

冲头几何形态对复合材料层合板低速冲击损伤特性的影响

郝子怡¹, 董晓传^{1,2}

¹天津职业技术师范大学汽车模具智能制造技术国家地方联合工程实验室, 天津

²天津市高性能精准成形制造技术与装备重点实验室, 天津

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

本文通过ABAQUS软件对不同结构形状的冲头对T300/PA6复合材料层合板的冲击损伤进行了仿真研究。在全方位考虑层合板中基体失效、纤维失效、层间失效及其混合失效等多种失效模式的基础上, 运用VUMAT子程序构建三维Hashin失效判据, 并采用内聚力单元模型深入分析了层合板层间损伤的逐步演变过程。研究结果显示, 圆柱形冲头接触时长最短, 为3.9 ms, 分层面积最大, 为1841.34 mm²; 圆锥形冲头接触时长最长, 为6.6 ms, 分层面积为553.11 mm², 其表明设计较钝的冲头会带来更大的冲击力和更短的接触时长, 会进一步导致分层损伤的产生; 与此相对, 更尖锐的冲头会带来更小的冲击并延长其接触时长, 对于基体损伤的产生更为有利。在冲击能量保持恒定的前提下, 使用较钝的冲头设计对层合板造成的损害相对较轻。

关键词

碳纤维复合材料, 数值模拟, 冲击动力学, 冲头形状

The Influence of Punch Geometry on the Low-Velocity Impact Damage Characteristics of Composite Laminates

Ziyi Hao¹, Xiaochuan Dong^{1,2}

¹National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Manufacturing Oriented Automobile Die & Mold, Tianjin University of Technology & Education, Tianjin

²Tianjin Key Laboratory of High-Performance Precision Forming Manufacturing Technology and Equipment, Tianjin

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

文章引用: 郝子怡, 董晓传. 冲头几何形态对复合材料层合板低速冲击损伤特性的影响[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 200-206. DOI: 10.12677/met.2025.142020

Abstract

In this study, the impact damage of T300/PA6 composite laminates subjected to punches with different structural shapes was investigated through numerical simulations using the ABAQUS software. On the basis of all-round consideration of various failure modes in the laminates, including matrix failure, fiber failure, interlaminar failure, and failure of their combinations, a three-dimensional Hashin failure criterion was established using the VUMAT subroutine. Cohesive zone elements were employed to thoroughly analyze the progressive evolution of interlaminar damage in the laminates. The results show that the cylindrical punch has the shortest contact duration of 3.9 ms and the largest delamination area of 1841.34 mm². In contrast, the conical punch has the longest contact duration of 6.6 ms and a delamination area of 553.11 mm². This indicates that a more blunt punch design leads to higher impact forces and shorter contact durations, which in turn promotes delamination damage. Conversely, a sharper punch results in lower impact forces and extended contact durations, which is more conducive to matrix damage. When the impact energy is kept constant, a blunter punch design causes relatively less damage to the composite laminates.

Keywords

Carbon Fiber Composite Laminates, Numerical Simulation, Impact Dynamics, Punch Shape

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技和工业的持续进步,轻量化材料在航空航天和汽车制造等行业中的重要性日益凸显。碳纤维增强聚合物材料(CFRP)因其卓越的比强度、比刚度、抗腐蚀能力和高度可定制的特性,已经成为推动结构轻量化设计的首选材料之一,并在多个领域得到了广泛应用[1]。但是,复合材料层合板由于其复杂的多层构造、不均匀性和各向异性的特点,对于与铺层方向垂直的冲击载荷显示出了极高的敏感性。这类难以察觉的损害常常难以进行准确检测,从而增加了在维护过程中漏检的风险,并会对结构的安全性和可靠性产生不良影响。因此,对 CFRP 在低速冲击下的机械响应和损害方式进行深入探讨,对于保障其在实际应用中的安全使用是非常关键的。

目前对 CFRP 层合板的低速冲击损伤研究已取得一定进展。例如, Ogunleye 等[2]通过实验研究了不同铺层顺序的碳纤维/环氧树脂层合板在弯曲、拉伸和冲击载荷下的力学性能。Brooks 等[3]研究了碳纤维增强塑料(CFRP)复合材料板在低速冲击下的行为以及由此产生的损伤,探讨了永久表面压痕深度与层间脱层损伤面积之间的关系。Ravindran 等[4]通过实验研究了碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板中多尺度纤维增强机制对层间断裂韧性、低速冲击损伤抗力和冲击后压缩(CAI)强度的影响。现有研究多聚焦于材料成分、冲击能量大小以及铺层顺序等因素对冲击损伤性能的影响[5]-[8]。对于冲头形状这一关键变量的系统研究却相对匮乏。冲头形状作为影响冲击损伤的重要因素,其对层合板损伤模式的调控机制尚不明确。

本文旨在通过设计半球形、圆柱形及锥形等多种冲头形状,以 T300/PA6 复合材料层合板为研究对

象,开展系统的数值模拟研究,深入探究不同冲头形状对层合板损伤模式的影响机制。通过对比分析不同冲头形状下层合板的冲击损伤特征,揭示冲头形状对冲击载荷分布、应力集中区域以及损伤模式的调控作用,进而为基于冲头形状优化的损伤控制策略提供理论依据,并为提升 CFRP 材料在实际工程应用中的安全性评估与设计水平提供重要的指导意义。

2. 数值模拟仿真模型

本研究利用有限元分析工具 Abaqus 创建了一个低速冲击的有限元分析模型。层合板的尺寸规格是 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,由 10 层组成,铺层的顺序是 $[0/0/90/45/-45]_s$ 。在两个相邻的子层之间,插入了 0.001 厚度的 cohesive 单元来模拟它们之间的界面。冲击器具 16 mm 的直径和 5.5 kg 的质量。通过将冲头简化为刚体结构,并调整其速度至 2335.5 mm/s,成功地实现了 15 J 的低速冲击能量输出。在支撑底座上,设计了一个 $125\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 的中心镂空结构。在前述的背景下,进一步构建了柱形和锥形的冲头设计,旨在探讨不同的冲头形状如何对复合材料层合板在低速冲击下的数值预测产生影响。图 1 呈现了三种不同冲头形态的图解。在模拟过程中,所有的冲头都使用了统一的 5.5 kg 的惯性质量,并且冲头的直径都被设定为 16 mm。冲头与层压板之间使用标准的接触方式,层压板的内侧表面具备自接触的特性,以防止其被穿透。图 2 展示了构建的低速冲击模型。有关层合板复合材料的基础材料参数,可查阅表 1,而层合板的力学性能参数和界面单元材料参数则分别列在表 2 和表 3 中。

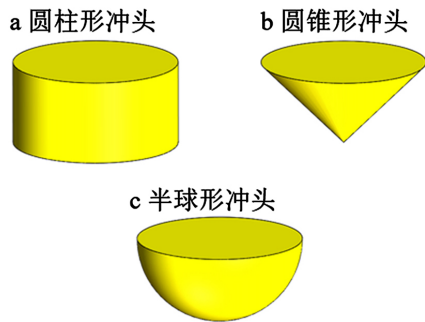


Figure 1. Three different punch shapes
图 1. 三种不同形状的冲头

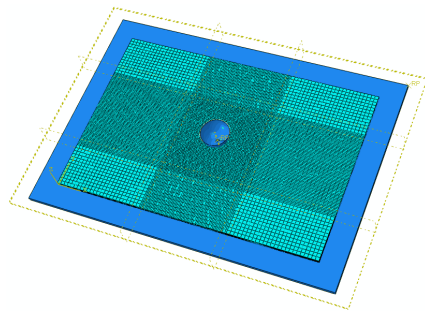


Figure 2. Finite element model
图 2. 有限元模型

Table 1. Basic material property parameters of CF/PA6
表 1. CF/PA6 基本材料性能参数

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	ν	ρ (T/mm ³)
115,000	7200	3100	2400	0.3	1.47e-9

Table 2. Mechanical property parameters of CF/PA6 material
表 2. CF/PA6 材料力学性能参数

X_T (MPa)	X_c (MPa)	Y_T (MPa)	Y_c (MPa)	G_{ft} (N/mm)	G_{fc} (N/mm)	G_m (N/mm)
1760	1100	61	68	56	10	7

Table 3. Interfacial element material parameters
表 3. 界面单元材料参数

N (MPa)	S (MPa)	G_n (N/mm)	G_s (MPa)	η	ρ (T/mm ³)
60	80	0.35	1.45	1.45	1.48e-9

3. 结果分析与讨论

3.1. 损伤结果分析

图 3 展示了在 15 焦耳冲击能量的条件下,不同形态的冲头对层合板造成的层间损伤的分布情况。经过对该图的仔细观察,可以注意到,在相对较低的冲击能量条件下,层合板的大部分层间界面,特别是接近冲击面及其背面的区域,并没有表现出明显的损伤消除迹象。而位于层合板中部铺层附近的区域,则遭受了较大范围的层间剥离损伤。更深入的研究揭示,层间的正应力和剪切应力是导致层间剥离损伤失效的根本。特别需要强调的是,在 $45^\circ/-45^\circ$ 的相邻铺层界面上,层间的应力集中现象更加明显。这种情况使得在受到低速冲击时,下层之间的损伤失效更有可能沿着 45° 的纤维铺层方向展开。此外,在层合板内部,位于中性面附近的各层之间的界面所承受的剪切应力已经达到了一个峰值。因此,与顶部和底部相比,中间部分的层间损伤更为严重。

当复合材料层合板遭受不同形状冲头的低速冲击时,冲头形状对其层间界面损伤特性存在显著影响。柱状冲头由于接触面积较小,导致应力在冲击点高度集中,使层间剪切应力迅速超过层间剪切强度极限,从而引发大面积层间分层。球形冲头因接触面积较大,在冲击过程中产生显著的弯曲形变,进而扩大应力集中区域,导致层间剪切应力显著上升,触发更大规模的层间损伤。锥形冲头在低速冲击时易产生穿透作用,冲击能量直接作用于基材内部,加重基材损伤,同时降低了层间损伤的能量吸收。

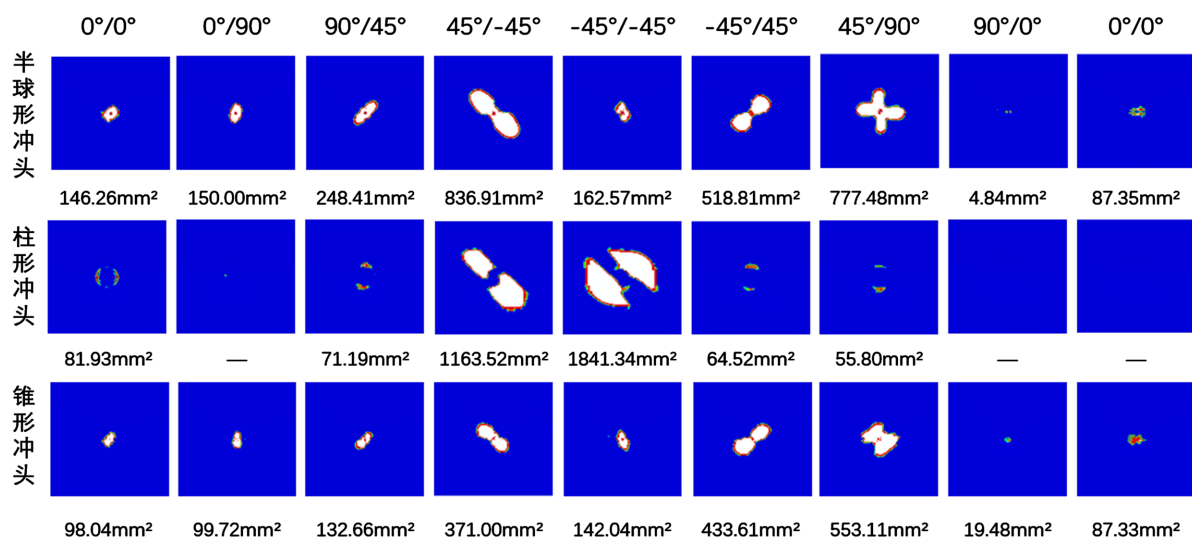


Figure 3. Damage conditions of the laminated plate corresponding to different punch geometries
图 3. 不同形态的冲头与相应的层合板之间的损伤状况

尽管不同冲头形状导致的损伤模式存在差异,但其内在联系主要体现在应力集中、能量传递和微观结构破坏的共同作用。冲击载荷均会导致局部应力集中,当层间剪切应力超过层间剪切强度时,层间分层不可避免。能量传递方式决定了损伤模式的差异:柱状冲头的能量集中于冲击点附近,导致局部损伤严重;球形冲头的能量在较大区域内分散,导致损伤区域扩大;锥形冲头的能量部分用于穿透基材,部分用于基材内部损伤,从而降低了层间损伤的能量吸收。微观结构方面,不同冲头形状的冲击均会破坏纤维与基体的界面以及层间界面,导致纤维断裂、基体屈服和层间分层,只是失效形式的发生位置和程度因冲头形状而异。

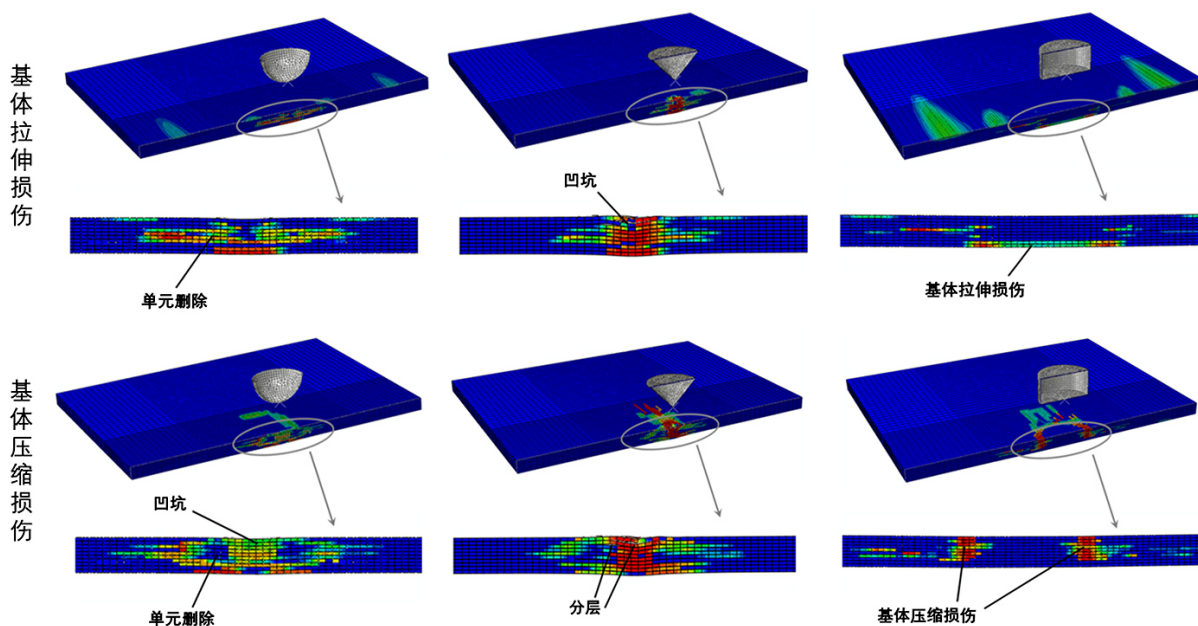


Figure 4. Damage conditions of the laminated plate base corresponding to different punch geometries

图 4. 不同形态的冲头对应的层合板基体的损伤情况

图 4 展示了复合材料层合板所受到的各种损伤的分布情况,红色区域代表单元已经完全失效,而其他颜色区域则表示部分失效或未失效的状态。图示还揭示了各种损伤的具体位置,以及在相应的破坏模式下能量的吸收状况。结果显示,锥形冲头冲击时基体损伤最为严重,主要集中在中间层和冲击正面区域,并沿层合板深度方向加剧。这是由于锥形冲头的尖端接触导致冲击能量高度集中,使基体在高应力下屈服和破坏。层间相互挤压及冲头的挤压效应进一步加重了基体的压缩损伤。

半球形冲头冲击导致的基体损伤程度次之,其损伤特征是从冲击中心向多方向蔓延。半球形冲头的较大接触面积使冲击载荷分布相对均匀,但冲击中心毗邻区域的显著弯曲形变导致层间剪切应力重新分布,进而引发基体的剪切损伤。这种剪切应力的增加使得基体在层间界面处更容易发生屈服和分层,导致基体损伤从冲击中心向周围区域扩展。从微观结构和失效机制来看,基体损伤的根本原因在于冲击载荷导致的应力集中和能量传递方式。锥形冲头的穿透作用直接破坏了纤维与基体的界面,使基体在深度方向上承受更高的应力,导致基体屈服和断裂。半球形冲头的弯曲形变则在层间界面处产生复杂的应力状态,包括剪切应力、拉伸应力和压缩应力,这种复杂的应力环境使得基体更容易发生屈服和破坏。此外,冲击能量的传递路径也对基体损伤有重要影响:锥形冲头的能量主要集中在冲击点附近,导致基体在局部区域遭受严重破坏;而半球形冲头的能量在较大区域内分散,使得基体损伤在更广泛的区域内发生。

冲击后层合板的基体损伤情况与冲头形状密切相关。锥形冲头导致基体在深度方向上的严重损伤, 而半球形冲头则引发基体在层间界面处的剪切损伤和分层。这些损伤模式均源于冲头形状对冲击载荷分布、应力集中区域以及能量传递路径的影响。

3.2. 结构响应分析

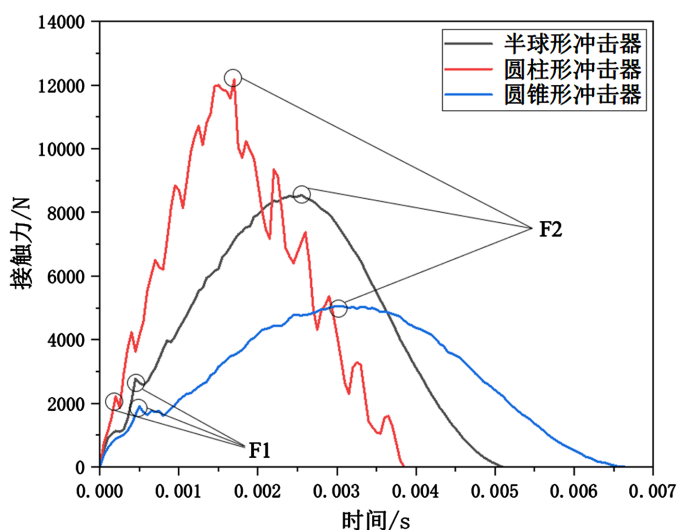


Figure 5. Contact force-time curves corresponding to different punch geometries

图 5. 不同冲头形态对应的接触力 - 时间曲线

图 5 显示了不同冲头形态下接触力随时间的变化。当冲击力达到阈值 F_1 (约 2 kN) 时, 试样刚度显著改变, 表明分层损伤开始出现。随着接触力的增加, 分层损伤加剧, 至最大冲击力 F_2 时, 刚度迅速降低, 损伤达到极限。三种冲头的初始冲击力 F_1 相近, 但最大冲击力 F_2 差异显著: 圆柱形冲头为 12.17 kN, 半球形冲头为 8.54 kN, 锥形冲头为 5.06 kN。最大冲击力与冲头接触面积呈正相关, 接触面积越大, 冲击力最大值越高。

在冲击测试中, 圆柱形冲头在 12 kN 冲击力下响应曲线显著降低, 表明层压板内部出现明显分层和基体损伤。而锥形冲头在 15 J 冲击能量下, 最大冲击力仅 5 kN, 响应曲线未显著减少。半球形冲头冲击力达 8 kN 时, 响应曲线仍稳定, 表明纤维未断裂。锥形冲头在触发层压板初始分层损伤方面最为敏感(F_1 不超过 2 kN), 且纤维断裂所需的冲击力也最低(F_2 约 5 kN)。这表明锥形冲头更易引发初级分层和纤维断裂, 主要因其尖端接触方式使冲击能量高度集中, 即使在较小冲击力下也能迅速破坏纤维与基体界面及层间界面。相比之下, 圆柱形冲头和半球形冲头接触面积较大, 冲击能量分散, 初始分层和纤维断裂所需的冲击力更高。圆柱形冲头的均匀应力分布易引发大面积分层, 而半球形冲头的弯曲形变产生复杂应力状态, 导致分层损伤从冲击中心向周围扩展。

不同冲头形状导致的损伤模式差异源于其对冲击载荷分布、应力集中区域以及能量传递路径的影响。锥形冲头因尖端接触和局部应力集中特性, 在较小冲击力下即可引发初始分层和纤维断裂; 而圆柱形冲头和半球形冲头则因接触面积较大, 冲击能量分散, 导致分层损伤区域较广, 但初始分层和纤维断裂所需的冲击力相对较高。

4. 结论

- 1) 冲头形状显著影响复合材料层合板的低速冲击损伤特性。圆柱形冲头接触时长最短(3.9 ms), 分层

面积最大(1841.34 mm²); 锥形冲头接触时长最长(6.6 ms), 分层面积最小(553.11 mm²)。半球形冲头的损伤介于两者之间, 且损伤从冲击中心向多方向蔓延。

2) 从微观结构和失效机制来看, 基体损伤的根本原因在于冲击载荷导致的应力集中和能量传递方式。锥形冲头的穿透作用直接破坏纤维与基体界面, 导致基体屈服和断裂; 半球形冲头的弯曲形变产生复杂应力状态, 使基体更容易发生屈服和破坏。

3) 在冲击能量恒定时, 较钝的冲头设计对层合板造成的损害相对较轻, 而更尖锐的冲头对基体损伤更为有利。合理选择冲头形状可优化复合材料层合板的损伤控制策略, 提升其在实际工程中的安全性。

基金项目

感谢天津市教委科研计划项目(2021KJ027)和天津市自然科学基金(22JCYBJC01620)的资助。

参考文献

- [1] Dubary, N., Bouvet, C., Rivallant, S. and Ratsifandrihana, L. (2018) Damage Tolerance of an Impacted Composite Laminate. *Composite Structures*, **206**, 261-271. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.045>
- [2] Ogunleye, R.O., Rusnakova, S., Zaludek, M. and Emebu, S. (2022) The Influence of Ply Stacking Sequence on Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite Laminates. *Polymers*, **14**, Article No. 5566. <https://doi.org/10.3390/polym14245566>
- [3] Brooks, R.A., Liu, J., Hall, Z.E.C., Joesbury, A.M., Harper, L.T., Liu, H., *et al.* (2024) The Relationship between the Extent of Indentation and Impact Damage in Carbon-Fibre Reinforced-Plastic Composites after a Low-Velocity Impact. *Applied Composite Materials*, **31**, 1869-1888. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10223-2>
- [4] Ravindran, A.R., Ladani, R.B., Kinloch, A.J., Wang, C. and Mouritz, A.P. (2021) Improving the Delamination Resistance and Impact Damage Tolerance of Carbon Fibre-Epoxy Composites Using Multi-Scale Fibre Toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **150**, Article ID: 106624. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106624>
- [5] Liu, H., Liu, J., Ding, Y., Zheng, J., Kong, X., Zhou, J., *et al.* (2020) The Behaviour of Thermoplastic and Thermoset Carbon Fibre Composites Subjected to Low-Velocity and High-Velocity Impact. *Journal of Materials Science*, **55**, 15741-15768. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05133-0>
- [6] Hynes, N.R.J., Vignesh, N.J., Jappes, J.T.W., Velu, P.S., Barile, C., Ali, M.A., *et al.* (2022) Effect of Stacking Sequence of Fibre Metal Laminates with Carbon Fibre Reinforced Composites on Mechanical Attributes: Numerical Simulations and Experimental Validation. *Composites Science and Technology*, **221**, Article ID: 109303. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109303>
- [7] Zhao, Y. and Zhou, X. (2024) Numerical Analysis of Unidirectional Carbon-Fibre/Epoxy Composite Laminates under Low Velocity Impacts of Different Forms. *Computational Materials Science*, **231**, Article ID: 112611. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2023.112611>
- [8] Yang, J., Zhang, W., Yang, F., Chen, S., Schmidt, R., Schröder, K., *et al.* (2020) Low Velocity Impact Behavior of Carbon Fibre Composite Curved Corrugated Sandwich Shells. *Composite Structures*, **238**, Article ID: 112027. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112027>