

<http://pmse.scu.edu.cn>

热压罐成型压力对双马树脂基复合材料孔隙及力学性能的影响

刘梓楠¹, 于雅琳², 王荣², 孙宏杰², 周何乐子¹, 黄志高¹, 周华民¹

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘要:双马来酰亚胺树脂(BMI)具有良好的加工工艺性能和优异的耐热性能,以BMI为基体的复合材料近些年在航空航天领域应用广泛。文中采用热压罐工艺固化T800/双马树脂基预浸料,设置0.1~0.8 MPa的成型压力,制备了[0/90/±45]_{2s}及[0]₁₄铺层的不同孔隙率的层合板。通过显微镜法表征了孔隙率和孔隙的尺寸、形状及分布。针对2种铺层和不同孔隙率样件的力学性能,开展了拉伸、弯曲和层间剪切实验,并采用扫描电子显微镜技术观察了受影响程度最大的层间剪切样件的失效形貌。结果表明,低成型压力会使孔隙突变,孔隙尺寸增大,并从层内向层间分布,导致力学性能急剧降低,其中,层间剪切性能受孔隙突变影响最大。当成型压力从0.8 MPa降低至0.1 MPa时,[0/90/±45]_{2s}铺层试样层间剪切强度下降26.22%,经失效分析认为,这是由于层间的大尺寸孔隙造成的性能降低。

关键词:双马树脂基复合材料;孔隙演化;成型压力;热压罐固化;力学性能

中图分类号:TB332 文献标识码:A 文章编号:1000-7555(2025)02-0070-08

双马来酰亚胺树脂(BMI)同时兼具环氧树脂良好的加工工艺性能和聚酰亚胺树脂的耐热性能^[1-3],在高温航空航天结构应用中作为基体材料发挥着重要作用。以BMI和它的改性产物为基体的复合材料在近些年发展迅速、应用广泛^[4,5]。在成型技术方面,热压罐成型技术提供的高压力环境可以制造高纤维体积分数、少缺陷的高质量复合材料样件^[6,7],同时也适用于薄壁大面积结构的结构成型,是航空航天领域成型复合材料的重要成型方法^[8,9]。

在聚合物基复合材料的制备过程中,孔隙是最重要的缺陷之一^[10,11]。其重要性在于孔隙对复合材料力学性能和失效机制具有广泛影响,其不同制造技术中都有较高的形成概率且很难避免^[12,13]。在环氧树脂基复合材料领域,目前孔隙对力学性能的影响研究已经较为成熟。较多研究认为存在临界孔隙含量。低于该含量,层合板的强度不会因孔隙的存在而受到显著影响;高于该含量时,层合板的多种强度值与孔隙率存在较好的相关性^[14-16]。此外,

Olivier等认为,除了孔隙含量之外,孔隙的大小和位置也对力学性能发挥着重要作用^[17]。

然而,对于BMI基体复合材料,现有研究主要集中于材料的改性^[18],对于孔隙的形成规律与其对力学性能的影响缺少系统性的研究。同时,现有的大量关于复合材料孔隙的研究仅仅单独考虑了孔隙对力学性能的影响,并没有将生产工艺对孔隙的形成与演化进行整体性的研究,未形成工艺-结构-性能的一体性结论,为实际生产提供指导。

因此,本文选取热压罐制备的T800/双马树脂基复合材料为研究对象。考虑到热压罐成型过程中,压力对孔隙的形成及抑制起到至关重要的作用^[19,20],选取成型压力作为一体化研究的工艺参数变量,通过改变热压罐成型压力制备了不同孔隙率的复合材料层合板,探究了成型压力对孔隙率及孔隙大小、形状、分布的影响,并研究了不同压力成型后不同孔隙对T800级双马树脂基复合材料力学性能的影响。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0035

收稿日期:2024-02-21

通讯联系人:周何乐子,主要从事复合材料成型、失效和增韧研究,E-mail: helezizhou@hust.edu.cn

1 实验部分

1.1 实验原料与样品制备

本文所选试样材料为航天材料及工艺研究所制备的TG800/802碳纤维增强双马树脂基预浸料,纤维体积分数为65%。层合板采用手工方式铺层,铺层方式参照航空领域实际应用需求,制备准各向同性(QI)层合板,具体铺层为 $[0/90/\pm 45]_2$;单向(UD)层合板,具体铺层为 $[0]_{14}$,采用热压罐成型工艺完成固化。

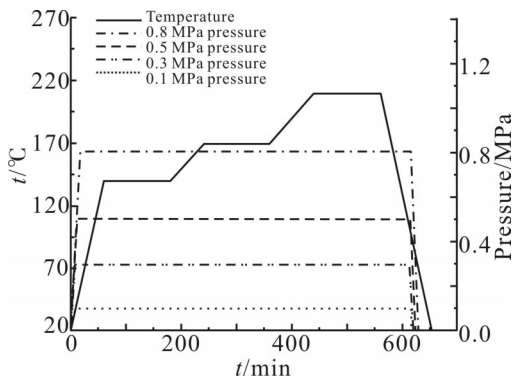


Fig. 1 Autoclave curing curve

如 Fig.1 所示,热压罐固化过程中,温度从室温(20 °C)以 2 °C/min 速度升温至 140 °C,保温 2 h;接着从 140 °C 以 0.5 °C/min 速度升温至 170 °C,保温 2 h。最后从 170 °C 以 0.5 °C/min 速度升温至 210 °C,保温 2 h,以 2 °C/min 速度降温至室温,完成固化。

固化过程的成型压力分别选取 0.8 MPa, 0.5 MPa, 0.3 MPa 和 0.1 MPa,通过不同成型压力制备不同孔隙率的碳纤维/双马树脂复合材料层合板^[21]。

1.2 测试与表征

1.2.1 孔隙表征:目前,表征复合材料孔隙率的主要方法有密度法、显微镜法和超声检测法^[22]。由于采用热压罐成型工艺制备的复合材料层合板主要应用于航天构件,孔隙率处于较低水平,密度法因为树脂和碳纤维体积分数值不够精确,计算结果容易造成较大误差;超声检测法由于孔隙尺寸小、数量少,超声波衰减不明显,难以判断是否存在孔隙;所以采用显微镜法表征孔隙率的大小,同时方便后续对孔隙形貌的观察^[19]。

显微镜法表征孔隙参照国标 GB/T 3365。每块层合板选取多个不同位置制备金相试样。使用由 KEYENCE 生产的 VHX-1000C 超景深三维显微镜对

制备好的金相试样进行表征。采用图像分析软件统计不同压力下成型层合板的平均孔隙率。

1.2.2 力学性能测试:本文通过拉伸强度测试、弯曲强度测试和层间剪切强度测试来评估孔隙率对层合板力学性能的影响。

拉伸试验使用由日本岛津生产的 AG-IC 100 kN 材料高温持久性能试验机,按照国标 GB/T 3354-2014 测试标准,从平行纤维方向即 0° 方向对 2 种不同铺层 4 种不同孔隙率试样测量拉伸强度,共 8 组。试样尺寸为 230 mm × 12.5 mm,在拉伸样条两边黏贴 50 mm 铝制加强片防止夹持破坏,加载速率为 2 mm/min。

三点弯曲试验采用德国 Zwick/Roell 集团公司生产的 Zwick Z020 万能材料试验机,按照国标 GB/T 3356-2014,从平行纤维方向测试 8 组样品的弯曲强度。试样尺寸为 80 mm × 12.5 mm,跨距为 64 mm,加载速度为 5 mm/min。

层间剪切强度由短梁法测定,采用德国 Zwick/Roell 集团公司生产的 Zwick Z020 万能材料试验机,按照 JC/T 773-2010 测试标准,从平行纤维方向测试 8 组样品的层间剪切强度。试样尺寸为 20 mm × 10 mm,跨距为 10 mm,加载速度为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 成型压力对孔隙的影响

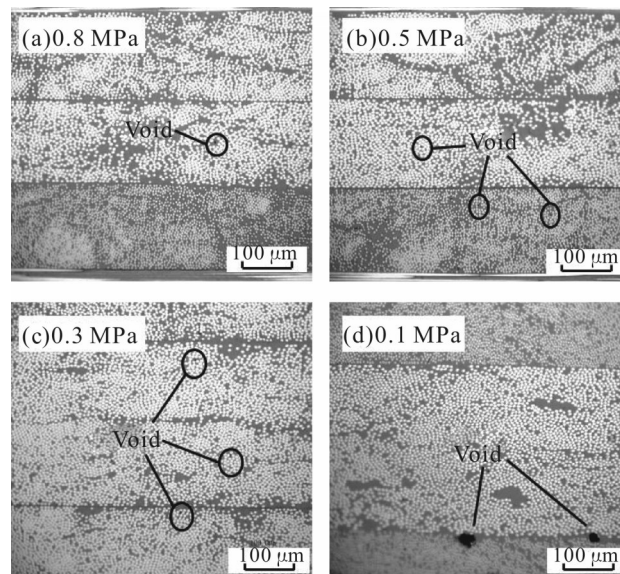
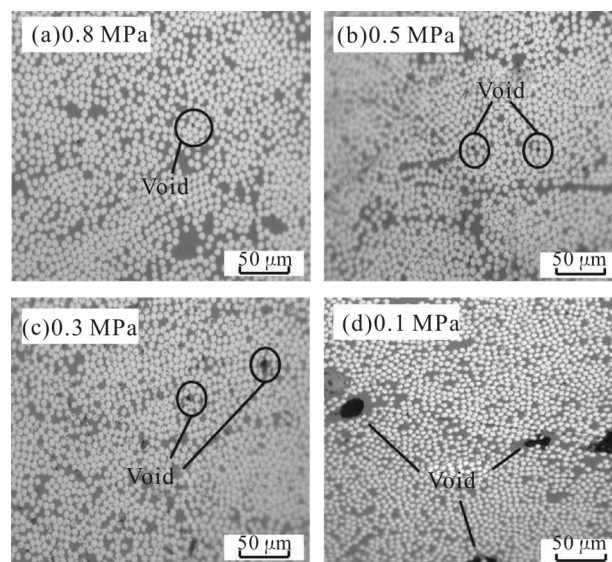
对不同固化压力下成型的复合材料层合板,每块选取 3 个不同区域制备金相试样,采用显微镜法观察孔隙形貌,使用 Image J 图像处理软件对试样孔隙率进行计算与统计,平均孔隙率结果如 Tab.1 所示。

由 Tab.1 可知,采用热压罐固化工艺制备的碳纤维/双马树脂复合材料层合板孔隙率普遍较小,并且孔隙率大小受成型压力影响。随着成型压力的减小,固化后层合板的孔隙率逐渐增大。成型压力从 0.8 MPa 逐渐减小到 0.3 MPa 的过程中,孔隙率增大幅度较小。当成型压力减小到 0.1 MPa 时,孔隙率急剧增大。不同成型压力下 2 种铺层板的孔隙形貌如 Fig.2 所示。

Fig.2 所示为 QI 层合板金相显微照片,当成型压力由 0.8 MPa 减小到 0.5 MPa,再从 0.5 MPa 减小到 0.3 MPa 时,孔隙大小、形状、分布未出现明显变化,

Tab. 1 Void content of laminates under different forming pressures

Group number	Ply stacking sequence	Forming pressures / MPa	Void content / %	Standard deviation / %
1	[0] ₁₄	0.8	0.16	0.01
2	[0] ₁₄	0.5	0.25	0.01
3	[0] ₁₄	0.3	0.34	0.03
4	[0] ₁₄	0.1	1.48	0.34
5	[0/90/±45] _{2s}	0.8	0.26	0.04
6	[0/90/±45] _{2s}	0.5	0.35	0.04
7	[0/90/±45] _{2s}	0.3	0.43	0.04
8	[0/90/±45] _{2s}	0.1	1.86	0.63

**Fig. 2 Metallographic micrograph of QI laminates at different autoclave pressures****Fig. 3 Metallographic micrograph of UD laminates at different autoclave pressures**

层合板孔隙尺寸较小,呈细小球形,分布不均匀,主要分布在层内树脂区域和纤维束之间。当成型压力下降到0.1 MPa时,孔隙率急剧增大,且大小、形状、分布发生突变。孔隙发生聚集现象,尺寸明显增大,呈拉长的椭圆形状,分布位置由层内转变为层间界面。

Fig.3所示为UD层合板金相显微照片,孔隙大小、形状随成型压力的变化与QI层合板基本相同。与QI层合板不同的是,当0.1 MPa压力成型时,孔隙尺寸增大,其分布位置并没有在层间界面发生聚集,仍然在层内区域随机分布。

2.2 成型压力对力学性能的影响

成型压力会影响孔隙率大小及孔隙形貌、分布,继而影响层合板的力学性能。将实际生产中的标准成型工艺即0.8 MPa成型压力下制备的层合板强度值作为标准强度值,计算不同成型压力下层合板的强度保持率。结合2.1节成型压力对孔隙的影响,进一步分析对力学性能的影响。

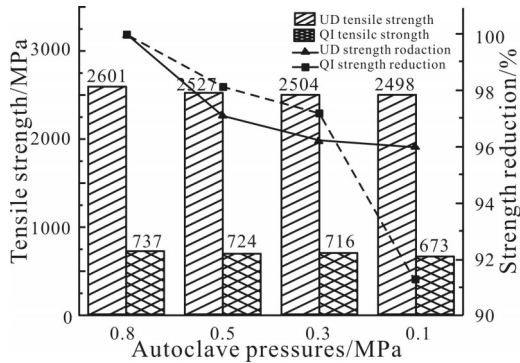


Fig. 4 Effect of autoclave pressures on tensile strength

对于拉伸性能,如Fig.4所示,随着成型压力从0.8 MPa减小到0.5 MPa,孔隙率略微增大,拉伸强度逐渐减小。UD层合板和QI层合板的拉伸强度基本呈现相同的下降趋势,保持近似线性下降。当成型压力下降到0.1 MPa,即孔隙发生突变时,UD板拉伸强度下降趋势逐渐平缓,QI板拉伸强度大幅下降8.70%。总体而言,拉伸强度对孔隙率变化不敏感,仅QI板在孔隙突变时强度值有大幅度下降。

对于压缩性能,如Fig.5所示,UD板随着成型压力下降,孔隙率增大了1.32%,弯曲强度下降了3.59%。QI板随着成型压力下降,孔隙率增大了1.60%,弯曲强度下降了9.62%。对于UD板,弯曲强度受孔隙变化的影响远小于准QI板,孔隙率突增、

孔隙尺寸增大时也没有发生大幅改变,强度基本呈线性下降趋势。QI板强度受孔隙突变的影响相对较大,下降幅度数倍于UD板。

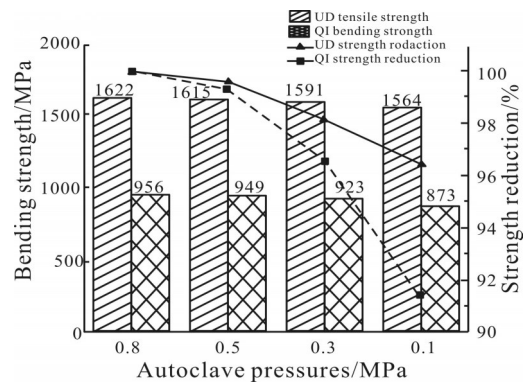


Fig. 5 Effect of autoclave pressures on flexural strength

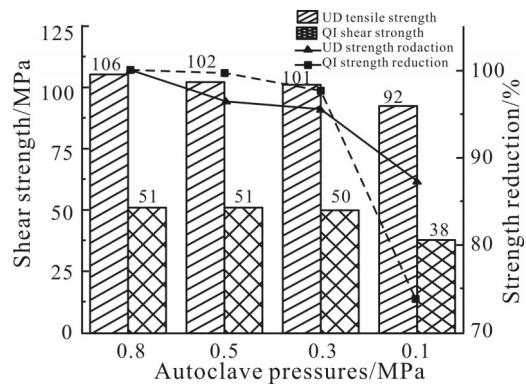


Fig. 6 Effect of autoclave pressures on shear strength

对于层间剪切性能,如Fig.6所示,随着成型压力的减小,孔隙率逐渐增大,UD板的层间剪切强度下降幅度相对较小,呈近似线性下降趋势,孔隙率增大1.32%,层间剪切强度下降12.65%。

QI板在孔隙未发生突变前,层间剪切强度变化幅度较小。而当成型压力来到0.1 MPa,孔隙突变,层间剪切强度急剧下降26.22%。比较之前的结果,QI板的层间剪切性能相对于拉伸性能、弯曲性能对于孔隙突变这一现象更为敏感,强度降幅也更加明显。

结合2.1节和2.2节实验结果综合分析,成型压力从0.8 MPa下降至0.3 MPa,即孔隙突变前阶段,2种层合板的力学性能都随着孔隙率的略微升高而下降,下降幅度较小,基本呈线性趋势。当成型压力下降至0.1 MPa,孔隙率大幅升高,孔隙尺寸变大,形状改变,QI板孔隙由层内转移至层间。该阶段QI板的力学性能下降幅度远大于UD板,层间剪切性能在3种力学性能中下降幅度最大,初步判断为大尺寸的

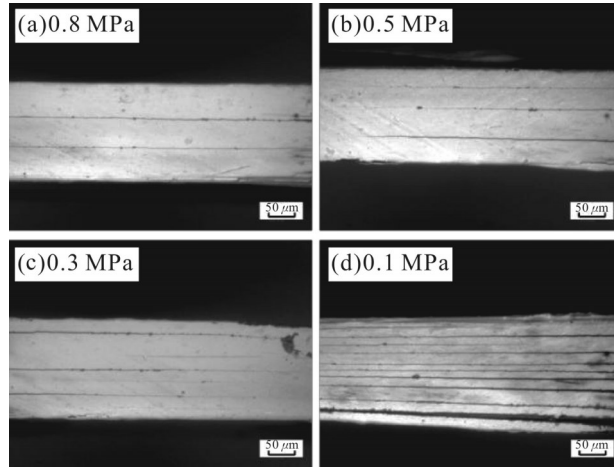


Fig. 7 Macro photos of interlaminar shear failure of QI laminates under different autoclave pressures

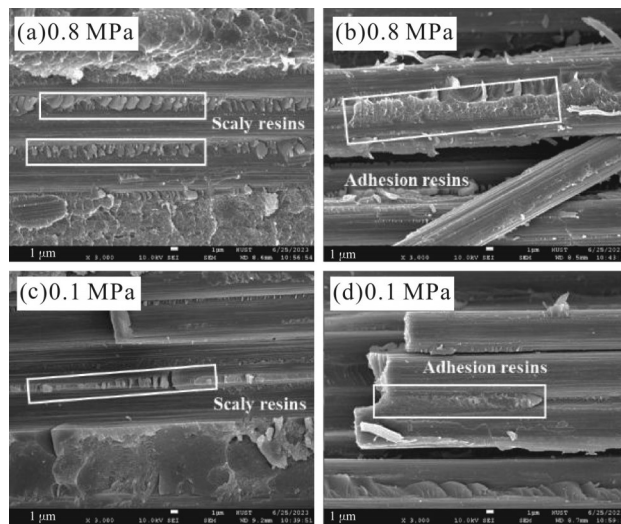


Fig. 8 SEM images of interlaminar shear failure of QI laminates at different autoclave pressures

层间孔隙促进了层间裂纹的产生,造成了QI板层间性能大幅下降,继而导致力学性能,特别是层间剪切性能大幅度下降。

2.3 层间剪切破坏形貌分析

比较上述成型压力对层合板不同力学性能的影响试验,可以看出,成型压力不同导致的孔隙突变对T800/双马树脂基复合材料试样的层间剪切强度,特别是QI板层间剪切强度具有较大的影响。

因此分别采用低倍超景深三维显微镜与扫描电子显微镜(SEM)观察了QI板层间剪切试样的宏观失效形貌与纤维-树脂界面结合状态,以探究成型压力及大尺寸层间孔隙对复合材料层间界面性能的影响机制。

根据Fig.7所示宏观失效照片结果,结合2.1节

成型压力对孔隙影响的分析,高压成型QI层合板的失效形式为较少层数的剪切失效。当成型压力为0.8 MPa,0.5 MPa和0.3 MPa时,仅孔隙率有小幅度增长,孔隙没有突变,与之对应的宏观失效形貌没有发生明显改变,3种试样的剪切失效层数都较少,因此层间剪切强度变化幅度极小。

而0.1 MPa成型QI层合板在层间存在大尺寸孔隙,裂纹容易在孔隙处萌发,层与层之间更容易发生剪切破坏,对应的宏观失效形貌发生多重剪切失效,失效层数远高于高压成型层合板,因此层间剪切强度急剧下降。

综上所述,对于QI板,当成型压力下降到0.1 MPa时,大尺寸孔隙分布到了性能较弱的层间界面位置,成为层间裂纹的萌发点,使得层间界面区域的

树脂与树脂之间更容易发生剪切破坏,因此层间剪切强度对成型压力的下降最为敏感。而拉伸破坏和弯曲破坏都有纤维参与承载,大尺寸的层间孔隙对强度值的影响相对较小。对于UD板,大尺寸孔隙随机分布到层内区域,对力学性能的影响进一步减小,但是还是容易在该处产生裂纹,因此孔隙突变后强度值仍然存在突然下降现象。

采用扫描电子显微镜观察高压与低压2种成型试样的层间剪切破坏形貌,如图8所示。Fig.8(a)和Fig.8(c)为0.8 MPa和0.1 MPa压力成型层合板在发生剪切破坏时,未开裂区域的界面形貌占据剪切失效表面的大部分面积,2种样件细观形貌基本类似。复合材料剪切断口界面几乎没有开裂,纤维无拔出现象,碳纤维表面与树脂保持黏附,呈条状树脂簇,表现出良好的结合性。纤维与纤维之间出现因剪切力作用形成的鳞屑状树脂,表明剪切力主要导致树脂与树脂之间的破坏,纤维与树脂界面强度较高,未发生明显破坏。Fig.8(b)和Fig.8(d)为2种成型压力下小面积的纤维拔出区域形貌图片,2种成型层合板剪切破坏时纤维拔出现象类似,拔出纤维表面黏附树脂,纤维与纤维间存在树脂粘连,并未观察到光洁纤维拔出后残留的隧洞,说明树脂与纤维界面结合性较好。

在2种成型压力试样树脂和纤维粘接界面形貌相似的情况下,整体观察树脂剪切断口,可以看出,在高压成型件的树脂破坏区域更加毛糙,存在大面积剪切撕裂痕迹,拔出纤维也存在更多鳞屑状树脂。而低压成型件则相对光滑,表面较为平整,拔出纤维存在树脂黏附,但是表面同样较为光滑。结合前文分析,其剪切失效主要由大尺寸孔隙处萌发的裂纹进一步扩展造成,在较低剪切应力下,裂纹即发生扩展,因此剪切撕裂形貌相对不明显。

总体而言,对于2种成型压力下的试样剪切破坏形貌,纤维与树脂间界面粘接区域并没有因为成型压力的不同而出现明显差异,纤维与树脂结合情况相似。树脂的剪切破坏区域则是0.8 MPa成型件更加毛糙,0.1 MPa成型件相对光滑,分析0.1 MPa成型件在较低的剪切应力即发生裂纹扩展,继而造成失效。层间剪切性能的差异主要还是由于层间大尺寸孔隙的存在,使得裂纹更容易萌发和扩展。

3 结论

本文将孔隙的形成演化与工艺结合,提出了关键的临界成型压力,为实际的生产提供了指导。在热压罐固化碳纤维/双马树脂基复合材料工艺中,存在使得孔隙突变的临界成型压力,低于该压力成型不仅会导致孔隙率急剧升高,还会使得孔隙尺寸、形状、分布情况发生改变。这种突变使得复合材料力学性能,特别是层间剪切性能大幅度下降,更容易在低剪切应力下失效,带来复合材料及其结构的安全风险。

因此成型高强度复合材料构件时,应尽可能提前探明材料的临界成型压力,避免低于临界压力下成型。反之,在确保成型压力始终高于临界数值的情况下,可以适当降低成型压力,这对孔隙及力学性能的影响都相对较小。临界成型压力的探明及应用,有利于在保证复材构件力学性能的同时,控制生产成本,降低成型工艺及设备要求,提高生产效率。

参考文献:

- [1] Hu H, Li C, Wang C, *et al.* Curing kinetics, thermal and erosive wear characteristics of bismaleimide blends modified by polyaryletherketone[J]. *High Performance Polymers*, 2023, 35: 126-141.
- [2] Xu J, Chen P, Ma S, *et al.* Synthesis, polymerization kinetics, and thermal properties of novel bismaleimides containing twisted structure[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140: 1-13.
- [3] Zhou X, Qiu S, He L, *et al.* Synthesis of star-shaped allyl phosphazene small molecules for enhancing fire safety and toughness of high performance BMI resin[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130655.
- [4] Sun P, Zhao Y, Luo Y, *et al.* Effect of temperature and cyclic hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of carbon fiber/bismaleimide (BMI) composite[J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 4341-4347.
- [5] Liu D, Chen P, Mu J, *et al.* Improvement and mechanism of interfacial adhesion in PBO fiber/bismaleimide composite by oxygen plasma treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 6935-6940.
- [6] Hanafiah N H M, Othman A R. Effect of processing parameter on void content of glass fibre composite laminate[J].

- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2022, 53: 308-315.
- [7] Maffezzoli A, Grieco A. Optimization of parts placement in autoclave processing of composites[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20: 233-248.
- [8] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 2-9.
Xing L S, Jiang S C, Zhou Z G. Advances in advanced resin matrix composites manufacturing technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 2-9.
- [9] 杨智勇, 张东, 顾春辉, 等. 国外空天往返飞行器用先进树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3029-3043.
Yang Z Y, Zhang D, Gu C H, *et al.* Progress in research and application of advanced resin matrix composites for space shuttle spacecraft abroad[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3029-3043.
- [10] 李波, 赵美英, 万小朋. 孔隙微观特征对碳纤维/环氧树脂复合材料横向拉伸强度的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1864-1868.
Li B, Zhao M Y, Wan X P. Effect of pore microscopic characteristics on transverse tensile strength of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(7): 1864-1868.
- [11] Ayanoglu M O, Carlsson L A, Du E. Effects of void content on the moisture uptake and mechanical strength of a glass/epoxy composite[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 57: 325-336.
- [12] Hyde A, He J, Cui X, *et al.* Effects of microvoids on strength of unidirectional fiber-reinforced composite materials[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 187: 107844.
- [13] Wei J, Sun L, Gao X, *et al.* Microstructures failure analysis of fiber reinforced composites with various void types[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 230-246.
- [14] Guo Z S, Liu L, Zhang B M, *et al.* Critical void content for thermoset composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43: 1775-1790.
- [15] Jeong H. Effects of voids on the mechanical strength and ultrasonic attenuation of laminated composites[J]. Journal of Composite Materials, 1997, 31: 276-292.
- [16] Costa M L, De Almeida S F M, Rezende M C. Critical void content for polymer composite laminates[J]. AIAA Journal, 2005, 43: 1336-1341.
- [17] Olivier P, Cottu J P, Ferret B. Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates[J]. Composites, 1995, 26: 509-515.
- [18] 许晓洲, 柯红军, 汪东. 双马来酰亚胺树脂及其纤维增强复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(7): 32-36.
Xu X Z, Ke H J, Wang D. Research progress of bismaleimide resin and its fiber reinforced composites[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(7): 32-36.
- [19] Mehdikhani M, Gorbatikh L, Verpoest I, *et al.* Voids in fiber-reinforced polymer composites: a review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53: 1579-1669.
- [20] Ali Z, Yan Y, Mei H, *et al.* Impact of fiber-type and autoclave-treatment at different temperatures on the mechanical properties and interface performance of various fiber-reinforced 3D-printed composites[J]. Polymer Composites, 2023, 44: 3232-3244.
- [21] 马雯, 刘福顺. 玻璃纤维复合材料孔隙率对超声衰减系数及力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 70-75.
Ma W, Liu F S. Effect of porosity on ultrasonic attenuation coefficient and mechanical properties of glass fiber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 70-75.
- [22] 文琼华, 孟江燕, 龚楚, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料孔隙率检测方法的分析比较[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(7): 32-37.
Wen Q H, Meng J Y, Gong C, *et al.* Analysis and comparison of porosity detection methods for carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Fiberglass/Composite Materials, 2016(7): 32-37.

Effect of Forming Pressure of Autoclave on Voids and Mechanical Properties of Bismaleimide Resin Composites

Zinan Liu¹, Yalin Yu², Rong Wang², Hongjie Sun², Helezi Zhou¹, Zhigao Huang¹, Huamin Zhou¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Bismaleimide resin (BMI) has good processing properties and excellent heat resistance. Composites based on BMI have been widely used in aerospace field in recent years. In this study, T800/BMI composites were cured by autoclave process. Laminates with different void content of $[0/90/\pm 45]_{2s}$ and $[0]_{14}$ layers were prepared by setting the forming pressure of 0.1~0.8 MPa. The void content, size, shape and distribution were characterized by microscopy. The tensile, bending and interlayer shear tests were carried out for the mechanical properties, and the failure morphology of the interlayer shear samples was observed by scanning electron microscopy. The results show that low forming pressure will cause void mutation, void size increase, and distribution from intralayer to interlayer, resulting in a sharp decrease in mechanical properties, among which the interlayer shear performance is most affected by void mutation. When the molding pressure is reduced from 0.8 MPa to 0.1 MPa, the interlayer shear strength of the $[0/90/\pm 45]_{2s}$ specimen is decreased by 26.22%, which is due to the large-size voids between the layers.

Keywords: bismaleimide resin composites; evolution of voids; forming pressure; autoclave curing; mechanical property