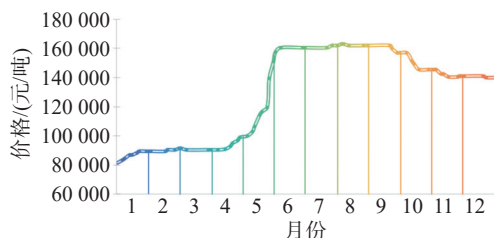


图 3 2024 年锑锭价格
Fig.3 Antimony ingot price in 2024

④法规/政策限制

随着全球对环保和安全的关注度不断提高,各国家地区制定了各种政策法规以限制锑的使用。例如,欧盟的 REACH 法规以及美国的《有毒物质控制法》(TSCA)法规对阻燃剂产品的注册、评估、授权和限制等方面做了详细规定,这使得锑系阻燃剂面临着严格的监管和限制。又例如加州 65 号提案为保护本州居民及水体环境,将 700 多种可能导致癌症或生殖毒性的化学品列为受控品,其中锑的安全阈值被设定为 0.06 $\mu\text{g}/\text{day}$ 。此外,主机厂沃尔沃秉持环保、可持续发展的理念,明确禁止锑在其汽车产品中的使用。

综上,锑系阻燃剂已陷入“资源不可持续—环境不可承载—经济不可负担—法规不可合规”的四重困境。目前汽车内饰材料正逐步趋向绿色化、生态化、低重金属化。越来越多的内饰制造商开始申请 Oeko-Tex Standard 100 认证。例如,比亚迪海豹和蔚来 ET7 分别使用磷系和氢氧化物阻燃剂改性内饰部件。因此,锑系阻燃剂的破局之道在于降低锑在阻燃剂中的比例,乃至加速开发使用其它无锑阻燃体系,例如氮磷系、硅系、氢氧化物等,亦或是它们的复配体系。唯有通过材料代际革命,才能在全球汽车产业绿色转型中抢占制高点,这既是对企

业社会责任的时代回应,更是对国家资源安全战略的产业担当。

参考文献:

- [1] 徐建林,王涛,康成虎,等. 阻燃剂研究与应用进展及问题思考[J]. 材料导报, 2022, 36(10): 20110227.
XU J L, WANG T, KANG C H, et al. Research and applications of flame retardants: A review and thoughts[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(10): 20110227. (in Chinese)
- [2] 纪发达. 偶联剂改性无机硅系阻燃剂对粘胶纤维性能的影响研究[J]. 有机硅材料, 2023, 37(5): 33–37.
JI F D. Study on effect of silane coupling agent modified inorganic silicon flame retardant on the properties of viscose fibers[J]. *Silicone material*, 2023, 37(5): 33–37. (in Chinese)
- [3] 刘朵朵,徐哲,张雷,等. 氮系无卤阻燃剂对液体硅橡胶阻燃泡沫材料性能的影响[J]. 有机硅材料, 2023, 37(1): 53–60.
LIU D D, XU Z, ZHANG L, et al. Effect of nitrogen-based halogen-free flame retardants on the performance of liquid silicone rubber flame retardant foam materials[J]. *Silicone material*, 2023, 37(1): 53–60. (in Chinese)
- [4] 史依茗,杨青倬,王宏宇. 环保型皮革化工制品低碳绿色评价体系研究——以电缆产品绝缘材料为例[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(6): 128.
SHI Y M, YANG Q Z, WANG H Y. Research on low carbon and green evaluation system for environmentally friendly leather chemical products—Taking cable insulation materials as an example[J]. *Leather Sci Eng*, 2023, 33(6): 128. (in Chinese)
- [5] 刘应杰. 棉纤维耐久性阻燃整理剂的合成与应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
LIU Y J. Research on synthesis and application of durable flame retardant finishing agent for cotton fiber[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] LIU B W, ZHAO H B, WANG Y Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(46): 2107905.
- [7] 刘彬,王韵然,王强,等. 低密度阻燃室温硫化硅橡胶的研制[J]. 有机硅材料, 2023, 37(6): 41–45.
LIU B, WANG Y R, WANG Q, et al. Preparation of RTV silicone rubber with low density and flame-retardant[J]. *Silicone material*, 2023, 37(6): 41–45. (in Chinese)
- [8] CHEN Y N, CHU F K, ZHOU Y F, et al. Bismaleimide with high thermal stability, toughness and flame retardancy modified by synergistic hyperbranched flame retardant[J]. *Chem Eng J*, 2024, 483: 149396.
- [9] AMIRABADI S, KHERADMANDKEYSOMI M, ZANDIEH A, et al. Highly tough and flame retardant polystyrene composites by elastomeric nanofibers and hexagonal boron nitride[J]. *J Mater Sci Technol*, 2024,

- 198: 208–220.
- [10] HERVIEU C, SEKAR A, POILVET G, et al. Reprocessable flame retardant amino-ester thermoset[J]. *Chem Eng J*, 2025, 503: 158190.
- [11] LI J H, CAO Q, ZHAO Y, et al. Bio-based flame retardant for manufacturing fire safety, strong yet tough versatile epoxy resin[J]. *Compos Part B Eng*, 2024, 276: 111362.
- [12] TAN S M, WANG X Y, XU R L, et al. Synthesis of biobased phosphorus-nitrogen-silicon ceramizable flame retardant and its flame retardancy effects on EPS[J]. *Chem Eng J*, 2024, 497: 154773.
- [13] WANG R P, ZHANG S, DU S, et al. Glass-blowing-inspired constructing a novel ceramizable intumescent flame retardant for realizing superior flame retardancy, smoke suppression and water resistance of polyethylene composites[J]. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2025, 190: 108687.
- [14] 王琦研, 段宝荣, 段小宁, 等. 皮革阻燃技术的研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2020, 30(3): 28–34.
WANG Q Y, DUAN B R, DUAN X N, et al. Research progress of leather flame retardant technology[J]. *Leather Sci Eng*, 2020, 30(3): 28–34. (in Chinese)
- [15] 陈浩楠, 金勇, 周荣, 等. 阻燃聚氨酯纳米复合材料的研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2024, 34(5): 50–59.
CHEN H N, JIN Y, ZHOU R, et al. Research progress in flame-retardant polyurethane nanocomposites[J]. *Leather Sci Eng*, 2024, 34(5): 50–59. (in Chinese)
- [16] 张宇强, 黄芮, 曾山晋, 等. 新型短链氟碳表面活性剂发泡性能研究[J]. *化学研究与应用*, 2024, 36(7): 1529–1536.
ZHANG Y Q, HUANG R, ZENG S J, et al. Study on foaming performance of new short carbon chain fluorocarbon surfactants[J]. *Chem Res Appl*, 2024, 36(7): 1529–1536. (in Chinese)
- [17] 王文博, 张广鑫, 梁西良, 等. 阻燃涂料中阻燃剂的研究进展[J]. *化学与粘合*, 2021, 43(4): 300–303.
WANG W B, ZHANG G X, LIANG X L, et al. Research progress in flame retardant in flame retardant coatings[J]. *Chem Adhesion*, 2021, 43(4): 300–303. (in Chinese)
- [18] 丁木生. 阻燃剂在高聚物材料中的应用分析[J]. *化工时刊*, 2020, 34(5): 34–39.
DING M S. Analysis on the application of flame retardant in polymer materials[J]. *Chem Ind Times*, 2020, 34(5): 34–39. (in Chinese)
- [19] 张月, 扈乐成, 于涵, 等. DOPO 衍生物-APP 协同的阻燃水性聚氨酯的制备及性能研究[J]. *皮革科学与工程*, 2024, 34(5): 60–66.
ZHANG Y, HU L C, YU H, et al. Preparation and performance study of flame-retardant waterborne polyurethane with synergistic effects of DOPO derivatives and APP[J]. *Leather Sci Eng*, 2024, 34(5): 60–66. (in Chinese)
- [20] 裴三女. 氢氧化镁阻燃剂的表面改性及其在 EVA 树脂中的优化应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
PEI S N. Surface modification of magnesium hydroxide flame retardant and its optimization application in ethylene-vinyl acetate copolymer resin[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [21] 仲磊. 基于木质素的反应型阻燃剂设计及其在阻燃型酚醛泡沫中的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
ZHONG L. Design of reactive flame retardant based on lignin and its application in flame retardant phenolic foam [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [22] 沈月石. 生物基阻燃剂的合成及其阻燃 PLLA 的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
SHEN Y S. Synthesis of biobased flame retardant and study on its flame retardant PLLA[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [23] 柴威鸿. 高性能无卤协同阻燃硅橡胶体系的设计构建及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
CHAI W H. Design, construction and research of high-performance, halogen-free and synergistic flame-retarding silicone rubber system[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [24] 王奕青. 羧酸类金属配合物涂层阻燃软质聚氨酯泡沫性能研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2023.
WANG Y Q. Study on the flame retardant flexible polyurethane foam coated with carboxylic metal complexes[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2023. (in Chinese)
- [25] DOGAN M, DOGAN S D, SAVAS L A, et al. Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials[J]. *Compos Part B Eng*, 2021, 222: 109088.
- [26] 徐康鹏. 改性硫化锌纳米粒子的制备及其环氧树脂的阻燃折光性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
XU K P. Preparation of modified zinc sulfide nanoparticle and study of the flame retardant and refractive properties of its epoxy resin[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [27] 赵胜利. 三氧化二锑表面改性及其阻燃应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
ZHAO S L. Surface modification and flame retardant applications research of antimony trioxide[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB 8410-2006 汽车内饰材料的燃烧特性[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. GB 8410-2006 flammability of automotive interior materials[S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [29] 王筠, 唐艳云, 郎思遥, 等. 中外汽车内饰材料燃烧特性标准的比较[J]. *中国纤检*, 2013(21): 47–49.
WANG Y, TANG Y Y, LANG S Y, et al. The comparison for standard of Chinese and foreign auto interior materials combustion characteristic[J]. *China Fiber Inspect*, 2013(21): 47–49. (in Chinese)