

航空刹车材料一家人的跨年夜

卢一铭², 谢翔², 邱晓清¹, 刘洋¹, 程新园^{1,*}

¹中南大学化学化工学院, 长沙 410083

²中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410083

摘要: 20世纪初, 在汽车刹车材料的启发下, 航空刹车材料应运而生。它凭借自己优异的稳定性、良好的耐磨性和能在复杂环境下工作等优势, 成功地在材料界站稳脚跟。近几年, 我国科技发展势头良好, 特别是在民用和军用航空航天研发领域, 我国的科学技术水平已经迈入世界前列, 航空刹车材料也再一次迎来了属于自己的高光时刻。本文采用拟人化的手法, 以家庭年夜饭为题来介绍航空刹车材料的发展历程、化学工艺等相关知识。

关键词: 航空刹车材料; 物理化学; 绿色化学; 非金属基刹车材料

中图分类号: G64; O6

The New Year's Eve of the Aviation Brake Material Family

Yiming Lu², Xiang Xie², Xiaoqing Qiu¹, Yang Liu¹, Xinyuan Cheng^{1,*}

¹ College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.

² Powder Metallurgy Research Institute of Central South University, Changsha 410083, China.

Abstract: In the early 20th century, inspired by automobile brake materials, aviation brake materials emerged. They established a strong presence in the materials industry due to their excellent stability, good wear resistance, and ability to operate in complex environments. In recent years, China's technological advancement has been remarkable, especially in the fields of civil and military aerospace research and development, placing the country at the forefront of global science and technology. Aviation brake materials have thus entered a new era of prominence. This article uses an anthropomorphic approach, depicting a family New Year's Eve dinner to introduce the development history, chemical processes, and related knowledge of aviation brake materials.

Key Words: Aviation brake materials; Physical chemistry; Green chemistry; Non-metal base brake materials

在2024年的春晚上, 有一幕让我热血沸腾: 神舟十七号乘组在太空中度过春节, 三位航天员为全国人民送上祝福。这是值得历史记住的一刻, 这代表着我国在航空航天领域已经跻身世界顶尖行列, 那么究竟是谁在保证航天人员可以安心在太空中欢度佳节呢? 那当然是各种材料的功劳啦! 自从材料领域诞生以来, 世界各国越来越看重材料的发展, 也正是这一份重视, 才有了航空刹车材料的“梦幻发展历程”。现如今的航空刹车材料可以说是材料界的翘楚, 为了迎接新年的到来, 航空刹车材料一家人宴请许多亲朋好友一同跨年, 据说按照他们家的传统, 家里的“上班族”都要在全家人的面前讲述自己这些年来在工作领域所做出的成绩, 这可是了解航空刹车材料的绝佳机会, 让我们一起去看看吧!

收稿: 2024-04-23; 录用: 2024-05-07; 网络发表: 2024-09-02

*通讯作者, Email: xycheng@csu.edu.cn

基金资助: 中南大学本科生教育改革实践类项目(2021KCSZ051); 中南大学教育教学改革研究项目(2021jy069); 2021年度中南大学金课建设项目

还没到开饭时间，人也还没到齐，那我就先给大家普及一下航空刹车材料的基础知识吧！摩擦材料是要具有足够的摩擦系数、导热性好、耐磨性好、寿命长、能承受较高的工作压力和速度以及优秀的耐腐蚀性^[1]，而这些性能在作为刹车材料重要分支的航空刹车材料身上也是同样重要。按照航空刹车材料的物相组成来分析，它目前被分为聚合物粘结刹车材料、粉末冶金刹车材料、碳碳复合刹车材料和碳碳陶瓷基复合刹车材料^[2]，这四类材料分别代表了不同发展阶段的技术进步，每一类在当前的应用中都发挥着独特且不可替代的作用，共同推动着航空刹车技术的不断创新与进步。

快来落座，宴席开始啦！餐桌上每个人都笑容满面，可以看出他们对于此次团聚无比兴奋期待。就在大家正在享用美食并愉快交谈时，一个人缓缓站起来，他那饱经沧桑的外貌引人注目，身上的每一处看起来都是饱经沧桑，花白的头发、眉毛和胡须都是时间的见证。“大家听我说几句，我是聚合物黏结刹车材料，作为家里的老大哥，我就先开个头，讲一讲我的故事。”听到大哥开始讲话，大家纷纷放下碗筷，坐姿端正地准备聆听大哥的发言。“我是在1909年问世的，我的第一位合作伙伴正是石棉，我们合力创造出了石棉基刹车材料，正是这次合作使我得到了优化并一炮而红。可是随着时间的推移，我也暴露出一个作为刹车材料最大的缺点：耐热性差，这一点会导致刹车片在工作中因为摩擦产生的温度过高，无法发挥相应性能而失效。终于，在1920年初，酚醛树脂开始工业化应用，它凭借着其耐热性明显高于橡胶的优势，迅速取代了橡胶，成为了我的主要合作伙伴，也是当今刹车材料中主要的粘结剂材料。由于酚醛树脂与其他各种耐热型的合成树脂相比价格较低，故从那时起，石棉-酚醛型摩擦材料一夜爆火，成为了那时家喻户晓的‘明星’。虽然在不久后，更多类型的刹车材料陆续诞生，这使得我逐渐走下历史舞台。但在当今时代，我凭借着制作简单、成本低廉、性能可调控性强的优势，在汽车制动领域仍有着广泛应用^[3]，这说明我可以在其他对于刹车片材料要求并不是非常苛刻的领域继续发挥作用。我只想说，我也曾辉煌一时，是为刹车材料界贡献过一份力量的！”话音未落，屋内掌声雷动，大家都深知聚合物粘结刹车材料的巨大贡献，正是他的努力，推动了刹车材料的发展。

屋内逐渐热闹起来，人们开始起身四处走动，互相敬酒，在推杯换盏间谈论着各自的近况。这时，有位穿着时尚的男士向我们走来，他的长相让我感觉非常熟悉，他开口说道：“大家好，我是粉末冶金刹车材料。我来提前给大家拜年了。”他与每个人碰杯致意，我也开始仔细打量着他：粉末冶金刹车材料虽然脸上已经满是皱纹，两鬓也已发白，但是他的穿搭却没有一点岁月的痕迹。他上身是一件银白色的卫衣，并且有着各种各样颜色的点缀，在光照下十分耀眼；下面穿着一条紫红色的运动裤，有趣的是，上面也同样有许多颜色的加持。这活脱脱像是一个十八岁的年轻小伙！果然，穿搭体现性格，在敬酒之后，他也是主动和我们攀谈起来：“我是由金属及非金属粉末经压制烧结而成，主要是以金属及其合金为基体，添加摩擦组元和润滑组元，用粉末冶金技术制成的复合材料。我今天穿的正是当今我们领域最为时髦的服装。这件卫衣是铜基刹车材料，它的工艺性能好，摩擦系数稳定，抗粘结、抗卡滞性能好^[1]；裤子是铁基刹车材料，它的动摩擦系数高且稳定，具有良好的耐磨性、抗粘结、较高的使用负荷以及工作稳定性^[4]。大家可能也看到了，我衣服上总是有着各种颜色来点缀，其实不同的颜色代表着金属基体与各种其他金属或非金属形成的结晶，代表着他们在粉末冶金刹车材料上做出的贡献。”说到这里，每个人都深有感触：无论哪种材料的诞生，都是以多种化学物质的合作为前提的。

在与粉末冶金刹车材料的深入交流中，我们得知在众多新型刹车材料相继问世的背景下，粉末冶金刹车材料选择专注于国家的军备建设，这一战略调整使其逐渐淡出了公众视野。2017年9月，随着全球瞩目的中国高铁时速成功突破350公里大关，我国对于高铁刹车材料的使用要求也是愈发严苛，为了保证高铁在更高时速运行中仍能保持足够的安全性，探索出性能更加优异、安全系数更高的刹车材料成为了科学家们的首要任务。在这个刹车材料种类繁多的时代，粉末冶金刹车材料凭借其出色的性能和稳定性再次成为焦点，赢得了重新展示于世人面前的机会。这次亮相不仅让其名声大噪，还使其被誉为“刹车材料界的世界巨星”。经过数年的发展，粉末冶金刹车材料也成功应用于

中国高铁的刹车盘制造领域(图1)。作为全球应用最广泛的刹车材料,粉末冶金刹车材料从未自满,反而持续为国家贡献力量,这种精神值得我们学习。此时的聚合物粘结刹车材料已经藏不住喜悦的神情,他早早就开始外出工作,只为了让自己的弟弟们可以一直读书,而二弟正是他供出来的全家第一个大学生,看到他如今发展得这么好,他也是由衷地开心。



图1 粉末冶金刹车材料已经在中国高铁上广泛使用^[5]

“叮叮叮……”谁的电话响了?原来是碳碳复合刹车材料来给大家拜年啦。电话接通,他的热情瞬间溢出屏幕,“大家新年快乐哈,碳碳复合刹车材料在这里祝大家心想事成,万事如意!”随后我们询问他现在的近况,他也是爽快地回答道:“我呢,作为以碳纤维为增强相,炭基体为连续相的新型刹车材料,优势就是重量轻、抗热震性能好、高温强度高、摩擦磨损性能优异^[6],这都是我比金属基刹车材料更加优秀之处。举个实例来说,与钢刹车盘热库相比,碳/碳复合材料刹车盘的热容量提高了2倍左右,使用寿命提高了大约1倍,且重量降低20%–40%,各方面的大型优化足以说明,我的诞生无疑是一次革命性的突破。另外,我能接受的工况环境温度更高,同时我也具有更加稳定的摩擦磨损性能,这都将极大提高飞机着陆的安全性^[2]。我敢说,在今后的每一种飞行器刹车系统上都一定会有我的身影!”听到这里,大家都为碳碳复合刹车材料感到骄傲,他作为在刹车材料界跨时代的非金属基新材料,从它诞生之际就广受世人关注,现在他也是不负众望,成为了国家的栋梁之材。

接下来我们就谈到了为什么碳碳复合刹车材料今年没有回来过年,当聚合物粘结刹车材料听到这个问题时,他的表情很是复杂,既有对于弟弟出类拔萃的喜悦,又有对于弟弟一直忙于工作的心疼。他说道:“碳碳复合刹车材料的出现,可以说是为飞行器领域量身打造的,他完美解决了粉末冶金刹车材料所存在的重量较大、磨损量较大、抗高温变形能力差、使用寿命短等缺点,因此目前绝大多数飞机上正使用化学、物理性能更加优异的碳基刹车材料^[2],这种材料对于我国,一个近几年一直致力于研究出一架属于我们自己的飞机的国家,是可遇不可求的。前些日子火出圈的C919大飞机的刹车系统就有着碳碳复合刹车材料的直接参与(图2),正是因为他和中南大学的伙伴们通力合作,成功地为我国的大飞机制造贡献出了自己的一份力量。但是毕竟人无完人,他也存在着抗氧化性能差等问题,虽然现在有基体改性和涂层这两种提高碳碳复合材料的抗氧化和抗烧蚀性能最有效的方法^[7],但金无足赤,更有效果的产品优化仍迫在眉睫。所以他实在赶不回来过年,只好网上拜年了。”听到这里,我们都不约而同地流露出敬佩的神情,刹车材料家族真的为国家贡献了太多!



图2 国产大飞机C919大飞机首次采用碳碳复合刹车材料^[8]

时间过得真快，新的一年已然悄悄来临，还有20分钟，新年的钟声就要敲响，听到有人告知今晚12点会有烟花表演，大家纷纷走向门外。前面人群涌动，我眼疾手快地拉住了一个从身后冲出的小朋友并将他抱起。小家伙皱着眉头，看起来好像和家里人走散了，“小朋友，慢点跑，人多很危险的。你叫什么啊，我带你去找家人。”“我叫碳碳陶瓷基复合刹车材料，我好像和我的哥哥们走散了。”听到他说自己也是刹车材料，我立刻带着他去找聚合物粘结刹车材料，毕竟是这次的聚餐的组织者，他肯定能找到这个小朋友的家人。经过一番寻找，我终于找到他，他却告诉我这是他家的四弟，也是全家最小的，听到这里，真的让我非常震惊！也许是我帮他找到家人的原因，小家伙也主动和我聊起来：“我是由碳纤维和碳基(C/C)制成的陶瓷基复合材料，所以我算是碳碳复合刹车材料的进化版，我与三哥的区别就是我在原基础上向基体中加入碳化硅(SiC)，这样可以提高硬度和热稳定性，降低化学反应活性，从而改善碳碳复合材料的摩擦学性能。因此，我是可以在高温下进行更加高效地工作的。与前辈们相比，我也具有更低的密度(约 $2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、更长的使用寿命和更高的抗热震性，这也解决了我们家族在湿工况和高速工况下工作受限严重的问题^[9]。虽然我现在只在高端汽车业和航天飞行行业有所应用，但作为‘完美材料’的我，在学成归来之时，肯定会出人头地，成为一颗冉冉升起的新星！”在这个小家伙身上，我们仿佛能看到，未来的某一年，在遥远的宇宙深处，我们的航天器披着一层神秘的碳碳陶瓷基复合刹车材料外衣，静静地漂浮在太空中，为每一位航天人员保驾护航，像朋友一样陪伴着他们度过在太空中的每一分，每一刻。我希望在未来某一次除夕夜里，他也可以像春晚的三位宇航员一样，在太空中全国人民送来新春的祝福，而他的出现，同样也证明我国航空航天领域又向前迈进一大步！

如今，碳碳陶瓷基复合刹车材料正凭借着自身得天独厚的优质条件迅猛发展，可一直有一片乌云笼罩在这个小孩子的头顶——碳纤维在空气中 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上会发生明显氧化烧蚀，这是限制碳纤维增强陶瓷基复合材料在航空航天领域应用的关键所在。目前，对于C/C、C/SiC复合材料的抗氧化保护一般从三个方面着手，即纤维涂层、基体掺杂、复合材料整体涂层。在具体解决方法中，液相法独具一格，它具有工艺过程简单、均匀性好、对设备要求低、可控性好、成本低等优势，是一种实用化、工程化前景很好的方法。尤其是在复合材料整体涂层研究中，Liedtke等在C/SiC复合材料表面用溶胶-凝胶工艺制备SiC涂层，在多种环境下进行测试，并与化学气相沉积(简称CVD)法SiC涂层进行了对比，其性能不比CVD涂层差，成本则明显降低、过程简单、可控性强，容易实现工业化应用^[10]，这说明这项隶属于物理化学分支领域——表面化学的技术有着无限潜力^[11]。当下，溶胶-凝胶法和陶瓷先驱体溶液浸涂裂解是液相法制备抗氧化涂层的两种有效手段^[10]，我相信，液相法凭借着自身独特之处一定会吸引越来越多的科学家对其进行深入研究，从而早日突破难关，帮助碳碳陶瓷基刹车材料这个小朋友早日登上太空！

当前, 航空刹车材料的前景依然十分广阔, 聚合物粘结刹车材料以及金属基刹车材料的持续优化一直在进行, 非金属基刹车材料作为后起之秀则具有极大的发展空间。然而, 这一切进程的推进都是依托于我国各位人才的不懈努力而完成的。来自中南大学粉末冶金研究院的黄伯云院士和他的创新团队, 于2004年完成了“高性能碳和碳航空制动材料的制备技术”, 这项技术不仅打破了国外高技术的封锁, 同时也确保实现我国碳和碳刹车材料国产化和国家航空战略安全^[12], 这足以体现刹车材料的重要性。

然而, 近几年新兴材料的崛起, 也给传统航空刹车产业带来了新的挑战。从诞生就饱受关注的难熔高熵合金正是一个有着强劲实力的对手, 他能在1500 K温度以上的环境下完成既定任务并且重量也很轻^[13], 这说明他的实力不可小觑。除此之外, 为了迎合我国提出的“双碳”理念, 我们应该从传统的以发展性能为重转变成以绿色化学为主进行产品研发, 用化学的方法和技术去减少那些对人类健康、社区安全、生态环境有害的原料、试剂等的使用^[14]。例如, 我国有着“冰丝带”之称的国家速滑馆, 它凭借着超临界CO₂制冷技术向世人展现了我国对于绿色发展的决心^[15]。近几年, 我国科学家除了继续探索具有更加优秀的刹车性能的材料之外, 也在不断推进着航空刹车材料产业化、尖端化。我相信, 在航空刹车材料家族每个人的不断努力下, 借着国家需求的东风, 家族的综合实力一定会愈加强大, 希望大家终能在顶峰相见!

参 考 文 献

- [1] 牛顿. 粉末冶金铜基摩擦材料制备及摩擦学性能研究[硕士学位论文]. 芜湖: 安徽工程大学, 2010.
- [2] 周一帆, 陆贤坤, 刘海平, 薛亮. 航空刹车材料发展概述. *化学设计通讯*, **2020**, 46 (6), 83.
- [3] 孙胃涛, 王彬, 周文龙. *工程塑料应用*, **2021**, 49 (9), 7.
- [4] 王秀飞, 黄启忠, 宁克焱, 尹彩流, 高莹. *摩擦学学报*, **2007**, 27 (4), 372.
- [5] 王晴. *中国品牌*, **2023**, No. 11, 3.
- [6] 蒋建纯, 黄伯云, 熊翔. *新型炭材料*, **2003**, 18 (2), 111.
- [7] Jin, X. C.; Fan, X. L.; Lu, C. S.; Wang, T. J. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2018**, 38 (1), 1.
- [8] 董宇航. *中国高新科技*, **2017**, No. 11, 14.
- [9] Kumar, P. J. *Adv. Ceram.* **2016**, 5 (1), 1.
- [10] Liedtke, V.; Olivares, I. H.; Langer, M.; Haruvy, Y. F. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2007**, 27 (2-3), 1493.
- [11] 傅献彩, 侯文华. *物理化学(上册)*. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2022: 2.
- [12] 高瑞平. *中国科学基金*, **2005**, No. 4, 231.
- [13] 陈颂阳, 王璐, 邱晓清, 李文章, 程新园. *大学化学*, **2023**, 38 (11), 139.
- [14] 陈祎平, 张岐, 李嘉诚, 刘钟馨, 庞素娟, 曹阳. *大学化学*, **2014**, 29 (1), 22.
- [15] 刘洋, 郜宇琦, 丁治英, 邱晓清, 程新园. *大学化学*, **2022**, 37 (9), 2203001.