

核乏燃料运输容器减震器填充材料研究进展

邢攸冬¹, 杨思一¹, 安钰坤¹, 赵而团¹, 张鹏飞¹, 李忠芳¹, ZHAI John²
(1.山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000;

2.Holtec International, 1 Holtec Boulevard Camden, Newjersey Camden 08104)

摘要: **目的** 综述以木材、聚氨酯泡沫、蜂窝铝作为核乏燃料运输容器减震器填充材料的性能。**方法** 通过对3种填充材料的减震器进行受载分析, 然后对3种填充材料的力学性能进行验证。**结果** 将3种材料作为核乏燃料减震器填充材料具有可行性, 还列出了3种材料的不足之处。**结论** 工业上对有着优秀能量吸收、限制过载、质轻且受环境变化影较小的核乏燃料运输容器减震器填充材料有着迫切需求。之后提出将2种材料(泡沫铝和双向瓦楞蜂窝铝)作为减震器的填充材料, 并分析了2种材料的特点与吸能特性, 证明了其作为减震器填充材料的合理性与可行性。

关键词: 减震器; 填充材料; 木材; 双向瓦楞蜂窝铝; 泡沫铝; 力学性能; 减震吸能

中图分类号: TJ91+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)21-0111-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.017

Research Progress in Impact Limiter Filling Materials for Nuclear Spent Fuel Transport Casks

XING You-dong¹, YANG Si-yi¹, AN Yu-kun¹, ZHAO Er-tuan¹, ZHANG Peng-fei¹,
LI Zhong-fang¹, ZHAI John²

(1.School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2.Holtec International, 1 Holtec Boulevard Camden, Newjersey Camden 08104, USA)

ABSTRACT: The work aims to review the properties of wood, polyurethane foam, and honeycomb aluminum as filling materials for impact limiters of nuclear spent fuel transport cask. The impact limiters of the three filling materials were subject to load analysis, and then the mechanical properties of the three filling materials were verified. The three materials had the feasibility of being used as filling materials for impact limiters of nuclear spent fuel, and their shortcomings were also obtained. There is an urgent need in the industry for the filling materials of nuclear spent fuel transport cask impact limiters with excellent energy absorption, limited overload, light weight and less environmental impact. Later, it is proposed to use two materials (aluminum foam and bi-directional corrugated honeycomb aluminum) as impact limiter filling materials, and their characteristics and energy absorption are analyzed to prove the rationality and feasibility of these materials as impact limiter filling materials.

KEY WORDS: impact limiter; filling material; wood; bi-directional corrugated honeycomb aluminum; aluminum foam; mechanical property; shock and energy absorption

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2018MEM006)

作者简介: 邢攸冬(1992—), 男, 山东理工大学博士生, 主要研究方向为多孔吸能材料、双向瓦楞蜂窝铝等。

通信作者: 杨思一(1962—), 男, 博士, 山东理工大学教授, 主要研究方向为减震器填充包覆材料、闭孔泡沫铝等。

随着我国核能源的逐渐发展,其地位也日益突显出来。随着核燃料的大量使用,其相应的核乏燃料也会不断增加。由于乏燃料中包含大量的放射性元素,具有很强的放射性,因此必须将其妥善处理^[1-2]。根据中国核能行业协会发布的《中国核能发展报告(2018)》^[3],截止2017年底,全球在运行和在建的核电总装机容量达 4.5271×10^9 kW,中国容量已达 5.868×10^8 kW,这么多的乏燃料运输是一项巨大问题^[4]。

核乏燃料放射性活度大、衰变热大,含有相当量的可裂变材料,且核乏燃料运输距离长,当运输不当发生碰撞时,会造成泄露,进而产生极大危害^[5]。为保证在起吊、运输过程中核乏燃料运输容器的安全性,须在容器的上下两端安置减震器。减震器作为核乏燃料运输容器的关键部件,起着吸收能量、控制过载和保证结构完整性的重要作用^[6],主要由内部的填充材料与外部的钢板组成,内部填充材料是其关键,主要功能为缓冲吸能,原理是在受到外部载荷冲击作用时,填充材料发生变形吸收能量,外部的钢板起到包覆内部填充材料的作用,保证减震器结构的完整性。减震器的设计遵循着IAEA《放射性物质安全运输规程》标准和本国相应的规定^[7-8],常用的标准为9 m跌落测试^[4,9-10]。减震器的设计要合理,尺寸要适当。通常而言,填充材料的强度虽要弱于需保护物体的强度,但也要保证在一定的范围内,既不能太高以防止起不到减震的作用,也不能太低,避免减震效果太差。填充材料必须要有一定的强度与塑性,满足静止时的支撑防护作用以及承受外载时的减震吸能效果。

国内外常用的运输容器有法国的TN系列(TN12, TN13, TN-24P等),其减震器用的填充材料为木材^[11];美国的NAC系列,该运输容器减震器的填充材料为红木和杉木,我国也使用此系列作为运输容器。此外,日本的MSF系列容器、德国的Castor系列容器、俄罗斯的TK系列容器以及西班牙的ENSAR乏燃料运输容器均已经达到成熟的技术水平。在这些容器中除部分采用蜂窝铝与聚氨酯泡沫^[12]作为减震器填充材料外,其他的运输容器减震器多采

用木质填充材料。木材虽有很好的吸能性能,但其吸能特性强烈地依附于其纹理方向,且木材对湿热条件的耐受力不强,其次木材的砍伐对环境也会造成很大的危害。此外,对于聚氨酯泡沫而言,体积大小决定了其吸能能力,若要吸收大量能量需要较大体积的聚氨酯泡沫。蜂窝铝材料虽不受湿热条件的影响,但其承受载荷的能力只在某一特定方向。由于这3种材料自身具有缺陷,因此导致运输容器的寿命与使用性能受到了很大限制。

文中通过对木材、蜂窝铝材料、聚氨酯泡沫作为减震器填充材料进行介绍,并分析这些材料的性能以及缺陷。之后提出利用泡沫铝与双向瓦楞蜂窝铝作为减震器填充材料,分析说明其用作减震器填充材料的可行性与合理性,旨在进一步研究其结构性能、优化其力学特性,进而用来替代传统形式的减震器填充材料。

1 核乏燃料运输容器减震器的传统类型填充材料

1.1 木材

自设计核乏燃料运输容器以来,其减震器的填充材料主要为木材^[13-14],常用的填充木材包括巴尔杉木、泡桐木^[15]等。在显微镜下观看,木材也是有很多细微孔洞结构的材料^[16]。众多学者对木质填充材料减震器的可行性与吸能效果进行了分析验证,证实其作为减震器填充材料的可行性。

1.1.1 木材作为减震器填充材料的应用

木材作为减震器的填充材料,已经有多年的应用。国外^[17-20]学者对设计制造的木质减震器进行了安全分析验证,对以巴尔杉木为填充材料的减震器在受到不同外载荷的环境下进行了验证,均得出在受到较大外载荷影响下,木材均出现压缩溃烂的情况。虽不同种类的木材变形情况不同,但失效仅发生在减震器部位,内部的运输容器并未被破坏。以木材作为填充材料的减震器见图1。此外他们还通过仿真的形式同理验证了其合理性。徐超^[21]也提到用红木或者松木



图1 木材填充减震器
Fig.1 Wood-filled impact limiter

作为填充材料填充乏燃料运输容器减震器,通过实验与仿真的形式证实了以木材作为填充材料填充减震器是合理的。

核乏燃料运输容器减震器的保护作用归因于填充材料的变形吸能,木材的吸能特性与压缩特性受到很多因素的影响,为进一步分析木材在减震过程中起到的作用,部分学者研究了木材的压缩特性。

1.1.2 木材的压缩特性

木材有着良好的变形吸能能力,部分研究者^[18,22]对巴尔衫木、橡木在不同温度与不同加载速度、不同加载方向的结果进行了分析,获得了木材在不同载荷、环境作用下的应力-应变曲线。结果表明木材虽有很好的吸能性能(有较长的应力平台区),但木材的吸能特性受木纹的方向性影响很大;此外,木材在不同温度下的能量吸收效果明显不同,这表明木材的吸能效果对环境的依赖较强。此外,加载速度对木材的吸能有较大影响,相对于高速加载,低速加载下木材变形表现为更平稳。徐朝阳^[23]等研究了木材的能量吸收特性。分析了木材绝对含水率对能量吸收和压缩强度的影响,得出木材绝对含水率对木材能量吸收有一定影响。

1.1.3 木材作为减震器填充材料的缺陷

通过对木材进行压缩力学试验研究,指出了木材作为减震器填充材料的缺点。首先木材的条纹致使木材的力学性能存在方向性,其次木材的力学性能受湿度与温度的影响较大,另外,加载速度对木材吸能也有很大影响。

1.2 聚氨酯泡沫材料

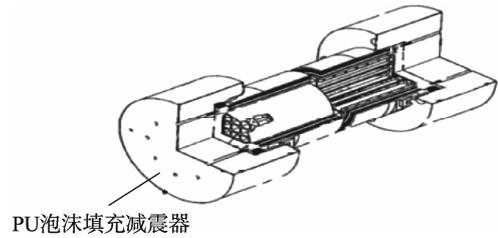
近几年来,由于泡沫塑料有着优秀的性能,因此部分泡沫塑料已经应用在核乏燃料运输容器减震器内作为填充材料。部分学者对聚氨酯泡沫作为减震器填充材料的结构与吸能效果进行了分析验证。

1.2.1 聚氨酯泡沫作为减震器填充材料的应用

由于聚氨酯泡沫材料具有优秀的吸能,国际上也有应用聚氨酯泡沫作为减震器填充材料的案例。Maji^[24]提到,利用硬质的闭孔聚氨酯泡沫填充减震器(见图 2),能使其具有很好的安全性能,经跌落试验验证聚氨酯泡沫能够保证运输容器的结构完整性与安全性。Saliba^[25]也提到用高密度聚氨酯泡沫填充 1:2 的减震器模型时,对 3 种典型的跌落试验进行分析。结果表明,对于减震器而言,以不锈钢层包覆的聚氨酯泡沫材料有很好的安全性能。

1.2.2 聚氨酯泡沫的压缩特性

国外部分研究者^[26-29]对聚氨酯泡沫的压缩力学性能进行了分析研究,利用实验与仿真的办法,验证了聚氨酯泡沫在不同应变速率下的冲击响应变化。结



PU泡沫填充减震器

图 2 聚氨酯泡沫填充减震器

Fig.2 Polyurethane foam filled impact limiter

果表明,在不同的应变速率下,聚氨酯泡沫的力学性能发生了显著变化。随着应变速率的增加,聚氨酯泡沫的响应变得更硬,并且动载下的致密化发生在远低于准静态应变速率下,因此,聚氨酯泡沫的能量吸收特性随着应变速率的变化而改变。胡时胜^[30]对 4 种密度的硬质聚氨酯泡沫缓冲吸能特性进行了评估,表明聚氨酯泡沫吸能性能受材料密度的影响较大。

1.2.3 聚氨酯泡沫作为减震器填充材料的缺陷

通过以上研究,聚氨酯泡沫的缺陷主要表现为以下 2 点,泡沫自身的特性,如强度较差(强度依赖于密度),吸收大量能量需要很大的尺寸或较大的密度;此外聚氨酯泡沫的性能受加载速度的影响也较大。

1.3 蜂窝铝材

蜂窝铝因其具有质量轻、能量吸收能力好等优点在工业上较常使用^[31]。此外,鉴于蜂窝铝具有较好的吸能特性,部分学者考虑将其用作核乏燃料运输容器减震器的填充材料,并进行了可行性分析。

1.3.1 蜂窝铝材作为减震器填充材料的应用

国外学者 Mane^[27]用 4 英寸(1 英寸=2.54 cm)立方的蜂窝铝块做核乏燃料减震器填充试验,见图 3,仿真了减震器的减震效果,期望通过结构设计能使减震器无论以何种角度跌落时均能保证有良好的吸能效果。此外,Maji^[24]研究了蜂窝铝材料的力学行为,沿着各种加载路径进行了一系列测试,在不同方向上测试了不同密度蜂窝铝材料的力学特性。结果表明蜂窝铝结构可以用作核乏燃料运输容器的减震器填充材料。国内尚未出现应用蜂窝铝作为减震器填充材料的实例。

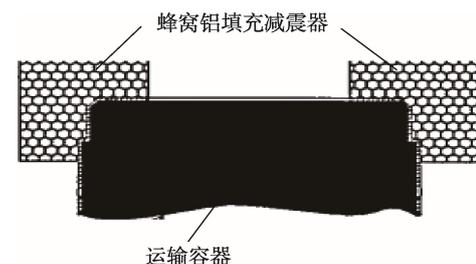


图 3 蜂窝铝填充减震器示意

Fig.3 Schematic diagram of honeycomb aluminum filled impact limiter

1.3.2 蜂窝铝材的压缩特性

国内外学者^[26,32-35]对蜂窝铝的吸能特性进行了分析,他们分别从不同的加载速度、加载方向以及不同蜂窝密度的情况下进行实验与仿真分析。结果表明加载速度会影响蜂窝铝的承载能力,加载速度越大,承载能力会有明显的提升。此外,蜂窝铝材料3个方向所承受载荷的能力不同,这表明蜂窝铝材料存在各项异性。蜂窝密度对吸能也有很大影响,吸能能力随着密度改变而变化。

1.3.3 蜂窝铝材作为减震器填充材料的缺陷

蜂窝铝可用于核乏燃料运输容器减震器的填充材料,一是其密度小,质量轻;二是金属铝材料原料丰富;三是蜂窝材料有着很好的塑性变形能力。以上研究虽表明蜂窝铝材料是一种很好的吸能材料,但同样也存在力学性能具有方向性等缺陷。

1.4 小结

以上3种材料均有较好的吸能特性,且在减震器上有了应用,这说明3种材料可以作为减震器的填充材料。同样的,这3种材料自身还有不足之处,木材的纹理使力学性能存有方向性,且木材不耐高温潮湿,受环境影响较大;聚氨酯泡沫的性能受密度影响大,很难做为结构材料;蜂窝铝材料的制备过程较为复杂等限制了这3种材料的进一步推广及应用。由此可见,就减震器的填充材料而言,这些材料并不是最优的选择,减震器的填充材料应该向着力学性能更优、受环境影响更小的方向发展。

2 2种吸能材料

随着新材料的出现以及传统材料的弊端越来越凸显,采用新材料代替部分传统材料的呼声越来越高涨。文中提出了2种问世虽较短但经过验证有很好性能的材料,旨在将这2种材料用作核乏燃料运输容器减震器的填充材料。

2.1 双向瓦楞蜂窝铝

双向瓦楞蜂窝铝是一种双向吸能材料,其可承受双向冲击载荷,见图4。基于双向瓦楞铝的双向性与吸能特性,旨在应用双向瓦楞铝作为减震器的填充材料,美国Holtec公司已经在研究该材料,而国内尚未出现。

利用压缩试验机对加工好的双向瓦楞蜂窝铝进行室温准静态压缩实验,常温下,对 x, y, z 等3个方向进行准静态压缩,受力方向见图4,得到准静态压缩试验下的应力-应变曲线。分析得出 x, y 方向的最大压缩强度与平均压缩强度均要优于 z 方向,这表明 x, y 方向的能量吸收强度要优于 z 方向。此外, x

方向的最大强度和平均强度与 y 方向相近,这表明 x, y 方向有着相似的力学性能。

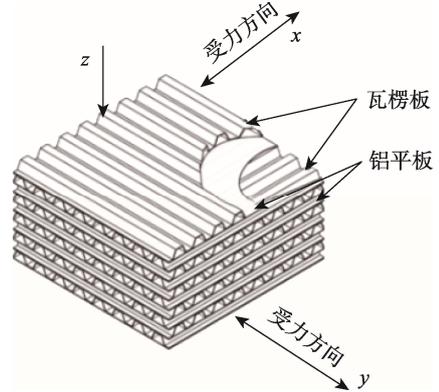


图4 双向瓦楞蜂窝铝静载压缩应力-应变
Fig.4 Static compression stress-strain of bi-directional corrugated honeycomb aluminum

双向瓦楞蜂窝铝准静态压缩应力-应变曲线见图5。分析图5可得,对3个方向进行压缩,双向瓦楞蜂窝铝均存在典型的3个阶段,即弹性阶段、平台阶段与密实阶段。由图5可知,弹性阶段存在的时间较短, z 方向约在应变达到4%处发生塑性转变;随后在4%~40%的阶段处于平台区,平台区阶段较短;应变超过40%后便处于密实阶段。对于 x, y 方向的压缩,当应变达到2%时,材料便处于塑性阶段,材料在压缩过程中大部分阶段处于平台区,平台区可以持续到70%左右,平台区是能量吸收的有效阶段。可以得出对于 x, y 方向的压缩,双向瓦楞蜂窝铝有很好的吸能特性,之后为材料的压缩密实阶段,此时材料的吸能效果较差。

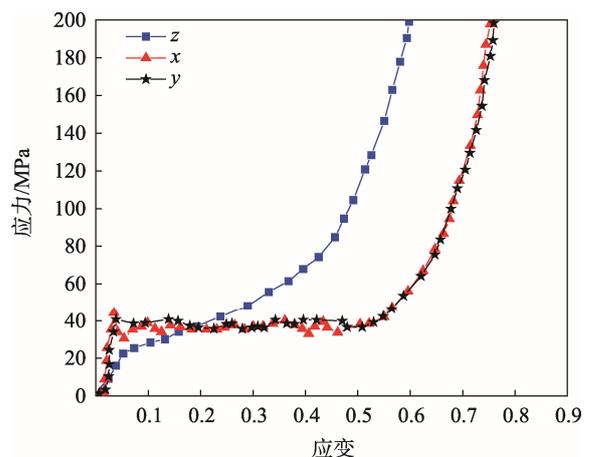


图5 双向瓦楞蜂窝铝准静态压缩应力-应变
Fig.5 Quasi-static compression stress-strain of bi-directional

与松木(见图6)的压缩性能相比,首先松木的性能受含水量(MC)的影响较大;其次双向瓦楞蜂窝铝的平台区长度要优于松木,双向瓦楞铝的平台范围可以达至70%,而松木的平台区到50%时就已显得

不是很明显；此外双向瓦楞铝的应力承受能力要高于松木，平台区的应力可达 30 MPa 左右，而松木在最优的情况下仅为 8 MPa 左右，对比而言双向瓦楞蜂窝铝的性能要优于松木。

运输容器在假想事故工况下受到的冲击均由填充材料吸收，填充材料的吸能大小是由应力与应变的大小决定的。由图 5 可知，双向瓦楞蜂窝铝材料在 x 与 y 方向有很好的吸能性能。

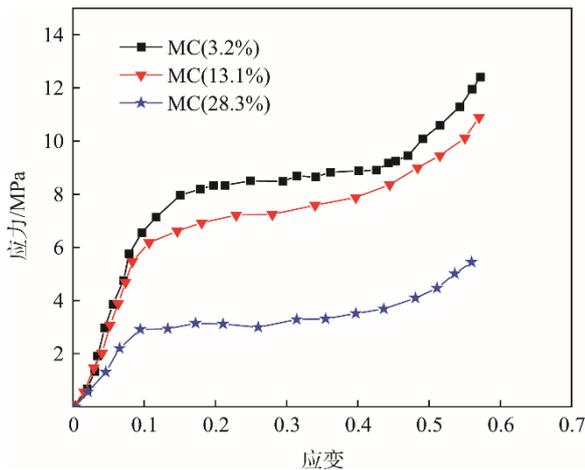


图 6 不同含水率下松木准静态压缩应力-应变

Fig.6 Quasi-static compression stress-strain of pine under different water contents

2.2 泡沫铝材

泡沫铝是近几年来研究的热门，因其具有比强度高、吸能效率好等优点^[36]，其应用范围也在逐步扩大。泡沫铝一般分为闭孔泡沫铝与开孔泡沫铝^[37]，开孔泡沫铝一般用作吸声材料，文中提出将闭孔泡沫铝作为减震器的填充材料用于吸能。

国内外学者^[38-40]研究了泡沫铝的压缩特性，研究了不同密度，不同速度载荷下的响应情况，分析了尺寸、孔隙率、孔径对泡沫铝压缩和吸能性能的影响，证明泡沫铝材料作为吸能材料有很显著的效果。

为了进一步增强泡沫铝材料的力学性能，部分学者对泡沫铝材料进行了增强研究。Yukun^[41]等利用金属框架增强泡沫铝的强度，结果表明在相同的弯曲挠度下，金属框架增强的材料在质量略微增加的前提下有更高的强度，且吸收能量较未增强的材料提升了约 10 倍。随后进一步^[42]研究了碳纤维增强泡沫铝的性能，结果表明，通过将碳纤维材料填入泡沫铝内，泡沫铝的力学性能得到很大提升。Jun^[43]等研究表明增强后泡沫铝的弹性模量与屈服强度均有了明显提升，增强后的泡沫铝吸能能力也大大增强。

对熔体发泡法制备的 2 种密度的闭孔泡沫铝进行压缩试验，得出应力-应变曲线图 7。泡沫铝是各向同性的材料，由图 7 可以看出泡沫铝变形过程的区间很长，且其平台区的应力约为 10 MPa，应变可达 0.55，

性能优于木材，理论上可以作为核乏燃料运输容器减震器填充材料。

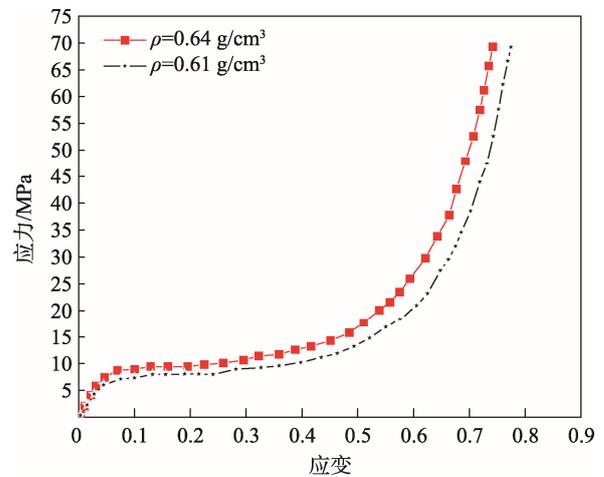


图 7 2 种密度泡沫铝的压缩应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of two densities of aluminum foams

2.3 小结

通过介绍泡沫铝和双向瓦楞蜂窝铝及对比木材的力学性能，发现这 2 种材料有较好的吸能特性。若将其作为运输容器减震器的填充材料，不仅能很好地克服木材的纹理性与易腐蚀性，且相较聚氨酯泡沫，其有更好的阻燃性。此外，泡沫铝有各向同性的特点，因此作为填充材料可以满足各个方向的吸能要求。双向瓦楞蜂窝铝有 2 个方向的力学性能相同性，且有较好的吸能能力，因此在一定的结构设计下，也可作为减震器的填充材料。

3 结语

木材作为核乏燃料运输容器减震器的填充材料时，其力学性能存在方向性，且受温度湿度影响较大。聚氨酯泡沫和蜂窝铝材虽具有作为减震器填充材料的特性，但还存在着一些自身缺陷，比如方向性、吸能的响应程度弱等。现如今，国内外使用的核乏燃料运输容器减震器填充材料仍然为木材，其他材料涉及很少，文中提出了 2 种填充材料，并对其力学性能进行了分析，指出其作为填充材料的可行性。现阶段，仍需进一步对 2 种材料进行性能优化与验证，以期代替传统类型的填充材料。

参考文献：

- [1] JIANG H, WANG J A J. Spent Nuclear Fuel System Dynamic Stability Under Normal Conditions of Transportation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 310: 1—14.
- [2] SILVERIO L B, LAMAS W D Q. An Analysis of De-

- velopment and Research on Spent Nuclear Fuel Re-processing[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(1): 281—289.
- [3] LI Y, XU J, ZHONG D, et al. Evidence for Multiple-insecticide Resistance in Urban *Aedes Albopictus* Populations in Southern China[J]. *Parasites & Vectors*, 2018, 11(1): 1—10.
- [4] 李越, 肖德涛, 刘新华, 等. 我国乏燃料运输现状探讨[J]. *辐射防护*, 2016, 36(1): 31—39.
LI Yue, XIAO De-tao, LIU Xin-hua, et al. Discussion on the Status of Spent Fuel Transportation in China[J]. *Radiation Protection*, 2016, 36(1): 31—39.
- [5] 张慧. 乏燃料运输市场待开启[J]. *能源*, 2014(3): 65—67.
ZHANG Hui. The Spent Fuel Transportation Market Is to Be Opened[J]. *Energy*, 2014(3): 65—67.
- [6] NEFFATI A, KALCK C, ISSARD H. Development of Innovative Solutions for High Performance Impact Limiters on Transport Casks[C]// *Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, 2016: 1—10.
- [7] 汪佳明. IAEA TS-R-1《放射性物质安全运输条例》(2009版)对其1996版(2003修订版)的变更[J]. *辐射防护*, 2011(1): 57—61.
WANG Jia-ming. Changes to the 1996 Edition (2003 Revision) of the IAEA TS-R-1 Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2009 Edition)[J]. *Radiation Protection*, 2011(1): 57—61.
- [8] 刘新华. 《放射性物质安全运输规程》(GB 11806)实用指南[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1—32.
LIU Xin-hua. A Practical Guide to the Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (GB 11806)[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1—32.
- [9] WEINER R F, AMMERMAN D J. Spent Fuel Transportation Risk Assessment: Transportation Accident Analysis[J]. *Packaging Transport Storage & Security of Radioactive Material*, 2014, 24(3): 128—133.
- [10] 周玉清. RY-I型乏燃料运输容器设计, 试验概况[J]. *辐射防护通讯*, 1991(5): 51—58.
ZHOU Yu-qing. Design and Experimental Overview of RY-I Spent Fuel Transportation Vessel[J]. *Radiation Protection Communication*, 1991(5): 51—58.
- [11] 汪海, 童明炎, 孙胜, 等. 乏燃料运输容器研究进展[J]. *机械工程师*, 2015(12): 65—69.
WANG Hai, TONG Ming-yan, SUN Sheng, et al. Research Progress of Spent Fuel Transport Containers[J]. *Mechanical Engineer*, 2015(12): 65—69.
- [12] 刘广东, 吴维亮, 朱贺, 等. 事故工况下乏燃料运输容器跌落分析[J]. *包装工程*, 2017, 38(21): 31—34.
LIU Guang-dong, WU Wei-liang, ZHU He, et al. Drop Analysis of Spent Fuel Transport Containers Under Accident Conditions[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(21): 31—34.
- [13] SILVA A D, KYRIAKIDES S. Compressive Response and Failure of Balsa Wood[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(25/26): 8685—8717.
- [14] VURA L, RAVICHANDRA N. Dynamic Response and Energy Dissipation Characteristics of Balsa Wood: Experiment and Analysis[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2003, 40(9): 2147—2170.
- [15] MUSOLFF A, QUERCITTI T K, MULLE R, et al. Experimental Testing of Impact Limiters for RAM Packages Under Drop Test Conditions[J]. *Packaging Transport Storage & Security of Radioactive Material*, 2014, 25(3): 133—138.
- [16] AMMERMAN D J. Spent Fuel Transportation Risk Assessment: Cask Impact Analyses[J]. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*, 2013, 24(3): 121—127.
- [17] BULTER N. Computer Modeling of Wood-filled Impact Limiters[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 1994, 150(2/3): 417—424.
- [18] DIERSCH R, WEISS M, DREIER G. Investigation of The Impact Behavior of Wooden Impact Limiters[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 1994, 150(2/3): 341—348.
- [19] QUINTANA F, SALIBA R, MOURAO R P, et al. Numerical Simulation of Impact Problems Applied to Development of Spent Fuel Transport Cask for Research Reactors[J]. *Packaging Transport Storage & Security of Radioactive Material*, 2013, 23(1/2): 8—15.
- [20] CHOI W S, SEO K S. A Simple Sizing Optimization Technique for an Impact Limiter Based on Dynamic Material Properties[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2010, 240(4): 925—932.
- [21] 徐超. 基于安全分析的乏燃料运输容器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
XU Chao. Research on Key Technologies of Spent Fuel Transportation Vessels Based on Safety Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [22] 钟卫洲, 邓志方, 魏强, 等. 不同加载速率下木材失效行为的多尺度数值分析[J]. *中国测试*, 2016(42): 79—84.
ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, WEI Qiang, et al. Multi-scale Numerical Analysis of Failure Behavior of Wood Under Different Loading Rates[J]. *China Testing*, 2016(42): 79—84.
- [23] 徐朝阳, 徐德良, 贾翀, 等. 硬松类木材横纹压缩时能量吸收特性研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(17): 11—14.
XU Chao-yang, XU De-liang, JIA Chong, et al. Study on Energy Absorption Characteristics of Hardwood Wood During Horizontal Grain Compression[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(17): 11—14.
- [24] MAJI A K, SCHREYER. Mechanical Properties of Polyurethane-foam Impact Limiters[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(4): 528—540.
- [25] SALIBA R, MUORAO R P, QUINTANA F, et al.

- Analysis and Design of Spent Fuel Transport Cask Impact Limiters[J]. *Packaging Transport Storage & Security of Radioactive Material*, 2013, 22(4): 172—178.
- [26] GIBSON L J, ASHBY M F, SCHAJER G S, et al. The Mechanics of Two-dimensional Cellular Materials[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1982, 382(1782): 25—42.
- [27] MANE J V, CHANDRA S, SHARMA S, et al. Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam Under Quasi-static and Dynamic Strain Rates-an Experimental Study[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 726—731.
- [28] 查萌, 张璋, 杨利. 航空用国产高性能PMI泡沫塑料性能研究[J]. *化工新型材料*, 2018(6): 70—73.
CHA Meng, ZHANG Zhang, YANG Li. Study on the Performance of Domestic High-performance PMI Foam for Aviation[J]. *New Chemical Materials*, 2018(6): 70—73.
- [29] 张海波, 孙金坤, 谭立伟, 等. 聚氨酯泡沫塑料吸能特性研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2004, 22(1): 117—120.
ZHANG Hai-bo, SUN Jin-kun, TAN Li-wei, et al. Study on Energy Absorption Characteristics of Polyurethane Foam[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2004, 22(1): 117—120.
- [30] 胡时胜, 刘剑飞, 王悟. 硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性评估[J]. *爆炸与冲击*, 1998, 18(1): 42—47.
HU Shi-sheng, LIU Jian-fei, WANG Wu. Evaluation of Buffer Energy Absorption Characteristics of Rigid Polyurethane Foam[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(1): 42—47.
- [31] 吴廷洋, 吴锦武. 蜂窝层合板结构的隔声特性研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(8): 153—157.
WU Ting-yang, WU Jin-wu. Study on Sound Insulation Characteristics of Honeycomb Laminate Structure[J]. *Materials Review*, 2016, 30(8): 153—157.
- [32] AKTAY L, JOHNSON A, KROPLI N. Numerical Modeling of Honeycomb Core Crush Behavior[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(9): 2616—2630.
- [33] 张士卫. 泡沫金属的研究与应用进展[J]. *粉末冶金技术*, 2016, 34(3): 222—227.
ZHANG Shi-wei. Progress in Research and Application of Metal Foam[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2016, 34(3): 222—227.
- [34] YAMASHIT A, GOTO H. Impact Behavior of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications: Numerical Simulation and Experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1): 618—630.
- [35] 李萌, 刘荣强, 郭宏伟, 等. 腿式着陆器用不同拓扑结构金属蜂窝吸能特性优化设计[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(21): 7—14.
LI Meng, LIU Rong-qiang, GUO Hong-wei, et al. Optimization Design of Energy Absorption Characteristics of Metal Honeycombs with Different Topologies for Leg-type Landers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(21): 7—14.
- [36] XIA X, CHEN X, ZHANG Z, et al. Compressive Properties of Closed-cell Aluminum Foams with Different Contents of Ceramic Microspheres[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 353—358.
- [37] AN Y K, YANG S Y, ZHAO E T, et al. Formation Mechanism and Three-point Bending Behaviour of Directly Fabricated Aluminium Foam Plates[J]. *Materials Science and Technology*, 2016: 1—9.
- [38] LI Z F, YANG S Y, XU H L, et al. Study on Aluminum Foam as a Filler Material for Impact Limiter of Spent Fuel Transportcask[J]. *International Conference on Novel Functional Materials*, 2018, 238: 205—209.
- [39] YONG H W, XI M Z, WEN J Y, et al. Dynamic Crushing Response of an Energy Absorption Connector with Curved Plate and Aluminum Foam as Energy Absorber[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 121: 119—133.
- [40] 于丽丽, 李爱群, 解琳琳, 等. 泡沫铝压缩和吸能性能的影响因素分析[J]. *建筑技术*, 2018, 49(3): 315—318.
YU Li-li, LI Ai-qun, XIE Lin-lin, et al. Analysis of Factors Affecting Foam Aluminum Compression and Energy Absorption Performance[J]. *Architectural Engineering*, 2018, 49(3): 315—318.
- [41] YUKUN A N, YANG S, ZHAO E, et al. Characterization of Metal Grid-structure Reinforced Aluminum Foam Under Quasi-static Bending Loads[J]. *Composite Structures*, 2017, 178: 288—296.
- [42] YUKUN A N, YANG S Y, ZHAO E, et al. Fabrication of Aluminum Foam Reinforced By Graphene Nanoflakes[J]. *Materials Letters*, 2018, 212: 4—7.
- [43] JUN L, CHENG Q W, HONG H, et al. Basalt Scale-reinforced Aluminium Foam Under Static and Dynamic Loads[J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 599—613.