

空间充气膨胀展开结构的可控刚化技术

王新伟^{2,1},任 妮¹,王多书¹,钟 彦²,冯利邦²,李菲菲²
(1.兰州物理研究所,表面工程技术国家级重点实验室,甘肃 兰州 730000;
2.兰州交通大学 机电工程学院材料科学与工程系,甘肃 兰州 730070)

摘 要 刚化技术是空间充气膨胀展开结构的一项关键技术。Adherent Technologies 有限公司的技术人员首次提出了“可控刚化”(Rigidization On Command-ROC)技术概念,利用此技术 ILC Dover 公司制造了空间充气膨胀展开结构的示范支撑管件。和传统的刚化技术相比可控刚化技术有许多优点,此技术可控、清洁,适用于空间的特殊环境。作者对空间充气膨胀展开结构刚化技术、可控刚化技术、可控刚化技术所用材料和紫外光(UV)固化复合材料进行了简单介绍。可控刚化技术可靠性高,固化后复合材料的机械性能好,为空间充气可膨胀展开结构提供一种急需的刚化技术,能满足充气膨胀展开结构多项任务的需要。

关键词 空间充气膨胀展开结构;可控刚化;紫外光固化;阳离子光引发剂

中图分类号:TB33 文献标识码:A 文章编号:1006-7086(2009)03-0125-06

RIGIDIZATION ON COMMAND OF SPACE INFLATABLE STRUCTURES

WANG Xin-wei^{2,1},REN Ni¹,WANG Duo-shu¹,ZHONG yan²,FENG Li-bang²,LI Fei-fei²
(1. National Key laboratory of Surface Engineering, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000,China;
2. Department of Materials Science & Engineering, School of Mechatronics & Engineering,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract : The rigidization technology is a key technology of space inflatable structures.The concept of Rigidization-On-Command (ROC) is proposed by the researchers of Adherent Technologies, Inc. for the first time and a cured demonstration tube is made at ILC Dover. This technology has many advantages compared to the approaches to rigidization in the past. It provided a controlled, clean rigidization technology to harden inflatable structure.The curing technologies of space inflatable structures, Rigidization-On-Command technology , the materials of ROC and the UV cured composite materials are introduced briefly in this paper. The ROC technology can provide a badly needed technology for the space inflatable structures. It can offer high reliability,good dynamic charateristics and can provide a much needed technology for the inflatable community.

Key words: inflatable space structures; rigidization on command;UV curing; cationic photoinitiator

1 引 言

空间充气膨胀展开刚化结构是一种可精确设计和展开的特殊的空间结构,其基本结构是以柔性复合薄膜材料构造密封闭合面、内部可充气的轻型结构。它的主要材料为薄膜。在发射过程和在轨展开充气之前是折叠压紧包装的。在轨道上按照设计的程序,飞行器将释放这些结构并通过充气膨胀展开成形。但是由于空间结构不具有在轨维修性能,为了在长达数年甚至更长的飞行时间里在空间碎片和微流星环境中,维持使用所需要的设计形状,节省充气压力所需的气体补充源和设备,这些结构将需要做在轨的固化处

收稿日期 2009-08-11.

基金项目:表面工程技术国家级重点实验室基金(9140C5404010804)、兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-02A)资助。

作者简介:王新伟(1967-),女,河南省新密市人,博士,副教授,从事复合材料和纳米功能材料研究。

理,这些处理技术可用于制造航天器的结构和功能部件^[1-2]。利用充气膨胀展开和刚化定型结构技术构建的空间结构具有发射体积小、发射质量轻、能够充分利用发射舱空间、研究和制造成本低等特点。总之,充气膨胀展开结构具有以下优异的性能:1)质量轻;2)承载体积小;3)易于制造;4)高的可靠性;5)尺寸稳定性好;6)行为可预见;7)动力学特性好;8)贮存期长;9)费用低。

充气膨胀展开结构目前可望应用在包括卫星天线和反射器、雷达阵列、太阳帆板展开结构以及其他飞行器结构单元等,在缓冲设备、居住舱、防护板以及保护飞船不受热、光或微流星/碎片的冲击等应用中也成为一种可行的选择。按照国外设计,这些结构的大小从几米到几百米不等。在各种轨道上释放膨胀展开结构并刚化处理后,可以持续运行几年而不用考虑微流星和碎片的冲击损坏、漏气或者其他轨道威胁如辐射或原子氧照射等。

当航天器释放展开膨胀结构达到所需的形状时就需要一种可控的、清洁的刚化技术来维持这些结构的形状,刚化技术是空间充气膨胀展开结构的一项关键技术。由于空间任务具有复杂性与多样性,对不同的任务都需要合适的展开方法和相应的刚化技术和刚化材料^[3-4]。目前,常用的刚化材料主要有:热固性复合材料、热塑性复合材料和铝箔/塑料薄膜叠层结构等。热固性复合材料包括:热固化热固性复合材料、紫外光固化复合材料、充气反应复合材料;热塑性复合材料包括:二级相转变和形状记忆聚合物复合材料、增塑剂或溶剂挥发固化复合材料、发泡硬化材料等。铝/聚合物层合板为薄壁结构,由铝和聚合物膜层合而成。

针对空间任务的复杂性和多样性对材料的要求,对空间充气展开结构的刚性化的基本要求是:1)真空环境下的固化;2)不能有不利物质释放;3)固化刚度要求比较低;4)能源及其要求;5)温度变化比较大。因此,在选择空间充气展开结构的刚性化材料时,要依照上述要求选择合适的刚化材料。

2 空间充气展开结构刚化材料及方法

在对可刚化材料进行选取和设计时,一般需要考虑以下要求:

(1)要有快速可预见的硬化过程。要防止在展开过程中材料发生硬化,造成展开失败。在展开或硬化过程中,结构的外形不能有皱褶、收缩、蠕变或不均匀固化等。能对硬化过程进行监控,并能证明固化完成。尽量在较宽的温度范围内进行硬化处理。在温度、湿度影响考虑在内的情况下,要有较长的贮存期。

(2)材料要具有高的比刚度和比强度以减轻结构质量,从结构折叠封装状态到展开状态,材料的性能没有明显的下降。由于热循环或受到辐射时材料的性能没有明显的下降,材料的热膨胀系数接近于零,以减少热变形和减轻隔热材料的质量。在展开及硬化过程中,要减少对航天器的能量需求。结构系统的复杂性也必须考虑。

(3)材料在硬化前后出气率要符合航天器使用的要求。

(4)飞行件能在地面进行试验验证。如有可能则硬化过程应为可逆过程。

(5)要保证加工过程简单可靠,并能进行有效的质量控制,生产成本低。

针对上述使用要求,在以前研究过的充气膨胀结构刚化技术方法包括:1)使用催化剂和内嵌式电阻线的加热固化;2)利用内含催化剂的充气气体引发固化反应;3)环氧树脂和固化剂混在一起的太空挤拉成型;4)自由基光活化系统;5)在玻璃化转化温度以下固化;6)溶剂或水从诸如明胶和其他软聚合物中挥发等。

虽然这些技术为膨胀展开结构刚化提供了许多新方法,但它们也存在一些缺点。这些问题和缺点包括:1)消耗巨大的能量(热固化系统);2)毒性和化学腐蚀(充气气体催化剂,象三氟化硼);3)复杂的控制操作(挤拉成型);4)地面稳定性差(自由基系统);5)复杂的机械效应(弹性体/纤维);6)化学刚化可控性差(自由基固化);7)温度依赖性和需热调节(玻璃转变型);8)大量出气/长的刚化时间(溶剂和凝胶系统)。

因此,目前仍需要研究和开发新的可控、干净的刚化技术在空间充气结构达到所需要的形状后对其进行刚化,可控刚化(Rigidization On Command-ROC)技术就是比较适合的一种方法。与以上刚化技术相比可控刚化技术具有明显的优势:应用可控刚化技术的空间充气展开结构仅需要足量的充气气体用于展开和适当剂量的紫外光辐射,并能按指令适时地进行固化,操作简单、适于全自动流程,无污染、不含挥发性有机溶剂,贮

存时间长,经辐射固化后的产品具有高质量的性能,能满足多项任务的需要^[5]。可控刚化(ROC)技术的核心是紫外光固化复合材料的刚化技术。

3 可控刚化(ROC)技术

3.1 可控刚化基本概念

由于过去研究的刚化技术遇到了前述的困难和问题,需用一种独特的技术来解决这些问题和降低风险。可控刚化技术是一种适合在空间复杂环境中应用的刚化技术,此技术可靠性高、可控、清洁。此技术是用光固化环氧树脂纤维复合材料^[6]。这些独特的材料为空间充气膨胀薄膜展开结构提供了相当多的益处,包括:1)高的固化强度;2)无限期的储存期;3)低的出气和无溶剂混合物;4)需要时精确固化;5)无温度依赖性;6)无复杂的“弹性体/织物效应”;7)可预见性且使用方便。

紫外光固化复合材料的一个重要优点,是可以利用太阳的紫外光固化复合材料,因此能简化系统设计,减少或消除对空间飞行器的能量要求。然而这种方法也有它的缺点,如缺乏对过程的控制,在太阳阴影区会产生固化不均匀的现象等。与太阳光辐照固化相比,内部辐照能提供最优化的控制,以解决上述问题,但要求应用多层隔热膜在其外部对结构提供保温,这增加了系统结构的复杂性。

用ROC树脂构建的空间膨胀展开结构系统仅需要足够的充气气体而且仅当需要时才会用紫外光固化。所需要的紫外光强度低,由低功耗的灯提供,大大节约了空间紧张的能源供应。

3.2 光固化环氧树脂

光固化环氧树脂纤维复合材料是由光固化环氧树脂、光引发剂、光敏剂、玻璃/石英纤维复合而成。环氧树脂是一类品种繁多、不断发展的合成树脂。环氧树脂未固化前是热塑性线性结构,不能直接应用。必须加入第二组分,在一定温度条件下发生交联固化反应,才能生成可供使用的体型网状结构的高聚物。在此系统中,环氧树脂固化是和另外的化合物反应(这种化合物不准确的被称为“催化剂”而实际上是固化剂)。过去传统的固化剂通常是高分子胺或有机酸酐。然而环氧树脂化合物也在一个被称作“均聚反应”的过程中和它们自身反应。环氧树脂通过离子型聚合反应固化所加的是催化性固化剂,它们仅仅起固化反应的催化作用,引发树脂分子中环氧基的开环聚合反应。“活性聚合物”这个术语意味着一旦反应开始,它就一直持续到所有的环氧树脂被消耗掉从而树脂完全达到固化。

这个化学反应需要少量(0.5%到2.0%)的催化剂来引发反应(产生一个氧鎓离子)。有许多种催化剂用于这个目的(典型的有双氰胺或三氟化硼 MEA 混合物)。这些催化剂可以和环氧树脂混合形成“一部分”混合物,在室温下具有一定的稳定性。这些混合物仍需要用热(大于100℃)来固化。可是,在室温储存通常不能超过6个月。

在商业上,已提供了一种相对新的催化剂体系,它们就是阳离子光引发剂。这些化合物被掺入的水平大约为1%~3%,在室温时将其暴露在柔和的紫外光下就可引发环氧树脂的固化(均聚反应)。阳离子光引发剂通常是化合物,如:三芳基鎓盐、四芳基碘鎓盐和二芳基碘鎓盐,(其中阳离子为六氟磷酸盐或六氟锑酸盐)。在这些体系中,有很多受保护的阴离子。它们在室温下是稳定的,在绝大多数环氧树脂中易溶,对室内的光线不敏感,只有暴露在紫外光下才会使树脂固化,有较长的贮存期,会引发一种活性聚合物固化以致全部环氧树脂得到固化。这就为空间充气膨胀展开结构这个家族提供了“可控固化”技术,因此可以应用此技术对空间展开结构固化并按要求固化。

紫外光阳离子固化树脂体系配方是在低温和充气膨胀管的可操作的需要推动下发展起来的。在配方中可加入促进剂(加速剂)来帮助低温固化。对不同配方的固化反应用示差扫描量热仪DSC来评价。在使用促进剂时,促进剂系统在加入光引发剂之前全部溶解在环氧树脂中。一旦加入光引发剂,就要保护树脂免受外界光的照射直到使用的时候。

3.3 光引发剂

紫外光固化技术主要分自由基光固化和阳离子光固化2种机理。目前,自由基固化应用最广泛,它具有干燥快、性能易于调节、膜表面性能优异等优点。但自由基固化存在固化深度浅、氧阻聚、附着力差、收缩严重

等问题。阳离子光固化是上世纪 70 年代末才发展起来的新型固化技术。与自由基光固化相比,该体系固化过程具有不受氧阻聚影响、固化体积收缩率小、对基材附着力强、固化反应不易中止、适用于厚膜的光固化等的优点^[7,8]。截至目前,世界各国正在积极开发阳离子光固化体系,近年来取得了很多成果。

在紫外光阳离子固化体系中,引发剂可分为小分子引发剂和大分子引发剂。小分子引发剂最先开发并商品化的紫外光阳离子引发剂是芳香重氮盐体系^[9],但芳香重氮盐热稳定性差、光解过程有气体产生。目前,阳离子聚合光引发剂中以二芳基碘鎓盐和三芳基硫鎓盐应用最多、最广泛。二芳基碘鎓盐是一种高效阳离子光聚合和固化的光引发剂,G.E.公司的 J.V.Crivello 于 1976 年首先进行了报道^[10]。该引发剂具有良好的感光性、稳定性和光引发活性。吸收波长一般在 200~400 nm 范围内。它克服了芳香重氮盐的缺点,具有较好的热稳定性,光解时也无气体产生,比较容易合成,因此迅速发展并且大量商品化。由于硫鎓盐在对紫外光的吸收波长、热稳定性、引发活性等方面较之碘鎓盐优越,故其得到了更多的发展,Crivello 等在这些方面做了相当多的工作。研究发现,应用最广泛、性能最好的阳离子光引发剂是硫鎓盐类光引发剂。三芳基硫鎓盐作为阳离子光引发剂,引发速度虽然没有二芳基碘鎓盐快,但热稳定性却远远优越于二芳基碘鎓盐,且合成容易,不仅反应简单,合成产率也很高,同时具有优良的光引发性能。三芳基硫鎓盐()与非亲核性阴离子 MtX_n -组合作为阳离子光引发剂很理想,其光引发机理与二芳基碘鎓盐相似。三芳基硫鎓盐()也是很优秀的阳离子光引发剂,但其合成的费用却太高,使得其应用受到了一定限制。

最早比较成功地应用阳离子光引发聚合的是光引发环氧聚合在金属涂覆上的应用^[11]。通用电子公司最早把紫外光引发聚合用于产品组装,并成功实现工业化。接下来,在鎓盐类引发剂被发现后的二三十年间,阳离子光引发聚合的应用扩展到许多不同的领域,其中包括涂料、油墨印刷、压敏胶、光敏胶、金属装饰、器件组装和复合材料等^[12]。

光引发剂体系是感光性高分子不可缺少的重要组分,我国在这一方面的研究刚刚开始,还未进入工业化生产。光固化涂料的迅速发展,已经在许多领域替代了传统涂料,而对光引发剂的研究进展如何,决定着涂料的各种性能。随着研究的不断深入,各类新型的引发剂将会不断被发掘,光固化涂料的性能也会不断得到提高。

应该特别注意的是,除了光引发剂,对于独特的空间结构和在轨环境遇到的固化条件也需要加入其他的物质来调整 ROC 树脂系统的固化和储存/处理的行为。这些物质包括:光敏剂来提高光吸收,促进剂(加速剂)提高在低温的固化动力学和高分子重量系统或填料来控制黏度。

3.4 实验研究

Adherent Technology, Inc 的技术人员提出了可控刚化的概念,且以在空间充气膨胀展开结构中的支撑管作为研究焦点,运用光固化树脂技术和 ILC Dover 公司合作制造了示范支撑管^[3],见图 1。这种复合材料的基体采用环氧树脂,增强材料采用碳纤维或碳纤维/玻璃纤维的混合物。

在这种结构中,他们选择使用小汞灯(管式灯)。这些灯很小(所选的灯长约 11.9 cm),以便于装入充气膨胀结构。这些灯功耗小,价格也不贵。它们发射出的紫外光波长一般在 254 nm,也有 313、365、405、436 和 546 nm 的。绝大多数光引发剂的吸收光谱与上述波长的紫外光至少部分重叠,汞灯发出的紫外光为引发所需要的阳离子环氧树脂发生聚合反应提供必不可少的激发能量。灯主要用来引发复合构件固化和发出很少的热以增加(提高)外部环境热量来保证在整个轨道期间保持管的温度高于-30℃。

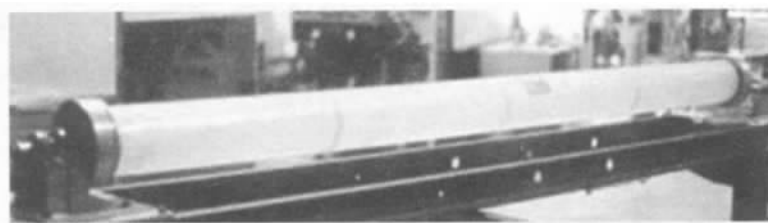


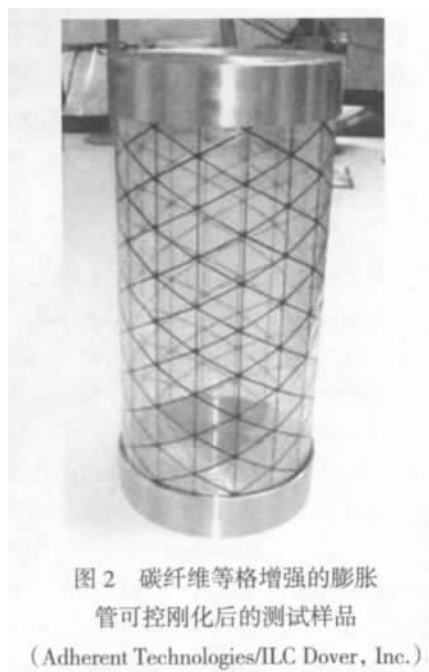
图 1 紫外光固化管件(Adherent Technologies/ILC Dover, Inc.)

选择二芳基碘盐(DPI-1)对含有这种引发剂的树脂体系进行了评价。固化的程度可以通过监控固化 DSC 放热曲线来控制并和观察到的样品比较。光敏剂混合物确实能提高 UV 引发环氧树脂系统的聚合速度。促进

剂(加速剂)的添加使聚合速率也得到了提高。

结果显示,UV 固化树脂配方有典型的纯环氧树脂的性能,它们能转化成好的复合材料性能。单一的复合材料的性能很低,因为层板富含树脂。在实际的膨胀展开结构中控制好树脂的含量将得到高刚度的复合管,利用此技术制得的复合材料的刚度已超过了大部分膨胀展开结构的需要。结构分析显示,玻璃纤维增强的壁厚为 0.013~0.038 cm 的管的机械性能适合膨胀展开空间飞行器。在树脂浸润之前编织玻璃布滑过金属管芯然后固化限定成管形,制备出剖面为圆的和环形的有高聚物膜的管。他们利用 Adherent Technology 有限公司的固化技术进行固化,制造的示范管的力学性能超过了大部分膨胀展开结构的需要。这种材料在低温(10℃)下就能被太阳光固化。他们对固化的程度和材料的力学性能进行了测试,结果显示固化程度达到 99%,并且同热固化管相比具有相同的最大折断载荷。

Adherent Technologies 公司和 ILC Dover 公司的技术人员利用可控刚化技术研制了碳纤维等格增强的紫外线固化膨胀充气管^[13],见图 2。利用 ROC 概念使用环氧基树脂的阳离子光固化技术,应用 ROC 的专用树脂、二苯基碘鎓盐为主要的紫外光阳离子引发剂,加入光敏剂,用碳纤维作增强材料,采用湿法缠绕技术制备了一根独立环绕管。利用 ROC 概念固化得到的管的固化度高,能达到满意的折叠效果,展开精度高,碳纤维增强的紫外光固化膨胀充气管机械性能和热固化管的性能相当。



3.5 国内外研究现状

紫外光固化复合材料是由基体树脂(如环氧或聚酯)和增强纤维组成,由太阳或结构内部能源提供的紫外线能量(通常波长在 250~380 nm)来引发和维持其基体树脂刚化过程。因此,可通过改变材料厚度、光源波长等来赋予结构设计的灵活性。固化时间由所用树脂材料本身性能、光引发剂和紫外线能量大小等因素共同决定,可以从几分钟到几小时。由于要求增强体必须对紫外线透明,因而增强纤维仅限于玻璃纤维与石英纤维,因此复合材料不能表现出高性能纤维(如石墨纤维和 PBO 纤维)增强复合材料所具有的力学性能。但可以通过设计改性(编织方法、应用杂化增强材料、光导纤维等)、应用高性能纤维来提高结构性能^[14]。

早期研究紫外光引发固化技术针对的大部分都是聚酯玻璃纤维复合材料结构。这些研究主要是美国 Hughes 飞行器公司(Hughes Aircraft Co.)引导、美国空军(USAF)飞行器推进实验室赞助的,研究促进了可充气太阳能收集器和集中器的发展。近期在进行研究的有 Rensselaer Polytechnic Institution(RPI),Thiokol Corporation 和 Adherent Technologies Inc。

阳离子光固化是上世纪 70 年代末才发展起来的新型固化技术。截至目前,世界各国正在积极开发阳离子光固化体系,对它的研究已成为热点,近年来取得了很多成果。在我国,由于阳离子光引发剂价格较昂贵,国内生产阳离子光引发剂的厂家很少,对阳离子光引发树脂固化的研究工作还处于起步阶段。国内很多高校和研究所已开始开展了阳离子光引发剂的合成和引发性能研究^[15~20]。孙凯等^[5]用预热固化技术对紫外光固化复合材料制备的充气展开器件进行了研究,刘宇艳等^[21]对可充气展开结构的热固性复合材料耐折叠性能进行了研究。目前,国内针对空间充气膨胀展开结构的可控刚化技术研究还很少,还需要研究在特定的空间条件下的紫外光阳离子光固化过程和复合材料的综合性能,研究空间辐射环境对复合材料性能的影响^[22]。

总之,利用可控刚化技术有许多优点:在未固化时,树脂热稳定性好,有无限期的存储寿命;固化后的树脂显示,与热固化环氧树脂有相同的机械性能;在固化时和固化后出气率较低,能均匀固化。此技术为空间可膨胀展开结构提供了一种急需的刚化技术,能满足多项任务的需要。

4 结束语

材料刚化技术是空间充气膨胀展开结构得以应用的关键技术。可控刚化技术可以用在大型空间膨胀展

开结构中,其可靠性高,固化后复合材料的性能很好,能满足多项任务的需要。此技术将为空间膨胀展开结构提供一种可行的刚化技术,为我国空间应用的大型充气膨胀结构的工程应用提供技术支撑。随着紫外光阳离子固化技术的发展,此技术在不久的将来,在商业、军事和航空领域里的应用将得到快速发展。

参考文献:

- [1] FREELAND R E, BILYEU G D, VEAL G R, *et al*. Inflatable deployable space structures technology summary [A]. Proceedings of the 49th International Astronautical Congress [C]. Melbourne: International Astronautical Federation, 1998. 1~10.
- [2] DAROOKA D K, JENSEN D W. Advanced space structure concepts and their development [A]. Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference [C]. Seattle: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001. 1~10.
- [3] DAVID P C, STEPHEN S, FREDERIC D E. Rigidizable Materials for use in Gossamer Space Inflatable Structures[R]. AIAA-2001-1417.
- [4] 刘宇艳, 孟秋影, 谭惠丰, 等. 空间充气展开结构用刚化材料和刚化技术的研究现状[J]. 材料工程, 2008, 2: 76~80.
- [5] 孙凯, 杨光, 黄鹏程. 用紫外光固化复合材料制备充气展开器件的研究[J]. 宇航材料工艺, 2003, 6: 25~29.
- [6] RONALD A, LARRY H, ANDREA H, *et al*. Inflatable Spacecraft using "Rigidization-on-Command Concept" American Institute of Aeronautics and Astronautics[R]. AIAA-2000-1637.
- [7] 聂俊, 何勇, 孙梦洲. 紫外阳离子光固化研究进展[J]. 涂料技术与文摘, 2007, 28(10): 1~4.
- [8] 吴宗南, 刘红波. 紫外光固化涂料的研究进展[J]. 广东化工, 2009, 2: 52~55.
- [9] CRIVELLO, J V, YOUNG S. The Synthesis and Cationic Photopolymerization of Monomers. Based on Dicyclopentadiene [J]. J Polym Sci, Part A: Polym Chem, 1999, (37): 3427~3440.
- [10] CRIVELLO J V. The discovery and development of onium salt cationic photoinitiators [J]. J Polym Sci, Part A: Polym Chem 1999, 37(23): 4241-4254.
- [11] BOULTER E A, SQUILLACIOTI L P, PETERS G B, *et al*. Proc IEEE International Symposium on Electrical Insulation Boston, MA, 1980, 9.
- [12] 孟庆飞, 华明杨. 紫外光固化涂料的研究进展[J]. 安徽化工, 2002, 4: 17~18.
- [13] RONALD E A, ANDREA E H, PAUL M M, STEPHEN S and DAVID P C. UV Rigidizable carbon-reinforced isogrid inflatable booms[R]. AIAA-2002-1202.
- [14] 沈祖炜, 唐明章. 空间结构展开与刚化[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26, 4: 56~64.
- [15] 彭长征, 余万能, 屈秀宁, 等. 二芳基碘鎓六氟锑酸盐引发环氧树脂阳离子光固化的研究[J]. 功能高分子学报, 1996, 9(2): 209~216.
- [16] 彭长征, 余湘平, 余万能. 三芳基硫鎓六氟锑酸盐引发环氧树脂阳离子光固化的研究 [J]. 功能高分子学报, 1997, 10(3): 393~398.
- [17] 王文志, 余万能. 光氧化还原碘鎓盐引发阳离子固化的研究[J]. 功能高分子学报, 1997, 10(4): 503~507.
- [18] 杨光, 邢涛, 初增泽, 等. 不同官能度环氧树脂的阳离子光固化研究[J]. 热固性树脂, 2003, 18(3): 4~6.
- [19] 杨光, 邢涛, 黄鹏程. 双酚 A 型环氧树脂的阳离子光固化体系的研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 3: 25~27.
- [20] 杨光, 唐卓. 紫外光辐射固化共混改性环氧树脂复合材料得力学和热老化性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(8): 78~81.
- [21] 刘宇艳, 朱琦, 万志敏, 等. 用于可充气展开结构的热固性复合材料耐折叠性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2005, 3: 31~37.
- [22] 高欣, 杨生胜, 牛小乐, 等. 空间辐射环境与测量[J]. 真空与低温, 2007, 13(1): 41~47.