气凝胶复合材料在航天领域中的应用

李增荣,王志平
(海军装备部驻上海地区军事代表局,上海 201206)

摘　要: 气凝胶是一种高孔隙率、高比表面积的三维网络状结构的纳米材料。气凝胶独特的纳米结构能有效抑制材料的固体热传导和气体对流传热,是一种性能优异的“超级隔热材料”。此外,与传统的保温材料相比,气凝胶具有轻质、不燃、疏水等特点,符合航空航天领域对隔热、轻质的要求,在美国等国家得到了广泛应用。

关键词: 气凝胶复合材料; 绝热; 航天; 防火; 减重
中图分类号: TQ 175.7　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.020

Application of Aerogel Composite Material on Aerospace

LI Zengrong, WANG Zhiping
(Naval Representative Office of Navy Equipment Department in Shanghai, Shanghai 201206, China)

Abstract: Aerogel is a three-dimensional network structure nanomaterial with high porosity and high specific surface area. The unique nanostructure of aerogel can effectively inhibit the solid heat conduction and gas thermal convection, and thus aerogel is a “super thermal insulation material” with excellent performance. In addition, compared with traditional thermal insulation materials, aerogel has the characteristics such as light weight, non-combustibility, and hydrophobicity, and meets the requirements of heat insulation and light weight in the aerospace field. Therefore, aerogel has been widely used in many countries such as the United States.

Key words: aerogel composite material; adiabatic; aerospace; fire prevention; weight loss

0　引言

随着航空航天事业的不断发展,对于耐超高温绝热材料性能的要求也在不断提高。绝热材料要具备耐高温、轻质、不易燃和使用寿命长等特性,使得众多传统保温材料(如岩棉、硅酸钙、硅酸铝毡等)不再适用[1]。气凝胶是一种纳米多孔的未来材料,具有轻质、高孔隙率、高比表面积和极低的热导率等特性,是航空航天领域的绝佳材料[2]。

气凝胶具有丰富的纳米级孔洞(1~100 nm),是世界上密度最小(最小至0.003 g/cm^3)、保温隔热性能最好(最低为0.015 W·m^{-1}·K^{-1})、孔隙率最高(高达99.8%)、比表面积最大(高达1 000 m^2/g)的超级材料[3]。

气凝胶的制备通常分为2步:1) 通过溶胶-凝胶法使溶液内分子不断交联,形成湿凝胶;2) 通过超临界干燥去除湿凝胶内部的溶剂,获得气凝胶[4]。溶胶-凝胶过程是指,溶液中的反应物通过水解和缩聚反应形成初级粒子,粒子之间交联长大,形成具有三维网络结构凝胶的过程。具体反应方程式如下。

水解反应:

$$MOR + H_2O \rightarrow MOH + HOR \quad (1)$$

缩聚反应:

$$MOR + HOM \rightarrow MOM + HOR \quad (2)$$

$$MOH + HOM \rightarrow MOM + H_2O \quad (3)$$

式中:M为金属元素或无机元素;R为烷基。

溶胶-凝胶过程对干燥后的气凝胶性能影响极大,可以通过添加酸碱等催化剂调节水解缩聚的速率,以调控气凝胶的性能[5]。

收稿日期: 2020-11-17; **修回日期:** 2021-02-25
作者简介: 李增荣(1979—),男,工程师,主要研究方向为航空、电子。
通信作者: 王志平(1960—),男,高级工程师,主要研究方向为船体。

对二氧化硅(SiO_2)气凝胶的研究最为广泛,其生产和制造工艺相对成熟,国内外各种气凝胶工业化产品相继问世。美国Aspen公司、Cabot公司,以及上海大音希声新型材料有限公司等已经生产出SiO_2气凝胶毡,并应用于各领域。但通常情况下,SiO_2体系气凝胶的使用温度不能突破650 ℃,无法满足航空航天领域1 000 ℃及以上的高温段隔热需求。金属氧化物气凝胶(如Al_2O_3和ZrO_2)具有良好的耐温和隔热性能(最高耐温1 300 ℃),可以在有氧环境下重复使用,满足航空航天对超高温段的需求[6]。

本文综述了目前在航空航天领域中常用的几种气凝胶,分析并总结了SiO_2气凝胶、Al_2O_3气凝胶和ZrO_2气凝胶的耐高温性能,同时,讨论了气凝胶材料在航空航天领域中的应用和发展方向。

1 SiO_2气凝胶的制备及其在热防护中的应用

1.1 SiO_2气凝胶的制备

目前,研究时间最长、制备工艺最成熟、溶胶-凝胶机理最完善的是SiO_2气凝胶。SiO_2气凝胶是目前应用最多的氧化物气凝胶[7],具有超低密度、良好的绝热性和超高的比表面积等优越性能,见表1。

表1 SiO_2气凝胶的典型性质

Tab.1 Typical properties of SiO_2 aerogel

性能	数值
体密度/(g•cm^{-3})	0.003～0.500
比表面积/(m^2•g^{-1})	100～1 600
固体百分比/%	0.13～15.00
孔隙率/%	80.0～99.8
平均孔径/nm	20～150
主要粒径/nm	2～5
折射率	1.007～1.240
热导率/(W•m^{-1}•K^{-1})	0.017～0.021
声速/(m•s^{-1})	20～800
弹性模量E/MPa	0.002～100

1931年,KISTLER[8]采用水玻璃作为硅源,通过溶剂替换与酒精超临界干燥,首次制备出了SiO_2气凝胶。其酒精超临界过程是在高温、高压条件下,使凝胶内部的酒精达到流体状态,注入惰性气体将酒精流体排出,制备得到具有纳米孔径的气凝胶,此方法沿用至今。继KISTLER之后,合成SiO_2气凝胶的方法开始变得多样化,包括前驱体的选择、酸碱催化剂的选用、不同有机溶剂的选配以及多种干燥方法。不同的前驱体和干燥过程也会影响SiO_2气凝胶的性能[9]。

KARMAKA等[10]发现,SiO_2气凝胶微球的形成与水和硅醇盐的比例密切相关。在强酸催化下,所需水与TEOS的摩尔比在1.0～1.5之间;在弱酸催化下,所需水与TEOS的摩尔比在1.5～4.0之间。DORCHEH等[11]得出,水与TMOS的比例影响SiO_2气凝胶颗粒的大小,其比例越大,颗粒越小。在pH值较低或较高时,硅源水解速率明显增强;在中性和碱性条件下,缩聚速率较大,如图1所示。在酸性或碱性条件下的水解和缩聚过程不同,导致凝胶的结构不同。在酸性条件下,缩聚开始前就已水解,硅酸单体的慢速缩聚导致形成交联低、孔径小、密度低的网络结构。在碱性条件下,单体一旦水解,马上会发生聚合,团簇主要通过单体的缩聚生长,形成颗粒大、孔径大、密度高的网络结构。

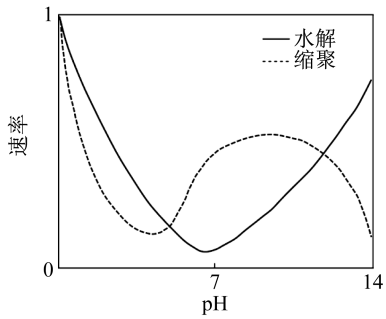


图1 水解缩聚的速率与pH值关系图

Fig.1 Hydrolysis and condensation rates versus the pH value

1.2 SiO_2气凝胶在热防护中的应用

纤细的纳米网络结构使得SiO_2气凝胶相较于普通的隔热材料,具有更低的固态热导率和气态热导率。但在超高温下,2～8 μm的红外辐射能量几乎全部通过SiO_2气凝胶,导致其热导率急速上升,为减小辐射热导率,可以引入一些能够吸收或散射能量的遮光剂[9]。

WEI等通过在SiO_2气凝胶中引入碳纳米纤维作为遮光剂,实现了SiO_2气凝胶在高温下的热导率仅为0.050 0 W•m^{-1}•K^{-1}。DMIETY等在前驱体反

应的过程中，通过引入适量的 TiO_2、$ZrSiO_4$ 等，使 SiO_2 气凝胶绝热性能得到了显著的提高，最高可达 60%。AEGERTER 等[12]成功合成了复合 TiO_2 粉末的 SiO_2 气凝胶，实验结果表明，在室温下，其热导率仅为 0.013 6 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$，加热至 400 ℃时，只增加了 0.014 8 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$。$TiO_2$ 含量不同的 SiO_2 气凝胶在不同温度下的热导率变化曲线如图 2 所示。随着 TiO_2 含量增加，SiO_2 气凝胶的热导率急速下降，且温度越高，这种趋势越明显。为了实现工业化生产 SiO_2 气凝胶，沈军等[13]通过改良前驱体硅源、优化干燥工艺，成功制备出了以 E-40 为硅源常压干燥的 SiO_2 气凝胶。同时，将使用传统硅源和酒精超临界干燥出来的 SiO_2 气凝胶进行性能对比，发现以 E-40 为硅源常压干燥的 SiO_2 气凝胶具有较好的绝热性能和更高的经济效益。

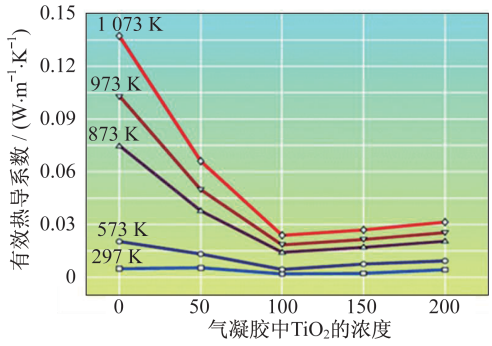


图 2　硅钛二元复合气凝胶在不同温度下的热导率

Fig.2　Thermal conductivity of Si-Ti binary composite aerogel at different temperatures

早在 1997 年，美国已经将气凝胶材料作为隔热材料应用于航天领域，并且于 2004 年 1 月将 SiO_2 气凝胶用于火星探测漫游车上（见图 3）。火星表面昼夜温差较大，在夜间，温度会下降到－66 ℃左右，针对这种严苛的工作环境，需要轻质且保温良好的气凝胶材料。在此恶劣条件下，SiO_2 气凝胶将漫游车的内部温度维持在 20 ℃左右，保护了车内较敏感的电子元件等。此后的 5 年多时间里，漫游车一直在探索火星表面的各种地质特征，气凝胶凸显出了优异的保温隔热性。2008 年，美国国家航空航天局（NASA）肯尼迪太空中心报道了气凝胶在运载火箭的液氢储存罐中的应用。在气凝胶的保护下，储罐表面能够抵御－147 ℃的低温，且航天飞机减少质量 230 kg[14]。同时，得益于其优异的绝热、绝冷和轻质性能，复合 SiO_2 气凝胶也可用于航天服和充气减速器[15]。美国的勇气号火星车采用气凝胶绝热材料代替传统的多孔陶瓷，自身减少质量 2.6 kg，利用减少质量值增加了 1 个火星气象站实验，显示出气凝胶的高效、轻质、保温优势带来的综合效益。

在我国，SiO_2 气凝胶在航天领域的应用也很早得到关注。20 世纪 90 年代初，中国某研究院立项研究，将该材料用于远程火箭的热电池保温，研究工作进展迅速，相关成果于 1995 年和 1996 年分别获得某预研基金二等和一等奖。在航天某研究院和相关企业的介入下，SiO_2 气凝胶复合保温材料在航天领域的应用迅速走向成熟，相关成果获得上海市科技进步二等奖和工信部国防科技进步三等奖。目前，我国的 DF-xx 多个系列远程火箭的热电池保温系统均采用了气凝胶复合材料。某型深空探测器的同位素电池采用气凝胶绝热且试验获得成功。我国的火星探测漫游车“天问一号”也采用了气凝胶材料。

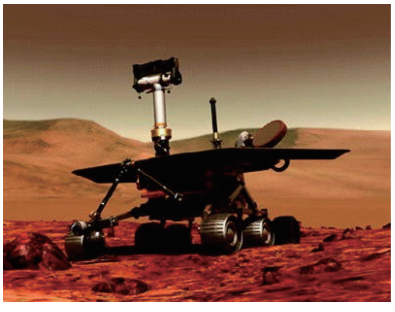


图 3　火星探测漫游车在火星表面

Fig.3　Mars rover on the surface of Mars

2　Al_2O_3 气凝胶的制备及其在热防护中的应用

2.1　氯化镁 Al_2O_3 气凝胶的制备

目前，合成 AI_2O_3 气凝胶的前驱体有 2 种：无机铝源（主要是 $AlCI_3\cdot_6H_2O$ 和 $Al(NO_3)_3\cdot_9H_2O$）和铝醇盐（主要是异丙醇铝和仲丁醇铝）[16]。以无机铝源为前驱体制备得到的气凝胶完整性较高，但热稳定性较差；以铝醇盐为前驱体制备得到的气凝胶热稳定性较好，但难以成型[17]。

YOLDAS 等用异丙醇铝和仲丁醇铝为前驱体，在催化剂的作用下，水解制备出 Al_2O_3 气凝胶。但其成形性不好，且比表面积不高。接着人们研究出超临界干燥工艺，用不同的铝醇盐制备出高比表面积、孔隙率的气凝胶。POCO 等[18]以仲丁醇铝为铝

源,采用2步水解法:首先,将前驱体溶解于酒精和不足量的水中,形成水解不充分的Al_2O_3溶胶;然后,加入足量的水,形成完全水解的Al_2O_3凝胶,通过快速酒精超临界干燥工艺制备出孔隙率大于98%、比表面积为376 m^2/g的Al_2O_3气凝胶。祖国庆等[19]以仲丁醇铝为前驱体,以铝源硝酸为催化剂,采用丙酮和苯胺缓慢生成水的方法控制仲丁醇铝的水解速率,最终,制备出了高比表面积的块状Al_2O_3气凝胶,并将Al_2O_3气凝胶的热稳定性提升到1 300 ℃,如图4所示。

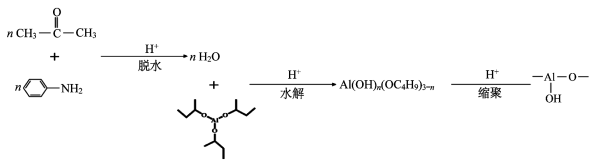


图4 丙酮-苯胺原位生成水法制备Al_2O_3气凝胶

Fig.4 Preparation of Al_2O_3 aerogels by acetone-aniline in-situ water formation method

2.2 Al_2O_3气凝胶在热防护中的应用

Al_2O_3气凝胶可使用的温度范围更高,耐温性能明显优于传统的SiO_2气凝胶,在航空装备和工业领域的高温隔热方面具有广泛的应用性。在航天领域,飞行器高速飞行时,机舱外表面积累大量的热,温度非常高,局部温度可达1 200 ℃以上。因此,出于对飞行器安全可靠性的考虑,必须对其进行高效的热防护。Al_2O_3气凝胶材料兼具耐高温、轻质和极低热导率等优势,在该领域具有重要的应用价值。

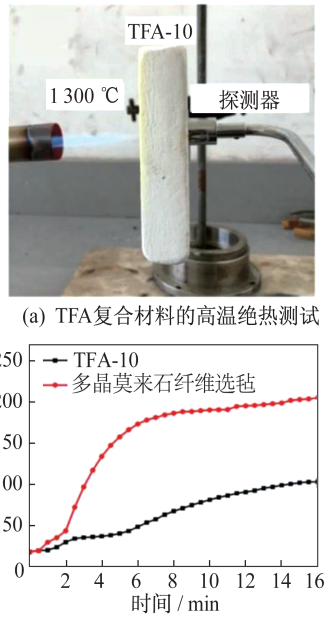
Al_2O_3拥有8种不同的晶型,按照相变温度排序分别为ρ-Al_2O_3、χ-Al_2O_3、κ-Al_2O_3、η-Al_2O_3、γ-Al_2O_3、δ-Al_2O_3、θ-Al_2O_3和α-Al_2O_3,形成不同晶型的原因是在不同温度下,氧化铝形成了不同的结构,且不同的温度会使其内部结晶水发生一定变化[20]。这8种Al_2O_3按照其生成温度可以分为低温(<700 ℃)和高温2类,属于低温4种为ρ-Al_2O、χ-Al_2O、κ-Al_2O、η-Al_2O和γ-Al_2O_3;属于高温的4种结构更紧密,且可以通过一定的条件相互转化。具体转变如下:

$$\gamma\text{-}Al_2O_3 \xrightarrow{750\,℃} \delta \xrightarrow{900\,℃} \theta \xrightarrow{1200\,℃} \alpha$$

因此,为了维持高温下的比表面积和孔隙率,获得耐高温的Al_2O_3气凝胶,必须抑制Al_2O_3的晶相转变。

王文琴等[21]通过添加硅来抑制Al_2O_3的晶相转变,引入TMEO后不仅限制了老化和干燥过程中表面羟基的缩合,且在高温条件下,氧化铝表面会产生二氧化硅颗粒,这将抑制热处理时晶体的生长,在800 ℃和1 000 ℃下的低热导率分别为0.13 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$和0.18 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$。

虽然Al_2O_3气凝胶的隔热性能优异,但机械性能较差,在实际使用中会出现破裂掉粉等情况,对其大规模的应用有较大影响。ZOU等[22]将琼脂和二氧化硅作为黏合剂,通过浸渍工艺和冷冻干燥将亚微米TiO_2遮光剂均匀分散到纤维增强材料中,制备了高强度且隔热性能好的TiO_2遮光剂/纤维/氧化铝基气凝胶三元复合材料。该复合材料在800 ℃下具有高达3.58 MPa的高杨氏模量,在1 000 ℃下具有0.129 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$的超低高温热导率,如图5所示。



(a) TFA复合材料的高温绝热测试

(b) 样品TFA-10和多晶莫来石纤维毡的背面温度随1 300 ℃的焙烧时间而变化

图5 TFA复合材料热学性能测试

Fig.5 Thermal performance test of TFA composite material

ZHONG等[23]采用常压干燥技术,开发出一种低导热率的高强度碳纤维毡增强Al_2O_3气凝胶,在1 600 ℃的超高温下的热导率低至0.284 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$,仅为碳纤维毡(0.538 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)的一半。孙晶晶等[24]创新性地使用纳米陶瓷纤维作为保温隔热的基板,以真空浸渍法成功使氧化铝与纤维骨架相互嵌合,制备出了耐高温的AI_2O_3气凝胶,可作为高温绝热体应用于航空航天等领域。NASA Glenn研究中心的HURWITY等[25]采用勃姆石和正硅酸四乙酯为前驱体,研发了能在1 200 ℃下保持中孔结构

的硅铝复合气凝胶，并研究了其在飞行器热防护上的应用。早在2010年前后，我国的航天某院就提出了对 AI_2O_3 气凝胶高温隔热的应用，并组织国内多家单位联合研发，目前，已经成功将其应用到某超高声速飞行器的实验中。

3 ZrO_2气凝胶的制备及其在热防护中的应用

3.1 ZrO_2气凝胶的制备

ZrO_2气凝胶在染料敏华太阳能电池、固体氧化物燃料电池和催化剂等领域受到广泛关注。ZrO_2气凝胶不仅具有密度低、空隙率高、比表面积高等气凝胶的一般特性，而且其化学性质稳定、耐温高，可用于高温段的保温隔热领域[1]。

ZrO_2气凝胶的制备也是通过传统的溶胶-凝胶过程得到湿凝胶，经超临界干燥获得。制备ZrO_2气凝胶的前驱体也分为2种：锆醇盐（一般为$Zr(OBu)_4$和$Zr(OPr)_4$）和无机锆盐（一般为$ZrOCl_2·8H_2O$和$Zr(NO_3)_4·5H_2O$）。在国内，关于有机金属醇盐制备ZrO_2气凝的报道很少，主流的制备方法仍是以金属无机盐制备ZrO_2气凝胶。$ZrOCl_2·8H_2O$为锆源水解缩聚过程如图6所示。在水溶液中，$ZrOCl_2·8H_2O$会形成$[Zr_4(OH)_8(H_2O)_{16}]^{8+}$四络合物形式。同时，这种络合物是不稳定的，$[Zr_4(OH)_{8+4x}(H_2O)_{16-4x}]^{(8-4x)+}$会不断发生脱质子化反应，通过不断水解形成凝胶[26]。有学者发现，通过在$ZrOCl_2$溶液中添加碱性催化剂，可以得到无定型氧化锆胶体：$[Zr_4(n\text{-}OH)_8(OH)_8(H_2O)_8]·xH_2O$。对溶液进行加热时，这种络合物也会发生脱水缩合形成$[Zr_4O_4]^{8+}$，称为氧桥四聚物[27]。

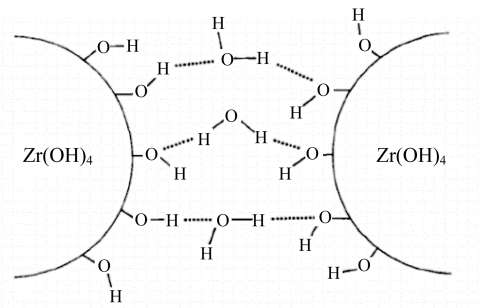


图 6　水分子桥接氢氧化锆的示意图

Fig.6　Schematic diagram of water molecules bridging zirconium hydroxide

3.2 ZrO_2气凝胶在热防护中的应用

ZrO_2具有3种不同的晶体形态：单斜相、四方相和立方相。常温下，ZrO_2以稳定的单斜相出现；当温度高于1 100 ℃时，ZrO_2逐渐形成四方相；温度在1 100～2 370 ℃之间时，ZrO_2以四方相稳点存在；温度在2 370 ℃以上时，ZrO_2转变为立方相。3种晶体形态的转化过程如图7所示。

图 7　ZrO_2的晶型转变过程

Fig.7　Crystal transformation process of ZrO_2

ZrO_2受热并发生晶型转变时，会破坏孔结构，导致内部塌陷，使其体积发生变化。可以通过添加酸碱催化剂或元素掺杂等提高其耐温性。

LENORMAND等[28]通过将有机锆盐作为前驱体，合成了ZrO_2气凝胶，通过使用小角X射线散射仪等设备研究其晶相转变的规律。研究表明，在ZrO_2中添加Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Y^{3+}和La^{3+}等离子可以抑制向立方相的转变，起到稳定四方相的作用。WU等[29]采用醇水加热法制备了硅锆复合气凝胶，在500 ℃热处理后，其比表面积高达735 m^2/g。这可用于复合纤维毡，或作为填充材料应用于航空航天领域，起到保温隔热的作用。目前在我国，虽然锆基气凝胶的应用还局限于地面实验室，但其在某些航天器上的应用已经立项。

4 结束语

综上所述，得益于纳米级的网络孔径结构，气凝胶是一种性能极佳的隔热防火材料，非常适用于航空航天等领域进行绝热作业，因此在国内外越来越受到重视。目前，SiO_2气凝胶研究较为成熟，市面上的产品也较多，得到了最为广泛的应用。但是，对于650 ℃以上的高温环境，SiO_2气凝胶难以胜任，需要采用Al_2O_3气凝胶或ZrO_2气凝胶等金属氧化物气凝胶来解决保温问题。在实际使用时，可采用多层气凝胶包裹来实现梯度降温，如外层包裹Al_2O_3气凝胶毡，以抵御650 ℃以上的高温，内层包裹SiO_2气凝胶进行二级降温。这样可以充分发挥各氧化物气凝胶的优势，达到轻质、保温的效果。

随着我国航空航天事业和军工事业的发展，对气凝胶复合材料的需求会越来越迫切。SiO_2气凝胶

和Al_2O_3气凝胶具有良好的绝热性能,但是机械强度低,限制了这2种气凝胶的应用。根据气凝胶本身的特性和未来发展的需要,制备机械强度高的耐高温复合气凝胶将是气凝胶实际应用的核心。针对这一核心,笔者认为,未来气凝胶主要会向着以下2个方向发展:1)除目前主流的SiO_2气凝胶和Al_2O_3气凝胶外,更多绝热性能优异的气凝胶种类将会被合成并应用于航天领域;2)多元复合气凝胶和纤维复合气凝胶也将是未来研究的重点,多元复合气凝胶通过抑制晶相转变达到更好的耐温效果,纤维复合气凝胶大大增强了其机械性能,有利于气凝胶的塑性。气凝胶复合材料有望在将来成为推动航天领域发展的核心材料之一。

参考文献

[1] 张泽,王晓栋,吴宇,等.气凝胶材料及其应用[J].硅酸盐学报,2018,46(10):1426-1446.

[2] 祖国庆,沈军,邹丽萍,等.弹性气凝胶的制备及其力学、热学性能研究[J].无机材料学报,2014(4):417-422.

[3] 沈军,连娅,祖国庆,等.气凝胶低成本制备及其在建筑保温领域中的应用[J].功能材料,2015(7):7001-7007.

[4] 沈军,王珏.二氧化硅气凝胶的小角X光散射研究[J].光散射学报,1995(2):241-242.

[5] 沈军,王珏,吴翔.气凝胶:一种结构可控的新型功能材料[J].材料科学与工程,1994(3):1-5,37.

[6] 沈军,王珏,吴翔.二氧化硅多孔介质气凝胶和干凝胶的分形结构研究[J].物理学报,1996(9):1501-1505.

[7] 沈军,吴宇,张志华,等.微纳复合SiO_2气凝胶超级绝热建筑外墙保温材料[J].新型建筑材料,2015,42(4):17-21.

[8] KISTLER S S. Coherent expanded aerogels and jellies [J]. Nature, 1931, 127(3211): 741.

[9] 张志华,王文琴,祖国庆,等.SiO_2气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J].航空材料学报,2015,35(1):87-96.

[10] KARMAKAR B, DE G, GANGULI D. Dense silica microspheres from organic and inorganic acid hydrolysis of TEOS [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2000, 272(2/3): 119-126.

[11] DORCHEH A S, ABBASI M H. Silica aerogel: synthesis, properties and characterization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1/2/3): 10-26.

[12] AEGERTER M A. Aerogels handbook [M]. Berlin: Springer, 2011.

[13] 沈军,周斌,吴广明,等.纳米孔超级绝热材料气凝胶的制备与热学特性[J].过程工程学报,2002,2(4):341-345.

[14] FESMIRE J E, SASS J P. Aerogel insulation applications for liquid hydrogen launch vehicle tanks [J]. Cryogenics, 2008, 48(5): 223-231.

[15] RANDALL J P, MEADOR M A B, JANA S C. Tailoring mechanical properties of aerogels for aerospace applications [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2011, 3(3):613-626.

[16] BAUMANN T F, GASH A E, CHINN S C, et al. Synthesis of high-surface-area alumina aerogels without the use of alkoxide precursors [J]. Chemistry of Materials, 2005, 17(2): 395-401.

[17] ZU G Q, SHEN J, WEI X Q, et al. Preparation and characterization of monolithic alumina aerogels [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2011, 357(15): 2903-2906.

[18] POCO J F, SATCHER J H, Jr, HRUBESH L W. Synthesis of high porosity, monolithic alumina aerogels [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285(1/2/3): 57-63.

[19] ZU G Q, SHEN J, ZOU L P, et al. Nanoengineering super heat-resistant, strong alumina aerogels [J]. Chemistry of Materials, 2013, 25(23): 4757-4764.

[20] ZOU W B, WANG X D, 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.

[21] WANG W Q, ZHANG Z H, ZU G Q, et al. Trimethylethoxysilane-modified super heat-resistant alumina aerogels for high-temperature thermal insulation and adsorption applications [J]. RSC Advances, 2014, 4(97): 54864-54871.

[22] ZOU W B, WANG X D, WU Y, et al. Highly thermally stable alumina-based aerogels modified by partially hydrolyzed aluminum tri-sec-butoxide [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2017, 84(3): 507-514.

[23] ZHONG Y, ZHANG J J, WU X D, et al. Carbon-fiber felt reinforced carbon/alumina aerogel composite fabricated with high strength and low thermal conductivity [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2017, 84(1): 129-134.

[24] 孙晶晶,胡子君,吴文军,等.氧化铝气凝胶复合高温隔热瓦的制备及性能[J].宇航材料工艺,2017,47(3):33-36,41.

[25] HURWITZ F I, ROGER R B, GUO H, et al. The role of phase changes in maintaining pore structure on thermal exposure of aluminosilicate aerogels [J]. MRS Communications, 2017, 7(3): 642-650.

[26] 钟亮，陈晓红，胡子君，等. 氧化锆气凝胶的制备方法研究进展[J]. 宇航材料工艺，2012，42(2)：24-29.

[27] READEY M J, LEE R R, HALLORAN J W, et al. Processing and sintering of ultrafine MgO - ZrO_2 and (MgO, Y_2O_3) - ZrO_2 powders [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1990, 73(6): 1499-1503.

[28] LENORMAND P, LECOMTE A, BABONNEAU D, et al. X-ray reflectivity, diffraction and grazing incidence small angle X-ray scattering as complementary methods in the microstructural study of sol-gel zirconia thin films [J]. Thin Solid Films, 2006, 495(1/2): 224-231.

[29] WU Z G, ZHAO Y X, LIU D S. The synthesis and characterization of mesoporous silica-zirconia aerogels [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2004, 68(1/2/3): 127-132.

（上接第 138 页）

[11] HOU W Z, LI Z Q, WANG J, et al. An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 2. information content analysis for aerosol parameters and principal components of surface spectra [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 192: 14-29.

[12] 谢一淞，李正强，侯伟真，等. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演[J]. 上海航天，2019，36：200-227.

[13] ZHENG Y, HOU W, LI Z Q, et al. Seasonal change analysis of multispectral BRDF for different surface types [C]// Proceedings of SPIE. 2021: 117639Y-1-7.

[14] LI Z Q, XU H, LI K, et al. Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: an overview of sun-sky radiometer observation network (SONET) measurements [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(4): 739-755.

[15] 麻金继，陈瑾. 用Mie散射理论计算大气气溶胶光学特性[J]. 原子与分子物理学报，2005，22(4)：701-707.

[16] 李正强. 地面光谱多角度和偏振探测研究大气气溶胶[D]. 合肥：中国科学院等离子体物理研究所，2004.

[17] TRAVIS L, MISHCHENKO M, ScatteringLACIS A., absorption, and emission of light by small particles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 158-177.

[18] LI Z, ECK T, ZHANG Y, et al. Observations of residual submicron fine aerosol particles related to cloud and fog processing during a major pollution event in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2014, 86: 187-192.

《上海航天(中英文)》2021年总目次

· 专家特稿 ·

数字卫星概念研究 ……董云峰,李　智,雷　鸣(1 - 1)
合成孔径雷达射频干扰抑制技术进展及展望
……陈筠力,陶明亮,李劼爽,侯雨生,刘艳阳(2 - 1)
空天一体联合体系作战及其技术展望 …张宏俊(3 - 1)
机器人智能化焊接技术发展综述及其在运载火箭贮箱
中的应用 ……林尚扬,杨学勤,徐爱杰,
陈华斌,林　涛,赵耀邦(3 - 8)
典型轨道环境效应及对在轨卫星影响分析
……曹喜滨,路同山(3 - 18)
自主可控关键软硬件在我国宇航领域的应用与发展
建议 ……倪光南,朱新忠(3 - 30)
氮化镓毫米波功放技术发展
……郝　跃,马晓华,杨　凌(3 - 35)
异构计算并行编程模型综述
……邬江兴,祁晓峰,高彦钊(4 - 1)
宇航抗辐射加固集成电路技术发展与思考
……赵元富,王　亮,岳素格,隋成龙,李同德(4 - 12)
新技术试验卫星C星、D星姿轨控分系统设计和在轨验证
……陈占胜,杜　宁,王世耀,陈文晖,徐家国(6 - 1)

· 结构与机构专栏 ·

冲击/周期载荷作用下分布式调谐质量阻尼器对响应
控制的影响 ……宋吉祥,吴　炜,严定帮,
郭双喜,陈伟民(1 - 13)
复合材料整流罩声学等效建模与低频隔声性能研究
……李航行,吴邵庆,沈　林(1 - 20)
大型空间可展开结构热致振动研究
……胡甜赐,陈素芳,吴　松,姜　东,费庆国(1 - 28)
带限位台阶的高阻尼橡胶减振器性能试验分析
……黄兴淮,江家权,孙伟豪,徐赵东,杨建中(1 - 36)
某型蓄压器低温振动试验方法
……次永伟,冯盟蛟,张文胜,蔡　平,毛雯捃(1 - 45)
机械式振动台结构设计及其波形复现性能测试研究
……郭迎庆,李宗荫,杨晓璐(1 - 53)

· 创新与探索 ·

国内外行星表面巡视器自主导航技术研究
……解杨敏,季　力,魏祥泉,陈　萌,邹怀武(1 - 61)
Ka数字波束合成-合成孔径雷达顺轨干涉性能分析
……吴思利,王　辉,郑世超,曾朝阳,陈　翔,
孙家正,冯利鹏(1 - 72)
液氢温区直接节流制冷新流程热力学分析
…申运伟,刘东立,李江道,张　浩,崙　锐,刘　磊,
王浩任,张德顺,王　博,赵钦宇,甘智华,
张　亮,仇　旻(1 - 80)
X波段在南极地区穿透深度的技术研究
……王冬红,刘　卓,王意军,李　佳,刘艳阳,
郭　磊,陈筠力(1 - 90)
燃料电池的空间应用技术发展
……胡　晶,李海滨,顾海涛(1 - 97)
面向星上目标提取的卷积神经网络优化技术
……卢　丹,孙永岩,郑幸飞,齐保贵,师　皓(1-105)
月球探测任务测控系统总体设计技术研究
……李　赞,李海涛,张　哲,樊　敏,徐得珍,
辛晓生(2 - 76)
基于多级铝蜂窝缓冲器的新型着陆器性能分析
…贾　山,钱佳程,陈金宝,周金华,徐雅男,张　胜,
肖赟辰,陈　姮(2 - 87)
400 kW空间堆布雷顿循环系统运行特性分析 …辛　杰,
卢瑞博，方华伟，易经纬，赵富龙，谭思超(2 - 98)
空间用液态金属传热式斯特林发电机换热结构研究
……刘凯旋,余国瑶,解家春,赵爱虎,吕　征(2-106)
毫米波SAR DBF-SCORE成像算法及系统级验证
……吴思利,王　辉(2-113)
应用LoRa通信协议的松散式有界星群构型设计
……张晓杰,张　璇,朱　野,赵灵峰(2-119)
防空武器系统能力需求分析的简化方法
……陈　杰,谭天乐,史树峰(5 - 46)
紫外-短波红外航天遥感探测器光电性能测试装置的
研制和标定 ……张　钊,屈　炜,万　志(5 - 53)
典型卫星表面材质的近红外干涉光谱反演
……徐　融,梁奕瑾,杨海龙,祝　竺,赵　飞(5 - 60)
敏捷SAR卫星平台载荷一体化控制方法研究 …张永强,
王　赟，刘德庆，陈筠力，于迎军，吴敬玉(5 - 67)
SO(3)上航天器自适应反步姿态跟踪控制
……史忠军,邵长宝,张剑桥,赵艳彬(5 - 74)
基于吩嗪类分子的锂离子电池性能与储能机理研究
……杨　杰,朱乔楠,吴勇民,王　华(5 - 81)

索网结构非线性有限元分析中初始张力状态的快速构造方法 …王　威,吴　松,郭其威,唐国安(5 - 89)
基于YOLOV3的改进目标检测识别算法
……王战涛,张　策,王晓田(6 - 60)
空间应用高光束质量小型化被动调Q激光器 …王彬宇,刘　斌,王永志,吴妙章,周云申,刘　崇(6 - 71)
50 kW级高功率霍尔推力器放电通道数值模拟研究
……陈笃华,王平阳,王　尚,刘　佳(6 - 78)
发电-储能一体化柔性电源系统结构热特性仿真研究
…陆鸣雷,张　圳,周丽华,王小顺,叶晓军,李红波,孙利杰,吴勇民,靳　洋,刘世超(6 - 85)
基于知识图谱的遥感图像检索定位方法
……王子奇,李华旺(6 - 93)

· 专业纵论 ·

新型针式高压隔离阀的设计和试验
……王建维,李　林,王平阳,周长斌,杭观荣(1-113)
平面整体冲破式易碎盖结构设计及有限元分析
……徐澧明,范棋鑫,蔡登安,南博华,周光明(1-119)
基于电永磁技术的对接/分离机构设计 ……许　珍,林　旻,李金恩,张　博,毛青筠,闫阿儒(1-128)
InGaAsP快速外延生长及其在太阳电池中的应用
……李　戈,陆宏波,李欣益,张　玮(1-136)
月面环境下谐波减速器固液复合润滑寿命试验研究
……郑宗勇,张智芳,方蒙生,王长亮,张崇峰,王治易(2-125)
低温推进剂交叉输送管路关键技术研究进展
…许　浩,容　易,季　伟,崔　晨,王　夕,陈士强,陈六彪,王俊杰(2-131)
StarLink星座对空间安全态势的影响
……田　鑫,崔　文,张　炜,王丽洁,罗　朗(2-137)
一种高效率星载电源无线能量传输系统 ……陈　强,张俊亭,陶建秋,费春梅,周肖楠,卫　倩(2-144)
搅拌摩擦加工调控镁合金组织与耐腐蚀性能的发展现状与趋势……龙　飞,陈高强,刘　瞿,张　弓,张　华,史清宇(2-149)
基于模糊单神经元PID的车载发射装置随动控制策略研究……王旭锋,牛远征,曾远帆,殷　翔,姜晓明(5 - 98)
基于GNSS掩星资料的风云卫星微波载荷产品质量验证与分析 …高　超,何杰颖,胡艳冰,柳聪亮(5-104)
基于有限元仿真的镗孔刀片优化设计及其性能评估
……李　超,徐锦泱,陈　明,文　亮,周金强,任　斐(5-114)
基于子孔径处理的大斜视SAR点目标仿真
……吴佳晔,顾丹丹,刘　鹏(5-120)
电动负载模拟器的自适应模糊PI控制策略
……贾东旭,刘　梁,徐照平(5-131)
双酚A二炔丙基醚/氰酸酯共混树脂固化反应与性能
……李　川,王晓蕾,田　杰,唐靳梅,夏　军,叶　清,袁莽龙(5-138)
基于主动阻尼控制的柔性基座振动抑制
……周　政,邹怀武,储驻港,钟　楼,汤奇荣(6-100)
太阳翼展开试验装置导轨摩擦力自动测量系统设计
……许红亮,王　宏,张永杰,胡　斌,徐　庆(6-105)
海洋定位卫星性能分析
…孙鸿强,张占月,赵焕洲,胡国林,张　辉,张　宽,谢　圆,卢　皓(6-111)
地球同步卫星BSR硅太阳电池阵输出功率衰减规律分析 ……刘　帆,郭　静,郭小红,黄晓峰(6-118)
基于自适应KF动态虚拟陀螺数据融合算法的研究
……熊泰然,陈雯雯,陈宏宇,高海云,吉言超(6-124)

· 工程实践 ·

改进FMECA在空间电源分系统中的应用
……孔雷星,冷学敏,马季军,葛茂艳,王　田(1-142)
激光熔化沉积15-5PH沉淀硬化不锈钢组织及拉伸性能
……刘正武,赵　凯,郝云波,杨　萍,张春杰(1-150)
空间核电源系统整流装置设计
……马　东,靳　洋,吴春瑜,李　阳,钱　循,刘世超(1-157)
7A09铝合金电子束焊接接头的显微组织与力学性能
……张成聪,王志国,刘　娇,汪　政,王少刚(5-146)
中国典型气溶胶模型光学特性分析及在大气校正中的应用……郑　杨,梁晏祯,张　钊,屈　炜,胡传甲,侯伟真,杨磊库(6-131)
气凝胶复合材料在航天领域中的应用
……李增荣,王志平(6-139)

· 导航与姿轨控制专栏 ·

考虑姿轨耦合的航天器高精度实时导航定轨方法
……杨盛庆,陈　桦,徐炜莉,刘美师,王　禹,钟　超(2 - 14)
单滑块与飞轮协同姿态控制卫星运动分析
……钱首元,高长生,荆武兴(2 - 22)
四维黎曼时空下脉冲星导航模型精度分析
……姜　宇,陈　晓,王龙奇,金　晶,马家辰(2 - 30)
FY-3(05)星主动对月定标控制技术研究
……王金华,薄煜明,高旭东,尹海宁(2 - 37)
基于改进ORB的月面着陆视觉导航的配准方法
……胡　涛,贺　亮,夏永江(2 - 45)

基于特征模型的力矩受限卫星姿态抗饱和设计
……郭瑞科,胡　军,李毛毛,张　涛(2-52)
高轨飞行器主动段双向测控陆基导航方案
……孙立达,叶　翔,温　渊,刘　伟,张丹丹(2-58)
基于遥感图像的无固定标志点卫星自主定轨
……高有涛,刘靖雨,王兆龙,李木子,孙　俊(2-66)

·总体技术·

智能博弈趋势下未来空天防御体系展望
……王波兰(3-46)
运载火箭演进及智能技术展望
……刘鲁江,梁建国,吴佳林,盛英华(3-53)
未来智能化网络化多功能卫星系统技术发展思考
……陈占胜(3-63)

·航天型号创新与探索·

未来远程对空导弹发展思考
……侯凯宇,贺　敏,金鹏飞(3-68)
我国风云卫星体系的发展思考 ……董瑶海(3-76)
在轨服务若干关键技术研究进展
……肖余之,靳永强,陈欢龙,顾冬晴,徐　峰(3-85)
天基干涉合成孔径雷达技术发展与展望
……陈筠力,刘艳阳,陈重华,赵　迪(3-96)
载人月球探测月面活动发展设想
……张崇峰,许惟扬,王　燕(3-109)

·先进制造与材料·

镁合金新材料及制备加工新技术发展与应用
……候正全,蒋　斌,王煜烨,宋江凤,肖　旅,潘复生(3-119)
新型运载火箭结构优化设计与试验验证
…王金明,鲍国苗,刘　勇,顾铖璋,易　果,刘　博,吴春雷,亢　战(3-134)
智能制造技术在航天大型构件中的应用
……何建利,高嘉爽(3-147)

·制导与控制·

相控阵雷达导引头技术现状及发展趋势
……陈　潜,陆满君,宋　柯,于祥祯,杜　科(3-157)
对空红外制导关键技术发展分析
……李同顺,奚　勇,印剑飞(3-163)

·推进技术·

智能固体发动机概念及发展设想
……叶　勋,高　波,毛成立,黄江流,乐　浩,何　快(3-171)
我国空间推进技术研究现状及发展
……朱智春,林庆国,杭观荣,姚天亮,刘昌国(3-178)

·电源技术及元器件应用·

元器件应用验证技术及其工程实践
……江理东,林立芳,刘伟鑫,王昆黍,楼建设,曾英廉,王敬贤(3-189)
空间电源数字孪生系统
…朱　凯,陈　健,吕桃林,付诗意,吴　磊,晏莉琴,王　可,解晶莹(3-197)
我国载人航天电源系统的技术发展成就及趋势
……马季军,何小斌,涂　涛(3-207)

·人工智能与高效能计算·

基于天基边缘计算的在轨智能技术
……张　飞,陈小前,于　帅,季明江,刘　勇,曹　璐(4-19)
基于误差模型的权重二值神经网络近似加速
……朱新忠,程利甫,吴有余,林闽佳,胡汝豪(4-25)
一种快速响应型小卫星的自主任务规划设计与应用
……范　凯,崔本杰,陈占胜,成　飞(4-31)
星载异构计算环境下的能耗优化任务调度
……安建峰,游红俊,赵伟勋,刘咪咪,张盛兵(4-38)
基于小样本学习的多因素单粒子翻转截面预测
……刘　婷,杨　博,于泽芳(4-45)
面向在轨高效实时图像处理的二值权重沙漏网络加速器设计 ……程利甫,徐炜莉,赵启义,段欣欣,蒋仁兴(4-52)

·体系架构与软件技术·

一种基于可重构片上互连的多核处理器架构
……刘　强,苏嘉玮,罗　宇,王　滔,孙泽渝(4-60)
一种基于控制流解耦的可重构阵列动态调度方法
……尹　琛,彭　飞,景乃锋(4-68)
在轨任务规划的新型开发方法
……关　宁,双小川,彭　娜,胡　浩,田文波(4-75)
基于动态库的星载软件可重构设计与实现
……白　亮,邱　源,韦　杰,孙逸帆,高　洁(4-84)

·航天通信技术·

基于星间链路状态的低轨卫星网络路由算法
……张　路,燕　锋,章跃跃,夏玮玮,谢　晔,石云墀,沈连丰(4-92)
天地联合测控鲁棒性路由算法
……夏茹敏,史可懿,何　健,李红艳(4-101)

基于数字多波束星载多通道VDES设计 ……王文伟，张　喆，谷晓鹰，刘宇宏，林　伟，戴　琳(4-109)
基于CCSDS空间数据链路安全协议的星载遥控认证保护 ……唐利锋,崔　阳,刘晓瑞,刘希红(4-118)

·图像处理技术·

基于注意力机制特征重建网络的舰船目标检测
……牛　戈,陈小前,季明江,郭鹏宇,刘　勇,冉德超(4-128)
基于空间分布特性多层RX高光谱点目标检测
……张　宁,朱浩文,谢少彪,兰先超,陈　乾(4-137)
基于HLS的红外遥感图像连通域快速提取方法
……成昊天,丁荣莉,胡博文,李　杰,李　焱,欧阳尚荣(4-144)
星上高光谱图像无损压缩方法 ……舒　锐,武少林,龚　伟,陈　阳,张天序(4-152)

·电源技术专栏·

镁硫电池硫硒化合物正极材料的研究
…朱悦丹,王　翠,努丽燕娜,武　迪,郭　瑞(5 - 1)
基于SE-TCN网络模型的太阳电池阵温度异常检测
……何利健,张　锐,陈文卿(5 - 8)
基于多尺度的空间锂离子蓄电池单体电-热耦合模型
……宋缙华,丰震河,郭向飞,田　娟,张兴浩,王　可(5 - 17)
临近空间太阳电池组件热力学特性仿真分析
……张　圳,陆鸣雷,杨　洋,宋琳琳,叶晓军(5 - 25)
空间站柔性太阳电池翼对日跟踪控制
……赵　真,王　碧,钱志源,陈国平(5 - 31)
空间用太阳翼电路部分隔离二极管应用分析
……王文强,陈　城,李　健,周　健,刘众鑫,刘志强,杨洪东(5 - 41)

·卫星研制与应用专栏·

基于FY4A-AGRI反演东北地区云顶高度
……董　焱,鲍艳松,许　丹,陈　强,李叶飞,崔　伟,孙　杰(6 - 8)
基于去相干敏感因子的多基线PolInSAR植被高度反演方法…王意军,宋天祎,李　威,汪长城,纪　鹏(6 - 21)
面向导航增强的低轨星座设计与应用
……彭　攀,范　鑫,徐伟证,康国华,华寅淼,许传晓(6 - 28)
星箭耦合力学分析中的卫星混合模型研究 ……吴　松,秦　川,刘　松,赵玉震,郭其威,唐国安(6 - 36)
双太阳翼GEO卫星在轨角动量管控方法
……洪振强,俞　洁,刘　伟,杨立峰,陆国平,施晨康,赵　辉(6 - 40)
面向北斗短报文的在轨卫星健康监控体系
……张海威,侯　波,车　斌,张国龙,邢　楠(6 - 47)
静止轨道实孔径微波载荷卫星构型方案研究
…潘高伟,张栖诚,陈晓杰,江　君,胡建梅,王　萌,靳　浩,秦高明(6 - 53)

AEROSPACE SHANGHAI(CHINESE & ENGLISH)

Special Paper of Expert

Research on Concept of Digital Satellite
……DONG Yunfeng, LI Zhi, LEI Ming (1 - 1)
Progress and Prospects of Radio Frequency Interference Suppression Technology for Synthetic Aperture Radar
……CHEN Junli, TAO Mingliang, LI Jieshuang, HOU Yusheng, LIU Yanyang (2 - 1)
Combat and Technology Prospect of Air and Space Integrated Operation System ……ZHANG Hongjun (3 - 1)
Recent Advances in Intelligentized Robotic Welding Technologies and its Application in Launch Vehicle Tank
……LIN Shangyang, YANG Xueqin, XU Aijie, CHEN Huabin, LIN Tao, ZHAO Yaobang (3 - 8)
Analyses of Environmental Effects of Typical Orbits and Their Influence on In-orbit Satellites
……CAO Xibin, LU Tongshan (3 - 18)
Application and Development Proposal of Autonomous and Controllable Key Electronic Components and Basic Software in Aerospace Field of China
……NI Guangnan, ZHU Xinzhong (3 - 30)
Review on GaN-Based mm-Wave Power Amplifier Technology
……HAO Yue, MA Xiaohua, YANG Ling (3 - 35)
Review of Programming Models for Heterogeneous Parallel Computing ……WU Jiangxing, QI Xiaofeng, GAO Yanzhao (4 - 1)
Development and Considerations for Aerospace Radiation-Hardened Integrated Circuit …ZHAO Yuanfu, WANG Liang, YUE Suge, SUI Chenglong, LI Tongde (4 - 12)

Attitude and Orbit Control System Design and On-orbit Verification of New Technology Test Satellites C and D
……CHEN Zhansheng, DU Ning, WANG Shiyao, CHEN Wenhui, XU Jiaguo (6 - 1)

Structures and Mechanisms

Influence of Multiple Tuned Mass Damperson Response Control under Impact/Periodic Load
……SONG Jixiang, WU Wei, YAN Dingbang, GUO Shuangxi, CHEN Weimin (1 - 13)
Acoustic Equivalent Modeling and Low-Frequency Sound Insulation Performance Study for a Composite Fairing
……LI Hangxing, WU Shaoqing, SHEN Lin (1 - 20)
Thermally Induced Vibration Study for Large-Scale Deployable Spatial Structures ……HU Tianci, CHEN Sufang, WU Song, JIANG Dong, FEI Qingguo (1 - 28)
Experimental Performance Study on Viscoelastic Assembly Dampers with Limitation…HUANG Xinghuai, JIANG Jiaquan, SUN Weihao, XU Zhaodong, YANG Jianzhong (1 - 36)
Test Method of Low Temperature Vibration for a Certain Type Accumulator ……CI Yongwei, FENG Mengjiao, ZHANG Wensheng, CAI Ping, MAO Wenjun (1 - 45)
Research on Structure Design of Mechanical Shaking Table and Its Waveform Recurrence Performance Test
……GUO Yingqing, LI Zongyin, YANG Xiaolu (1 - 53)

Innovation and Exploration

Domestic and Overseas Research Status on Autonomous Navigation Technology of Planetary Rovers……XIE Yangmin, JI Li, WEI Xiangquan, CHEN Meng, ZOU Huaiwu (1 - 61)
Performance Analysis on Along-Track Interferometry of Ka Digital Beam Forming Synthetic Aperture Radar
…WU Sili, WANG Hui, ZHENG Shichao, ZENG Zhaoyang, CHEN Xiang, SUN Jiazheng, FENG Lipeng (1 - 72)
Thermodynamic Analysis for a New Direct Throttling Cryocooler Process at Liquid Hydrogen Temperature
…SHEN Yunwei, LIU Dongli, LI Jiangdao, ZHANG Hao, ZHUAN Rui, LIU Lei, WANG Haoren, ZHANG Deshun, WANG Bo, ZHAO Qinyu, GAN Zhihua, ZHANG Liang, QIU Min (1 - 80)
Research on X-Band Penetration Depth in Antarctica
……WANG Donghong, LIU Zhuo, WANG Yijun, LI Jia, LIU Yanyang, GUO Lei, CHEN Junli (1 - 90)
Development of Space Applied Technology for Fuel Cells
……HU Jing, LI Haibin, GU Haitao (1 - 97)
Convolutional Neural Network Optimization Technology for Satellite Target Extraction ……LU Dan, SUN Yongyan, ZHENG Xingfei, QI Baogui, SHI Hao (1-105)
Research on Overall Design Technology of TT&C for Lunar Exploration ……LI Zan, LI Haitao, ZHANG Zhe, FAN Min, XU Dezhen, XIN Xiaosheng (2 - 76)
Performance Analysis of a New Lander Based on Multi-level Aluminum Honeycomb Buffer ……JIA Shan, QIAN Jiacheng, CHEN Jinbao, ZHOU Jinhua, XU Yanan, ZHANG Sheng, XIAO Yunchen, CHEN Heng (2 - 87)
Operation Characteristic Analysis of 400 kW Brayton Cycle Space Reactor System……XIN Jie, LU Ruibo, FANG Huawei, YI Jingwei, ZHAO Fulong, TAN Sichao (2 - 98)
Research on Heat Transfer Structure of Space-Used Stirling Generator with Liquid Metal ……LIU Kaixuan, YU Guoyao, XIE Jiachun, ZHAO Aihu, LYU Zheng (2-106)
Millimeter SAR DBF-SCORE Imaging Algorithm and System-Level Verification……WU Sili, WANG Hui (2-113)
A Configuration Design of Loosely Bounded Satellite Cluster Based on LoRa Communication Protocol ……ZHANG Xiaojie, ZHANG Xuan, ZHU Ye, ZHAO Lingfeng (2-119)
Simplified Method of Capability Need Analysis for Anti-air Weapon Systems ……CHEN Jie, TAN Tianle, SHI Shufeng (5 - 46)
Development and Calibration of Photoelectric Property Test Device for Ultraviolet-Short Wave Infrared Detector
……ZHANG Zhao, QU Wei, WAN Zhi (5 - 53)
Characterization of Typical Satellite Surface Material using Near-Infrared Interference Spectra ……XU Rong, LIANG Yijin, YANG Hailong, ZHU Zhu, ZHAO Fei (5 - 60)
Radar and Platform Integrated Control Method of Agile SAR Satellite ……ZHANG Yongqiang, WANG Yun, LIU Deqing, CHENG Junli, YU Yingjun, WU Jingyu (5 - 67)
Adaptive Backstepping Attitude Tracking Control for Spacecraft on SO(3) ……SHI Zhongjun, SHAO Changbao, ZHANG Jianqiao, ZHAO Yanbin (5 - 74)
Energy-Storage Mechanism and Performance of Phenazine-Redox-Moieties Based Li-ion Batteries …YANG Jie, ZHU Qiaonan, WU Yongmin, WANG Hua (5 - 81)
Fast Construction Method for Initial Tension State in Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Net Structure …WANG Wei, WU Song, GUO Qiwei, TANG Guoan (5 - 89)
Improved Target Detection and Recognition Algorithm Based on YOLOV3 ……WANG Zhantao, ZHANG Ce, WANG Xiaotian (6 - 60)
Miniaturized Passively Q-switched Laser with High Beam Quality for Space Applications ……WANG Binyu, LIU Bin, WANG Yongzhi, WU Miaozhang, ZHOU Yunshen, LIU Chong (6 - 71)
Numerical Simulation of the Discharge Channel of a 50 kW High-Power Hall Thruster ……CHEN Duhua, WANG Pingyang, WANG Shang, LIU Jia (6 - 78)
Simulation Research on Thermal Characteristics of Power Generation-Energy Storage Integrated Flexible Power System Structure ……LU Minglei, ZHANG Zhen, ZHOU Lihua, WANG Xiaoshun, YE Xiaojun, LI Hongbo, SUN Lijie, WU Yongmin, JIN Yang, LIU Shichao (6 - 85)

Remote Sensing Image Retrieval and Location Method Based on Knowledge Graph ……WANG Ziqi, LI Huawang (6 - 93)

Speciality Discussion

Design and Test of New High-Pressure Isolation Valve ……WANG Jianwei, LI Lin, WANG Pingyang, ZHOU Changbin, HANG Guanrong (1-113)
Structural Design and Finite Element Analysis of Plane Integral Bursting-Type Frangible Cover ……XU Liming, FAN Qixin, CAI Deng'an, NAN Bohua, ZHOU Guangming (1-119)
Design of Docking/Separation Mechanism Based on Permanent Magnet Technology……XU Zhen, LIN Min, LI Jinen, ZHANG Bo, MAO Qingyun, YAN Aru (1-128)
Rapid Growth of InGaAsP and Its Application in Solar Cells ……LI Ge, LU Hongbo, LI Xinyi, ZHANG Wei (1-136)
Study on the Life Test of Solid-Liquid Composite Lubrication of Harmonic Reducer in Lunar Environment ……ZHENG Zongyong, ZHANG Zhifang, FANG Mengsheng, WANG Changliang, ZHANG Chongfeng, WANG Zhiyi (2-125)
Research Progress on the Key Technologies of Cryogenic Propellant Cross Feed Pipeline ……XU Hao, RONG Yi, JI Wei, CUI Chen, WANG Xi, CHEN Shiqiang, CHEN Liubiao, WANG Junjie (2-131)
Effects of Starlink Constellation on Space Security……TIAN Xin, CUI Wen, ZHANG Wei, WANG Lijie, LUO Lang (2-137)
A High Efficiency Wireless Power Transmission System for Spaceborne Power ……CHEN Qiang, ZHANG Junting, TAO Jianqiu, FEI Chunmei, ZHOU Xiaonan, WEI Qian (2-144)
Recent Developments of Regulating the Microstructure and Corrosion Resistance of Magnesium Alloys by Friction Stir Processing ……LONG Fei, CHEN Gaoqiang, LIU Qu, ZHANG Gong, ZHANG Hua, SHI Qingyu (2-149)
Research on Follow-up Strategy for Vehicle Launchers Based on Fuzzy Single Neuron PID Control ……WANG Xufeng, NIU Yuanzheng, ZENG Yuanfan, YIN Xiang, JIANG Xiaoming (5 - 98)
Quality Verification and Analysis of Feng Yun Satellite Microwave Payload Products Based on GNSS Occultation Data ……GAO Chao, HE Jieying, HU Yanbing, LIU Congliang (5-104)
Optimal Design and Performance Evaluation of Boring Blades Based on the Finite Element Simulation ……LI Chao, XU Jinyang, CHEN Ming, WEN Liang, ZHOU Jinqiang, REN Fei (5-114)
Point Target Simulation of Large Squint SAR Based on Subaperture Processing ……WU Jiaye, GU Dandan, LIU Peng (5-120)
Adaptive Fuzzy PI Control for Electric Load Simulator ……JIA Dongxu, LIU Liang, XU Zhaoping (5-131)
Curing Reaction and Properties of Blended Resins of Bisphenol a Dipropargyl Ether and Cyanate Esters ……LI Chuan, WANG Xiaolei, TIAN Jie, TANG Jinmei, XIA Jun, YE Qing, YUAN Qiaolong (5-138)
Flexible Base Vibration Suppression Based on Active Damping Control ……ZHOU Zheng, ZOU Huaiwu, CHU Zhugang, ZHONG Lou, TANG Qirong (6-100)
Design of an Friction Automatic Measurement System for Guide Rail of Solar Array Deployment Test Facility ……XU Hongliang, WANG Hong, ZHANG Yongjie, HU Bin, XU Qing (6-105)
Performance Analysis of Marine Positioning Satellites ……SUN Hongqiang, ZHANG Zhanyue, ZHAO Huanzhou, HU Guolin, ZHANG Hui, ZHANG Kuan, XIE Yuan, LU Hao (6-111)
Analysis on Attenuation Rule of Back Surface Reflection Solar Cell Array Power in Geostationary Orbit Satellite ……LIU Fan, GUO Jing, GUO Xiaohong, HUANG Xiaofeng (6-118)
Data Integration Algorithm for Dynamic Virtual Gyroscope Based on Adaptive Kalman Filter ……XIONG Tairan, CHEN Wenwen, CHEN Hongyu, GAO Haiyun, JI Yanchao (6-124)

Engineering Practice

Application of an Improved FMECA in Space Power Subsystem ……KONG Leixing, LENG Xuemin, MA Jijun, GE Maoyan, WANG Tian (1-142)
Microstructures and Tensile Properties of 15-5PH Precipitation Hardening Stainless Steel Fabricated by Laser Melting Deposition……LIU Zhengwu, ZHAO Kai, HAO Yunbo, YANG Ping, ZHANG Chunjie (1-150)
Design of Rectifier in Space Nuclear Power System ……MA Dong, JIN Yang, WU Chunyu, LI Yang, QIAN Xun, LIU Shichao (1-157)
Microstructure and Mechanical Properties of 7A09Aluminum Alloy Electron Beam Welded Joint ……ZHANG Chengcong, WANG Zhiguo, LIU Jiao, WANG Zheng, WANG Shaogang (5-146)
Optical Property Analysis of Typical Aerosol Models in China and Their Application in Atmospheric Correction ……ZHENG Yang, LIANG Yanzhen, ZHANG Zhao, QU Wei, HU Chuanjia, HOU Weizhen, YANG Leiku (6-131)
Application of Aerogel Composite Material on Aerospace ……LI Zengrong, WANG Zhiping (6-139)

Navigation and Control of Attitude and Orbit

High Precise Real - Time Navigation and Orbit Determining Method for Spacecraft with Consideration of Attitude and Orbital Coupling ……YANG Shengqing, CHEN Hua, XU Weili, LIU Meishi, WANG Yu, ZHONG Chao (2 - 14)

Analysis of Satellite Motion Under the Cooperative Control of Single Slider and Flywheels ……QIAN Shouyuan, GAO Changsheng, JING Wuxing (2 - 22)
Accuracy Analysis of Pulsar-Based Navigation Model in Four-Dimensional Riemann Space-Time ……JIANG Yu, CHEN Xiao, WANG Longqi, JIN Jing, MA Jiachen (2 - 30)
Lunar Calibration Maneuver for the FY-3(05) Satellite ……WANG Jinhua, BO Yuming, GAO Xudong, YIN Haining (2 - 37)
Lunar Surface Landing Visual Navigation Registration Based on Improved ORB Algorithm ……HU Tao, HE Liang, XIA Yongjiang (2 - 45)
Anti-windup Design for Satellite Attitude Control with Input Saturation Based on Characteristic Model …GUO Ruike, HU Jun, LI Maomao, ZHANG Tao (2 - 52)
Bidirectional TT&C Ground-Based Navigation Schemes for High-Orbit Aircrafts in Boost Phase ……SUN Lida, YE Xiang, WEN Yuan, LIU Wei, ZHANG Dandan (2 - 58)
Autonomous Orbit Determination Based on Remote Sensing Image without Fixed Landmarks ……GAO Youtao, LIU Jingyu, WANG Zhaolong, LI Muzi, SUN Jun (2 - 66)

General Technology

Outlook of Future Aerospace Defense System Under the Intelligent Game Trend ……WANG Bolan (3 - 46)
Evolution and Intelligent Technology Prospect of Launch Vehicles ……LIU Lujiang, LIANG Jianguo, WU Jialin, SHENG Yinghua (3 - 53)
Consideration on the Development of Intelligent Networked Multifunctional Satellite System Technology in the Future ……CHEN Zhansheng (3 - 63)

Innovation and Exploration of Aerospace Model

Thoughts on the Development of Long-Range Air-to-Air Missiles ……HOU Kaiyu, HE Min, JIN Pengfei (3 - 68)
Consideration on the Development of Fengyun Series Satellite System ……DONG Yaohai (3 - 76)
Research Progress on Several Key Technologies of On-orbit Service ……XIAO Yuzhi, JIN Yongqiang, CHEN Huanlong, GU Dongqing, XU Feng (3 - 85)
Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar: Status and Prospect ……CHEN Junli, LIU Yanyang, CHEN Zhonghua, ZHAO Di (3 - 96)
Development Ideas of Manned Lunar Surface Exploration ……ZHANG Chongfeng, XU Weiyang, WANG Yan (3-109)

Advanced Manufacturing and Materials

Development and Application of New Magnesium Alloy Materials and their New Preparation and Processing Technologies ……HOU Zhengquan, JIANG Bin, WANG Yuye, SONG Jiangfeng, XIAO Lv, PAN Fusheng (3-119)
Structure Optimization and Test Verification of New Launch Vehicles ……WANG Jinming, BAO Guomiao, LIU Yong, GU Chengzhang, YI Guo, LIU Bo, WU Chunlei, KANG Zhan (3-134)
Applications of Intelligent Manufacturing to Large Aerospace Components ……HE Jianli, GAO Jiashuang (3-147)

Guidance and Control

Current Status and Development Trend of Phased Array Radar Seeker Technology …CHEN Qian, LU Manjun, SONG Ke, YU Xiangzhen, DU Ke (3-157)
Analysis on the Development of Key Technologies for Surface-to-Air Infrared Guidance ……LI Tongshun, XI Yong, YIN Jianfei (3-163)

Propulsion Technology

Concept and Development of Intelligent Solid Rocket Motor ……YE Xun, GAO Bo, MAO Chengli, HUANG Jiangliu, LE Hao, HE Kuai (3-171)
Research Status and Development of Space Propulsion Technology in China ……ZHU Zhichun, LIN Qingguo, HANG Guanrong, YAO Tianliang, LIU Changguo (3-178)

Power Supply Technology and Component Application

Application Verification and Engineering Practice of Components …JIANG Lidong, LIN Lifang, LIU Weixin, WANG Kunshu, LOU Jianshe, ZENG Yinglian, WANG Jingxian (3-189)
Digital Twin System for Space Power-Sources ……ZHU Kai, CHEN Jian, LÜ Taolin, FU Shiyi, WU Lei, YAN Liqin, WANG Ke, XIE Jingying (3-197)
Technical Development Achievements and Trends of Manned Spaceflight Power System in China ……MA Jijun, HE Xiaobin, TU Bo (3-207)

Artificial Intelligence and High-Performance Computing

On-orbit Artificial Intelligence Based on Space Edge Computing ……ZHANG Fei, CHEN Xiaoqian, YU Shuai, JI Mingjiang, LIU Yong, CAO Lu (4 - 19)
Error Model Based Approximate Computing Design for Binarized Weight Neural Network System…ZHU Xinzhong, CHENG Lifu, WU Youyu, LIN Minjia, HU Ruhao (4 - 25)
Autonomous Mission Planning Design and Application of a Fast Responsive Small Satellite ……FAN Kai, CUI Benjie, CHEN Zhansheng, CHENG Fei (4 - 31)
Real-Time Task Scheduling for Space-Oriented Computing on Heterogeneous System ……AN Jianfeng, YOU Hongjun, ZHAO Weixun, LIU Mimi, ZHANG Shengbing (4 - 38)
Multi-factor Single-Event Upset Cross Section Prediction Based on Few-Shot Learning …… ……LIU Ting, YANG Bo, YU Zefang (4 - 45)

Binary - Weight Hourglass Network Accelerator for Efficient Real-Time Image Processing in Orbit ……CHENG Lifu, XU Weili, ZHAO Qiyi, DUAN Xinxin, JIANG Renxing (4 - 52)

Architecture and Software Technology

A Multi-core Processor Architecture Based on Reconfigurable On-chip Interconnection ……LIU Qiang, SU Jiawei, LUO Yu, WANG Tao, SUN Zeyu (4 - 60)

A Dynamic Scheduling Method for Reconfigurable Arrays Based on Control Flow Decoupling ……YIN Chen, PENG Fei, JING Naifeng (4 - 68)

New Development Methods for On-orbit Mission Planning …GUAN Ning, SHUANG Xiaochuan, PENG Na, HU Hao, TIAN Wenbo (4 - 75)

Design and Implementation of On-board Software Reconfiguration Based on Dynamic Library ……BAI Liang, QIU Yuan, WEI Jie, SUN Yifan, GAO Jie (4 - 84)

Aerospace Communication Technology

LEO Satellite Routing Algorithm Based on Inter-Satellite Link State Information…ZHANG Lu, YAN Feng , ZHANG Yueyue, XIA Weiwei, XIE Ye, SHI Yunchi, SHEN Lianfeng (4 - 92)

Robust Routing Algorithm for Space-Ground Integrated Telemetry, Tracking, and Command……XIA Rumin, SHI Keyi, HE Jian, LI Hongyan (4-101)

Design of Spaceborne Multi-channel VDES Based on Digital Multi-beam ……WANG Wenwei, ZHANG Zhe, GU Xiaoying, LIU Yuhong, LIN Wei, DAI Lin (4-109)

Satellite-Borne Transmission Control Authentication Protection Based on CCSDS Space Data Link Security Protocol …TANG Lifeng, CUI Yang, LIU Xiaorui, LIU Xihong (4-118)

Image Processing Technology

Ship Detection with Feature Reconstruction Network Based on Attention Mechanism ……NIU Ge, CHEN Xiaoqian, JI Mingjiang, GUO Pengyu, LIU Yong, RAN Dechao (4-128)

Multi-layer RX Hyperspectral Point Target Detection Based on Spatial Distribution Characteristics ……ZHANG Ning, ZHU Haowen, XIE Shaobiao, LAN Xianchao, CHEN Qian (4-137)

Fast Extraction Method for Connected Domain of Infrared Remote Sensing Image Based on High Level Synthesis ……CHENG Haotian, DING Rongli, HU Bowen, LI Jie, LI Yan, OUYANG Shangrong (4-144)

Lossless Compression Method for On-board Hyperspectral Image ……SHU Rui, WU Shaolin, GONG Wei, CHEN Yang, ZHANG Tianxu (4-152)

Power-source Technology

Sulfur - Selenium Compound Cathode Materials for Magnesium - Sulfur Battery …ZHU Yuedan, WANG Jiang, NULI Yanna, WU Di, GUO Rui (5 - 1)

Abnormal Temperature Detection of Solar Array Based on An SE-TCN Network Model ……HE Lijian, ZHANG Rui, CHEN Wenqing (5 - 8)

A Multiscale Electro-Thermal Coupling Model for Space Lithium-ion Batteries ……SONG Jinhua, FENG Zhenhe, GUO Xiangfei, TIAN Juan, ZHANG Xinghao, WANG Ke (5 - 17)

Simulation Analysis of Thermodynamic Characteristics of Solar Cell Modulesin Near Space ……ZHANG Zhen, LU Minglei, YANG Yang, SONG Linlin, YE Xiaojun (5 - 25)

Solar Tracking Control of Flexible Solar Cell Wings of Space Station ……ZHAO Zhen, WANG Bi, QIAN Zhiyuan, CHEN Guoping (5 - 31)

Application Analysis of Isolation Dioxide for Space Soar Cell Array ……WANG Wenqiang, CHEN Cheng, LI Jian, ZHOU Jian, LIU Zhongxin, LIU Zhiqiang, YANG Hongdong (5 - 41)

Development and Application of Satellite

Cloud Top Height Retrieval in Northeast China Based on FY4A-AGRI ……DONG Yan, BAO Yansong, XU Dan, CHEN Qiang, LI Yefei, CUI Wei, SUN Jie (6 - 8)

Multi-baseline PolInSAR Vegetation Height Inversion Method Based on Decorrelation Sensitivity Factor ……WANG Yijun, SONG Tianyi, LI Wei, WANG Changcheng, JI Peng (6 - 21)

Design and Application of Navigation-Enhanced LEO Constellations ……PENG Pan, FAN Xin, XU Weizheng, KANG Guohua, HUA Yinmiao, XU Chuanxiao (6 - 28)

Research on Satellite Hybrid Model for Coupling Mechanical Analysis of Satellite and Rocket……WU Song, QIN Chuan, LIU Song, ZHAO Yuzhen, GUO Qiwei, TANG Guoan (6 - 36)

On-orbit Angular Momentum Management and Control for GEO Satellites with Double Solar Arrays …HONG Zhenqiang, YU Jie, LIU Wei, YANG Lifeng, LU Guoping, SHI Chenkang, ZHAO Hui (6 - 40)

Health Monitoring System for On-orbit Satellites Based on Beidou Short Message ……ZHANG Haiwei, HOU Bo, CHE Bin, ZHANG Guolong, XING Nan (6 - 47)

Research on Configuration Scheme for Real Aperture Microwave Payload Satellites in Geostationary Orbit ……PAN Gaowei, ZHANG Qicheng, CHEN Xiaojie, JIANG Jun, HU Jianmei, WANG Meng, JIN Hao, QIN Gaoming (6 - 53)