乏燃料运输容器减震器应用及研究现状

孙谦，庄大杰，孙洪超，王长武，王智鹏，连一仁，孙树堂，李国强
（中国辐射防护研究院，太原 030006）

摘要：目的 了解国内外乏燃料运输容器减震器的成熟结构形式，分析应用技术的主要特点，整理现有减震器缓冲材料的材料特性和研究现状，为国内减震器设计发展提供一定参考。**方法** 综述国内外代表性乏燃料运输容器的减震器应用现状，分析现有缓冲材料的优缺点和结构设计方面的注意事项。**结果** 目前，国内外乏燃料运输容器多采用木材填充的壳式减震器，在填充材料方面，聚氨酯泡沫、蜂窝铝等工程材料也有应用，此外泡沫铝、碳泡沫、双向瓦楞蜂窝铝等新型材料也被研究用作减震器缓冲材料。**结论** 建议继续增加对新型缓冲材料以及对减震器结构设计的研究，以满足未来国内大型乏燃料运输容器的应用需要，同时建议注重减震器产品的适配性和兼容性，开发系列化产品。

关键词：乏燃料运输容器；减震器；缓冲材料；木材；结构设计
中图分类号：TB485.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)05-0282-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.035

Application and Research Status of Spent Fuel Transport Cask Impact Limiters

SUN Qian, *ZHUANG Da-jie*, *SUN Hong-chao*, *WANG Chang-wu*, *WANG Zhi-peng*, *LIAN Yi-ren*, *SUN Shu-tang*, *LI Guo-qiang*

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT: The work aims to learn the mature structural forms of impact limiters for spent fuel transport casks at home and abroad, analyze the main characteristics of application technology, and sort out the material characteristics and research status of existing impact limiters, so as to provide certain reference for the design and development of domestic impact limiters. The application status of impact limiters for representative spent fuel transport casks at home and abroad was summarized. The advantages and disadvantages of existing impact limiters, and the matters needing attention in structural design were analyzed. The shell impact limiters filled with wood were mostly used on the spent fuel transport casks. Polyurethane foam, honeycomb aluminum and other materials were also used as filling materials. In addition, foam aluminum, carbon foam, two-way corrugated honeycomb aluminum and other new materials have also been studied for impact limiters. It is suggested to increase the research on new buffering materials and structural designs of impact limiters to meet the application needs of large domestic spent fuel transport casks in the future. At the same time, the adaptability and compatibility development of impact limiters should be paid attention to and series products should also be developed.

KEY WORDS: spent fuel transport cask; impact limiter; filling material; wood; structure design

乏燃料运输容器是专用于管理、运输乏燃料组件的关键设备，其特别高的安全性能是乏燃料安全运输的根本保证。出于对容器安全功能的设计需要，乏燃料运输容器往往重量巨大，为保证事故冲击下的容器结构完整性，在开展运输活动时必须安装专门设计的减震器，起到缓冲减震作用，减轻严重事故的后果。

收稿日期：2022-08-18
作者简介：孙谦（1994—），男，硕士。

我国乏燃料运输容器减震器的设计通常遵循 IAEA《放射性物质安全运输规程》和 GB 11806—2019 的相关要求，其中 B 型货包须满足 9 m 自由下落等力学试验的要求[1]。国内外现有乏燃料运输容器减震器的形式多样，主要结构为外部钢壳包裹内部缓冲材料，多设计安装在运输容器端部[2]。其中，钢制外壳能够防护和限制内部的缓冲材料，而缓冲材料起到支撑容器和事故冲击下缓冲吸能的关键作用。

1　乏燃料运输容器减震器应用现状

钢制外壳包裹缓冲材料的壳式结构是乏燃料运输容器减震器较通用的结构设计，主要以木材、聚氨酯泡沫、蜂窝铝等材料作为缓冲材料，国外已有较多成熟的减震器产品。除此之外，国外一些小型乏燃料运输容器也根据使用需求，采用了其他结构形式的减震器设计。

1.1　木材填充壳式减震器

以木材作为填充材料的壳式减震器是目前应用成熟、范围较广的结构形式。国外容器以美国 NAC–STC 型乏燃料运输容器为代表，包括美国 NFS–4 型运输容器[3]、德国 CASTOR 系列容器[4]、法国 TN 系列（TN–12、TN–13、TN–24、TN–32 等）容器[5]、日本 MSF 系列容器[6]、俄罗斯 TK 系列容器、韩国 KN–18 SNF 型运输容器[7-8]等均采用壳式减震器，一般选择轻木、红木、松木、云杉等木材作为缓冲材料[9]。

美国 NAC 公司生产的 NAC–STC 型运输容器是国际上使用较为广泛的夹铅屏蔽乏燃料运输容器，在运输条件下，容器上、下两端须安装圆柱形壳式减震器，减震器以红木、松木作为填充材料，外部包裹 304 不锈钢材质钢层，用于保持减震器结构的完整性[10]。德国 GNS 公司研制的 CASTOR 系列大型球墨铸铁运输容器也采用了类似的减震设计，两端减震器采用云杉、山毛榉等欧洲资源较丰富的木材作为缓冲材料[11]。其中，以 CASTOR HAW/TB2 型号运输容器[12]为例，容器两端木材填充减震器的径向尺寸没有过多超出容器筒体尺寸，这主要是因为在容器筒体外还安装了 3 条环式铝制减震器，在跌落时利用环式减震器吸收一定的冲击能量，容器结构见图 1。相比木材，铝材的性质更均匀、强度更大，因此具有相对高的吸能能力，但铝材的大塑性变形也会导致变形区出现温度较大的升高。

除常规木材外，阿根廷、巴西和智利三国共同研制的研究堆乏燃料运输容器，使用木质复合材料（OSB）填充减震器[13]。木质复合材料（OSB）是在加热和压力条件下由小直径圆木切片黏合而成的，是一种工程化、垫成型的面板产品。填充材料在减震器的中心区域垂直排列，在外围区域水平排列，以获得更好的各向同性的力学性能。

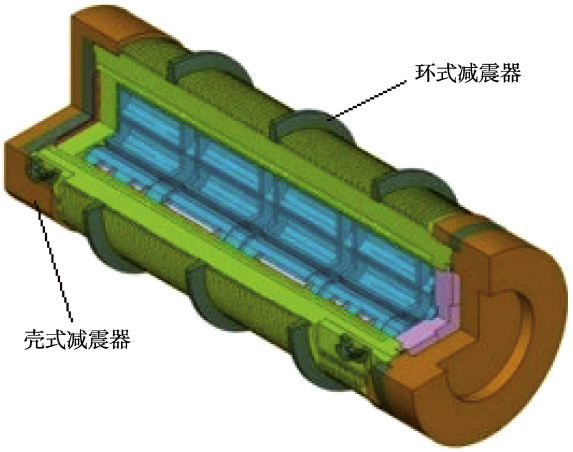

图 1　CASTOR HAW/TB2 运输容器[12]
Fig.1 CASTOR HAW/TB2 transport cask[12]

国内的乏燃料运输容器同样以采用木材填充减震器为主，包括 RY–I 型乏燃料运输容器[14-15]、BQH 系列乏燃料运输容器[16]、CNSC–24 型乏燃料运输容器[17]等。由于国内木材资源的限制，我国多采用泡桐木作为减震器缓冲材料。其中，国内 RY–I 型小型乏燃料运输容器，首次采用国产泡桐木代替国际上通用的轻木作为减震器填充材料。除此之外，国内也出现了新型减震器设计，例如清华大学天津高端装备研究院采用了内置弹簧的结构，能够在保证事故冲击安全的前提下，减轻正常运输条件下振动对乏燃料造成的影响[18]。

1.2　其他填充壳式减震器

木材作为缓冲材料虽然具有质量小、吸能效果好等特点，但也存在各向异性、耐湿热能力差等固有缺陷，因此部分乏燃料运输容器也采用硬质聚氨酯泡沫、蜂窝铝等其他工程材料作为减震器缓冲材料。美国 T–3 型运输容器[19]用于运输快中子试验堆 FFTF 乏燃料组件，其两端的减震器由低碳钢外壳和内部填充的硬质聚氨酯泡沫材料构成，通过螺栓与容器筒体连接，起到保护容器端部免受结构冲击和热损伤的作用。

蜂窝铝材料的缓冲性能具有各向异性，因此在减震器中多采用分区域填充的设计。美国 Holtec 国际公司设计制造的 Hi–STAR100 两用乏燃料容器在运输条件下配备了 AL–STAR 减震器[20]，示意图见图 2。AL–STAR 减震器被设计成能够将最大刚体减速度限制在重力加速度的 60 倍，主要由 304 不锈钢外壳和蜂窝铝缓冲材料构成，在仅承受单向冲击载荷的区域填充了单向蜂窝铝材料，在冲击载荷方向可能发生变化的区域填充了双向蜂窝铝材料。同时为了在冲击过程中获得更多支撑，减震器上还设置了 2 个圆柱形加强环。除此之外，西班牙 ENSA 公司 ENUN 32 乏燃

料运输容器减震器还采用了蜂窝材料和聚氨酯泡沫复合填充的设计[21]。在减震器端部可能受到角冲击的区域，冲击载荷加载方向不确定，采用相对廉价的聚氨酯泡沫材料填充，在减震器侧面采用体积相对较小的蜂窝材料填充，以满足操作和运输时的外径尺寸限制。为了减少冲击时侧面和末端方向的峰值加速度，减震器端部被设计为圆锥形。

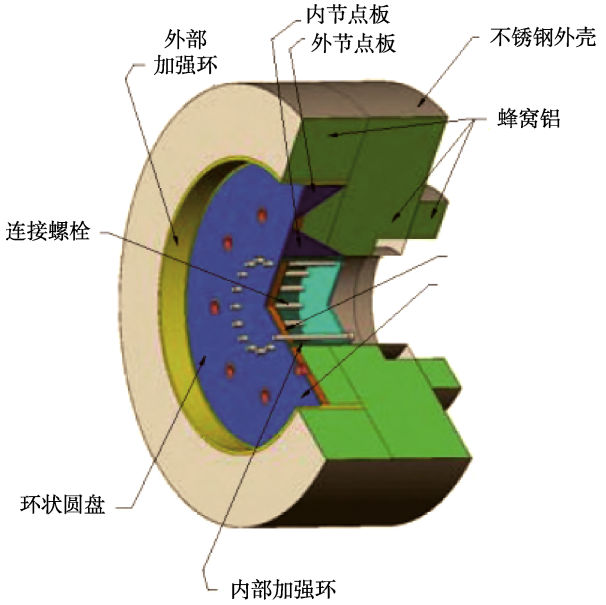

图 2　AL–STAR 减震器示意图[20]
Fig.2 Schematic diagram of AL-STAR impact limiter[20]

1.3　其他结构形式减震器

除壳式减震器外，部分乏燃料运输容器也采用了其他结构形式的减震器。美国 GE 公司研制的 IF 系列运输容器，是美国早期运输乏燃料组件的容器[22]。以 IF–300 型运输容器为例，该容器质量约 70 t，在容器外部焊接了与容器集成的环形不锈钢减震翅片[23]，以此实现缓冲减震的作用，图 3 展示了该运输容器的减震器结构。与壳式减震器相比，该设计有利于节约笨重减震器的存储空间以及安装、拆卸减震器的时间，但也会增加清理减震翅片的难度和时间。

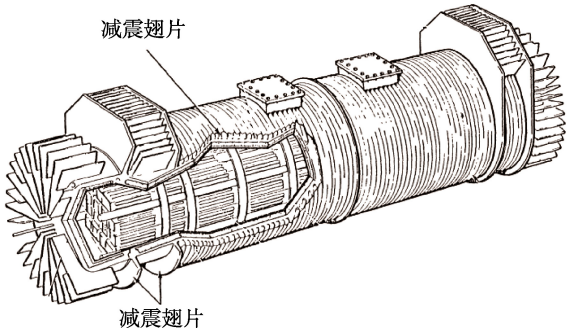

图 3　IF–300 型运输容器示意图[23]
Fig.3 Schematic diagram of IF-300 transport cask[23]

作为小型乏燃料运输容器，意大利 AGN–1 型运输容器根据操作使用需求采用了不锈钢椭球型壳式减震器[24]，容器结构见图 4。AGN–1 型运输容器主体是与 CASTOR 系列运输容器类似的球墨铸铁容器，质量相对较小（约 54 t）。该运输容器两端的壳式减震器内部没有填充缓冲材料，在干式操作条件下内部为干燥空气，在湿式操作条件下内部为水。该减震器能够依靠钢制壳体的变形吸收冲击能量，但此类设计仅适用于小型乏燃料运输容器[25]。

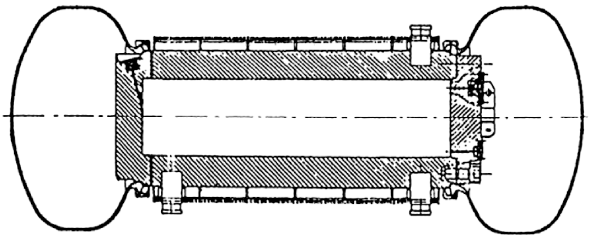

图 4　AGN–1 型运输容器示意图[24]
Fig.4 Schematic diagram of AGN-1 transport cask[24]

为满足乏燃料组件航空运输更加严格的要求，俄罗斯 TUK–145/C 型乏燃料运输容器采用了全包裹式的减震器设计[26]。该运输容器的结构见图 5，主要由 SKODAVPVR/MB 型容器和能量吸收装置（EAC）两部分构成。其中，能量吸收装置（EAC）分为上、下两部分，质量为 18 500 kg，由超过 2 000 个钛合金材质的空心球体焊接而成，并采用密封泡沫填充。外部的能量吸收装置（EAC）完全包裹内部容器，用于吸收航空事故中可能造成的巨大冲击能量，能够承受不低于 90 m/s 的速度对刚体的冲击。

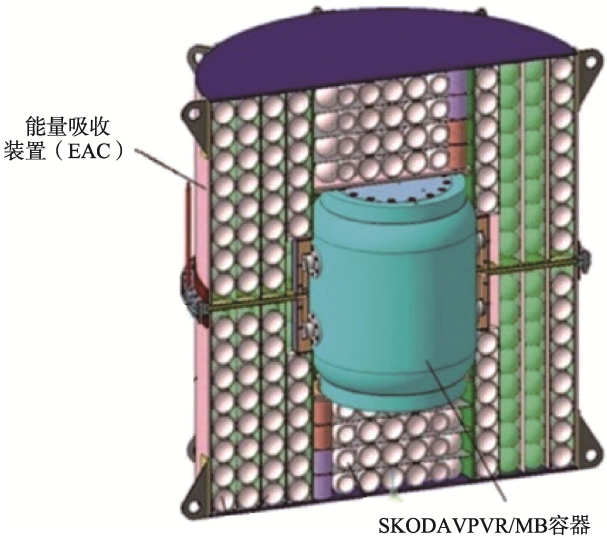

图 5　TUK–145/C 型乏燃料运输容器示意图[26]
Fig.5 Schematic diagram of TUK-145/C spent fuel transport cask[26]

1.4　小结

壳式减震器是国内外乏燃料运输容器采用的主要结构形式，其设计和制造技术成熟，能够应用于多种尺寸的运输容器。木材是主要的缓冲材料，国外减震器多采用轻木、红木等木材进行填充，而国内则选择资源更丰富的泡桐木作为填充材料。除此之外，聚氨酯泡沫、蜂窝铝等工程材料也被用于减震器缓冲设计。考虑到壳式减震器装卸复杂、储存不便等缺点，国外部分乏燃料运输容器根据使用需求设计了其他结构形式的减震器，也能实现良好的效果。

2　乏燃料运输容器减震器优化研究

2.1　缓冲材料优化

乏燃料运输容器减震器多设计为外部钢层包裹缓冲材料的结构形式，其中缓冲材料在受冲击时发挥了缓冲吸能的关键作用，因此研究和开发性能更加优异的缓冲材料成为了研究热点[27]。

2.1.1　木质填充材料

木材具有质量相对较小、易于加工制造、可再生、环保等优点，且受冲击载荷变形后具有较强的能量吸收能力[12]，因此被广泛用作乏燃料运输容器减震器的填充材料。

国际上，欧洲国家多采用本地生长的云杉、山毛榉等木材作为减震器缓冲材料，除此之外，生长于热带地区的轻木、红木等木材具有更好的抗压缩性能。相关研究显示[28]，红木的抗压缩强度大于轻木，但轻木的吸能效率更高，并且同其他木材类似，均表现为轴向上的力学强度更大。与红木相比，轻木的价格更具优势，因此更受欢迎。与吸能效率的评价方式不同，较大的抗压缩强度使得单位体积的轻木在轴向上具有更强的吸能能力，因此，比吸能量也用于评价减震器设计[29]。

轻木的力学动态响应也受到关注和研究[30]。相较于准静态压缩，动态压缩条件下轻木的失效强度增大，发生致密化的应变减小，但总体表现为平台应力不受应变速率的影响。由于轻木越来越受欢迎，因此近些年被更多国家种植，但不同的气候也造成其力学性能存在差异，总体表现为密度越大，平均破碎强度越高[31]。轻木的性能易受温度影响，阿海珐公司研究发现温度升高造成轻木力学性能下降，并且这一规律也适用于其他木材[32]。在开展力学研究的同时，近几年国外相关学者还增加了对木材填充减震器在火烧试验条件下的安全性研究，特别是探究木材中可能存在的阴燃对放射性活度释放等的影响[33-34]。

考虑到国内轻木等木材资源有限，主要依赖进口，因此目前国内乏燃料运输容器减震器设计主要以资源更丰富的泡桐木作为缓冲材料。泡桐木的压缩性能研究显示，泡桐木在轴向上能够表现出良好的压缩性能和吸能性能，但缺点是随着含水量增加，其压缩、吸能性能显著下降，易受环境条件的影响[35]。国内许多学者还探究了将我国资源丰富的其他种类木材作为减震器缓冲材料的可能性。中国林业科学研究院吕文华等[36]对我国主产的几种人工林木材的减震性能进行研究发现，大青杨、毛白杨和落叶松密度较大，使得容器质量和运输成本增加，难以满足减震要求，而泡桐和柳杉密度相对低，抗压强度较小，可以作为抗压强度和尺寸要求不高的容器的减震材料。为获得更好的减震性能，该团队针对低密度人工林杉木开展了树脂浸渍改性研究[37]，结果表明浸渍改性技术有助于提高木材的密度和抗压强度，在一定程度上改善木材的减震性能。中国工程物理研究院钟卫洲等[38]探究了国内云杉木的抗压缩性能，研究发现云杉木在轴向上的性能明显高于横纹方向的，且在超高的加载速率（500 m/s）下，云杉木能够表现出更高应力，具有良好的冲击响应。

2.1.2　工程填充材料

相较于自然生长的木材，工程材料能够更好地控制材料的平均抗压强度，更有利于减震器设计，因此聚氨酯泡沫、蜂窝铝等材料也被用作乏燃料运输容器减震器的缓冲材料。

聚氨酯泡沫不但具有可以预测的吸能能力，而且质量稳定、形状易于加工、具有各向同性的力学性能，还能提供显著的热保护[39]，在运输容器减震器设计方面发挥了重要作用，并且其抗压缩性能的动态响应特性有利于其作为减震器的缓冲材料。印度巴哈原子研究中心通过冲击响应试验发现[40]，随应变速率增加，聚氨酯泡沫发生致密化的应变值减小，屈服强度增加，使得吸能能力增强。除此之外，聚氨酯泡沫的力学性能受材料密度和温度的影响较大。随着材料密度增加，其压缩、冲击等力学强度不断增加[41]，但随温度升高，聚氨酯泡沫“应力–应变”平台期缩短，抗压强度、压缩模量等表征压缩性能的参数近似线性降低[42]，这也为减震器的设计带来一定的制约。

蜂窝铝材料具有质量小、吸能能力强、易于加工制造等特点，在航空航天、交通运输等行业被广泛应用于吸能装置，缺点是价格较高。蜂窝铝材料在冲击载荷条件下表现优异[43]，随载荷的加载速度增加，蜂窝铝材料的平台期强度、质量比吸能、体积比吸能等力学特性增强[44]。另外，蜂窝铝材料六边形单元尺寸的缩小和壁厚增加均有助于增强材料的吸能能力，当材料质量增加 1 倍时，其吸能能力将增加 2 倍[45]。蜂窝铝材料的力学性能也具有各向异性的缺陷，其在轴向方向上具有更好的压缩性能和吸能能力，因此，需要在减震器设计时充分考虑

蜂窝铝材料的填充方向。

2.1.3 新型填充材料

虽然现有缓冲材料具备了一定的应用条件，但还存在固有缺陷的制约，因此，国内外学者期望寻找和研究出性能更加全面的新型缓冲材料[46]，其中泡沫铝、碳泡沫、双向瓦楞蜂窝铝等新材料被研究应用于乏燃料运输容器减震器。

泡沫铝材料是一种各向同性材料，具有较高的比强度、比刚度和吸能效率，在交通运输、建筑等行业具有较大的应用潜力[47]，近些年其优异的力学性能也受到关注。李忠芳等[48]探究了闭孔泡沫铝材料作为乏燃料运输容器减震器填充材料的可能性，结果表明，面心立方腔结构的泡沫铝在准静态压缩过程中应力分布均匀，具有相当的压缩性能和吸能性能，且在一定密度范围内大致相同，具有良好的性能稳定性。相关研究还表明，孔隙率、孔径等参数均对泡沫铝材料的压缩和吸能性能有重要影响[49]，但结论尚不统一，有待进一步探究。

作为低密度的多孔结构材料，碳泡沫已被应用于热能储存、多孔电极、过滤材料等多个领域[50]。另外，特殊结构也决定了其具有较好的力学性能，其中非石墨类型的碳泡沫相对较硬，导热系数和制造成本较低，被阿海珐公司（AREVA）研究用作减震器的缓冲材料[32]。研究发现，在−40 ℃和 140 ℃的极端温度条件下，碳泡沫的抗压缩性能不受影响，并且对湿度的变化很不敏感，这些特点都有利于作为减震器缓冲材料的应用。需要注意的是，碳泡沫的力学性能具有轻微的各向异性，这与制造过程中孔结构在发泡方向上的拉长有关。

双向瓦楞蜂窝铝作为一种新型材料，被国内学者研究提出用于填充乏燃料运输容器的减震器[35]。该材料为铝基多孔轻质材料，其波纹形为标准规则六边形的一半，且正交布置，其力学性能不受温度和湿度的影响，具有多向吸能能力。与泡桐木相比，双向瓦楞蜂窝铝材料在 3 个方向上均能表现出良好的力学性能，且制造工艺简单，具有较好的应用潜力。为进一步验证其吸能性能，邢攸冬等[51]结合 NAC–STC 运输容器参数开展了 9 m 自由下落试验的仿真计算研究，结果表明双向瓦楞蜂窝铝具有良好的能量吸收效果，其平台应力值能够满足 NAC–STC 运输容器平台应力过程最小值 12.35 MPa 的要求。

2.1.4 小结

作为传统的缓冲材料，木材被广泛应用于乏燃料运输容器的减震器，具有易于获取、减震性能良好等优点，然而，其力学性能也具有各向异性的固有缺陷，且易受温度、湿度等环境条件的影响。

聚氨酯泡沫、蜂窝铝等工程材料能够在制造加工时实现对抗压缩强度的控制，在冲击载荷下能够表现出更强的吸能能力，但 2 种材料也存在各自缺点。其中聚氨酯泡沫的抗压缩性能随温度升高而下降，蜂窝铝力学性能存在各向异性的固有缺陷，且价格较高。

为克服现有缓冲材料性能的局限性，泡沫铝、碳泡沫、双向瓦楞蜂窝铝等期望具备更全面性能的新型缓冲材料正在被研究，需要进一步优化确定材料的加工制造参数和设计应用条件。

2.2 结构设计优化

减震器的结构尺寸、形状对冲击过程中的响应有重要影响。在壳式减震器的尺寸设计方面，可以基于填充材料的冲击特性参数，采用数学方法推导出各种跌落条件下减震器的冲击吸能体积，进而初步确定减震器的初始尺寸和质量[52]。

基于初步设计，进一步开展减震器的结构设计优化。已有研究表明，减震器高度的增加有利于冲击时峰值加速度的降低[53]，但存在能量吸收上限的平衡点，在此基础上额外的高度增加不能获得更好的减震性能，反而增加了减震器质量。另外，端部形状能够影响减震器冲击过程表现，在端部边缘处引入倒角有助于减轻导致焊缝失效的应力集中[13]，圆锥形的减震器端部还有利于降低冲击过程中侧面和末端方向的峰值加速度[21]。除此之外，减震器外壳的焊接方式也具有一定影响。韩国原子能研究中心[54]研究发现，在减震器外壳上的适当位置采用一定强度的间断焊接，有助于通过控制对缓冲材料的约束和适当释放，减轻减震器在冲击阶段后期的最大冲击力。

在此基础上，采用 ANSYS、ABAQUS、LS–DYNA 等有限元计算软件建立减震器和容器的数值模型[4,55]，模拟容器跌落试验的冲击过程，帮助进一步优化减震器结构设计，并将关键部件的应力、应变作为评价标准，验证结构可靠性[56]。其中，应力评价标准已在世界范围内得到广泛应用，而塑性应变的评价标准在 2015 版 ASME《锅炉与压力容器规范》第III卷《核设施部件建造规则》中提出。韩国蔚山科学技术院探究了 2 种评价标准在乏燃料运输容器减震器设计方面的差异[57]，研究发现基于应力评价标准的设计更加保守，在某些情况下相较于应变标准保守超过了 100 倍。

在力学试验方面，国内外试验要求基本相同，各国均依据国际原子能机构（IAEA）发布的《放射性物质安全运输条例》（SSR–6）制定了本国的标准文件，我国参照制定了《放射性物质安全运输规程》（GB 11806）。国内外开展力学试验的装置应满足上述标准中一致的试验要求，国内中国辐射防护研究院已具备开展 130 t 级容器力学试验的能力，相关力学测试装置已实现国产化。在研究队伍方面，国内

高校、研究院多关注基础材料研究，相关企业及容器设计单位多关注减震器的设计与应用，相比之下，国外相关公司将材料研究与减震器设计应用联系得更加紧密。

3　结语

综上所述，乏燃料运输容器减震器是保障容器筒体结构完整，确保乏燃料安全运输的关键部件。国外在减震器的设计、应用方面技术成熟，成熟的产品较多，能够满足多种类型乏燃料运输容器的需求，而国内在大型乏燃料运输容器减震器设计方面的经验相对少，在今后的自主发展中可以从以下几个方面进行借鉴。

1）在材料研究方面，建议增加对新型缓冲材料的探索，注重对材料冲击响应特性、温湿度影响特性等的测试研究，尽快掌握具备优异性能材料的加工制造工艺。

2）在减震器设计方面，建议增加工程材料的应用，借鉴和研究国际上成熟、有效的结构形式，特别注重对大型乏燃料运输容器减震器的设计开发。

3）在减震器产品开发方面，建议增强与不同容器筒体的适配性，针对不同尺寸、类型的乏燃料运输容器尝试开发系列化、家族化的产品。

4）在队伍建设方面，建议增加基础研究设计与制造单位的联系，增加以工程需求为导向，推进相关产业“产学研”一体化的发展。

参考文献：

[1] GB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].
GB 11806—2019, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S].

[2] 殷勇，李其朋，马庆俊. 高燃耗乏燃料运输容器结构设计研究[J]. 核科学与工程, 2017, 37(2): 308-313.
YIN Yong, LI Qi-peng, MA Qing-jun. Study on the Structural Design of High Burnup Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(2): 308-313.

[3] FRANKLIN A. Evaluation of Improvement Potential for Spent Fuel Cask Handling[R]. Pacific Northwest Lab, Richland, WA (USA), 1981: 8-10.

[4] KOMANN S, BALLHEIMER V, QUERCETTI T, et al. Design Assessment by BAM of a new Package Design for the Transport of SNF from a German Research Reactor[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2019, America, 2019: 1176.

[5] 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 Container[J]. Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.

[6] YAMAMOTO T, HODE S, KAMIWAKI Y, et al. Developments in Spent Fuel Transport and Storage Casks[J]. Technical Review, 2006. 43(4): 1-6.

[7] KIM K S, KIM J S, CHOI K S, et al. Dynamic Impact Characteristics of KN-18 SNF Transport Cask - Part 1: An Advanced Numerical Simulation and Validation Technique[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(4): 546-559.

[8] KIM K S, KIM J S, CHOI K S, et al. Dynamic Impact Characteristics of KN-18 SNF Transport Cask - Part 2: Sensitivity Analysis of Modeling and Design Parameters[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(4): 560-571.

[9] 李忠芳. 核乏燃料运输容器减震器填充材料的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019: 3-5.
LI Zhong-fang. Study on the Filler Material in Impact Limiters for Nuclear Spent Fuel Transport Cask[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019: 3-5.

[10] XU Yu-mei, YANG Jian, XU Chao, et al. Thermal Analysis on NAC-STC Spent Fuel Transport Cask under Different Transport Conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 682-690.

[11] KLEIN K, WILL J, SEIDER T. Numerical Simulation of Wood Filled Impact Limiter with LS-DYNA[C]// International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, Germany, 2004: 1-7.

[12] QIAO L, ZENCKER U, MUSOLFF A, et al. Dynamic Finite Element Analyses of a Spent Fuel Transport and Storage Cask with Impact Limiters by 9 Meter Drop Tests[C]// SIMULIA Customer Conference, Germany, 2011: 932-945.

[13] SALIBA R, MOURAO R P, QUINTANA F, et al. Analysis and Design of Spent Fuel Transport Cask Impact Limiters[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2011, 22(4): 172-178.

[14] 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, 11(5): 51-58.
ZHOU Yu-qing. General Situation of Design and Test of RY-I Spent Fuel Transport Container[J]. Radiation Protection Bulletin, 1991, 11(5): 51-58.

[15] 周玉清，游美英，张毅. RY–I型乏燃料运输容器研究试验[J]. 中国核科技报告, 1993(1): 11.

ZHOU Yu-qing, YOU Mei-ying, ZHANG Yi. Study and Test on Ry-I Type Transport Cask for Spent Fuels[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1993(1): 11.

[16] 许文清, 高学功. BQH—20 型乏燃料运输容器力学分析[J]. 核工程研究与设计, 1998(26): 7.
XU Wen-qing, GAO Xue-gong. Mechanical Analysis of BQH—20 Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Engineering Research and Design, 1998(26): 7.

[17] 汪俊. CNSC–24 乏燃料干法贮运容器热工安全分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 15-18.
WANG Jun. Thermal Safety Analysis of CNSC-24 Spent Fuel Transportation and Storage Cask[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 15-18.

[18] 盛选禹, 成昱旻, 孔文文, 等. 一种乏燃料运输容器: China, 210073345U[P]. 2020-02-14.
SHENG Xuan-yu, CHENG Yu-min, KONG Wen-wen, et al. A Kind of Spent Fuel Transport Container: China, 210073345U[P]. 2020-02-14.

[19] LEDUC D, JEFFERY E J. Spent Fuel Cask Impact Limiter Attachment Design Deficiencies[C]// Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Miami, 2007: 1-9.

[20] SINGH K P, SOLER A I, BULLARD C W. Validation of Impact Limiter Crush Prediction Model with Test Data: Case of HI-STAR 100 Package[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2006, 17(1): 41-49.

[21] HARDING D C, QUEVEDO D G. Protecting Against Corner Impacts: Sensitivities Discovered during a Rail Cask Impact Limiter Design[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2014, 25(1): 38-46.

[22] MEIER J K. Thermal Analyses of the IF-300 Shipping Cask[R]. California Univ, Livermore (USA): Lawrence Livermore Lab, 1978: 1-2.

[23] ANDERSON R. Studies and Research Concerning BNFP: Operational Assessment of the General Electric IF-300 Rail Spent Fuel Cask[R]. Allied-General Nuclear Services, Barnwell, SC (United States), 1978: 3-6.

[24] PUGLIESE G, FRANO R L, FORASASSI G. Spent Fuel Transport Cask Thermal Evaluation under Normal and Accident Conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(6): 1699-1706.

[25] 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: 11-16.
XU Chao. Research on the Key Technologies of Safety Design for Spent Fuel Transportation Cask[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 11-16.

[26] BUDU M, DERGANOV D V, SAVINA O A, et al. Developing a Spent Fuel Cask for Air Transport[J]. Nuclear Engineering International, 2014, 59(715): 17-21.

[27] EISENACHER G, WILLE F, DROSTE B, et al. Development of a Wood Material Model for Impact Limiters of Transport Casks[C]// WM2014 Conference, Phoenix, 2014: 14111.

[28] KANG S G, IM J M, SHIN K B, et al. Effective Equivalent Finite Element Model for Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Cask Made of Sandwich Composites Panels[J]. Composites Research, 2015, 28(2): 58-64.

[29] CHOI W S, SEO K S. A Simple Sizing Optimization Technique for an Impact Limiter Based on Dynamic Material Properties[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(4): 925-932.

[30] VURAL M, Ravichandran G. Dynamic Response and Energy Dissipation Characteristics of Balsa Wood: Experiment and Analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(9): 2147-2170.

[31] HAROON R, XUE J. Impact Limiter Development and New Material Investigation for Spent Fuel Transport Casks[C]// Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2019, America, 2019: 1279.

[32] CHARLOTTE K, AMINE N, HERVÉ I. 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 PATRAM 2016, Japan, 2016: 1010.

[33] FELDKAMP M, ERENBERG M, NEHRIG M, et al. Behavior of Wood Filled Impact Limiters During the IAEA Thermal Test[C]// Volume 7: Operations, Applications and Components. Waikoloa, Hawaii, USA, American Society of Mechanical Engineers, 2017: 65721.

[34] FELDKAMP M, ERENBERG M, NEHRIG M, et al. Heat Flux from Wood Filled Impact Limiter Under Fire Conditions[C]// 9th International Scientific Conference-Wood & fire Safety 2020, Online, 2020: 51517.

[35] LI Zhong-fang, YANG Si-yi, XU Hai-le, et al. Study on the Two-Way Corrugated Aluminum Honeycomb as a Filler Material in Impact Limiters for Spent Fuel

Transport Casks[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, 56(5): 425-431.

[36] 吕文华，刘君良，秦特夫，等. 几种人工林木材的减震性能研究[C]// 全国生物质材料科学与技术学术研讨会，长沙, 2011: 208-211.
LYU Wen-hua, LIU Jun-liang, QIN Te-fu, et al. Study on Shock Absorption Performance of Several Plantation Woods[C]// National Symposium on Biomass Material Science and Technology, Changsha, 2011: 208-211.

[37] 吕文华，郑雅娴，柴宇博，等. 大型运输容器减震用改性木材的研制[J]. 东北林业大学学报，2015, 43(2): 75-79.
LYU Wen-hua, ZHENG Ya-xian, CHAI Yu-bo, et al. Preparation and Characterization of Special Shock Absorption Wood[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2): 75-79.

[38] 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(10): 79-84.
ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, WEI Qiang, et al. Multi-Scale Numerical Analysis on Failure Behavior of Wood under Different Speed Loading Conditions[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(10): 79-84.

[39] PATEL J, STOJKO S. Characterising Polyurethane Foam as Impact Absorber in Transport casks[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2010, 21(1): 25-30.

[40] 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.

[41] 王伟力，徐标. 硬质聚氨酯泡沫塑料力学性能与密度、增强剂含量的关系[J]. 工程塑料应用, 2001, 29(8): 8-10.
WANG Wei-li, XU Biao. Relation of the Mechanical Properties of Rigid Polyurethane Foam with Its Density and Content of Its Reinforced Phase[J]. Engineering Plastics Application, 2001, 29(8): 8-10.

[42] MAZZUCA P, FIRMO J P, CORREIA J R, et al. Mechanical Behaviour in Shear and Compression of Polyurethane Foam at Elevated Temperature[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2022, 24(2): 1429-1448.

[43] HU L L. Dynamic Crushing Strength of Hexagonal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 467-474.

[44] 王中钢，鲁寨军. 铝蜂窝异面压缩吸能特性实验评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1246-1251.
WANG Zhong-gang, LU Zhai-jun. Experimental Assessment on Energy Absorption Property of Aluminum Honeycomb under Out-of-Plane Compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1246-1251.

[45] 蔡茂，高群，宗志坚. 铝合金蜂窝结构轴向压缩吸能特性[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(5): 675-679.
CAI Mao, GAO Qun, ZONG Zhi-jian. Energy Absorption Properties of Honeycomb Structured Aluminum under Axial Compression[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(5): 675-679.

[46] 邢攸冬，杨思一，安钰坤，等. 核乏燃料运输容器减震器填充材料研究进展[J]. 包装工程，2019, 40(21): 111-117.
XING You-dong, YANG Si-yi, AN Yu-kun, et al. Research Progress in Impact Limiter Filling Materials for Nuclear Spent Fuel Transport Casks[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 111-117.

[47] AN Yu-kun, YANG Si-yi, ZHAO Er-tuan, et al. Formation Mechanism and Three-Point Bending Behaviour of Directly Fabricated Aluminium Foam Plates[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(4): 421-429.

[48] LI Zhong-fang, YANG Si-yi, XU Hai-le, et al. Study on Aluminum Foam as a Filler Material for Impact Limiter of Spent Fuel Transport Cask[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 238: 05006.

[49] 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 Influencing Factors on Compressive and Energy Absorption Property of Aluminum Foam[J]. Architecture Technology, 2018, 49(3): 315-318.

[50] INAGAKI M. Carbon Foam: Preparation and Application[J]. Carbon, 2015, 87: 128-152.

[51] XING You-dong, YANG Si-yi, LI Zhong-fang, et al. Simulation and Application of Bi-Directional Corrugated Honeycomb Aluminum as Filling Material for Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Transport Cask[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 361: 110502.

[52] CHOI W S, SEO K S. A Simple Sizing Optimization Technique for an Impact Limiter Based on Dynamic Material Properties[J]. Nuclear Engineering and Design,

2010, 240(4): 925-932.

[53] HAO Yu-chen, LI Yue, WANG Jin-hua, et al. Study on the Impact Limiter Design in Spent Fuel Transfer Cask in Nuclear Power Plants[C]// Volume 1: Beyond Design Basis; Codes and Standards; Computational Fluid Dynamics (CFD); Decontamination and Decommissioning; Nuclear Fuel and Engineering; Nuclear Plant Engineering, Virtual, Online. American Society of Mechanical Engineers, 2020: 83761.

[54] KU J H, SEO K S, PARK S W, et al. Beneficial Influence of the Weldment Rupture of Cask Impact Limiter Case on the Impact Absorbing Behavior[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 196(3): 263-279.

[55] KANG S H S, KIM D H, CHANG Y S, et al. Comparative Stress Analyses of Dropped Spent Nuclear Fuel Assembly in A Prototypal Cask[C]// Volume 6: Materials and Fabrication, Virtual, Online. American Society of Mechanical Engineers, 2020: 21510.

[56] KANG S, KIM D H, CHANG Y S, et al. Integrity Assessment of Spent Fuel Assembly in Vertically and Obliquely Dropping Cask[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(9): 3821-3827.

[57] KIM S P, KIM J, SOHN D, et al. Stress-Based Vs. Strain-Based Safety Evaluations of Spent Nuclear Fuel Transport Casks in Energy-Limited Events[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 355: 110324.

责任编辑：曾钰婵