落锤冲头形状及冲击能量对玻璃 纤维层合板动态性能影响研究

邓云飞1, 尹湲1, 周春萍2, 王轩1

1.中国民航大学, 天津 300300

2. 航空工业济南特种结构研究所高性能电磁窗航空科技重点实验室,山东济南 250023

摘 要:纤维增强树脂材料层合板对外来物的冲击非常敏感,为解决其应用隐患,需要研究玻璃纤维增强复合材料层合板低 速冲击损伤机理和动态响应特性。本文采用三种头部形状冲头以6种冲击能量进行落锤试验,分析冲击过程中载荷与吸收 的能量变化规律。结果表明,冲击能量对层合板损伤形貌与载荷响应影响比较小,而冲头形状对层合板损伤形貌和载荷响 应影响较大。冲头形状越钝,层合板的载荷峰值就越大;反之,层合板最大冲击位移和最大冲击时间越长,冲击损伤程度越 大。本研究可为复合材料层合板工程应用提供一定的试验基础和参考依据。

关键词:复合材料;低速冲击;损伤机理;动态响应;失效模式

中图分类号:V258

文献标识码:A

增强树脂复合材料具有轻质、力学性能良好、绝缘和抗腐蚀性能优异等特点,被广泛应用于航空航天、汽车、化工、 土木建筑等领域^[1-3]。然而,纤维增强树脂材料层合板对外 来物的冲击非常敏感,冲击作用易使层合板产生严重的断 裂及分层损伤,从而使其强度发生骤降甚至失效^[4-5]。

为解决复合材料层合板应用隐患,研究其低速冲击的 动态力学性能及损伤机理尤为重要^[6-7]。王念^[8]通过数值仿 真与试验的方法详细分析了层合板冲击历程的损伤特点和 损伤机理,并全面揭示了基体开裂和纤维断裂等损伤形式 的形成原因及扩展规律。H. Ulus^[9]研究了冲击能量与吸收 能量之间的关系,发现大部分冲击能量被产生的冲击损伤 所吸收,一部分能量由于弹塑性变形和摩擦而耗散。R. C. Batra 等^[10]用数值仿真分析了层合板在低速冲击下的损伤 发生、损伤拓展和失效过程的变化历程。蒋万乐等^[11]用落 锤对玻璃纤维复合材料层合板进行了不同能量的冲击试 验。结果表明,随着冲击能量的增大,载荷一时间曲线的冲 击载荷峰值逐渐增大,层合板失效时间变短,并且载荷一位 移曲线的冲击行程越长,其冲击损伤越大。

复合材料层合板冲击过程复杂,影响因素众多,其中冲 击物形状对其冲击性能存在明显的影响。刘逸众等^[12]用圆 形和锥形冲头对T700/DS1202 层合板进行了低能量冲击试 验。结果表明,冲头形状对层合板的贯穿阈值存在影响,锥 形冲头相比圆形冲头可以在更小的冲击能量下贯穿层合 板,且锥形冲头造成的损伤更集中,损伤程度更严重。T. Mitrevski等[13]通过落锤试验以4J和6J的能量冲击试件,对 比半球形、卵形和锥形冲头下的层合板力学响应,发现冲头 形状对于能量耗散、峰值冲击力和冲击接触时间具有显著 影响。屈天骄等^[14]采用Abagus软件研究了复合材料层合 板低速冲击下的损伤特性。研究表明,冲击能量及冲头形 状对复合材料层合板抗冲击能力影响显著,冲头形状越尖 锐,层合板损伤面积越小,越容易出现侵入现象。M. Habibi 等^[15]采用半球形和圆锥形冲头以4~14J冲击能量开展了低 速冲击试验,研究冲头形状和冲击能量对复合材料层合板 抗冲击损伤特性,以及剩余拉伸性能的影响。结果表明,使 用圆锥形冲头的损伤程度更为严重,层合板主要发生基体 开裂、纤维断裂、分层等损伤模式,而这些损伤对复合材料 的剩余拉伸性能有显著影响。

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.04.011

通过现有文献发现,针对层合板抗外来物形状特性的研 究,大多限于层合板受到低能量冲击后的损伤特性,而在实际 应用中冲击能量经常远超过层合板的承载能力,故缺乏层合



收稿日期:2022-09-05;退修日期:2023-02-05;录用日期:2023-03-10 基金项目:航空科学基金(201918067001)

引用格式: Deng Yunfei, Yin Yuan, Zhou Chunping, et al. Study on the influence of drop hammer impactor shape and impact energy on dynamic properties of glass fiber laminates[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(04): 79-86. 邓云飞, 尹湲, 周春萍, 等. 落锤冲头形状及冲击能量对玻璃纤维层合板动态性能影响研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(04): 79-86.

板受到不同形状冲头的高能量击穿破坏后损伤定性、定量的 描述及验证。因此,本文利用三种形状冲头以较高的冲击能 量开展落锤试验,揭示出平纹编织玻璃纤维层合板在低速冲 击下的损伤形貌及动态响应规律,为玻璃纤维层合板工程应 用的损伤评估以及防护设计提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试件材料与制备

试件材料选用 Solvay 公司生产的 MXB7701/220 体系的 平纹编织玻璃纤维增强环氧树脂预浸料,表1 所示为材料参数^[16]。单层预浸料厚度为0.114mm,面密度为295g/m²。层合 板铺层顺序为[0/90]₃₈,共12层,总厚度约为1.37mm。

表1 材料参数 Table 1 Parameters of material

材料性能参数	数值	材料性能参数	数值
经向弹性模量E ₁₁ /GPa	26	经向拉伸强度 X _T /MPa	414
纬向弹性模量 E ₂₂ /GPa	26	纬向拉伸强度 Y _T /MPa	414
法向弹性模量E ₃₃ /GPa	8	法向拉伸强度 Z _T /MPa	120
剪切模量 G ₁₂ /GPa	3.8	经向压缩强度 X _c /MPa	458
剪切模量 G ₁₃ /GPa	2.8	纬向压缩强度 Y _C /MPa	458
剪切模量 G23 /GPa	2.8	法向压缩强度 Z _T /MPa	500
泊松比 γ ₁₂	0.1	面内剪切强度 S ₁₂ /MPa	105
泊松比 y ₁₃	0.25	面外剪切强度 S ₁₃ /MPa	65
泊松比 y ₂₃	0.25	面外剪切强度 S ₂₃ /MPa	65

层合板制备采用真空袋热压成形工艺,把预浸料按预 定的角度和层数铺贴,铺贴完成后依次覆盖隔离膜、上均压 板、电热毯和透气毡,使用真空袋和密封胶条进行密封,然 后通过真空泵连接热补仪将真空袋内抽真空,如图1所示。 当真空度到达90kPa以上,热补仪按照预设固化曲线调控 电热毯温度,如图2所示。固化结束后把层合板切割成 125mm×125mm的冲击试件。

1.2 低速冲击试验系统

低速冲击试验在Instron 9350 落锤试验机上完成,如图 3 所示,冲击装置主要由配重块、载荷传感器、气动夹具及防 回弹装置等组成,冲击物总质量为5.30kg。冲击总质量保 持不变,通过调节冲头冲击速度,从而得到不同的冲击能 量。通过载荷传感器、时间与速度测量装置采集数据,由 CEAST软件处理,即可得到实时的冲击时间、速度、载荷、 位移和能量吸收等重要参数。

1.3 冲击试验方案

为揭示冲击能量和冲头形状对玻璃纤维层合板抗冲击 性能的影响,冲头直径为20mm,形状为平头形、半球形和



圆锥形,如图4所示。冲击能量选取15J、30J、50J、100J、 150J和200J,试验工况共18组。



图4 冲头类型 Fig.4 Type of impactor

2 试验结果与分析

2.1 层合板低速冲击损伤特性

图5给出了平头形冲头冲击下层合板的损伤形貌。冲 头能量对层合板损伤模式影响很小,当冲击能量为15J时, 层合板正面发生剪切断裂,形成直径为20mm的圆形压痕 以及接近垂直的直线裂纹,断口处存在纤维拔出和分层现 象,而层合板背面呈现不规则撕裂。当冲击能量达到30J以 上,层合板损伤区域发生压溃失效,并且层合板损伤面积与 裂纹长度随着冲击能量的增加而增加。玻璃纤维层合板基 体强度明显低于纤维强度,因此,基体产生开裂并沿纤维方 向扩展,而且层合板在冲头的挤压力作用下产生了斜向压 溃折痕,最终形成规则五角形破片。

图6给出了半球形冲头冲击下层合板的损伤形貌。当冲 击能量为15J时,层合板未被穿透,层合板正面受到冲头挤压 产生塑性变形,并形成了深度约为4mm的凹坑,以及长度约 为55mm的十字形裂纹。当冲击能量为30J时,层合板已被 穿透,层合板产生了更大的塑性变形,层合板正面和背面均 呈现出长度约为20mm的规则菱形损伤区域,以及4条长度 约为15mm的直线裂纹,且菱形损伤区域四周有明显的折断 痕迹。基体在冲击区域沿着0°和90°花瓣开裂状拉伸断裂, 断口边缘呈锯齿状,并且存在纤维拔出现象。当冲击能量达 到50J以上时,冲击断口位置纤维束和基体发生脱黏,甚至产 生弧形破片冲塞,形成了更为严重的分层现象。

图7给出了圆锥形冲头冲击下层合板的损伤形貌。当冲击能量为15J时,其损伤形貌与半球形冲头情况相似,但是由于圆锥形冲头顶部形状尖锐,十字裂纹中心点被贯穿形成小圆孔。当冲击能量为30J时,层合板正面呈现圆形损伤区域,背面出现菱形损伤区域,且损伤主要集中在冲头冲击区域,存在轻微纤维拔出现象。当冲击能量为50J以上时,破片边缘呈锯齿状,纤维产生拉伸断裂破坏,基体产生









Fig.6 Damage morphology of laminated plate impacted by hemispherical impactor

开裂,并存在分层现象。当冲击能量达到200J时,由于冲击 能量较大,层合板受到冲击后产生弧形破片冲塞,并且损伤 区域由菱形区域扩展为直径达30mm的圆弧区域。





采用光学显微镜观测了不同形状冲头冲击后的层合板 微观损伤形貌,如图8所示。层合板发生以纤维断裂和基 体破碎为主的损伤破坏模式,同时圆锥形冲头相较于半球 形冲头在冲击时,层合板产生更加明显的分层损伤现象。



图 8 不同形状冲头冲击后的微观损伤形貌 Fig 8 Damage morphology with different shapes of impactors after impact

图9为层合板受到不同形状冲头冲击的损伤机理示意 图。当平头冲头冲击接触层合板时,层合板在冲头边缘处 受到环向剪切力,纤维和基体发生剪切断裂,随着冲头挤压 力的持续作用,层合板沿厚度方向压溃,并形成大面积的五 角形破片。当半球形冲头冲击接触层合板时,冲头与层合 板会形成一个球弧形接触面,球面内部产生挤压力,挤压作 用会导致纤维拉伸断裂和基体挤压破碎。层合板背面受到 压缩产生拉伸应力波,拉伸应力波作用在层合板背面首先 形成十字形裂纹,随着冲头的侵彻挤压作用,裂纹逐渐转变 成花瓣开裂状断口。当圆锥形冲头接触层合板时,其损伤 机理与半球形冲头相似。值得注意的是,随着圆锥形冲头 的持续侵彻作用,圆锥形冲头损伤区域是由点到面逐渐递 增的,当冲头顶部完全贯穿层合板后,其产生的损伤形貌与 半球形冲头相似。此外,由于圆锥形冲头顶部形状尖锐,更 易造成应力集中,从而导致接触点纤维和基体提前失效。



Fig.9 Schematic diagram of damage mechanism

2.2 层合板低速冲击动态响应曲线分析

图10为平头形冲头冲击层合板的载荷动态响应曲线。 在不同能量冲击下,载荷趋势基本相似,曲线可分为载荷随 位移上升阶段和载荷骤降阶段。上升阶段载荷表现出小幅 度波动,这是由于层合板在冲击过程中不断发生基体开裂、 分层及纤维断裂等多种形式的损伤。当冲击载荷达到峰值 时,纤维和基体达到承载极限而发生完全失效,导致层合板 压剪断裂,载荷迅速下降。

图11为半球形冲头冲击层合板的载荷动态响应曲线。 采用Savitzky-Golay滤波器对所有的曲线进行了平滑处理, 阶段上升载荷表现出小幅度震荡但总体呈线性的特点,线 性增长表示层合板整体发生了弹性变形。载荷达到峰值 后,曲线呈先骤降后锯齿状缓慢下降的趋势。载荷骤降是 因为层合板断裂失效后承载能力降低,冲头和层合板摩擦 力产生的载荷小于层合板承载力与摩擦力共同作用产生的 载荷。最后,随着断口开裂程度逐渐增大,冲头和层合板之 间的摩擦力逐渐减小,载荷缓慢下降。

图 12 为圆锥形冲头冲击层合板的载荷动态响应曲线。



采用 Savitzky-Golay 滤波器对所有的曲线进行了平滑处理。 可以发现,载荷曲线呈现出两个阶梯状平台阶段。第一个平 台阶段位于曲线初期且冲击载荷很小,其主要原因是圆锥形 冲头的顶部形状尖锐,导致层合板撞击中心处在承受很小的 载荷下便已发生失效破坏。随着冲头的侵彻作用,层合板损 伤范围由点逐渐转化成面,圆锥形冲头与层合板的接触面积 逐渐增大,冲击载荷不断增大。当冲击位移达到约17mm 时,即冲头圆锥顶部刚好完全穿过层合板,载荷曲线会在峰 值载荷范围稳定一段距离,呈现出第二个平台阶段。此阶段 载荷是由冲头侧壁与层合板开裂断口挤压和摩擦产生的,但 冲头侧壁横截面积不变,其损伤范围不会扩展,仅会造成断 裂处开裂程度扩大,即冲头与层合板开裂口接触面积比较稳 定,故载荷比较稳定。最后,当层合板承载达到极限,并且断 口开裂面积大于冲头横截面积时,冲头侧壁和断口处因接触 作用减弱而使摩擦力减小,故载荷快速下降。

综上所述,冲头形状对载荷响应曲线存在显著影响。 冲头形状越尖锐,载荷曲线中的冲击载荷会明显减弱,同时 冲击时间和冲击位移均有显著增加。但是,当相同形状冲



Fig.11 Impact load response curve of hemispherical impactor

头冲击层合板时,冲击能量对载荷一位移曲线影响较小,冲 击位移和冲击载荷随能量的增大没有明显的变化。

2.3 层合板低速冲击动态响应规律

最大冲击载荷和最大吸能是评估夹芯结构在低速冲击下防护性能的重要指标¹⁷⁷。图13对比了不同形状冲头冲击下的最大载荷,发现平头形冲头的最大载荷最高,其次为半球形冲头,圆锥形冲头最低,而且平头形冲头冲击的最大载荷比圆锥形和半球形冲头分别提高约900%和200%。这是由于平头冲头顶部横截面积最大,冲击损伤的面积相应最大,并且冲击响应时间短,其造成的最大载荷最高。圆锥形冲头的顶部尖锐,其侵彻破坏能力较强,导致层合板在很小的载荷下就已经失效。此外,冲击能量变化对最大载荷影响比较小。

图 14 对比了层合板在不同形状冲头冲击下的最大吸能,发现冲头形状对层合板的最大吸能影响不明显。随着冲击能量的增大,层合板在不同形状冲头冲击下的最大吸能仅有小幅度上升的趋势,这是因为层合板的穿透阈值能量由其本身材料特性决定,穿透阈值能量为层合板背面刚好处于断裂时的冲击能量^[18],即当冲击能量大于其穿透阈值能量时,



Fig.12 Impact load response curve of conical impactor



Fig.13 Comparison between maximum load

层合板最大吸能也仅能稳定在其穿透阈值能量附近。

冲头形状对层合板最大位移及最大冲击响应时间有显 著影响,如图15所示。随着冲击能量的增加,三种形状冲



图14 最大吸能对比

Fig.14 Comparison between maximum energy absorption



Fig.15 Comparison between maximum impact displacement

头的最大冲击位移均稳定在较小的范围内,而且圆锥形冲 头冲击的最大位移约为平头形冲头最大位移的5倍,圆锥 形冲头冲击的最大位移约为半球形冲头最大位移的1.4倍。 此外,层合板最大冲击时间随冲击能量的增加呈减小的趋势,如图16所示。总体而言,圆锥形冲头的冲击位移和冲 击时间均最长,其次为半球形冲头,最短为平头形冲头。

3 结论

通过试验研究了玻璃纤维层合板在冲头低速冲击下的 损伤形貌及机理,分析了冲击能量和冲头形状对玻璃纤维 层合板动态响应的影响规律,得到了以下结论:

(1)冲头形状对层合板损伤形貌及机理存在显著影响。平头形冲头冲击时,纤维发生剪切断裂,基体受到冲头



Fig.16 Comparison between maximum impact time

挤压形成破片。半球形冲头和圆锥形冲头冲击下层合板损 伤形貌相似,基体主要产生挤压开裂,纤维发生拉伸断裂, 随着冲击能量的增加,层合板损伤形貌由十字形裂纹转变 为花瓣开裂状断口。

(2)冲头形状对冲击载荷响应存在明显的影响。当 冲头形状为平头时,冲击载荷呈先波动上升后骤降的趋势。当冲头形状为半球形时,冲击载荷在载荷下降阶段表现出先线性骤降后锯齿状缓慢下降的趋势。当冲头形状为圆锥形时,载荷响应曲线呈现出两个特殊的平台阶段。此外,冲击能量的大小对层合板载荷响应曲线的趋势影响比较小。

(3) 对于冲击动态响应特性规律,冲头形状越钝,层合 板的载荷峰值就越大;冲头形状越尖锐,层合板最大冲击位 移和冲击时间越大。随着冲击能量的增大,层合板的最大 冲击位移比较稳定。此外,层合板穿透后,最大吸能会稳定 在其穿透阈值能量附近。

参考文献

- [1] 刘万雷,常新龙,张晓军,等.基于改进Hashin准则的复合材料低速冲击损伤研究[J].振动与冲击,2016,35(12): 209-214.
 Liu Wanlei, Chang Xinlong, Zhang Xiaojun, et al. Low-velocity impact analysis of composite plates based on modified Hashin criterion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (12): 209-214. (in Chinese)
- [2] 冯鹏.复合材料在土木工程中的发展与应用[J].复合材料科 学与工程,2014(9):99-104.

Feng Peng. Development and application of composite in civil engineering[J]. Composites Science and Engineering, 2014(9): 99-104. (in Chinese)

- [3] Zhang X, Mohammed I K, Zhang G, et al. Temperature effects on the low velocity impact response of laminated glass with different types of interlayer materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 124: 9-22.
- [4] 任毅如,邓亚斌.基于非线性铺设角复合材料层合板的抗低 速冲击性能研究[J]. 航空科学技术,2021,32(12): 84-90.
 Ren Yiru, Deng Yabin. Research on low-velocity impact resistance of composite laminates with non-linear angle based layups[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 84-90.(in Chinese)
- [5] 张温馨,张迪,齐江伟,等.预载荷对纤维复合材料低速冲击 性能影响研究[J]. 航空科学技术,2021,32(12): 91-97. Zhang Wenxin, Zhang Di, Qi Jiangwei, et al. Effect of preloading on the low speed impact resistance for carbon fiber/epoxy resin composite laminates[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 91-97.(in Chinese)
- [6] 胡静, 巩翰林, 司晓亮, 等. 碳纤维复合材料雷电防护特性仿 真及试验研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(1): 98-106.
 Hu Jing, Gong Hanlin, Si Xiaoliang, et al. Simulation and experimental research on lightning protection characteristics of carbon fiber composites[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(1): 98-106.(in Chinese)
- [7] 肖琳,王冠辉,邱思,等.聚合物基复合材料低速冲击损伤的研究进展[J].材料科学与工艺,2017,25(6):1-8.
 Xiao Lin, Wang Guanhui, Qiu Si, et al. Development on damage of low velocity impact on polymer matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(6): 1-8. (in Chinese)
- [8] 王念.复合材料层合板冲击损伤及损伤容限研究[D].南京: 南京航空航天大学,2014.

Wang Nian. Research on impact damage and damage tolerance of composites laminates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

- [9] Ulus H, Ustun T, Sahin O S, et al. Low-velocity impact behavior of carbon fiber/Epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(6):761-770.
- [10] Batra R C, Gopinath G, Zheng J Q. Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates[J]. Composite Structures, 2012, 94(2):540-547.
- [11] 蒋万乐,孙耀宁,王国建,等.玻璃纤维层合板低能量冲击试

验研究[J]. 机械设计与制造, 2019(5): 18-21.

Jiang Wanle, Sun Yaoning, Wang Guojian, et al. Experimental study on low energy impact of glass fiber laminate[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(5): 18-21. (in Chinese)

- [12] 刘逸众,李敏,陈律. 冲头形状对层合板低能量冲击损伤尺寸及 剩余压缩强度的影响[J]. 复合材料科学与工程,2018(7): 89-92.
 Liu Yizhong, Li Min, Chen Lyu. Effect of plunger on damage dimensions and residual compressive strength of laminates subjected to low-energy impact[J]. Composites Science and Engineering, 2018(7): 89-92. (in Chinese)
- [13] Mitrevski T, Marshall I H, Thomson R, et al. The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates[J]. Composite Structures, 2005, 67(2):139-148.
- [14] 屈天骄,郑锡涛,范献银,等. 层合板低速冲击损伤影响因素 分析[J]. 航空材料学报,2011,31(6): 81-86.
 Qu Tianjiao, Zheng Xitao, Fan Xianyin, et al. Exploration of several influence factors of low-velocity impact damage on

composite laminates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6):81-86. (in Chinese)

- [15] Habibi M, Laperrière L. Influence of low- velocity impact on residual tensile properties of nonwoven flax/epoxy composite
 [J]. Composite Structures, 2018, 186: 175-182.
- [16] Menna C, Asprone D, Caprino G, et al. Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(8): 677-685.
- [17] Wang H, Ramakrishnan K R, Shankar K. Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores[J]. Materials & Design, 2016, 99:68-82.
- [18] 孙杰. 环氧基 CFRP 的制备及低速冲击性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学,2022.

Sun Jie. Preparation of epoxy-based CFRP and research on low-velocity impact properties[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology, 2022. (in Chinese)

Study on the Influence of Drop Hammer Impactor Shape and Impact Energy on Dynamic Properties of Glass Fiber Laminates

DengYunfei¹, Yin Yuan¹, Zhou Chunping², Wang Xuan¹

1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. Aeronautical Science Key Lab for High Performance Electromagnetic Windows, AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Ji' nan 250023, China

Abstract: Fiber reinforced resin laminates are sensitive to the impact of foreign objects. In order to solve the hidden danger of its application, the low-velocity impact damage mechanism and dynamic response characteristics of glass fiber reinforced composite laminates, drop weight tests are carried out with three kinds of impactor heads and six kinds of impact energy, and the changes of load and absorbed energy during impact are analyzed. The test results show that the impact energy has little effect on the damage morphology and load response curve of laminates, but the shape of the impactor has a great influence on the damage morphology and load response of the laminate. And the load peak value of the laminate is larger as the shape of impactor becomes blunter. Moreover, the maximum impact displacement and maximum impact time is longer, and the impact damage degree is greater as the shape of impactor become sharper. This study can provide some experimental basis and reference for the practical application of composite laminates.

Key Words: composites; low-velocity impact; damage mechanism; dynamic response; failure mode

Received: 2022-09-05; Revised: 2023-02-05; Accepted: 2023-03-10 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201918067001)