73rd 国际宇航大会（IAC），巴黎，法国，2022年9月18日至22日。版权所有 ©2022 国际宇航联合会（IAF）。保留所有权利。

IAC-22-C2.6.x68465

航天器用可浇注可销毁宇宙射线辐射屏蔽层

Jarred C Novak

物理系，威奇塔州立大学，美国堪萨斯州威奇塔市费尔芒特街*1845*号，邮编*67212*，*jcnovak@shockers.wichita.edu*

摘要

历史上，铅、钨和铁等材料一直被用于航天器中，以保护科学探测器免受宇宙射线的影响。当无需考虑再入地球时，这些材料的效果很好。通常的策略是让航天器受控下降；或者由于美国国家航空航天局要求所有撞击部件的撞击能量不得超过15焦耳，因此尽可能少使用屏蔽材料，甚至完全不使用。鉴于该任务的性质，受控下降和不使用屏蔽材料这两种方案都不可行。这正是威奇塔州立大学（WSU）nuSOL（中微子太阳轨道实验室）团队为其3U立方体卫星演示器所面临的问题。

该立方体卫星将配备科学设备，用于探测太阳中微子；来自宇宙射线的背景噪声越低，研究效果就越好。通过仿真、密度测试和燃烧测试，WSU成功开发出一种环氧树脂基屏蔽层，其中掺杂了铁粉或钨粉。研究人员使用Geant4（几何与跟踪）进行仿真，将能量从1MeV逐步提高，向屏蔽材料发射电子、质子、α粒子以及氧原子核和铁原子核，直至达到一致的失效率。这些仿真的标准范围是密度为1.15g/cm^3 的基础环氧树脂至密度为8g/cm^3 的实心钢。混合测试表明，铁基材料可达到4g/cm^3 的密度，其中铁按体积计占53%。密度为7.5g/cm^3 的钨基环氧树脂更容易制备，其中钨按体积计占40%。这些配比形成的材料质地类似混凝土，可浇注且均匀。

With the data collected, several prototypes of varying densities were made by pouring the mixture into molds. The results indicate that the 4g/cm^3 iron doped epoxy does not have a 90% punch-through until 40MeV for electrons and 74MeV for protons. The tungsten fared better at 1GeV and 90MeV respectively, with the proton never exceeding 94% punch-through at 1GeV. The steel 90% fail are 250MeV for electron and 125MeV for proton. Due to the current requirements of the mission, the densities of iron 4g/cm^3 and tungsten 7.5g/cm^3 have been determined to be the best fit for the nuSOL project. Both materials have been tested to determine if they burn upon re-entry and neither shield survived past 425°C. A vibration test is planned to ensure survival of launch along with a test to measure the science package and shielding capabilities for accelerator particles to ensure efficiency.

Keywords: (maximum 6 keywords) Radiation Shield, Materials, Spacecraft, Destroyable, Re-entry

Acronyms/Abbreviations
Wichita State University (WSU)
Neutrino Solar Orbiting Laboratory (nuSOL)
National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Geometry and Tracking (Geant4)
Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)
Computer Aided Design (CAD)

1. Introduction

nuSOL项目正在开发一款太空探测器，计划将其送入太阳附近的日心轨道以探测中微子 [1]。与所有新实验一样，实验团队有责任确认这些创新技术能够正常运作。实现这一目标的一种方法是对设备进行试飞。nuSOL团队已证明这些技术在地球上可行，因此下一步是执行一次太空测试任务。具体做法是将中微子探测器装入一颗3U立方体卫星，送入太空并使其绕地球轨道运行约2年，以确保它能够收集数据准确且高效 [2]。为确保这一点，需要一个辐射屏蔽罩，尽可能阻挡宇宙射线，以降低探测器上的背景噪声。

1.1 Major Requirements

这项测试任务面临的主要障碍包括如何保护设备免受高能粒子的影响，并确保满足美国国家航空航天局的要求。虽然这些问题并不新鲜，但屏蔽罩设计和材料所采用的流程与方法却是全新的。起初，WSU团队认为，采用实心铁制屏蔽层是实现这一目标的最佳方式。铁的密度为7.874克/厘米^3，初始熔化温度为1538 °C。唯一的问题是，任何被送入地球轨道的物体，都必须能够在探测器返回地球时于大气层中烧毁。平均再入温度为1871 °C，虽然这一温度高于铁的初始熔化温度，但还需要考虑物体的尺寸和速度等其他因素。鉴于3U立方体卫星的尺寸以及需要将

f

Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

铁屏蔽层的厚度保持在不低于1.5厘米以实现有效屏蔽，因此确定实心铁制屏蔽层在再入时不会完全熔化。此外还确定，铁制屏蔽层以超过15焦耳的能量坠落到地球的概率很高。由于该航天器没有再入发动机或用于控制下降的控制系统，因此需要采用其他类型的屏蔽材料。在评估了不同类型的材料后，最终确定，以钨或铁掺杂的环氧树脂基屏蔽罩最适合这项任务。

1.2 Shield Attachment

Not only was the material and shield design new, but also the way the shield interfaces and attaches to the CubeSat needed to be an innovative design. This process has many moving parts given that multiple organizations make up the nuSOL team and are responsible for individual components. These organizations include WSU, NASA's Jet Propulsion Laboratory and Marshall Space Flight Center, and Nanoavionics. It is the responsibility WSU to design the shield, the shield attachment system, and to incorporate all other components to fit within the 3U CubeSat made by Nanoavionics. The main driving force behind the complete CubeSat design is for WSU to have the ability to attach the shield in a manner compliant with all other mechanical and science packages while keeping the integrity and efficiency of the CubeSat mission. With an innovative design the nuSOL team at WSU believes this has been accomplished, but further tests including a vibration test, G-force test, and stress/strain test are scheduled to confirm this. Also, high energy particle test will be conducted to test the science package and shield efficiency at Fermi National Laboratory and is scheduled for January 2023.

2. Materials

这项立方体卫星任务所使用的材料是一个需要尽早解决的关键障碍。nuSOL团队为中微子探测研制了新的科学载荷，但与大多数实验一样，必须完成一项测试任务，以确保能够实现预期的科学目标。立方体卫星飞行是最终卫星任务的测试，该最终任务将朝向太阳飞行。与前往太阳的任务不同，后者将配备大规模屏蔽，并且不会返回地球；立方体卫星则不具备这样的条件。因此，项目团队需要设计一种在满足NASA指南关于航天器返回要求的同时保护探测器的方法。这促使WSU团队设计并创造了一种创新方法，用于屏蔽科学载荷免受辐射影响。

2.1 Shield Material

对于这个项目，我们需要一种耐用、可塑形且易于粘附的材料。显而易见的选择是使用聚酯树脂。最终决定使用3M 2216半透明环氧胶黏树脂。这种树脂具有极强的材料韧性，因此常用于普通机械连接件无法满足要求或已经损坏的设备中。我们为科学载荷采用的设计包含专用且易损的设备和电子设备（图1），因此树脂的耐用性和柔韧性成为设计的主要考量。

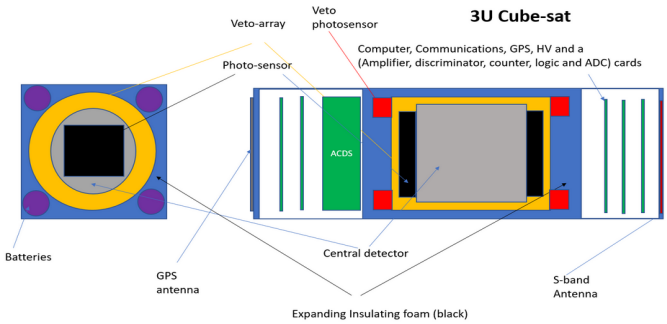


Figure 1: Block diagram of science package and electronics [2]

This is a two-part resin that consist of a base and accelerator that we were able to mix in the iron or tungsten filler and with the help of a 3D mold, create the desired shape of a shield prototype. It also helped that the resin has a relatively long work life at 120 minutes. Other material properties that went into determining this resin was the overlap shear test which at lower temperatures was 3000 psi and the shear modulus which ranged from 342Mpa to 2745Mpa when tested at a range of temperatures with the lower end being at higher temperatures, and viscosity of 5000-9000CPS [2]. These properties are important due to the temperatures the CubeSat will encounter in space and with the shielding having to be attached to a metal frame for the ejection out of a rocket to enter orbit and for pourability respectfully.

2.1.1 iron and tungsten

在初步研究中，使用铁填料来确定可达到的最大密度和配比。最初选择铁，是因为实心钢通常用作辐射屏蔽罩，而且铁在受到辐射照射后不会活化，因此看起来是很有前景的候选材料。通过第 3 节所述的实验过程，研究确定可达到 4/cm^3 的密度，且铁占体积的 53%。这一成果对 nuSOL项目而言具有开创性，并证实在立方体卫星任务期间实现一定程度的辐射防护是可行的。虽然

Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

铁掺杂环氧树脂显著提高了辐射防护能力，但辐射屏蔽罩设计的最初目标是尽可能接近钢的8g/cm^{3}密度，因此仍有很大的改进空间。

After some deliberation, it was decided that tungsten filler should also be studied. With tungsten having a higher density than iron, the ability to create a doped epoxy with similar densities to steel seemed more achievable. This turned out to be true, with samples and prototypes ranging from 3.5g/cm^3 to 7.5g/cm^3 and a volume ratio of 10% to 40% tungsten. The limitations of a tungsten doped epoxy shield were confined to the payload weight, rather that the structural integrity of the shield itself. The only downfall to using tungsten filler is that after a period of approximately 2 years the metal will become activated with constant radiation exposure. Given that the nuSOL CubeSat mission will collect data and orbit less than this mark it makes a great shield and performs not only better than the iron doped epoxy, but also the solid steel in blocking Cosmic Ray radiation.

2.2 屏蔽层连接

最后需要设计的是一种将钨掺杂环氧树脂屏蔽罩连接到 Nanoavionics 提供的立方体卫星平台上的方法。第3.3节将进一步介绍该设计，但所用材料需要兼具轻质和结构强度。这是为了确保屏蔽罩在发射操作期间的移动最小，同时使有效载荷重量保持在8 kg的限制以内。基于这些原因，连接组件的大部分采用航空结构用2024铝合金。与钢制同类部件相比，它重量更轻，并且仍可在 WSU 按照定制设计进行加工。组件的另一部分是钢制轴键，以确保屏蔽罩与立方体卫星平台之间几乎不存在间隙。

3. 方法

本研究采用了多种方法来确定屏蔽的有效性，以及其能否便于制造。对于立方体卫星，我们需要阻挡50 MeV范围内的大多数高能粒子。这并不意味着低于该能级的所有粒子都会被阻挡，但为了使探测器正常工作并获得最精确的数据，绝大多数粒子都不能进入设备。为此，我们在不同密度和能级下进行了仿真。为了确保能够在现实中达到相应的密度，我们需要设计并开展实验测试。这些测试包括研究能够实现的混合比例、用于确保密度均匀的高度测试，以及最终的原型制作。这样做不仅是为了确认我们能够制造出这种屏蔽罩，也是为了了解制造工艺，并制定一种能够以高精度重新制造这种屏蔽罩的方法。

3.1 仿真

WSU 团队研究了如何正确构建立方体卫星屏蔽层，该项工作于2021年夏季完成。为确定铁和钨掺杂环氧树脂的有效性，这一过程的初始步骤是使用 Geant4 进行仿真。Geant4 是一个用于粒子物理模拟的 C++ 扩展库。这些仿真包括将电子、质子、α粒子以及氧原子核和铁原子核射向厚度为1.5 cm的掺杂环氧树脂，能级范围从1 MeV开始，直至达到稳定的失效率。如果粒子穿透屏蔽罩，即粒子或粒子簇射在屏蔽罩之外的体积中沉积了任何能量，则将该事件视为失败（图2）。我们关注的数据是在这些能级下穿过屏蔽罩的粒子百分比。我们使用钢板和未掺杂环氧树脂作为参考标准，然后将掺杂环氧树脂的密度分别调整为铁掺杂环氧树脂的1 g/cm^3 至5 g/cm^3，以及钨掺杂环氧树脂的3.5 g/cm^3 至7.5 g/cm^3。这些仿真的结果将在第4.1节中讨论。

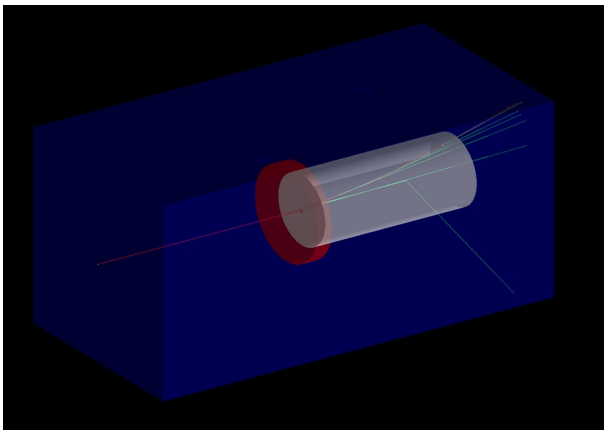


Figure 2: Geant4 simulation model of iron doped epoxy, red is 1.5cm iron shield, white is a plastic volume to capture energy and to serve as an indicator in punch-through events.

3.2 Experimental

本研究的第二部分旨在了解我们制造屏蔽罩原型的能力，确保其不仅满足美国国家航空航天局的再入要求，还能达到仿真中提出的密度。为此，我们开展了一系列实验，以确保制造工艺的一致性和可重复性。由于钨填料成本较高，这些初始测试仅使用了铁填料；随后，我们分别使用这两种材料制造原型，以

Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

确定这些方法是否具有可重复性，并达到相同的精度水平。

3.2.1 Mixing Ratio

To start we made small rectangular samples of both the base epoxy and iron doped epoxy to analyze. Calculations were made based on weight to ensure we were getting the correct epoxy to iron ratio that would result in the correct density desired. The epoxy is a two part resin that is mixed to equal amounts. For this test the total weight of epoxy was 10g to test the ease of mixing of the iron filler and to test the pouring capabilities. These samples were mixed in small cylindrical plastic containers that were cut away after full cure. The iron filler was added based on mass to give a ratio of parts iron/1 part epoxy. The cure time for the epoxy is 7 day work and 30 day full hardened, so to speed up this process the samples were placed with in a heating closet at a temperature of approximately 110°F. Once the samples were created, hardened, and cut into rectangular samples (Figure 3), we calculated the density by using a water displacement test using a graduated cylinder.

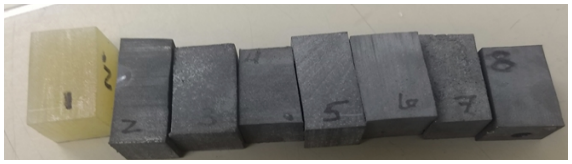


Figure 3: Picture of small iron doped epoxy samples increasing in densities with 1 being base epoxy and 8 being the highest density .

3.2.2 Height Density

我们接下来研究的是铁掺杂环氧树脂的密度如何随高度变化。为此，我们按照约 1:4、1:4.5 和 1:5.5 的目标比例，分别制备了三种不同密度的铁掺杂环氧树脂，然后将其装入量筒。接着，我们将掺杂后的环氧树脂切成小段，并按顺序编号（1 代表量筒底部），再对每一段单独进行测试（图4）。这些测试结果将在第 4.2.2 节讨论，但结果表明，预期结果与实验结果存在显著差异。我们认为，密度差异是由铁掺杂环氧树脂中存在气泡造成的。



图*4*：分段量筒测试照片（上排—*1:3.765* 比例，中排—*1:4.619* 比例，下排—*1:5.425* 比例）

3.2.3 Prototypes

在密度研究的最后阶段，我们制作了多个原型屏蔽体。最初的3个屏蔽罩原型均采用环氧树脂与铁按1:8的比例配制，主要区别仅在于填充模具的方法和模具本身的材料。这样做是为了确保我们掌握制造过程以及获得精确结果所需的技术。第一个原型中，我们在金属容器内混合铁掺杂环氧树脂，然后将其倒入薄壁圆柱形PETG模具中。正如预期，由于形成了气泡，密度低于计算值。由于铁掺杂环氧树脂黏附在PETG上，脱模十分困难。制作第二个原型时，我们在玻璃容器中用手压实铁掺杂环氧树脂，以尽量减少气穴。这个屏蔽罩中的气泡比第一个少，但从容器中取出后仍清晰可见。脱模同样很困难，因此需要通过机加工将屏蔽罩取出。第三个屏蔽原型使用三维模具（图5）制作，希望能更容易脱模。在浇注铁掺杂环氧树脂的过程中，我们先将模具填至三分之一，然后用模具的阴模将其压实，再使用真空腔排出气泡。重复这一步骤三次，直到模具填满；施加低真空，直至环氧树脂到达模具顶部，随后迅速释放压力，使每次填充时都发生压缩。这种方法显著减少了气泡数量。我们从三个屏蔽罩中各取一小部分，按照先前测试的方法检查密度是否受重力影响；结果表明，所有原型均符合这一规律。

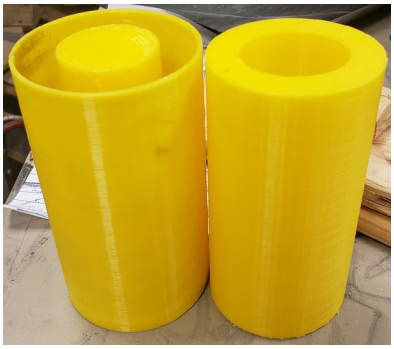


Figure 5: 3D printed shield prototype mold and negative

Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

铁掺杂环氧树脂屏蔽罩取得成功后，WSU团队有信心使用钨填料测试这一工艺。我们制作了尺寸和规格合适的3D打印模具，并重复采用低真空技术。由于达到相同密度所需的填料较少，制作这个原型也更容易。不过，尝试从塑料打印模具中取出硬化的屏蔽罩时，仍然遇到了问题。于是，WSU团队开始寻找一种新材料，以便轻松完成脱模。团队选择使用硅基模具，它不仅便于我们轻松取出屏蔽罩，还可重复使用。最终的模具（图6和图7）采用这种材料制作，不仅包含屏蔽罩的精确参数，还包括屏蔽罩连接组件的部分结构，具体内容见第3.3节。

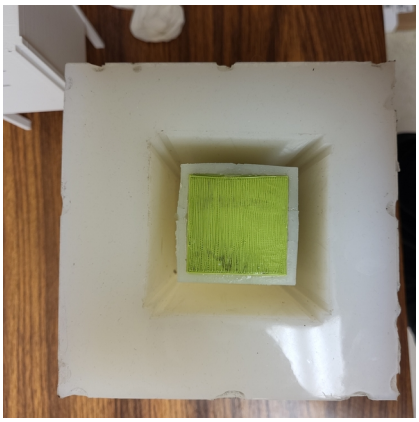


Figure 6: Silicone shield mold with assembly attachment components

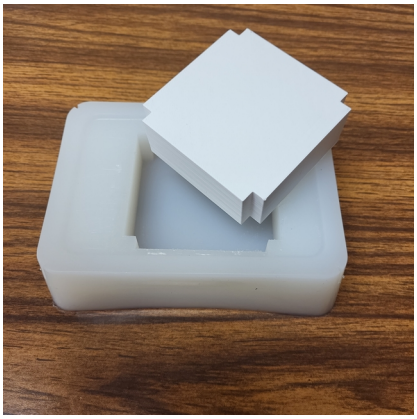


Figure 7: Silicone shield end-cap mold

3.3 Computer Aided Design and Shield Attachment Assembly

屏蔽罩完成设计、测试和制造后，还需要一种将其连接到立方体卫星平台上的方式。为此，制作了屏蔽罩及连接组件的CAD模型（图8），以确保其能够稳固地安装在立方体卫星平台内（图9）。该设计由三个主要部件组成：角支架、轴键和金属板。角支架采用定制设计，可直接连接到屏蔽罩本体上。具体做法是将支架嵌入硅胶模具中，然后浇注掺杂环氧树脂，使材料之间形成牢固的结合。金属板安装在两侧，并通过攻丝孔直接连接到立方体卫星平台。该制造设计旨在减轻重量，同时确保结构牢固。通过这种方式，金属板能够限制移动，并为屏蔽罩提供横向强度。为防止轴向移动并固定屏蔽罩，在角支架和金属板之间加装轴键。其中两个轴键将通过一层环氧树脂连接，另外四个轴键将通过攻丝螺栓固定。钨掺杂环氧树脂屏蔽罩及连接组件的最终制造于2022年9月开始，并将于2022年12月完成；完整的立方体卫星建造工作将于2023年秋季完成。

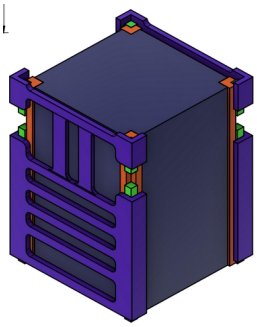


Figure 8: Isometric Shield Attachment CAD Model

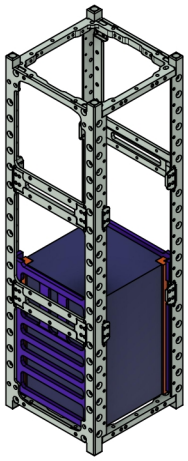


Figure 9: Isometric CubeSat and Shield CAD Model

4. 结果与讨论

通过认识到保护科学载荷免受宇宙射线影响的必要性，nuSOL团队得以模拟、设计并测试一种新型创新辐射屏蔽罩。本研究结果表明，有效的屏蔽罩是可以实现的，这不仅推动了nuSOL项目的科学研究，也将惠及未来的项目。

4.1 模拟结果

在研究的这一阶段，WSU团队分别进行了仿真。第一项仿真是用能量范围为 1MeV 至 1GeV 的电子和质子轰击屏蔽罩。该屏蔽罩厚 1.5cm，由密度为 2g/cm^3 至 5g/cm^3 的铁掺杂环氧树脂，或密度为 3.5g/cm^3 至 7.5g/cm^3 的钨掺杂环氧树脂构成。这项仿真旨在确定掺杂环氧树脂的特性，并分析其相较于基剂环氧树脂和实心钢的辐射屏蔽能力。在模拟的最低密度下，铁掺杂环氧树脂能够完全阻止 6MeV 电子和 52MeV 质子。在这一密度下，电子和质子的穿透率达到 90% 的能量分别为 14MeV 和 54MeV。铁掺杂的上限密度能够完全阻止能量为 12MeV 的电子和 94MeV 的质子；当电子能量为 28MeV、质子能量为 102MeV 时，穿透率为 90%。钨掺杂环氧树脂的结果明显优于铁掺杂环氧树脂。在较低密度下，其完全阻止电子和质子的能量上限分别为 12MeV 和 60MeV，穿透率达到 90% 时的能量则分别为 74MeV 和 64MeV。在较高密度 7.5g/cm^3 下，完全阻止电子和质子的能量上限分别为 20MeV 和 85MeV；穿透率达到 90% 时，电子和质子的能量分别为 1GeV 和 90 MeV。尽管密度为 5g/cm^3 的铁掺杂环氧树脂在阻挡高能质子方面确实优于钨掺杂环氧树脂（如第 4.2 节所述），但结构上可实现的铁掺杂环氧树脂屏蔽罩最高密度为 4g/cm^3。该仿真包含一百万个独立粒子事件，在 5σ 水平下，统计误差小于 0.1%。

正如预期，仿真表明，随着密度逐渐接近钢的密度，阻止本领会增强，而每次密度增加所带来的差异则逐渐减小。考虑到3U立方体卫星的重量要求，这让我们了解了所需的优化方向，以同时满足重量要求和屏蔽能力要求。将这些结果与实心钢板的标准（图10和图11）进行比较后发现，钨制屏蔽层不仅优于铁制屏蔽层，在阻挡电子方面也优于实心钢屏蔽层。这些仿真表明，实现某种宇宙射线辐射屏蔽是可行的，nuSOL团队认为，将宇宙射线噪声降低10%即可视为成功，并满足重量和再入要求。

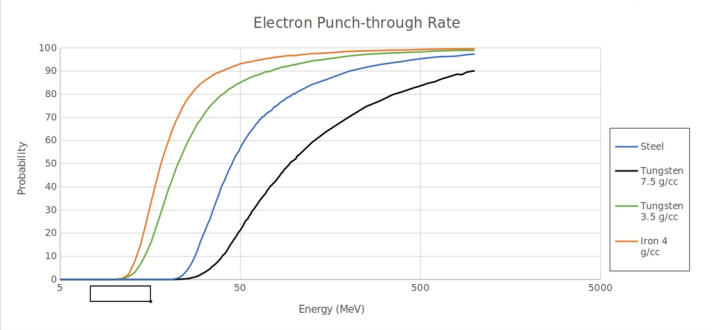


Figure 10: Graph of Simulated electron Punch-through Rates

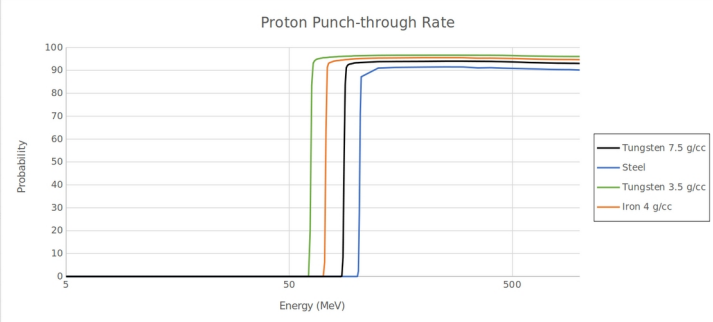
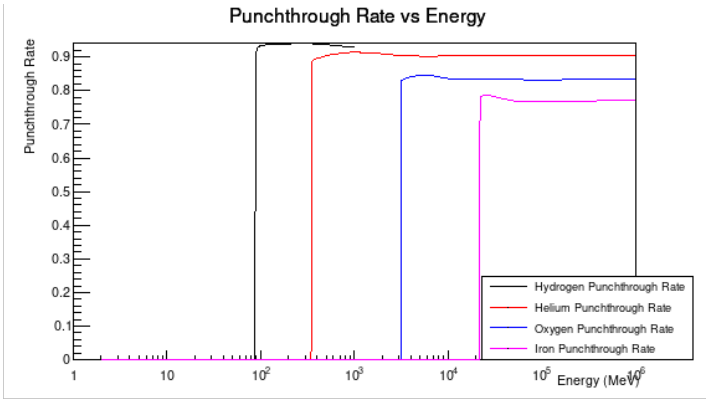


Figure 11: Graph of Simulated proton Punch-through Rates

仿真的第二部分旨在考察最终制成的 7.5g/cm^3 钨掺杂环氧树脂屏蔽罩如何应对其他粒子，例如阿尔法粒子、氧原子核和铁原子核。本研究表明，在高能量下，α粒子的穿透率趋于稳定在约 90%，而原子核的噪声降低幅度始终未达到 10%（图12）。这表明，即使在高能量下，钨掺杂环氧树脂屏蔽罩仍然表现出色。



Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

Figure 12: alpha Particle, and oxygen and iron nuclei Punch-through rates

4.2 Experimental Results

完成仿真后，WSU团队需要确认屏蔽罩是否能够实际制造。按照第3节概述的方法，我们制成了铁掺杂环氧树脂测试样品，以获取制造和制造工艺的实物证据。最终，我们制造了铁掺杂环氧树脂和钨掺杂环氧树脂屏蔽原型。这是为了确认仿真中的密度是否可行，同时测试屏蔽罩本身的结构性能。虽然仿真结果显示，铁掺杂环氧树脂在 5g/cm^3 时表现最佳，但这种混合物会变得过饱和，无法完全硬化，导致结构失效。随着测试的铁密度升高，混合物会变得像混凝土一样，更难浇注和处理。铁的混合物所能达到的最高密度为 4g/cm^3 。在测试的密度范围内，钨掺杂环氧树脂没有出现这一问题。这是由于立方体卫星的重量限制，因此没有继续测试其他样品。

yond that limit.

4.2.1 Mixing Ratio

首先需要了解的是，铁填料如何与环氧树脂混合，以及混合物是否易于操作。为此，WSU团队制作了小型样品，以测试计算出的密度是否与实际制造结果一致。我们根据重量进行计算，以确保获得正确的环氧树脂与铁的比例，从而达到所需的正确密度。样品制作完成后，我们使用量筒进行排水法测试，以计算密度。结果表明，较低的密度更容易实现，而较高密度的误差较大（图13）。这是由于混合过程中产生了气泡，后续结果表明需要采用低真空技术。

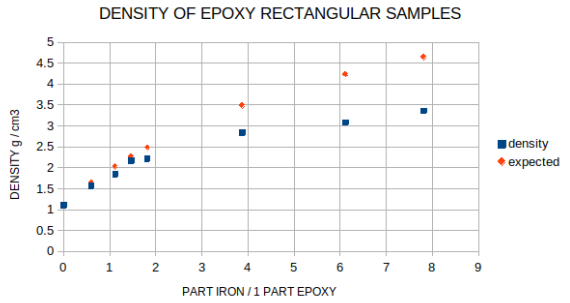


Figure 13: Graph of Expected and Obtained iron Doped Epoxy in Small Samples

4.2.2 Height Density Study

下一项测试不仅考察了铁填料与环氧树脂混合的可行性，还测试了密度是否会随高度发生变化。鉴于最终屏蔽罩高12.5厘米，这项测试十分重要；如果密度不均匀，屏蔽罩将无法有效工作，并会因立方体卫星的位置不同而产生宇宙射线噪声差异。样品完全固化后，我们将其切割成更小的样品，并使用排水法测试密度。由于各部分并不完全均匀，且用于称量各部分的秤与量筒之间存在10%的误差，我们得出结论：密度不会随高度发生显著变化（表1）。由此得到的总体平均密度为：对于1:3.765的比例，密度为3.133 g/cm^3；对于1:4.619的比例，密度为3.3383 g/cm^3；对于1:5.425的比例，密度为3.183 g/cm^3。如前所述，准确混合仍然是一个值得关注的问题，而且与之前一样，较低密度的样品比高密度样品更准确（图14）。这表明气泡的形成仍然是一个问题。

CUT #	WEIGHT (g)	DISPLACEMENT (ml)	Density (gm/cm3	IRON PARTS PER 1 PART EPOXY
1	7.7	2.5	3.08	3.765
2	8	2.75	2.91	
3	7.8	2.5	3.12	
4	7.9	2.75	2.87	
5	7.8	2.5	3.12	
6	7.2	2.25	3.2	
7	5.8	1.75	3.31	
8	6.9	2.25	3.07	
9	6.5	2	3.25	
10	7.1	2.25	3.16	
11	7.4	2.5	2.96	
12	3.9	1.1	3.55	

Table 1: Sample Data Table for Graduated Cylinder Test (3.765 Parts iron to 1 Part Epoxy)

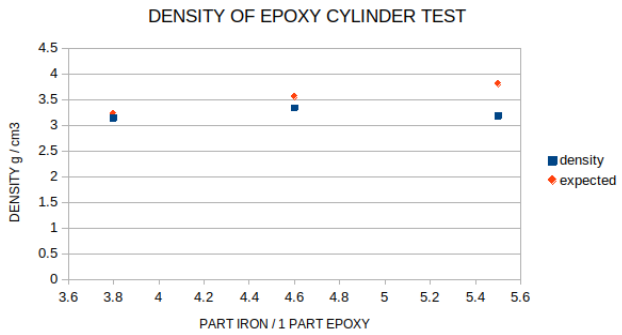


Figure 14: Graph of Expected and Obtained iron Doped Epoxy in Height Density Samples

4.2.3 Prototypes

完成初步实验后，nuSOL团队制作了辐射屏蔽罩的原型。在此过程中，他们制作了四个原型，其中三个由铁掺杂环氧树脂制成，另一个由钨掺杂环氧树脂制成。第一个铁掺杂环氧树脂原型以与之前样品相同的方式制作。其预期密度为3.6克/立方厘米^3，实际密度为2.8。这表明WSU

Copyright ©2022 by the International Astronautical Federation (IAF). All rights reserved.

团队需要测试低真空技术，以减少气泡的形成。这些技术被应用于接下来的两个铁掺杂环氧树脂原型。通过这种方式，预期密度与实际密度更加准确地吻合（图15）。在研究了铁掺杂环氧树脂原型后，WSU团队确信他们有能力制作精密屏蔽罩，于是制作了尺寸准确的钨掺杂环氧树脂屏蔽罩（图16）。最终得到的屏蔽罩结构坚固，密度为3.48克/立方厘米^3，达到预期值3.5克/立方厘米^{3}的99.4%精度。最后一个需要测试的要求是：当屏蔽罩重新进入地球大气层时会发生什么，以及是否会有任何碎片以超过15焦耳的能量撞击。为此，他们在原型浇注过程中制作了小型样品，使其硬化后用火炬燃烧。铁掺杂环氧树脂样品在约260°C时开始燃烧，并在700°C时完全损毁。钨掺杂环氧树脂样品在315°C时开始燃烧，并在424°C时损毁。两者都远低于1800°C的平均再入温度。

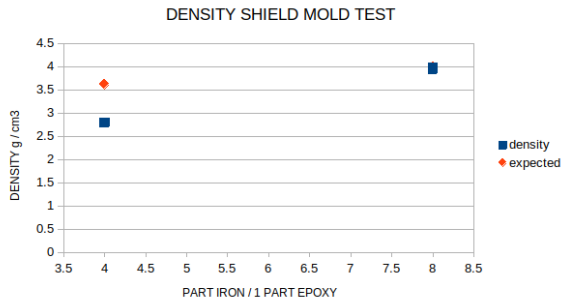


Figure 15: Graph of Expected and Obtained iron Doped Epoxy in Prototypes

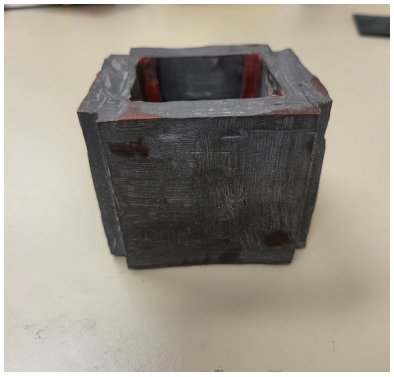


Figure 16: Picture of tungsten Doped Epoxy Prototype

5. Conclusions

nuSOL项目的3U立方星任务对于推进中微子研究至关重要。如果立方体卫星任务取得成功，那么近太阳轨道卫星任务将触手可及。为确保立方体卫星任务成功，必须采用新颖且创新的技术。其中一项挑战是制造宇宙射线辐射屏蔽罩，以降低科学载荷中的潜在噪声。WSU团队受命完成这一任务。团队不仅了解任务背后的科学原理，还掌握相关工程学知识，并通过仿真、实验数据以及最终研制出的可用原型实现了这一目标。计划开展进一步测试，以确保屏蔽罩的性能符合预期；不过，能够阻止或降低宇宙射线辐射噪声，并使穿透率始终低于90%，这一成果对科学界而言具有开创性。该屏蔽罩不仅满足立方体卫星任务的所有要求，也符合美国国家航空航天局的要求。这将是首次采用此类屏蔽技术执行任务。通过证明其可行性，其他任务的能力也将大幅提升，从而推动科学研究

Acknowledgments

I would like to thank Dr. Nick Solomey for leading the nuSOL project and giving me the opportunity not only to excel in physics but also in engineering. I would also like to thank PhD candidate Jonathan Folkerts for helping lead the research team at WSU and for his immense contributions to the nuSOL project and for spearheading the research for the Sun orbiting satellite. Thanks to Trent English for his contributions that led to the success of the shield design.

References

[1] N. Solomey, J.Folkerts, H. Meyer, C. Gimar, J. Novak, B. Doty, T. English, L. Buchele, A. Nelsen, R. McTaggart, M. Christl, Design of a Space-based Near-Solar Neutrino Detector for nuSOL experiment, Arxiv (2022) https://doi.org/10.48550/arXiv.220600703

[2] N.solomey, A. Dutta, H. Meyer, J. Folkerts, T. English, K. Messick, J. Novak, J. Chee, M. Christl, R. McTaggart, and et al., Niac phase-2 final report for astrophysics and technical lab studies of a solar neutrino spacecraft detector, NASA Technical Report Server, Apr 2022

[3] 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive 2216 B/A Translucent Material Properties https://www.alliedelec.com/m/d/badcaf2fd3816d3706fc411c0bf6ab8c.pdf#page=6&zoom=auto,-267,559/, (accessed 20.07.2021)