

DOI:10.11918/202509112

复合材料火箭喷管预制体成形工艺研究进展

霍嘉宸¹,李文龙²,王辉^{3,4},陈一哲^{3,4},华林^{3,4}

(1. 中国特种飞行器研究所,湖北 荆门 448035; 2. 西安航天动力研究所,西安 710100; 3. 高温轻合金及应用技术
全国重点实验室(武汉理工大学),武汉 430070; 4. 武汉理工大学 汽车工程学院,武汉 430070)

摘要: 喷管作为火箭、导弹发动机的核心构件,其复合材料预制体的成形工艺直接影响产品的性能和可靠性。针对复合材料可设计性强、种类繁多,导致喷管预制体成形工艺多样,且缺乏系统性归纳的问题,本文系统梳理了一维缠绕、三维针刺、三维编织3种典型成形工艺,对比分析了各工艺的核心原理、技术特性,深入探讨了成形质量的关键影响因素及不同工艺的优势与局限,明确了各类工艺适宜制造的零部件预制体类型,并展望了未来复合材料喷管成形工艺的发展趋势。本研究可为火箭复合材料喷管预制体成形工艺的科学选型提供参考,为复合材料在航空航天动力高端装备领域的高性能应用提供技术支撑,助力先进飞行器动力系统实现升级迭代。

关键词: 复合材料;火箭喷管;缠绕;针刺;编织

中图分类号: V258 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)12-0179-12

Research progress on the forming process of composite rocket nozzle preforms

HUO Jiachen¹, LI Wenlong², WANG Hui^{3,4}, CHEN Yizhe^{3,4}, HUA Lin^{3,4}

(1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, Hubei, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China; 3. State Key Laboratory of Light Superalloys (Wuhan University of Technology), Wuhan 430070, China; 4. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: As a core component of rocket and missile engines, the forming process of composite nozzle preforms directly determines the performance and reliability of the final product. The design flexibility of composite materials has resulted in numerous forming techniques for rocket nozzle preforms, but a systematic summary is still lacking. This work reviews three typical forming processes (1D winding, 3D needling, and 3D braiding), comparing their principles, technical features, and key factors affecting preform quality. The advantages and limitations of different processes are discussed in depth, the types of components suitable for each process are clarified, and we offer a brief outlook on future development in composite nozzle preform manufacturing. This study provides a comprehensive reference for selecting suitable forming processes for composite rocket nozzle preforms. It offers technical support for the high-performance application of composite materials in high-end aerospace power equipment and helps drive the upgrading and iteration of next-generation aircraft power systems.

Keywords: composite materials; rocket nozzle; winding; needling; braiding

近一个世纪以来,全球航天事业实现快速发展,运载火箭在其中发挥重要作用。自1956年钱学森提出发展中国航天构想后,从“嫦娥三号”探月任务到空间站建设,各类探测器的成功部署均依赖运载火箭,其中长征系列运载火箭更助力我国完成“载人航天”“北斗导航”等重大工程,充分印证其关键价值^[1]。国际层面,美国与欧洲是运载火箭发展的主要引领者:美国火箭技术起步早,1926年成功发射人类首枚液体火箭,发动机技术成熟,近十年重启航天发射系统研制并发射多款重型火箭^[2];欧

洲航天局成立早、发展快,代表性成果包括阿里安(Ariane)系列运载火箭等^[3]。

在世界各国种类繁多的运载火箭中,因其推进剂的性质不同,又被分为固体火箭、液体火箭^[4-5]。固体火箭优势在于可以满足快速发射响应以及高可靠性^[6-7],因此被认为是最为理想的运载火箭,可成为战争导弹以及各类航天器的推进主力工具^[8],但固体火箭存在承担的运载力较小、无法自主关机而只能等待能量耗尽后结束工作等不足之处^[9]。与之相反,液体火箭则推进力大、运载能力强,可以通

收稿日期:2025-09-28;录用日期:2025-11-05;网络首发日期:2025-11-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251112.1544.011>

基金项目:国家自然科学基金(52422510,52373320,52175360,52472383);中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001)

作者简介:霍嘉宸(2000—),男,硕士,助理工程师;王辉(1984—),男,教授,博士生导师;

陈一哲(1990—),男,教授,博士生导师;华林(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者:华林, hualin@whut.edu.cn

过阀门等设置使火箭停止工作,需要时再进行重复启动,但是因为其推进剂为液体,易挥发、腐蚀、不易保存,故液体火箭的准备周期长,储存时间短。两种火箭的优缺点明显,应依据探测器的需要来选择火箭类型。但是无论是固体火箭还是液体火箭,可靠的喷管结构也是火箭发动机能成功工作的必要条件。

动力系统的升级迭代是提升运载火箭性能的重要方式^[10]。在动力系统中,喷管的主要作用是通过改变内部结构来对流体的速度进行调整,其长期承受高温与高压极端环境^[11-12]。大量关于火箭发动机地面液压实验、热试车结果和飞行结果表明,火箭动力系统遇到的推力问题一般都是由于喷管焊缝出现缺陷,喷管内壁失稳所导致的,喷管结构问题是导致火箭发动机出现故障的主要原因之一^[13-14]。

随着航天工程的持续推进,中国“嫦娥系列”“天问系列”等深空探测任务的发射距离逐步提升,任务面临的太空环境愈发严苛,轻量化需求日益凸显。可以预见,轻量化已成为未来航天航空工程的核心研究课题之一。复合材料喷管能够在保障性能的基础上实现喷管的显著轻量化,具备重要的研究意义与工程应用价值。针对复合材料火箭喷管面临的愈发严苛的工作环境挑战,本文分别综述了3种火箭复合喷管预制体成形工艺,为火箭复合材料喷管预制体成形工艺选型提供技术参考。

1 火箭喷管结构和常用材料

火箭发动机中的喷管分为收敛喷管、收敛扩散喷管、可调喷管等,而其中最常使用的是收敛扩散喷管。收敛扩散喷管又称为拉瓦尔喷管,其结构可分为3部分,分别为收敛段、喉部、扩张段^[15]。气体在喷管内的收敛段加速,至喉部时气体速度加到最大,再到扩张段、延伸段进行膨胀后从喷管中喷出^[16]。液体火箭发动机中,扩张段的型面设计是喷管性能的关键因素。目前,国内、外火箭发动机喷管按扩张段截面形状可划分为截短理想喷管、压缩截短理想喷管、最大推力喷管、抛物线喷管等^[17]。喷管在设计时也需要考虑多方因素,如:1)尽可能薄的壁厚,以便于增加传热量;2)不同材料间的连接情况,防止在极端条件下发生断裂等问题;3)减少喷管的质量,增大轻量化程度等^[18]。

在传统技术中,喷管所选用的材料大部分为金属,其结构通常以铜金属作为内层,不锈钢金属作为外层,并在不锈钢金属中车铣出冷却液通道。冷却液通过通道带走热量以保持合适的壁温,这是目前火箭发动机中最主流使用的再生冷却方式^[19-20]。

在传统喷管选材中,铜金属的导热性良好,便于传热,可以将喷管中的大部分热量与冷却液进行交换,降低喷管温度,而不锈钢外层起到了保护内层管道的作用^[21]。然而,无论是哪种类型的金属材料喷管,因存在密度很高、热结构缺陷多等缺点,既无法满足轻量化要求,也无法保证喷管在使用过程中的可靠性。随着航空航天领域对轻量化要求的持续提高,复合材料的研究与应用也愈发广泛。这些复合材料能够在保持原有性质的前提下,显著降低质量以提高轻量化程度。目前,在火箭发动机中选用的可以承担大量热负荷的复合材料,通常有碳-陶瓷复合材料、碳-碳复合材料等。由于复合材料需长时间在极端热负荷、热腐蚀环境下保持其原有性质不发生变化,因此,碳-碳等复合材料常被选作火箭发动机喷管等高端航空航天装备零部件制作材料^[22-24]。

碳-陶瓷复合材料通常是指基体为陶瓷,增强相为碳的复合材料。碳-陶瓷复合材料不仅具有陶瓷高强度、抗氧化、耐高温等优异性能^[25-26],同时克服了陶瓷脆性大的问题,被认为是理想的高温结构材料。碳-陶瓷复合材料相较于碳-碳复合材料的抗氧化和耐磨性能十分突出^[27],同时密度稍大于碳-碳复合材料,因此常被用于有氧环境中,如高速列车的刹车盘等。

碳-碳复合材料是指增强相为碳纤维及其织物的碳基体复合材料。在其结构中,作为基体的碳纤维是其结构中的骨架,起到承载结构的作用,而增强相因为不同的成形工艺,如编织、铺层、针刺等,最终形成复合材料的物理和力学性质等也会有区别^[28]。在航空航天与汽车工业等领域,使用多向编织等多类型预制体成形工艺,可以制造高密度碳-碳复合材料用于火箭发动机喷管、制动盘等零部件^[29-30]。碳-碳等复合材料具有密度小、强度高、耐热腐蚀、热变形系数低、延展性高、热机械能力高、导热率低等优点^[31-35],相比于传统的金属材料,在极端环境中复合材料的优点更加显著,是最理想的喷管材料。因其抗烧蚀能力强,使用复合材料制作的喷管无凹坑等缺陷,大幅度提高了喷管的性能和效率^[36]。因此,碳-碳复合材料已被广泛应用于航空航天领域。王遥等^[37]研究了不同程度冲击对于碳纤维/环氧树脂复合材料层合板的影响,给予了该种类型材料承载能力的修复效率。研究表明,该类层合板对于冲击力有较好的修复性能。复合材料各向异性热膨胀系数的研究对于长时间承受较大热负荷的喷管也具有重要意义。万佩等^[38]通过数值模型模拟了单向T300/5208碳纤维增强环氧树脂基系列复合材料各

向异性热膨胀系数,模拟结果与实验结果误差最大只有 7.5%,准确率较高。

目前国际上许多研究人员都认为复合材料是取代金属制作喷管的最有潜力的材料之一,然而复合材料类喷管预制体是由长短纤维组成,目前尚未见有系统总结复合材料喷管预制体成形工艺的相关报道,也无法通过统一指标来判断喷管性能。在喷管预制体成形工艺中,面对不同部位的不同要求,无法精准选择一种或几种成形工艺。复合材料零部件制备流程为使用预制体成形工艺,如缠绕、编织等将复合材料制成预制体状态,之后通过引入基体材料,如通过 RTM、化学气相沉积等方式将其表面致密化,最后进行固化定型^[39-40]。其中,预制体属于零部件的“骨架”,预制体的成形效果对于零件质量有着重要的影响。国内外火箭喷管复合材料预制体成形工艺,主要包括一维缠绕成形、三维针刺成形以及三维编织成形等方案和典型零部件^[5,41],见图 1。在上述 3 种成形工艺中:一维缠绕成形工艺成熟度高、简便易行,是复合材料成形领域应用最早且最为普及的工艺之一,在航空航天领域中常用于固体火箭发动机壳体的制备;但该工艺存在明显局限性,难以成形含内凹结构的零部件,且普遍存在层间性能薄弱的问题。三维针刺成形工艺复杂度较低、自动化程度高,通过引入层间纤维可大幅提升构件层间力学性能,有效弥补了一维缠绕工艺层间性能不足的短板,适用于喷管喉衬及扩张段等构件的成形;然而,该工艺多采用碳布铺层后进行针刺加工的方式,对复杂曲面的成形精度较差。三维编织成形工艺可制备形状复杂的预制体,且能同步提升构件层间性能与结构整体性,凭借其层间力学优势,常用于火箭头罩、箭体等关键构件的制备;但该工艺存在技术复杂度高、成形效率低等问题,制备大尺寸预制体时受设备规格与工艺条件的约束更为显著,尤其是在成

形壁厚较大的构件时,内部纤维的取向调控与张力均匀性控制面临更大挑战。本文通过对成形工艺及其影响因素的介绍,详细阐述了 3 种方案的优势与不足,以期对复合材料喷管成形工艺的选择起到一定的借鉴作用。

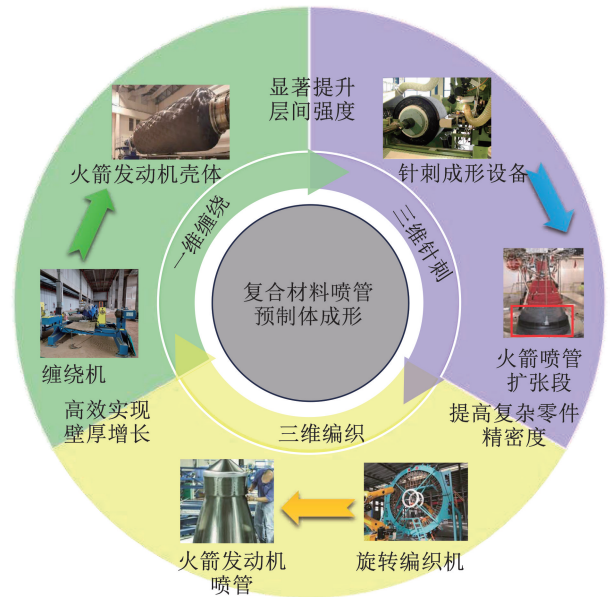


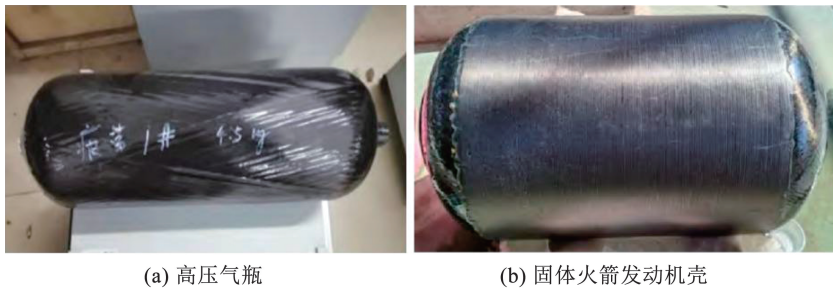
图 1 复合材料喷管常见成形工艺、优点与典型应用^[5,41]

Fig. 1 Common forming process, advantages, and typical application of composite nozzle^[5,41]

2 碳纤维复合材料预制体成形工艺

2.1 一维缠绕

一维缠绕成形是碳纤维复合材料预制体成形最常见的方式之一。缠绕成形是指碳纤维复合材料按照一定规律连续缠绕到旋转或者固定的芯轴上^[42],再通过固化、脱模等后续工艺得到成品的过程。缠绕成形工艺常应用于圆柱体和管道形式的物品,如高压容器、管道、火箭发动机壳、整流罩、飞机喷管等^[43-47],见图 2。



(a) 高压气瓶

(b) 固体火箭发动机壳

图 2 缠绕成形工艺成品^[46-47]

Fig. 2 Finished products of winding forming process^[46-47]

一维缠绕成形的优点包括:1)适用于高比强度复合材料预制体成形;2)易于实现成品内部的等强度设计;3)制造成本较低,而且复现率高^[48]。但由于缠绕自身的成形过程,一维缠绕成形也存在一些

局限性:1)缠绕成形过程容易出现气泡等缺陷,导致成品层间强度降低,易失稳;2)使用缠绕成形制成的成品在开孔处应力集中过高,当成品受到高压时,开孔处会最先破裂^[49];3)对于零部件的形状选

择有局限性,缠绕成形只适合于罐类、管道等圆柱体零件,不适合于有凹面的部件。

一维缠绕成形按照树脂基体的物理、化学所处的不同状态,可分为干法缠绕、湿法缠绕、半干法缠绕 3 种方式^[50]。目前国内常使用的方法均为湿法缠绕,仅对部分性能要求较高的零部件采用干法缠绕。

干法缠绕是指经过预浸胶处理的纤维束,在加热软化处理后进行缠绕的碳纤维复合材料预制体成形工艺,在缠绕时不需要浸胶,便于提高产品质量及自动化生产,相比于湿法缠绕,对设备的要求更高^[51]。干法缠绕在缠绕过程中含胶量均匀,具有效率高、污染小等优点,但因其没有张力装置,干法缠绕成品的层间强度较低。干法缠绕制成的复合材料预制体性能与树脂质量分数、缠绕形态、缠绕速度、固化工艺因素息息相关^[52]。余木火等^[53]基于树脂自催化模型及响应面分析方法,为制备性能稳定的预浸纱,将传统制备预浸纱的热熔法改进,最终制备出层间剪切强度可达 57.3 MPa,拉伸强度高达 2 536.1 MPa,以 T700/HY230 为体系的预浸纱。邓明等^[54]采用干法缠绕工艺,基于钢芯模和尼龙 6 芯模分别制备了恒定张力、内松外紧和内紧外松 3 种不同张力制度的复合材料缠绕圆筒,研究缠绕张力对干法缠绕复合材料残余应力及回弹变形的影响。研究发现,内松外紧张力制度回弹最小,芯模热变形大则张力影响弱,总残余应力低于缠绕与固化应力叠加值。肖磊等^[55]通过数值模拟与拉伸实验等方法探究了纤维束在缠绕结构中交叉、起伏等特

征,与层合结构进行对照,总结了长丝缠绕时发生集中应变的机理,认为应变的主要原因是交叉起伏区域树脂富集和纤维弯折。

如图 3 所示,湿法缠绕则是指在张力的作用下,纤维通过胶池,胶液将纤维束聚合,缠绕在芯模上成形^[56]。因为该工艺是在进料时对纤维束进行浸胶与张力控制,故对设备要求较低。影响湿法缠绕预制体性能的因素很多,但最为关键的是树脂的性能,不仅要求树脂具有优异的力学性能、耐热性能、低收缩率等,还取决于工艺参数,如卷绕角度、纤维张力、树脂类型和固化周期,具体包括树脂的黏度-温度-时间的变化、温度-固化程度-时间的变化等数据^[57-58]。缠绕工艺决定了能否最大限度发挥出树脂的性能。湿法缠绕的工艺参数包括纤维浸胶、缠绕张力、缠绕速度、缠绕角度等,每一个工艺参数都影响着最终的成品性能^[59-60]。其中,缠绕张力是一个很重要的影响因素:张力加大,可以使得浸胶过程更加充实,并挤出多余胶使得材料更加紧实;但如果张力过大,则会加大纤维束之间的摩擦,加大传递力时材料的磨损,不利于纤维束发挥自身的优异力学性能,同时发生的过度挤胶也会导致成品含胶量过低^[61]。Yadav 等^[62]以缠绕张力为核心,采用理论分析、数值模拟与实验结合的多尺度方法,研究其对纤维缠绕 CFRP 复合材料的影响,发现 25 N 为最优张力,可将孔隙率降至 5.54%,并减少纤维错位,超过该张力会增加残余应力,小于该张力则致纤维错位与高孔隙率。

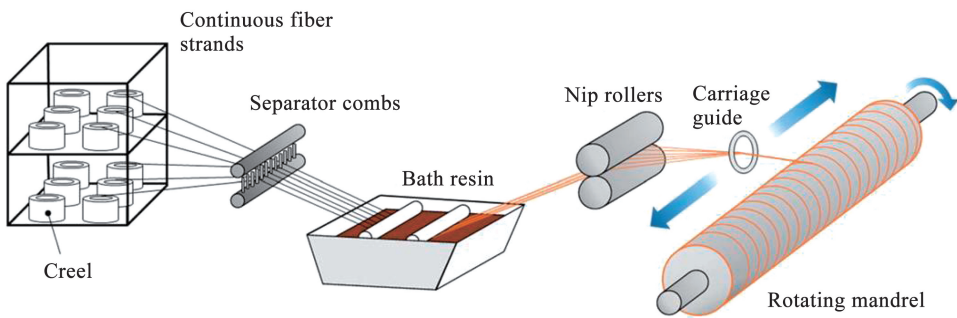


图 3 湿法缠绕过程^[56]

Fig. 3 Wet winding process^[56]

半干法缠绕结合了干法缠绕和湿法缠绕工艺,在浸胶到缠绕之间增加了烘干工序,将浸胶时所连带的多余溶剂蒸发掉。相比于干法缠绕,其省去了预浸胶工序,简化了流程;相比于湿法缠绕,经过烘干,可以减少缠绕时产生的气泡,提高层间界面强度。但因其工艺较为复杂,在实际生产中,该成形工艺使用较少。

纤维缠绕工艺是一种机械化生产程度很高的复合材料预制体制备工艺,但利用该工艺制备的成品

构件截面母线几何单一、层间强度较低,当缠绕件被加载较高的冲击载荷或较大剪切力时,层间的强度无法支持成品正常工作。另一方面,传统的复合材料纤维加工中,部分纤维需要提前预浸,而织物和预浸料的悬垂性很差,使其在大规模制作零部件时无法直接对其成形,需要使用共固化、机械连接等加工方式来连接。其中,机械连接可能在预制体加工区域产生应力集中,增加缺陷产生的可能性,进而提升零部件的应用风险^[63]。

2.2 三维针刺

一维缠绕本质上是将浸渍了树脂的纤维束或预浸料带按照特定角度铺叠在芯模上,形成典型的层合结构,层与层之间仅靠基体材料连接,因此层间性能是其主要弱点。三维针刺工艺在碳布/树脂铺层后,用刺针将部分纤维垂直刺入,起到了“缝合”层与层的作用,从而提高了层间剪切强度和抗分层能力,显著改善了层间性能,这对于承受巨大轴向和径向热应力的喷管构件至关重要^[64]。

如图 4(a)所示,三维针刺成形工艺是将厚度方向的纤维通过针刺方式引入到二维织物中,形成具有三维立体结构的复合材料预制体^[65]。具体操作为:使用一个带有倒向刺钩的刺针,在材料铺层的厚度方向进行穿刺,将部分水平纤维带到厚度方向,使水平方向和厚度方向的纤维相互缠绕、纠缠在一起,形成结构均匀、致密的预制体^[66-67]。三维针刺成形工艺制备的预制体的结构可划分为两类,一类是采

用短切纤维丝构成的整体式结构,这种结构通常用于喷管的喉部处;另一类是一种由一层基布层与一层短切纤维丝交织而成的结构^[68]。因其具有优异的耐高温、隔热性能,所以被广泛应用于极端环境中^[69]。

图 4(b)为三维针刺的内部结构,在厚度方向引入的纤维增加了预制体的抗分层性,解决了层间强度不足的问题^[70]。不仅如此,三维针刺成形工艺还具有以下优点:1)可以制备复杂的预制体,且可根据特殊需要在厚度方面制定特性;2)三维针刺成形工艺自动化程度高,成本低;3)三维针刺因其工艺方式而具有较强的层间性能,更加坚固,同时具有较高的层间断裂韧性等^[71-74]。三维针刺技术因其独特的优势,也经常应用于火箭头罩、飞机制动系统、国防和轨道交通等高端产品和领域^[75-78]。但是,针刺工艺制成的预制体结构复杂,壁厚存在最小值的限制,且在进行穿刺时会导致纤维发生位移与局部变形,因此形状精度和表面质量较低。

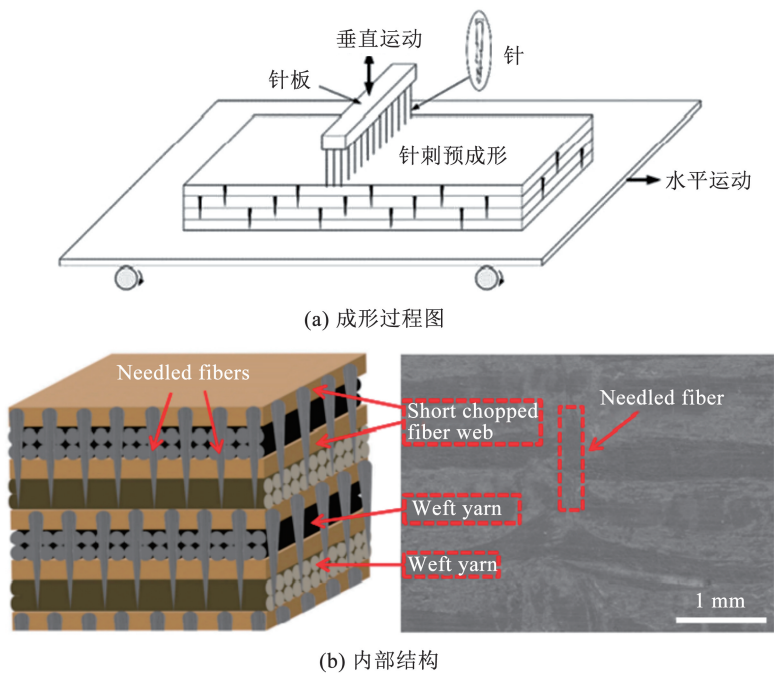


图 4 三维针刺工艺图^[65,70]

Fig. 4 Three-dimensional needling^[65,70]

三维针刺复合材料预制体的性能受较多因素影响,如纱线尺寸、纤维类型、基布层,以及纤维层的质量比和厚度比等。Zhao 等^[79]采用三维针刺成形工艺制备了长碳纤维增强聚醚醚酮复合材料,在一定成分范围内研究了碳纤维含量及其取向对复合材料预制体力学性能、热性能等的影响。研究表明,随着材料内纤维含量的增加,预制体的力学性能表现更加优异,热变形温度明显升高,复合材料性能明显提升。谢军波^[80]研究了针刺 C/C-SiC 复合材料的力学性能,并开发了一种针刺预制体工艺参数建模方法。研究发现,经过数值模拟可以较准确地预测材

料的性能,揭示了针刺工艺参数、预制体结构和复合材料力学性能之间的联系。李娜^[81]选择环氧树脂作为基体和多种增强纤维,如玻璃纤维、玄武岩纤维等材料作为增强基,使用三维针刺成形工艺制造了复合材料预制体,对其进行了高温弯曲、高温压缩性能等测试,并探究了纤维体积分数对于预制体性能的影响,发现随着纤维体积分数升高,预制体的力学性能更加优异。

对于三维针刺成形工艺,除了实验验证,数值模拟模型也逐渐走向成熟。陈国耀等^[82]针对经过高温烧蚀后的三维针刺碳/酚醛复合材料建立了数值

模拟模型,研究了在针刺区域纤维丝的变形规律。研究表明,随着针刺深度加深,所用材料的面内弹性模量与剪切模量均有下降,而针刺密度的升高,则会提高材料面内的弹性模量和剪切模量,数值模拟结果与实验结果拟合较好。Wang 等^[83]提出三维针刺复合材料准纤维尺度建模方法,用虚拟纤维复现针刺预制体复杂纤维结构并建立损伤本构模型,分析虚拟纤维直径等参数影响,验证结果表明,模型预测应力应变、强度及断裂模式与实验吻合良好。李俊杰^[84]以无纬布复合毡穿刺碳/碳复合材料喷管为对象,构建多尺度体积元模型,建立喷管化学烧蚀和粒子侵蚀模型,分析气体温压、粒子参数及材料热导率影响,发现可以通过增加针刺密度、针刺频率、穿刺纤维束直径等方法,定向提高材料在面外方向的热导率,从而提高碳/碳复合材料喷管的抗烧蚀性能。

2.3 三维编织

三维针刺成形的预制体通常由柔性碳布和网胎铺叠而成,再通过针刺固定。对于复杂的三维曲面,其形状保真度和轮廓精度相对较差,更多用于制造筒状、锥状或块状等几何形状相对简单的预制体。而三维编织的近净成形能力很高,通过计算机精确控制数百甚至数千个携纱器的运动轨迹,可以直接编织出形状极其复杂的预制体。其成形件的尺寸稳定性高,形状精度高。

三维编织在二维编织基础上增加了轴向纤维,通过整体成形工艺得到立体编织物^[85-86],其中,沿着成形方向每一条纱线连接都有特征角。与传统成形工艺相比,三维编织成形工艺具有复杂零部件一

体化成形^[87]、变截面编织等优势,且经三维编织的零部件预制体,因其内部纱线交织形成的空间紧密结构,不仅具备传统材料的高强度、低密度特性,还具有很强的抗冲击特性与抗分层特性^[88-90]。但是,也正因为三维编织成形工艺方法的局限,所以三维编织的成本大,编织需要的时间长,制备大尺寸零部件时容易受到设备限制。三维编织成形工艺常应用于航天航空、汽车和电子工业、航海船舶、医疗设备等高端精密制造领域^[91-94]。

三维编织预制体的制备是三维编织复合材料制备性能的基础,从根本上决定了成品的性能。三维编织分为纵横步进法编织和旋转法编织,而纵横步进法编织又分为二步法和四步法编织。但无论是二步法编织还是四步法编织,其运用的编织原理是相同的,仅实现方式有所区别,只要在合适的位置加入编织锭子,并向编织盘中加入轴向纱,四步法就可以编织出与二步法编织的单元结构相同的预制件,同时也说明,四步法只是纵横步进编织法的一个特例^[95]。纵横步进法编织的使用原理即为携纱器在笛卡儿坐标或极坐标平面,沿着纵横交叉的轨道以一定规律进行编织。四步法编织原理如图 5 所示^[96-97],图中每一个点代表编织纱端点。在进行编织时,第 1 步是偶数行横向向右移动一个单位,奇数行横向向左移动一个单位,第 2 步是奇数列纵向向上移动一个单位,偶数列纵向向下移动一个单位,第 3 步与第 1 步移动方向相反,第 4 步与第 2 步移动方向相反,完成一个编织循环,重复以上步骤,即为四步法编织。如果在编织过程中,移动的不止一个单位,就会得到结构更为复杂的预制体。

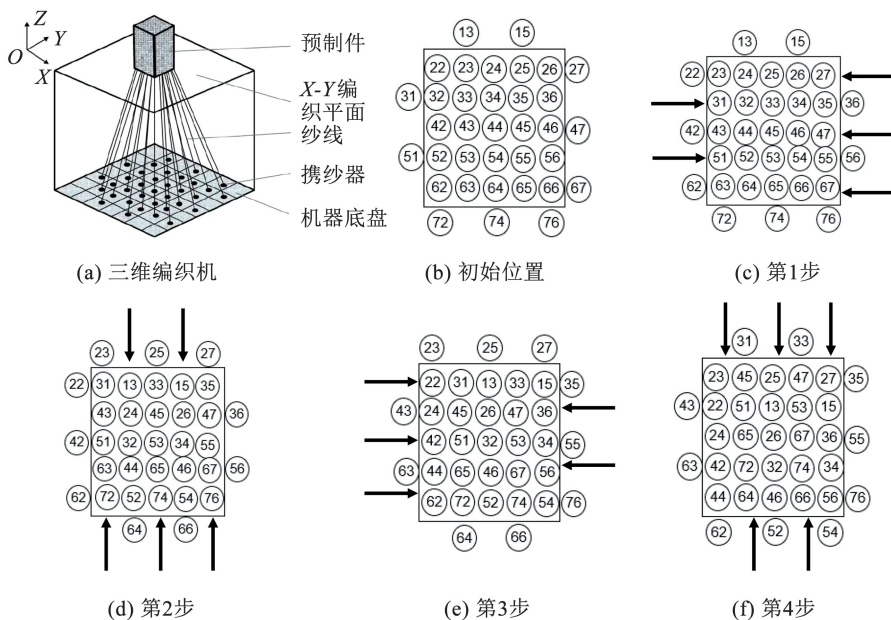


图 5 四步法编织^[96-97]

Fig. 5 Four-step braiding^[96-97]

图 6(a) 所示^[98] 为旋转法三维编织工艺示意图。旋转式三维编织工艺源于旋转二维编织, 旋转式二维编织中通常有两组携纱器, 一组携纱器(实心点) 绕圆心顺时针带动纱线沿一定轨迹循

环转动, 另一组携纱器绕圆心逆时针带动纱线按相反轨迹循环转动, 两组携纱器相互配合, 所携带纱线相互缠绕完成预制体的编织, 如图 6(b) 所示^[99]。

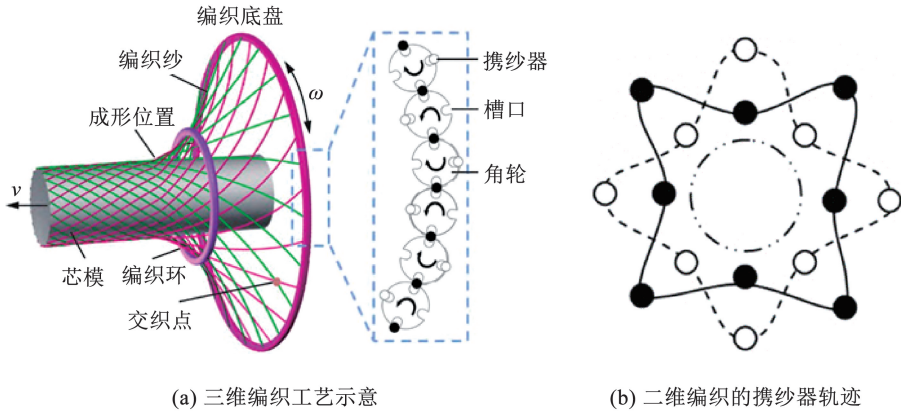


图 6 旋转法编织^[98-99]

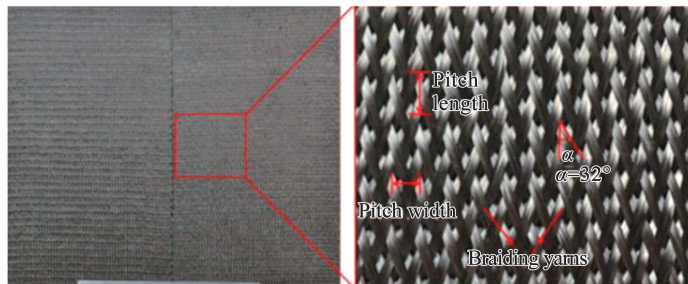
Fig. 6 Rotational braiding^[98-99]

图 7(a) 所示^[100] 为三维编织成形工艺制造的喷管。三维编织成形预制体成品性能与众多因素有关, 如编织角度^[101]、芯轴几何形状^[102] 等。而众多影响因素中, 编织角度是影响三维编织成品的重要因素, 编织角度越小, 材料在受到纵向冲击时的力学性能越敏感^[103]。Gao 等^[104] 研究了不同的编织角度对于三维编织成品受到纵向冲击的影响, 分别制作了编织角度为 15°、26° 和 37° 的编织复合材料。经 3 次撞击的压缩实验测试, 结果表明, 15° 样品, 纱线断裂与层间损坏在第 1 次撞击时受到的影响最大; 而对于 26° 和 37° 样品, 树脂断裂和界面脱粘在第 1 次冲击时会导致失效; 之后的两次撞击, 15° 样

品的纱线会继续断裂, 而对于 26° 和 37° 样品, 依然可以保持结构不变。如图 7(b) 所示, Zhu 等^[105] 构建真实参数化有限元模型, 结合 3D Hashin 和最大应力准则, 分析三维编织复合材料拉伸下渐进损伤与强度, 探究编织角、纤维体积分数影响并验证模型有效性。研究明确 25° 为编织角临界值, 此角度前后复合材料呈现脆性与韧性两种不同特性, 为其结构设计提供关键依据。王立武^[106] 以固体火箭发动机喉衬为研究对象, 开展编织工艺创新及性能研究, 发现对比无纬布针刺和石墨预制体, 轴棒法编织的预制体抗过载烧蚀最优, 且轴向试样抗烧蚀优于径向, 研究认为, 预制体编织结构影响了喷管的抗过载烧蚀性能。



(a) 三维编织工艺成形喷管



(b) 三维编织表面形貌

图 7 三维编织技术^[100,105]

Fig. 7 3D braiding technology^[100,105]

在三维编织过程中, 因内部结构的变化关系着预制体的性能影响, 所以对于内部结构的观测具有重要意义。Yan 等^[107] 将精度高、体积小传感器 FBG 嵌入三维编织的纱线中, 通过传感器来反映材

料内部的结构变化, 并构建了相应的有限元分析模型与实验进行对照验证, 分析发现, 加入传感器并不会显著改变材料的力学性能, 并且通过传感器观察到, 材料内部的晶格相比于材料表面和内部的变形

较大。此类研究对于三维编织成形工艺的完善也具有重要的作用。

综上所述,一维缠绕、三维针刺和三维编织成形工艺技术原理的不同使得其在成形能力、周

期与经济性等方面各有特点。为了更加直观地表现出 3 种工艺的差异与互补,如表 1 所示对 3 种工艺在适用结构、尺寸、精度等关键指标上进行了对比。

表 1 一维缠绕、三维针刺和三维编织工艺关键指标对比

Tab. 1 Comparison of key indicators for 1D winding, 3D needling and 3D braiding processes

关键指标	一维缠绕	三维针刺	三维编织
适用结构	简单回转体(筒、锥等)	大尺寸、壁厚较大、较简单的结构(板、筒、锥等)	复杂异形构件
尺寸	适用于小型到大型构件	适用于小型到超大型构件	适用于小型到中型构件
精度	轮廓精度高、型面复杂度低	形状精度和表面质量较低	尺寸精度高
生产周期	短	短	长
成本	低	中等	高
核心优势	工艺简单、成本低、效率高	层间强度和效率较高	复杂结构成形精度高
主要不足	层间性能差	复杂形状成形能力有限	生产周期长、效率低

3 总结与展望

随着航空航天事业的蓬勃发展,复合材料在航空航天领域的应用比例越来越大。高性能的复合材料喷管对于运载装备的轻量化程度具有十分重要的意义。因此,如何针对不同的零件预制体选择合适的成形工艺是非常重要的。本文分析了一维缠绕成形、三维针刺成形和三维编织成形 3 种成形工艺的原理、优缺点及影响因素。本研究的总结如下。

1) 一维缠绕成形工艺简单、成本低,特别适用于回转体零件。湿法缠绕在一维缠绕成形中最为常见,在一定条件下可以满足复合材料预制体的要求。然而,该工艺所得构件本质上是二维结构,层间强度有待提高,在极端热、力冲击下容易分层失效。因此,一维缠绕工艺常用于不需要承载复杂应力状态的零件,如某些导弹发动机壳喷管。

2) 三维针刺成形工艺在厚度方向上通过纤维增强层间强度。与一维缠绕工艺相比,通过在厚度方向上引入纤维,有效增强了层间性能。但其面内纤维连续性会因针刺而受到影响,且对于复杂构件成形的精度不足。因此,对于大型火箭发动机喷管的扩张段等部位预制体,可以考虑采用三维针刺技术进行成形和制造。

3) 三维编织成形工艺通过纤维在空间内多方向上的连续交织,大幅度提高了预制体层间性能,使得零件结构完整性大幅提升。它可以进行形状复杂的高强度零部件预制体精确成形,且整体空间结构紧凑,但其成形过程复杂,成本高、生产效率低。因此,对于承载极端情况的关键零件预制体,如整体体积较小的高速运载火箭发动机喷管,通常采用三维编织成形工艺。

通过对一维缠绕、三维针刺与三维编织工艺系统性的综述,可以发现 3 种工艺并非简单的替代关系,而是基于“性能-精度-效率”三方权衡的互补性技术体系,共同组成了复合材料火箭喷管预制体成形工艺系统。随着未来航空航天运载要求的提升,现有技术仍存在诸多挑战,结合目前高性能先进制造技术,针对复合材料火箭喷管提出以下展望。

1) 未来技术发展将聚焦于多种工艺的复合一体化成形,通过复合工艺突破单一技术瓶颈。探索“编织-针刺”、“缠绕-编织”等综合制造策略,如在关键部位利用编织技术保证其精度与极端环境可靠性,在非关键或大尺寸区域采用针刺或缠绕技术以控制成本,通过多种工艺复合来实现零部件整体性能与效率的协同提升。

2) 数字化与智能化赋能是系统性提升复合材料预制体成形工艺效率与性能的核心方向。未来将通过构建融合材料特性和工艺参数的高精度模型,结合智能制造,对整个预制体成形过程进行全流程的精准调控与最终性能预测,显著提升复杂异形构件的制造精度与成形效率。

参考文献

- [1] 李东, 李平岐. 长征五号火箭技术突破与中国运载火箭未来发展[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527269
LI Dong, LI Pingqi. Technological breakthroughs in LM-5 and future development of China's launch vehicle[J]. Journal of Aeronautics, 2022, 43(10): 168. DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.27269
- [2] 国家航天局. NASA 新登月火箭再次延期, 人类太空探索到底有多难? [EB/OL]. [2022-12-05]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6759010/c6840872/content.html>
- [3] 杨开. 欧洲新型运载火箭发展思路及特点分析[J]. 国际太空, 2014(12): 34
YANG Kai. Development ideas and characteristics analysis of new European launch vehicles[J]. Space International, 2014(12): 34
- [4] MAKHUTOV N A, GADENIN M M, REZNIKOV D O, et al.

- Analytical, experimental, and numerical methods for the analysis of strength and service life of rocket engines[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 40: 264. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.04.036
- [5] 范玉辉. 锥柱一体化固体火箭发动机壳体设计制造技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2023
FAN Yuhui. Research on design and manufacturing technology of cone-column integrated solid rocket motor housing[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. DOI: 10.27101/d.cnki.gghfu.2023.003021
- [6] 王宇泰, 高普云, 申志彬. 固体火箭发动机结构健康监/检测技术研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(2): 95
WANG Yutai, GAO Puyun, SHEN Zhibin. Research progress on structural health monitoring and testing technology for solid rocket motors[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(2): 95. DOI:10.14188/j.1671-8844.2021-02-001
- [7] KOPACZ W, OKNINSKI A, KASZTANKIEWICZ A, et al. Hydrogen peroxide: a promising oxidizer for rocket propulsion and its application in solid rocket propellants[J]. *FirePhysChem*, 2022, 2(1): 56. DOI: 10.1016/j.fpc.2022.03.009
- [8] XU Guanyu, LIU Peijin, AO Wen, et al. Interactions between turbulent flow and diffusion flame of composite propellant in a solid rocket motor with sidewall mass injection[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 102: 105872. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105872
- [9] 张建栋. 固体运载火箭上升段多约束制导方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021
ZHANG Jiandong. Research on multi-constraint ascent guidance method of solid launch vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.gghdu.2021.003438
- [10] 范瑞祥, 王小军, 程堂明, 等. 中国新一代中型运载火箭总体方案及发展展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(4): 1
FAN Reixiang, WANG Xiaojun, CHENG Tangming, et al. General scheme and development prospects for new generation of chinese medium launch vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2016(4): 1. DOI: 10.7654/j.issn.1004-7182.20160401
- [11] LI Sha, ZHANG Bin, MENG Siyi, et al. Ablation behavior of carbon-carbon composite nozzles produced by different carbon fibers in a small solid rocket motor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2025, 159: 109985. DOI: 10.1016/j.ast.2025.109985
- [12] HAO Xuefan, YAN Yong, CAO Taofeng, et al. Numerical prediction of the two-phase flow and radiation effects on the thermal environment and ablation of solid rocket nozzle[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 197: 108794. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108794
- [13] 曾鼎. 某型发动机喷管结构强度特性虚拟验证研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2021
ZENG Ding. Research on virtual verification of structural strength characteristics of a type of engine nozzle[D]. China Academy of Launch Vehicle Technology, 2021. DOI: 10.27096/d.cnki.ghtdy.2021.000035
- [14] DEGTYAREV A, KUSHNARYOV A, SHULGA V, et al. Yuzhnoye's new liquid rocket engines as enablers for space exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 693. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.04.006
- [15] ZHANG Xiaotian, WANG Zhengkang, WANG Ruiqing, et al. Numerical simulation of chemical ablation and mechanical erosion in hybrid rocket nozzle[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 82. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.012
- [16] ZHANG Xiaoying. Coupled simulation of heat transfer and temperature of the composite rocket nozzle wall[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(5): 402. DOI: 10.1016/j.ast.2010.09.006
- [17] 丁煜朔. 液体火箭发动机喷管型面设计与传热仿真分析研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019
DING Yushuo. Study on contour design and heat transfer simulation of liquid rocket engine nozzle[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019. DOI: 10.27096/d.cnki.ghtdy.2019.000018
- [18] GRADL P R, PROTZ C S. Technology advancements for channel wall nozzle manufacturing in liquid rocket engines[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 174: 148. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.04.067
- [19] KERSTENS F, CERVONE A, GRADL P. End to end process evaluation for additively manufactured liquid rocket engine thrust chambers[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 454. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.02.034
- [20] 秦飞, 赵征, 何国强, 等. 火箭基组合循环发动机热结构技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(11): 73
QIN Fei, ZHAO Zheng, HE Guoqiang, et al. Thermal structure technology development of rocket based combined cycle engine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(11): 73. DOI: 10.7527/S1000-6893.2024.29572
- [21] 王雅雷, 熊翔, 张洪波, 等. 一种超薄膜-陶复合材料喷管延伸段的制备方法和应用: CN11613581913[P]. 2025-07-25
- [22] ANIKIN A V, BERDOV R D, VOLKOV N N, et al. Long-Run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, 60(1): 80. DOI: 10.1134/S0021894419010115
- [23] REBELO KORNMEIER J, HOFMANN M, SCHMIDT S. Non-destructive testing of satellite nozzles made of carbon fibre ceramic matrix composite, C/SiC[J]. *Materials Characterization*, 2007, 58(10): 922. DOI: 10.1016/j.matchar.2006.09.010
- [24] 徐景校, 花宏亮, 王玉魁, 等. 变厚度铺层 Nomex 蜂窝夹层件固化变形的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(8): 56
XU Jingxiao, HUA Hongliang, WANG Yukui, et al. Numerical simulation of cure-induced deformation of Nomex honeycomb sandwich structure with variable thickness layup[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(8): 56. DOI: 10.11918/202306092
- [25] ZHANG Xia, YAO Mingyu, JIANG Xiaoyi, et al. Ductile Ni₃B interphase with oxidation-induced crack healing capability for carbon fiber toughened ultra-high temperature ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2026, 46(3): 117857. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117857
- [26] 赵日达, 汤素芳. 多孔碳陶瓷化改进反应熔渗法制备陶瓷基复合材料研究进展[J]. 无机材料学报, 2024, 39(6): 623
ZHAO Rida, TANG Sufang. Research progress of ceramic matrix composites prepared by improved reactive melt infiltration through ceramization of porous carbon matrix[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, 39(6): 623
- [27] FU Yu, YI Liming, LI Xiaoyuan, et al. Carbon fiber reinforced ceramic composites with Hf-rich (Zr, Hf) C solid solution for enhanced ablation resistance[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(27, Part C): 55109. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.09.234
- [28] 李明旭. 针刺碳/碳复合材料超高温拉伸力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
LI Mingxu. Experimental study on ultra-high temperature tensile mechanical properties of needle-punched C/C composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.gghdu.2020.001216
- [29] PENG Lina, HE Guoqiang, LI Jiang, et al. Effect of combustion gas mass flow rate on carbon/carbon composite nozzle ablation in solid rocket motor[J]. *Carbon*, 2012, 50(4): 1554. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.11.034
- [30] 薛钰, 黎云玉. 碳/碳复合材料抗氧化涂层技术的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2025, 48(4): 76
XUE Yu, LI Yunyu. Research progress on anti-oxidation coating technology for carbon/carbon composites[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2025, 48(4): 76. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0041.2025.04.020
- [31] SHI Yiang, ZHA Bailin, SUN Zhensheng, et al. Air plasma ablation/erosion test for 4D C/C composites used in the throat of

- solid rocket motor [J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (11): 15582. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.02.092
- [32] HU Haoteng, WANG Yajun, XIE Linjie, et al. Mode-II fracture behaviors of C/C composites with different preform architectures: an experimental combined numerical investigation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1040: 183471. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183471
- [33] YANG Jing, GE Jingran, LIU Xiaodong, et al. Numerical study of mesoscopic ablation-erosion of C/C composites with inclined fibers [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38 (11): 103730. DOI: 10.1016/j.cja.2025.103730
- [34] PRASAD N, WOOD C A, FERGUSON J I, et al. Impacts of prior ablative damage and fiber breakage influence on flexural strength of 2D C/C composites with and without secondary high temperature treatments [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 5594. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.08.293
- [35] ADI R K, DAS S, MUFLIKHUN M A. Design and analysis of filament winding machine for cylinder manufacturing process using glass fiber composite [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66: 2904. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.555
- [36] 尹健, 熊翔, 张红波, 等. 固体火箭发动机喷管用 C/C 复合材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2004, 18(4): 46
- YIN Jian, XIONG Xiang, ZHANG Hongbo, et al. Research and development of C/C composites used for SRM [J]. *Materials Review*, 2004, 18(4): 46. DOI: 10.3321/j.issn:1005-023X.2004.04.014
- [37] 王遥, 曹东风, 胡海晓, 等. 单螺栓修复对含冲击损伤碳纤维/环氧树脂复合材料层合板压缩承载能力的影响 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2833
- WANG Yao, CAO Dongfeng, HU Haixiao, et al. Effect of single-bolt repair on compression capability of carbon/epoxy composite laminates containing impact damage [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37 (11): 2833. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200121.004
- [38] 万佩, 夏辉, 刘晨, 等. 基于多尺度数值模型的复合材料各向异性热膨胀系数预测 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 1208
- WAN Pei, XIA Hui, LIU Chen, et al. Prediction of anisotropic thermal expansion coefficient of composite based on multi-scale numerical model [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 1208. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220331.001
- [39] 程仁政, 高建军, 董凯, 等. SiC_f/SiC 复合材料包壳预制体缠绕成型工艺铺层方案的优化 [J]. *机械工程材料*, 2025, 49(9): 71
- CHENG Renzheng, GAO Jianjun, DONG Kai, et al. Optimization of layering scheme of winding forming process for SiC_f/SiC composite cadding preforms [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2025, 49(9): 71. DOI: 10.11973/jxgccl.240555
- [40] 刘泰山, 黄睿, 王首豪, 等. 超高温陶瓷改性碳/碳复合材料力学性能研究综述 [J]. *材料导报*, 2025, 39(12): 57
- LIU Taishan, HUANG Rui, WANG Shouhao, et al. Review on mechanical properties of ultra-high temperature ceramics modified carbon/carbon composites [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(12): 57. DOI: 10.11896/cldb.24120162
- [41] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 64
- SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research of 3D advanced aerospace composite preforms forming technology and equipment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(20): 64. DOI: 10.3901/JME.2023.20.064
- [42] KARBUZ P, DOGU M, OZBEK B. Manufacturing of hexagonal cross-section thermoplastic matrix composite parts with automatic filament winding system [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 129: 62. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.08.051
- [43] AZEEM M, YA H H, ALAM M A, et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 103468. DOI: 10.1016/j.est.2021.103468
- [44] STABLA P, LUBECKI M, SMOLNICKI M. The effect of mosaic pattern and winding angle on radially compressed filament-wound CFRP composite tubes [J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115644. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115644
- [45] KIM B J, EUN L, OH B, et al. Development of silicon carbide fiber-reinforced silicon oxycarbide composites for low-observable unmanned aerial vehicle exhaust nozzles via filament winding, and polymer infiltration and pyrolysis [J/OL]. *Defence Technology*, (2025-09-02). DOI: 10.1016/j.dt.2025.09.001
- [46] 王英超, 黄泽勇, 郭文波, 等. 固体火箭发动机壳体干法缠绕成型技术研究 [J]. *航天制造技术*, 2023, (6): 30
- WANG Yingchao, HUANG Zeyong, GUO Wenbo, et al. Research on dry winding forming technology for solid rocket engine shell [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2023, (6): 30. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5108.2023.06.006
- [47] 康凯, 祖磊, 吴乔国, 等. 铝合金内胆碳纤维缠绕气瓶爆破与疲劳性能研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2022(8): 35
- KANG Kai, ZU Lei, WU Qiaoguo, et al. Research on burst strength and fatigue performance of carbon fiber wound composite cylinder with aluminum alloy liner [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(8): 35. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20220828.005
- [48] VARGAS-ROJAS E. Prescriptive comprehensive approach for the engineering of products made with composites centered on the manufacturing process and structured design methods: Review study performed on filament winding [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 243: 110093. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110093
- [49] 张军, 汪宁. 大型玻璃纤维/环氧复合材料壳体开孔补强工艺技术研究 [J]. *航天制造技术*, 2007(4): 28
- ZHANG Jun, WANG Ning. Study on opening reinforcement technology of large glass fiber/epoxy composite shell [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2007(4): 28
- [50] 胡海燕. 基于 DSP 的夹砂玻璃钢缠绕机控制系统研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- HU Haiyan. Research and development on DSP-based control system of winding machine for RPM pipe [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007
- [51] 陈长胜, 谢富原, 董晓阳, 等. 国产碳纤维干法缠绕成型工艺研究 [J]. *航天制造技术*, 2022(1): 35
- CHEN Changsheng, XIE Fuyuan, DONG Xiaoyang, et al. Study on dry winding process of domestic carbon fiber [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2022(1): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5108.2022.01.007
- [52] 张红卫, 韦健, 黄胜德, 等. 碳纤维缠绕复合材料成型工艺浅析 [J]. *石油化工技术与经济*, 2021, 37(3): 30
- ZHANG Hongwei, WEI Jian, HUANG Shengde, et al. Analysis on the forming process of carbon fiber wound composite material [J]. *Techno-Economics in Petrochemicals*, 2021, 37(3): 30. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1099.2021.03.009
- [53] 余木火, 王昊, 余许多, 等. 干法缠绕用预浸纱制备工艺优化及其性能 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(12): 5688
- YU Muhuo, WANG Hao, YU Xuduo, et al. Optimization of preparation process and properties of prepreg yarn for dry winding [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(12): 5688. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211213.001
- [54] 邓明, 曹子荷, 王静南, 等. 缠绕张力对干法缠绕复合材料结构残余应力及回弹变形的影响 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(12): 6884
- DENG Ming, CAO Zihuo, WANG Jingnan, et al. Investigation on the influence of winding tension on residual stress and spring-in deformation of dry wound composite structure [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(12): 6884. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230310.001
- [55] 肖磊, 胡海晓, 曹东风, 等. 考虑纤维缠绕形态的复合材料结构拉伸承载行为 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 1167
- XIAO Lei, HU Haixiao, CAO Dongfeng, et al. Tensile bearing behavior of composite structures considering filament wound

- morphology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 1167. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220419.010
- [56] SHRIGANDHI G D, KOTHAVALE B S. Biodegradable composites for filament winding process [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 42: 2762. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.718
- [57] 廖国峰, 沈伟, 张继涛, 等. 碳纤维用湿法缠绕成型工艺环氧树脂研究[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(8): 101
LIAO Guofeng, SHEN Wei, ZHANG Jitao, et al. Preparation and property of epoxy resin and carbon fiber composite by wet winding process[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(8): 101. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.08.021
- [58] BŁACHUT A, WOLLMANN T, PANEK M, et al. Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels[J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116337. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116337
- [59] 肖亚超, 郑志才, 陈艳, 等. 湿法缠绕成型工艺研究进展[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(增刊1): 24
XIAO Yachao, ZHENG Zhicai, CHEN Yan, et al. Research progress of wet winding technology forming process [J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(Sup 1): 24
- [60] AZEEM M, YA H H, AZAD ALAM M, et al. Influence of winding angles on hoop stress in composite pressure vessels: finite element analysis[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101667. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101667
- [61] 苏祖君, 梁国忠, 曾金芳, 等. 树脂基复合材料湿法缠绕成型研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2005(1): 46
SU Zujun, LIANG Guozhong, ZENG Jinfang, et al. Study progress in wet winding technology of resin matrix composites [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2005(1): 46. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2005.01.015
- [62] YADAV M, YELVE N P, GRIES T, et al. Multiscale investigation of winding tension on porosity, misalignment, and mechanical performance of filament-wound CFRP composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 271: 111340. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.111340
- [63] 李哲瑞. 碳纤维单向与三维编织混杂织物灌注成形复合材料结构与性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2022
LI Zherui. Study on the structure and properties of carbon fiber unidirectional and three-dimensional woven hybrid fabric infusion molding composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2022. DOI: 10.27012/d.cnki.gdhuu.2022.000644
- [64] 唐勇, 袁嫣红, 鄢和平. 炭/炭坩埚回转预制体针刺机系统设计[J]. *轻工机械*, 2025, 43(4): 1
TANG Yong, YUAN Yanhong, YAN Heping, et al. System design of carbon-carbon crucible rotary prefabricated body needling machine [J]. *Light Industry Machinery*, 2025, 43(4): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2895.2025.04.001
- [65] 刘昱君, 刘希艳, 党艺旋. 针刺技术在复合材料预成型体中的研究进展[J]. *山东纺织科技*, 2021, 62(6): 4
LIU Yujun, LIU Xiyan, DANG Yixuan. Research progress of needle-punching technology in composite materials preforms [J]. *Shandong Textile Science & Technology*, 2021, 62(6): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3028.2021.06.003
- [66] WANG Weihao, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. An experimental study on bending properties of braiding-needling composites with different layup structures [J]. *Materials Today Communications*, 2026, 50: 114104. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.114104
- [67] LIM H J, CHOI H, LEE M J, et al. An efficient multi-scale model for needle-punched C_f/SiC_m composite materials with experimental validation [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 217: 108890. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108890
- [68] 杨红英, 康晓佩, 张亚洲, 等. 碳/碳针刺预制体的研究进展[J]. *上海纺织科技*, 2021, 49(4): 9
YANG Hongying, KANG Xiaopei, ZHANG Yazhou, et al. Research progress of C/C needling preform [J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2021, 49(4): 9. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2021.04.003
- [69] SUN Yueqi, HONG Changqing, ZHANG Xinghong, et al. Preparation and properties of SiOC ceramic modified carbon fiber needled felt preform composites [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(2): 1743. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.148
- [70] DU Xiangbin, LI Diansen, WEI Qihong, et al. High temperature bending properties and failure mechanism of 3D needled C/SiC composites up to 2000°C [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(6): 3036. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.044
- [71] QI Yunchao, FANG Guodong, WANG Zhangwen, et al. An improved analytical method for calculating stiffness of 3D needled composites with different needle-punched processes [J]. *Composite Structures*, 2020, 237: 111938. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111938
- [72] HOU Geng, SHANG Deguang, ZUO Linxuan, et al. Fatigue life prediction of needled ceramic matrix composite under variable amplitude loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 156: 106690. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106690
- [73] HAN Meng, ZHOU Chuwei, BI Qinsheng. Residual mechanical properties of needle-punched carbon/carbon composites after oxidation [J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100966. DOI: 10.1016/j.coco.2021.100966
- [74] CHEN Guangjun, XU Jinkai, WANG Jingdong, et al. Numerical and experimental study on the amplitude effect of ultrasonic vibration-assisted milling of 3D needle-punched C_f/SiC composite [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12): 17893. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.03.061
- [75] LI Wudi, JIAN Yingjie, ZHOU Xingui, et al. In situ tensile damage characterization of C/C composites through X-ray computed tomography and digital volume correlation [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(7): 10471. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.11.231
- [76] CHEN Xiaoming, YAO Tianlei, LI Jiao, et al. Mode I interlaminar fracture behavior of non-felt needled composites [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 182: 110170. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110170
- [77] GUO Fangliang, YAN Ying, HONG Yang, et al. Multiscale modeling: prediction for thermophysical properties of needled carbon/carbon composite and evaluation of brake disk system [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 22: 100685. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100685
- [78] QI Yunchao, ZHOU Zhengong, MENG Songhe, et al. In-plane and interlayer shear strengths for needled composites prepared by different needling processes [J]. *Structures*, 2025, 72: 108226. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108226
- [79] ZHAO Wenyan, YU Rui, DONG Wenyong, et al. The influence of long carbon fiber and its orientation on the properties of three-dimensional needle-punched CF/PEEK composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 203: 108565. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.108565
- [80] 谢军波. 针刺预制体工艺参数建模及复合材料本构关系研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
XIE Junbo. Parametric modeling of needling process and constitutive relationship of needled composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [81] 李娜. 三维针刺复合材料的力学性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019
LI Na. Study on mechanical properties of three-dimensional needle-punched composites [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019
- [82] 陈国耀, 黄丰, 杨振宇, 等. 三维针刺复合材料参数化建模及力学性能仿真 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4459
CHEN Guoyao, HUANG Feng, YANG Zhenyu, et al. Parametric modeling and mechanical properties simulation of three-dimensional needling composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4459. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220725.002
- [83] WANG Jingjing, FANG Jing, WANG Jinming, et al. Quasi-fiber

- scale modeling of 3D needled composites based on the virtual fiber embedded method [J]. *Materials & Design*, 2024, 243: 113085. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113085
- [84] 李俊杰. 无纬布复合毡穿刺碳/碳复合材料喷管抗烧蚀性能数值分析[D]. 上海: 东华大学, 2025
LI Junjie. Numerical analysis of the ablation resistance of weftless composite felt pierced carbon/carbon composite nozzles [D]. Shanghai: Donghua University, 2025. DOI: 10.27012/d.cnki.gdhuu.2025.002005
- [85] LIU Tao, WU Xianyan, SUN Baozhong, et al. Investigations of defect effect on dynamic compressive failure of 3D circular braided composite tubes with numerical simulation method[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107381. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107381
- [86] AI Jing, DU Xiangbin, LI Diansen, et al. Parametric study on longitudinal and out-of-plane compressive properties, progressive damage and failure of 3D five-directional braided composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 156: 106840. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.106840
- [87] ZHANG Di, ZHENG Xitao, WANG Zhibang, et al. Effects of braiding architectures on damage resistance and damage tolerance behaviors of 3D braided composites [J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111565. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111565
- [88] SONG Hao, XU Haojie, WANG Yutao, et al. Buckling and fracture analysis of three-dimensional four-directional braided composite tubes with cutouts under axial compression [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 305: 112680. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112680
- [89] LU Yao, LIU Tao, WANG Shujuan, et al. A mild, environmental, and low-destructive recycling strategy for the 3D multi-axial braided composites cured by the vacuum-assisted resin transformed molding process [J]. *Composites Communications*, 2022, 35: 101354. DOI: 10.1016/j.coco.2022.101354
- [90] ZUO Hongmei, LI Diansen, JIANG Lei. Experimental study on compressive fatigue behavior and failure mechanism of 3D five-directional braided composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 139: 106097. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106097
- [91] GE Lei, LI Huimin, GAO Yihang, et al. Parametric analyses on multiscale elastic behavior of 3D braided composites with pore defects [J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115332. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115332
- [92] LI Yiding, YAN Shibo, YAN Ying, et al. Modelling of the compressive behavior of 3D braided tubular composites by a novel unit cell [J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115303. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115303
- [93] TIAN Wenlong, QI Lehua, FU M W. Multi-scale and multi-step modeling of thermal conductivities of 3D braided composites [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 228: 107466. DOI: 10.1016/j.ijmeosci.2022.107466
- [94] LI Wei, FANG Guodong, LI Weijie, et al. Numerical investigation of mesoscopic volumetric ablation of 3D braided charring composites [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 116016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116016
- [95] 李毓陵. 三维矩形编织规律的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2005
LI Yuling. Study on the law of three-dimensional rectangle braiding [D]. Shanghai: Donghua University, 2005
- [96] 胡嘉彬. 三维编织复合材料四步法 Matlab 建模 [J]. *电脑与电信*, 2024 (5): 14
HU Jiabin. Four-step Matlab modeling of 3D woven composites [J]. *Computer & Telecommunication*, 2024 (5): 14. DOI: 10.15966/j.cnki.dnydx.2024.05.018
- [97] GU Qiuji, QUAN Zhenhen, YU Jianyong, et al. Structural modeling and mechanical characterizing of three-dimensional four-step braided composites: a review [J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 119. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.065
- [98] 朱翔宇, 单忠德, 孙正, 等. 基于纱线交织的旋转编织预制体表面形貌预测 [J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(2): 318
ZHU Xiangyu, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Surface morphology prediction of preforms in rotational braiding process based on yarn interlacement [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Natural Science Edition)*, 2025, 57(2): 318. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2025.02.013
- [99] 李政宁, 陈革, FRANK Ko. 三维编织工艺及机械的研究现状与趋势 [J]. *复合材料科学与工程*, 2018 (5): 109
LI Zhengning, CHEN Ge, FRANK Ko. The development and tendency of 3D braiding technology and machinery [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018 (5): 109. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2018.05.018
- [100] MOURITZ A P, BANNISTER M K, FALZON P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30 (12): 1445. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2
- [101] JANG Y, KIM H, LEE D, et al. Comprehensive analysis of the effect of braiding angle on the wettability and mechanical properties of 3D braided carbon fiber fabric-reinforced composites [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110798. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110798
- [102] LI Qiyang, LI Chengen, CHI Xinfu, et al. Influence of process configuration and mandrel geometry variations on the mechanical behavior of 3D braided composites subjected to quasi-static loads [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 306: 112794. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112794
- [103] CUI Can, DONG Jiwei, MAO Xianbiao. Effect of braiding angle on progressive failure and fracture mechanism of 3-D five-directional carbon/epoxy braided composites under impact compression [J]. *Composite Structures*, 2019, 229: 111412. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111412
- [104] GAO Xingzhong, SIDDIQUE A, SUN Baozhong, et al. Influence of Braiding angle on multiple impact damages of 3-D braided composite along longitudinal direction [J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26 (4): 1261. DOI: 10.1007/s10443-019-09779-1
- [105] ZHU Hao, LI Diansen, JIANG Lei. Mesoscale progressive damage and strength analysis of three-dimensional braided composites under tension [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 237: 107221. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107221
- [106] 王立武. 横向过载下固体火箭发动机多向编织炭/炭复合材料喉衬烧蚀机理研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2021
WANG Liwu. Study on the mechanism of carbon-carbon composite materials in a solid rocket motor with lateral flight overloads [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. DOI: 10.27406/d.cnki.gxbgu.2021.000302
- [107] YAN Shuo, ZHANG Junjie, SUN Baozhong, et al. In situ measurement of strains at different locations in 3-D braided composites with FBG sensors [J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111527. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111527

(编辑 吕雪梅 张红)