

碳化物气凝胶隔热材料的研究进展

王子寒^{1,2}, 刘学宁^{1,2}, 邵菊香^{1,2}, 付俊杰^{1,2}, 袁美玉^{1,2}, 徐世玉^{1,2}, 崔升^{1,2*}

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211800;

2. 宿迁市南京工业大学新材料研究所, 江苏 宿迁 223800)

摘要:综述了近几年来氧化物气凝胶、碳气凝胶和碳化物气凝胶在高温隔热方向的研究进展,介绍了改性制备过程和隔热性能研究,并对耐高温碳化物气凝胶隔热防护材料未来的发展进行了展望。

关键词:气凝胶;隔热;耐高温;热导率;碳化物

中图分类号:V25;TQ427.26

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)02-0112-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.023

Research advances in carbide aerogel thermal insulation materials

WANG Zi-han^{1,2}, LIU Xue-ning^{1,2}, TAI Ju-xiang^{1,2}, FU Jun-jie^{1,2}, YUAN Mei-yu^{1,2},
XU Shi-yu^{1,2}, CUI Sheng^{1,2*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2. Suqian Advanced Materials Institute, Nanjing Tech University, Suqian 223800, China)

Abstract: Latest research progress in oxides aerogel, carbon aerogel and carbides aerogel for high-temperature thermal insulation in recent years is reviewed. Research on the modification preparation process and thermal insulation performance of these aerogels is introduced. Futural development of high temperature-tolerant carbides aerogel thermal insulation and protection materials is prospected.

Key words: aerogel; thermal insulation; resistant to high temperature; thermal conductivity; carbides

随着航天技术的发展,航天飞行器不断向着高马赫和长航行时间的目标发展,服役环境也越来越恶劣。热防护系统是保障在极端环境下安全服役的关键技术之一,至关重要^[1]。有效的热防护系统可在飞行器结构面对剧烈的气动加热时提供足够的保护,使其免于气动热环境的伤害而能保持更长时间的安全飞行^[2]。而作为热防护系统的重要组成部分之一,低导热率的隔热材料需要阻止热量传递到飞行器内部,避免内部结构遭受破坏。因此隔热材料需要在高温极端环境下具有一定的强度、刚度、较低的热导率以及出色的耐热疲劳等特性^[3]。其中,轻质高效的超级隔热材料—气凝胶及其复合材料在这几年受到了越来越多的关注和应用。

气凝胶是一种由纳米级颗粒或者聚合物单体相互聚合构成的具有三维网络骨架的纳米多孔材料,具有低密度、高比表面积、高孔隙率、低导热率等优异的特性^[4]。自 Kistler 首次以水玻璃为原料,通过溶胶-凝胶法结合超临界干燥制备出气凝胶材料以来,其优异的性能引起世界的广泛关注。经过几十年的发展,气凝胶的种类不断增多,逐渐发展为以

SiO₂^[5]、Al₂O₃^[6] 气凝胶为主的氧化物气凝胶,以 SiC^[7] 气凝胶为主的碳化物气凝胶,以纤维素^[8]、聚合物^[9] 气凝胶为主的有机气凝胶等体系。

相较于其他隔热材料,气凝胶纳米级的孔径明显小于空气分子的平均自由程,可限制气态传热。复杂的纳米孔结构增加了传热途径,从而降低固体传热。所以,气凝胶材料具有极低的导热率,广泛应用于高温炉窑、超声速飞行器等高温隔热领域。本文中综述了近几年来氧化物气凝胶、碳气凝胶和碳化物气凝胶在高温隔热方向的研究进展,介绍了其改性制备过程和隔热性能研究,并对碳化物气凝胶材料未来的发展方向进行了展望,为其在高温隔热领域中的应用提供参考。

1 氧化物气凝胶

氧化物气凝胶是最早开始研究的一种气凝胶,研究成果也较为成熟。目前主要研究的氧化物气凝胶为 SiO₂、Al₂O₃、ZrO₂ 气凝胶及其复合气凝胶。其中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 气凝胶更是被广泛研究,不仅在高温隔热领域发挥着重大的作用,在催化、吸附等领域

收稿日期:2021-01-09;修回日期:2021-11-28

作者简介:王子寒(1998-),男,硕士生;崔升(1980-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为气凝胶纳米新材料,通讯联系人,scui@njtech.edu.cn。

也有着广泛的应用。

1.1 SiO₂ 气凝胶

SiO₂ 气凝胶通常以溶胶-凝胶法结合超临界干燥制备而成,是一种具有低密度、低导热率、高孔隙率等优异性能的高度纳米多孔固体材料。虽然 SiO₂ 气凝胶具有较低的热导率,但是因机械强度较差,在受到外力作用时可能会引起内部纳米级颗粒相互连接结构的破坏,从而严重阻碍了实际应用。Shafi 等^[10]以四乙氧基硅烷为前驱体,通过酸碱催化结合 CO₂ 超临界干燥制备 SiO₂ 气凝胶/玻璃纤维复合材料,并且通过浸渍硅胶改善隔热性能和机械性能。浸渍的硅胶填充在玻璃纤维的间隙中,并通过—Si—O—Si—网络将 SiO₂ 气凝胶固定在玻璃纤维上。这不仅可以减缓热量传递,还可以保护 SiO₂ 气凝胶免于塌陷。表征结果显示,当硅胶质量分数为 5% 时,该复合材料不仅具有 0.017 9 W/(m·K) 的超低热导率,而且具有优异的机械性能和 0.246 g/cm 的低密度。

Zhang 等^[11]在 2020 年通过向 SiO₂ 溶液中加入柔性 SiO₂/SnO₂ 纳米纤维合成 SiO₂/SnO₂ 纳米纤维增强的柔性 SiO₂ 气凝胶复合材料, SiO₂/SnO₂ 纳米纤维随机分散在柔性 SiO₂ 气凝胶中。与纯 SiO₂ 气凝胶相比,该材料的高度完整性导致较小的线性收缩,更好的热防护和机械性能,具有 0.025 ~ 0.029 W/(m·K) 的导热率和 70 kPa 的杨氏模量,如图 1 所示。Dou 等^[12]在 SiO₂ 纤维骨架上组装纳米多孔 SiO₂ 气凝胶,设计并合成了二元网络结构的 SiO₂ 纳米纤维气凝胶(BSA)。得益于 SiO₂ 纳米纤维网络框架的高机械强度,所得的 BSA 的压缩应变达到 80%,显示出超弹性和强大的耐疲劳性。此外,独特的二元网络结构为 BSA 提供 0.021 W/(m·K) 的超低热导率、强大的阻燃性和出色的高温隔热性能。

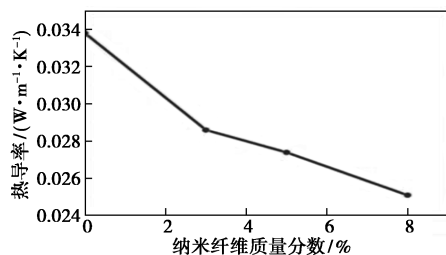


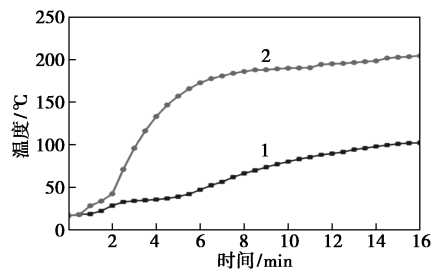
图 1 不同质量分数纳米纤维复合材料的室温导热率

1.2 Al₂O₃ 气凝胶

Al₂O₃ 气凝胶得益于晶体和纤维网络的微观结构,热稳定性要优于纯 SiO₂ 气凝胶,具有 0.035 ~

0.400 g/cm³ 的低密度、高孔隙率和高表面积。2019 年,Zhong 等^[13]以廉价的六水合氯化铝为原料成功合成了相互渗透的有机/无机网络结构的整体式 RF/Al₂O₃ 气凝胶复合材料。该材料具有 0.077 ~ 0.112 g/cm³ 的低堆积密度,0.024 ~ 0.028 W/(m·K) 的低导热率和 453.26 ~ 722.75 m²/g 的高比表面积。当 RF/Al 摩尔比为 1/4 时显示出最佳的网络结构,具有 1.83 MPa 的抗压强度和 122.57 MPa 的杨氏模量。

然而,Al₂O₃ 气凝胶的高红外透明度增加了高温下的红外辐射,导致热导率增加^[14]。根据先前的研究报道,掺入 SiO₂ 可增强 Al₂O₃ 气凝胶的热稳定性^[15]。另外,将遮光剂添加到气凝胶基质可以阻挡高温下的红外辐射,从而降低高温下的辐射热导率。Zou 等^[16]将琼脂和 SiO₂ 作为黏合剂,通过冷冻干燥将亚微米级的 TiO₂ 遮光剂均匀地分散到纤维增强材料中,成功制备了高强度、高温绝热性能优异的 TiO₂/纤维/Al₂O₃ 气凝胶三元复合材料(TFA),如图 2 所示。所得的复合材料在 800℃ 下的杨氏模量高达 3.58 MPa,高温下的导热系数在 0.129 W/(m·K),1 000℃ 下的低温导热率在 0.168 W/(m·K)。



1—TFA-10;2—莫来石纤维毡

图 2 复合材料在 1 300℃ 下的冷面温度变化示意图

2020 年,Peng 等^[17]无需溶剂置换即成功合成了具有高表面积和良好机械性能的 Al₂O₃-SiO₂ 气凝胶。由于 Al₂O₃-SiO₂ 气凝胶中 Si 的均匀分布,抑制了亚稳态 Al₂O₃ 纳米粒子的烧结和相变。通过溶胶-凝胶过程形成均匀且附着良好的微观结构,以及添加硅形成的 Al—O—Si 键导致所得材料具有较高的强度,大大高于之前报道的,压应力(3%应变)高达 1.78 MPa,弹性模量为 65.6 MPa。

1.3 ZrO₂ 气凝胶

ZrO₂ 材料具有较高的熔点和较低的热导率,立方相 ZrO₂ 在 1 300℃ 时热导率为 2.094 W/(m·K),因此被广泛应用于航空航天和工业节能等高温领

域^[18]。然而在高温下,四方相 ZrO_2 的成核和生长会引起 ZrO_2 气凝胶的收缩和变形,严重限制在更高温度的应用。2019 年, Liu 等^[19] 根据不同的溶胶凝胶参数制备了一系列 ZrO_2/SiO_2 杂化气凝胶,当 ZrO_2/SiO_2 的比例为 86/14 时,高度混合的杂化气凝胶具有最好的热稳定性,1 000℃ 时的导热系数为 0.056~0.060 W/(m·K)。弱支化的 ZrO_2 和 SiO_2 团簇在制备过程中倾向于自由缠绕,得到混合程度最高的 ZrO_2/SiO_2 杂化材料,具有最大的协同效应,为设计其他多组分的混合气凝胶提供了途径。

2020 年, Zhang 等^[20] 将 $ZrO_2-Al_2O_3$ 纳米纤维与 $Al(H_2PO_4)_3$ 基体相结合,制备出同时具有超强、超弹性和耐高温的层状多拱结构陶瓷纳米纤维气凝胶。得到的 $ZrO_2-Al_2O_3$ 纳米纤维气凝胶具有应变恢复快、压缩强度大于 1 100 kPa(应变为 90%)、高达 1 300℃ 的耐高温性能和 0.032 2 W/(m·K) 的低导热系数,如图 3 所示。

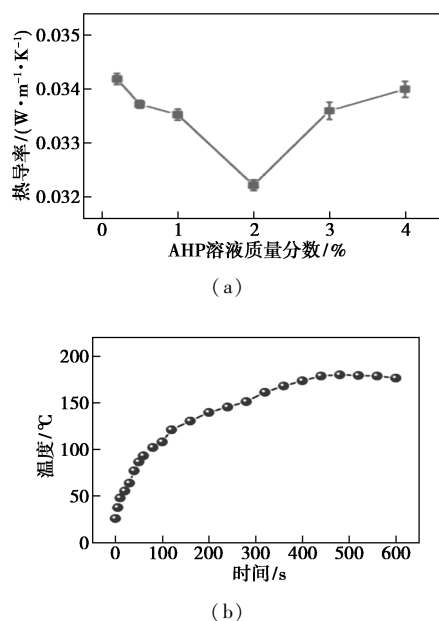


图 3 $ZrO_2-Al_2O_3$ 纳米纤维气凝胶的热导率及其于 1 300℃ 下的冷面温度变化示意图

2 碳气凝胶

氧化物气凝胶虽然具有低密度和低导热率等优异的性能,但是在高温(800~1 000℃)下极易发生收缩和烧结,导致热导率快速增大,极大地限制了在高温领域的应用。而与其他类型的气凝胶相比,碳气凝胶在惰性气氛中超过 2 000℃ 的高温下也可以保持介孔结构,表现出优异的耐高温性能。通常,碳气凝胶是在惰性气氛中聚合和热解有机前驱体(例

如间苯二酚-甲醛、三聚氰胺-甲醛或甲酚-甲醛)来制得。除此之外,还可以通过石墨烯及其衍生物的自胶凝或化学聚合制备,以及通过碳纳米管(CNT)或碳纳米纤维(CNF)的化学气相沉积或化学交联制备。

2020 年, Vazhayal 等^[21] 变废为宝,利用废纸巾和聚乙烯醇制备了具有高度互连的三维多孔结构的碳气凝胶。所得的气凝胶具有 0.057 g/cm³ 的低密度,1 384 m²/g 的比表面积和 1 246.8 MPa 的高杨氏模量。除此之外,还有相当低的导热系数,达到了 0.087 W/(m·K)。同年, Zhang 等^[22] 采用酸碱两步催化法成功地制备出强度高、导热系数低的低密度碳气凝胶单块(CAM),由酸催化而来的线性酚类低聚物,通过碱催化引发的交联聚合,被紧紧地固定在一起,形成坚固的骨架结构。CAM 的弹性模量达到 29.73 MPa,比表面积为 689 m²/g。此外,CAM 的隔热性能也非常出色,在 2 000℃、0.1 MPa 氩气氛下热导率为 0.809 W/(m·K),要低于碳凝胶填充泡沫和碳泡沫,如图 4 所示。

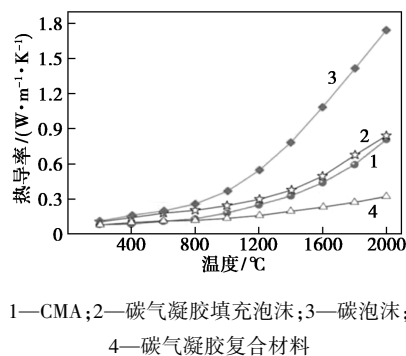


图 4 碳气凝胶等复合材料随温度变化的热导率

3 碳化物气凝胶

碳化物气凝胶材料是气凝胶材料中种类最为丰富的一个分支,相较于传统的氧化物气凝胶,碳化物气凝胶具有更高的耐温性,在惰性氛围下耐温性最高可达 3 000℃,且密度低于 0.4 g/cm³,室温导热系数低于 0.040 W/(m·K)。因此,碳化物气凝胶材料成为 1 200℃ 以上温区最具潜力的气凝胶材料,广泛应用于航天航空、高温炉窑等高温隔热领域。

3.1 SiC 气凝胶

SiC 气凝胶材料具有出色的性能,例如高强度、良好的抗热震性、低导热性和高温稳定性、低密度、低热膨胀系数和高杨氏模量,在高于 1 500℃ 的温度下仍具有较高的机械强度和氧化稳定性,因此备受关注,可以作为一种优良的高温隔热材料使用。

2019年, An等^[23]以邻苯二酚、甲醛为碳源, 三乙氧基硅烷为硅源制备了C/SiO₂/SiC三元气凝胶。制成的气凝胶具有0.118~0.271 g/cm³的低密度, 0.044~0.089 W/(m·K)的低导热系数, 774 m²/g的高比表面积。除此之外, 该课题组将SiC晶须添加到溶胶中以制备SiC_w-C/SiO₂/SiC气凝胶复合材料。通过增加SiC晶须含量, 线性收缩率从42.6%降低到40.6%, 密度范围为0.196~0.223 g/cm³。由于晶须的均匀分布以及与气凝胶的完美结合, 使压缩强度从1.21 MPa提高到2.09 MPa。同时, 热导率从0.065 W/(m·K)增加到0.086 W/(m·K)。

SiC气凝胶具有出色的高温化学稳定性和耐热性, 是一种应用于极端条件下的气凝胶材料, 然而为了进一步的应用, 应克服其脆性、力学性能差等缺陷。SiC纳米线具有一维纳米材料的弹性、柔韧性以及SiC陶瓷优异的高温热化学稳定性的综合特性, 使其具有广泛的应用前景。Su等^[24]于2020年以SiC纳米线为基块, 通过模板定向凝固并结合高温热处理制备了具有各向异性和分层结构的SiC@SiO₂纳米线气凝胶。较SiC纳米线气凝胶而言, 该材料具有更加出色的隔热性能, 0.014 W/(m·K)的超低导热系数, 即使在1200℃的丁烷加热下也具有出色的热化学稳定性, 使其成为极端条件下的理想隔热材料。

3.2 SiOC气凝胶

SiOC气凝胶是一种具有纳米孔结构的高耐热性气凝胶, 可以通过在惰性气氛下将含有Si—R键的交联聚硅氧烷网络热解制备而得。由于高温下热解过程中相邻颗粒之间存在一定程度的烧结, 气凝胶骨架中颗粒之间的颈区变得更宽, 这导致与SiO₂气凝胶相比, SiOC气凝胶具有更高的强度和更好的高温稳定性。尽管纯SiOC气凝胶具有低密度和耐高温的独特性能, 但由于脆性, 仍难以大规模的应用。为了克服该缺点, Li等^[25]2019年以聚丙烯腈基碳纤维为增强体制备了SiOC气凝胶。表征结果显示, SiOC气凝胶填充了碳纤维之间的孔隙, 并且纳米孔结构可以有效地改善复合材料的隔热性能。随着浸渍和热解SiOC溶胶时间的增加, 复合材料的骨架结构变得更加致密, 抗弯强度增加到32.52 MPa, 抗压强度增加到51.98 MPa, 抗氧化性也逐渐提高。Yang等^[26]在2020年以四乙氧基硅烷(TEOS)、三乙氧基乙烯基硅烷(VTES)为前驱体制备了具有耐高温性和隔热性的氮化硼/碳氧化硅(BN/SiOC)气凝胶复合材料。BN含量的增加导致

颗粒彼此接触并桥接形成结构, 增强了抗变形性。另外, 添加的BN颗粒增加了复合材料的密度, 使材料更致密, 有利于提高强度。由于从SiOC气凝胶继承了纳米孔结构, 复合材料具有出色的隔热性能, 表征结果显示, 该复合材料的压缩强度高达20.3 MPa, 热导率低至0.20 W/(m·K)。

3.3 ZrC气凝胶

Zr基化合物具有高达3000℃的熔点和低蒸气压, 并且先前的研究已经表明Zr基复合材料(如ZrO₂、ZrC和ZrB₂)具有优异的耐烧蚀性, 可用于2000℃甚至更高的工作环境。2019年, Suo等^[27]以氯化锆为锆源, 三氯化铝为铝源, 间苯二酚和甲醛为碳源制得ZrC@Al₂O₃@碳复合气凝胶。 γ -Al₂O₃相的加入有利于改善复合气凝胶的综合性能, 提高热稳定性和降低体积收缩率。表征结果显示, ZrC@Al₂O₃@碳复合气凝胶的比表面积高达650.4 m²/g, 抗压强度高达1.31 MPa, 有利于用作高温下的隔热材料和催化剂载体。在1500℃热处理5 h后, 碳纤维毡增强复合气凝胶的热导率低至0.048 W/(m·K)。Ren等^[28]在2020年通过聚合诱导相分离法, 分别以酚醛清漆酚醛(PF)和ZrOC溶胶为前体, 六亚甲基四胺(HMTA)为交联剂, 成功制备了有机-无机杂化ZrOC/PF气凝胶复合材料。结果表明, 气凝胶的微观结构由PF和ZrOC团簇颗粒形成的“葡萄串”状缠结链组成, 有助于增强气凝胶的机械性能, 团簇颗粒的直径范围从十几纳米到几十纳米, 直至微米。复合材料具有0.258~0.332 g/cm³的低密度, 0.32~1.40 MPa的高抗压强度和0.0466~0.0660 W/(m·K)的低导热率。

4 结论

随着航天技术的发展, 航天飞行器不断向着高马赫和长航行时间的目标发展, 面临的服役环境也越来越恶劣, 会导致内部结构的烧蚀破坏。在面临极端气动加热和高温冲刷环境时, 隔热材料是保障其安全服役的关键技术之一, 因此新型轻质耐高低热导隔热材料亟需设计并且开发出来。

相较于氧化物气凝胶、碳气凝胶, 碳化物气凝胶在高温隔热领域具有更大的潜力。对于碳化物气凝胶而言, 作为高温隔热材料依然存在着低强度高脆性、力学性能较差的问题, 严重限制着应用, 所以需要在制备过程中以无机陶瓷纤维为增强体进行复合, 从而提高机械性能, 进一步改善力学性能; 在高温含氧环境下, 碳化物材料会发生氧化, 因此需要在

碳化物气凝胶表面涂覆耐高温高辐射抗氧化涂层来提升抗氧化性和热稳定性能。除此之外,碳化物气凝胶材料是气凝胶材料中种类最为丰富的一个分支,但目前关于碳化物气凝胶的研究还主要集中在碳化硅方向,可以尝试向其他碳化物,例如碳化硼、碳化锆等方向进行研究,从而在高温研究领域取得巨大进展。

参考文献

- [1] Al-Jothery H K M, Albarody T M B, Yusoff P S M, *et al.* A review of ultra-high temperature materials for thermal protection system [J]. IOP conference series. Materials Science and Engineering, 2020, 863: 12003.
- [2] Uyanna O, Najafi H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects [J]. Acta Astronautica, 2020, 176: 341–356.
- [3] 周聪, 徐淑琼, 李云芳. 返回式航天器高温隔热材料综述 [J]. 科技视界, 2019, (18): 168–169.
- [4] Suo H, Peng C, Jing F, *et al.* Facile preparation of TiO₂/ZnO composite aerogel with excellent antibacterial activities [J]. Materials Letters, 2019, 234: 253–256.
- [5] Zhang X, Zhang T, Yi Z, *et al.* Multiscale mullite fiber/whisker reinforced silica aerogel nanocomposites with enhanced compressive strength and thermal insulation performance [J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28561–28568.
- [6] Zhang Y, Li J, Liu H, *et al.* Microencapsulated phase change materials composited Al₂O₃-SiO₂ aerogel and the thermal regulation properties [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2020, 96(3): 627–635.
- [7] Liang C, Wang Z. Eggplant-derived SiC aerogels with high-performance electromagnetic wave absorption and thermal insulation properties [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 373: 598–605.
- [8] Pereira A L S, Feitosa J P A, Morais J P S, *et al.* Bacterial cellulose aerogels: Influence of oxidation and silanization on mechanical and absorption properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 250: 116927.
- [9] Zhang X, Li W, Song P, *et al.* Double-cross-linking strategy for preparing flexible, robust, and multifunctional polyimide aerogel [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122784.
- [10] Shafi S, Navik R, Ding X, *et al.* Improved heat insulation and mechanical properties of silica aerogel/glass fiber composite by impregnating silica gel [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 503/504: 78–83.
- [11] Zhang R, An Z, Zhao Y, *et al.* Nanofibers reinforced silica aerogel composites having flexibility and ultra - low thermal conductivity [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(3): 1531–1539.
- [12] Dou L, Cheng X, Zhang X, *et al.* Temperature-invariant superelastic, fatigue resistant, and binary-network structured silica nanofibrous aerogels for thermal superinsulation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(16): 7775–7783.
- [13] Zhong Y, Shao G, Wu X, *et al.* Robust monolithic polymer (resorcinol-formaldehyde) reinforced alumina aerogel composites with mutually interpenetrating networks [J]. RSC advances, 2019, 9(40): 22942–22949.
- [14] Yang J, Wu H, Huang G, *et al.* Modeling and coupling effect evaluation of thermal conductivity of ternary opacifier/fiber/aerogel composites for super-thermal insulation [J]. Materials & Design, 2017, 133: 224–236.
- [15] Yang J, Wang Q, Wang T, *et al.* Facile one-step precursor-to-aerogel synthesis of silica-doped alumina aerogels with high specific surface area at elevated temperatures [J]. Journal of Porous Materials, 2017, 24(4): 889–897.
- [16] Zou W, Wang X, Wu Y, *et al.* Opacifier embedded and fiber reinforced alumina-based aerogel composites for ultra-high temperature thermal insulation [J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 644–650.
- [17] Peng F, Jiang Y, Feng J, *et al.* A facile method to fabricate monolithic alumina-silica aerogels with high surface areas and good mechanical properties [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(6): 2480–2488.
- [18] Torres-Rodríguez J, Kalmár J, Menelaou M, *et al.* Heat treatment induced phase transformations in zirconia and yttria-stabilized zirconia monolithic aerogels [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 149: 54–63.
- [19] Liu B, Gao M, Liu X, *et al.* Thermally stable nanoporous ZrO₂/SiO₂ hybrid aerogels for thermal insulation [J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2(11): 7299–7310.
- [20] Zhang X, Wang F, Dou L, *et al.* Ultrastrong, superelastic, and lamellar multiarch structured ZrO₂-Al₂O₃ nanofibrous aerogels with high-temperature resistance over 1300°C [J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15616–15625.
- [21] Vazhayal L, Wilson P, Prabhakaran K. Waste to wealth: Lightweight, mechanically strong and conductive carbon aerogels from waste tissue paper for electromagnetic shielding and CO₂ adsorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122628.
- [22] Zhang Z, Zhao S, Chen G, *et al.* Influence of acid-base catalysis on the textural and thermal properties of carbon aerogel monoliths [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 296: 109997.
- [23] An Z, Ye C, Zhang R, *et al.* Multifunctional C/SiO₂/SiC-based aerogels and composites for thermal insulators and electromagnetic interference shielding [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2019, 89(3): 623–633.
- [24] Su L, Wang H, Niu M, *et al.* Anisotropic and hierarchical SiC@SiO₂ nanowire aerogel with exceptional stiffness and stability for thermal superinsulation [J]. Science advances, 2020, 6(26): y6689.
- [25] Li X, Feng J, Jiang Y, *et al.* Preparation and properties of PAN-based carbon fiber-reinforced SiCO aerogel composites [J]. Ceramics International, 2019, 45(14): 17064–17072.
- [26] Yang H, Li C, Yue X, *et al.* New BN/SiOC aerogel composites fabricated by the sol-gel method with excellent thermal insulation performance at high temperature [J]. Materials & Design, 2020, 185: 108217.
- [27] Suo H, Wang W, Jiang S, *et al.* Preparation of ZrC@Al₂O₃@Carbon composite aerogel with excellent high temperature thermal insulation performance [J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(5): 1–7.
- [28] Ren S, Hu L, Li X, *et al.* Preparation and characterization of organic-inorganic hybrid ZrOC/PF aerogel used as high-temperature insulator [J]. Ceramics International, 2020, 46(5): 6326–6332. ■