

复合材料C/L型结构固化变形的影响因素分析*

杨青^{1,2}, 卫原平^{1,2}, 刘卫平³

(1. 上海赛科利汽车模具技术应用有限公司, 上海 201209;

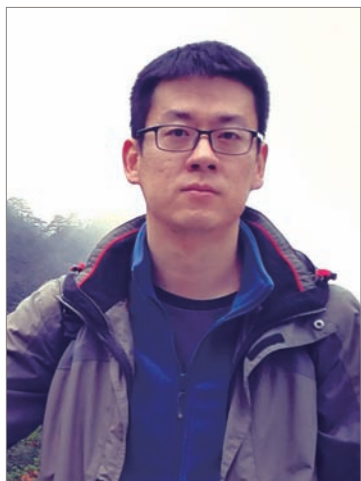
2. 上海汽车车身先进制造工程中心, 上海 201209;

3. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 固化变形是影响复合材料零件结构成型几何精度的重要因素。产生固化变形的原因一般可以分为内因和外因: 内因主要与材料属性和结构设计参数有关; 外因主要与固化工艺和模具有关。固化时这些因素共同作用, 在复合材料结构内部产生残余应力, 脱模时导致构件发生变形。通过对已有试验结果的研究, 总结了不同因素对复合材料结构固化变形的影响, 为固化变形的工程预测和控制提供直观的数据参考。

关键词: 复合材料; C/L型; 固化工艺; 变形; 影响因素

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.087



杨青

工学博士, 研究方向复合材料汽车零部件设计与制造。

尺寸精度是影响复合材料零件质量的重要因素, 零件制造成型过程中出现的翘曲和回弹, 会引起尺寸偏

差。影响复合材料结构固化变形的因素众多, 且相互耦合, 如何减小制造过程中的固化变形和残余应力一直是复合材料制造的重要课题之一。从固化变形的发生机理来看, 一般可以分为内因和外因: 内因主要指材料属性、几何结构和铺层设计等因素; 外因主要与固化工艺和模具有关。这些因素在固化过程中共同作用, 在复合材料内部产生残余应力累计, 最后脱模时参与应力集中释放, 从而导致结构发生变形^[1-4]。C型构件与L型复合材料零件, 常作为研究固化变形的典型结构, 如图1(a)所示。结构整体的固化变形可视为由转角区域的回弹变形和平面区域的翘曲变形叠加而成, 如图1(b)所示。

Rennick^[5], Radford^[6], Nelson^[7]认为材料参数的各向异性是导致复合材料发生固化变形的主要原因, 由于热膨胀和化学收缩参数等参数各向异性, 导致复合材料面内和面

外方向变形不协调, 从而产生残余应力, 导致不同几何结构发生不同的程度变形。杨青等^[8]研究了不同几何结构形式、不同铺层形式等因素对零件固化变形的影响。固化变形不仅与材料本身的各向异性属性有关, 还和固化工艺有密切的联系, 如固化的温度、压力、时间等参数都会导致零件内部残余应力的变化。徐娟等^[9]研究了固化工艺参数对复合材料帽形加筋壁板固化变形的影响。徐鹏等^[10]利用数值模拟的方法研究了固化工艺对大厚度复合材料层合板温度分布的影响。张江涛等^[11]基于黏弹性模型研究了材料参数演化及残余应力的变化。Pagliuso等^[12]研究了复合材料固化过程中吸胶不均匀和与模具的粘接作用等不严谨的工艺控制导致的翘曲问题。Nairn等^[13]研究了固化温度对残余应力的影响, 提出较高的固化温度会引起较高的残余应力, 从而导致更大的固化

* 基金项目: 上汽集团科研基金项目(1715)。

变形。White 等^[14]研究了固化温度和固化时间对零件回弹的影响,表明降低固化温度、增加固化时间,可以在保持构件力学性能不变的情况下减小 20%~30% 的固化变形,而较低降温速率可以增加零件的应力松弛,使固化变形量减小 12% 左右。

随着对固化变形机理的认识不断深入,发现模具对固化变形也有着非常重要的影响,模具与复合材料热膨胀系数不匹配会增加结构厚度方向的应力梯度,从而引起变形,其大小与模具和构件的界面作用力有关^[15-17]。Flanagan^[18]认为,界面的滑动摩擦剪力是造成复合材料应力梯度的主要原因。通过对界面力的研究,Melo 等^[19]认为,模具与复合材料界面和复合材料第 1 层与第 2 铺层之间的界面摩擦剪力对构件固化变形产生的影响不可忽略。Twigg 等^[20]依据上述假设建立了理论模型,对模具与结构变形的关系进行了定量的研究。Rahim 等^[21]通过光纤光栅和热电偶相结合的方法对复合材料构件在热压罐成型工艺过程中的温度和应变进行在线监测,研究了不同模具材料对构件固化变形的影响,模具热膨胀系数同复合材料零件热膨胀系数相差越大,残余应力越大。

目前针对复合材料结构固化变形的问题,主要采取理论和试验相结合的方法进行研究,一般首先建立某些影响变量对固化变形影响的理论模型,然后对理论模型进行求解,最后开展试验对理论结果进行分析和验证。但事实上,固化变形的影响因素非常多,理论模型往往只能体现某些类型变量对固化变形的影响,无法全面表征不同因素对固化变形的综合影响。杨青^[22]和丁安心等^[23]对固化变形的理论模型研究情况进行了总结,发现考虑变量较多的理论模型工程求解很困难,很难直接用于工程应用,如 Rahim^[24]开发的理论模型很复杂,求解非常困难。

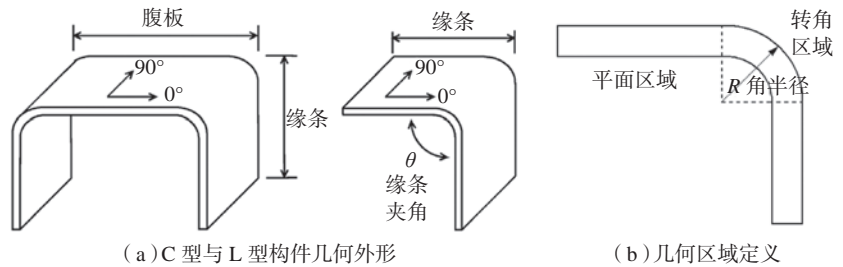


图1 固化变形典型结构

Fig.1 Typical curing deformation structure

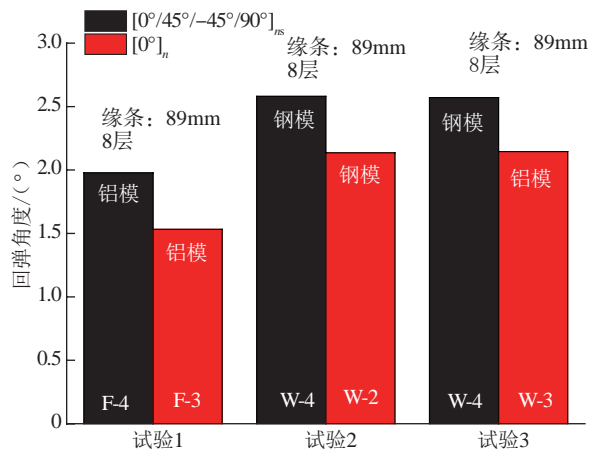


图2 单向铺层和准各项同性铺层的回弹角度

Fig 2 Spring-in angle of unidirectional and quasi-isotropic laminates

本文以 C 型、L 型和板条型等典型复合材料结构为对象,从材料参数、铺层形式、几何外形等内部因素,以及固化工艺和模具等外部因素对复合材料固化变形的影响的试验结果进行总结分析,对影响机理较明确和尚未明确的影响因素进行了区分讨论,为工程应用和理论研究方向提供直观的试验数据基础。

内因对固化变形的影响

内在因素主要是指材料的物理属性及相关几何参数,包括材料热膨胀和化学收缩特性、铺层形式、厚度,夹角半径和 R 角度半径等因素。本文将讨论上述内在因素对固化变形的影响。

1 铺层对固化变形的影响

铺层形式对复合材料结构回弹的影响较大,不同铺层之间无法进行有效比较。但是,通常认为对称铺层的回弹与翘曲小于非对称铺层^[25]。对于

C 型和 L 型构件而言,0° 单向材料的回弹要小于准各项同性铺层和其他铺层形式^[16,26-27],如图 2^[26]所示。Jain 等^[28]研究发现,[90° /0° /90° /0°]与 [0° /90° /0° /90°]铺层构件回弹值相差很小,这表明在一定铺层角度下,铺层顺序可能对回弹结果影响不大。

Radford 等^[29]较为详细地研究了 L 型结构铺层对回弹变形的影响,如图 3 所示。图 3 给出了不同铺层材料,在不同温度下的固化回弹值,可以发现斜率较大曲线表明热膨胀效应对该铺层复合材料的固化回弹值影响较大。而斜率较小接近水平的曲线表明,固化回弹热膨胀效应对该铺层复合材料的回弹值影响小,导致回弹的因素可能主要与模具相互作用和化学收缩有关。

由图 2~3,可以看出 [0°]铺层与 [0° /+30° /0° /-30°]的回弹值较小,同时在降温过程中回弹值增

加不多,说明这种情况下的回弹可能与模具等其他因素相关,受热膨胀系数的各向异性影响不大。而 $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ 正交铺层回弹最大,且随温度降低,回弹值急剧增加,说明热膨胀效应对回弹影响较为明显。还可以发现,准各向同性铺层的回弹值居中。

2 厚度对回弹的影响

当材料体系和工艺制度一定的前提下,研究表明,复合材料结构的厚度越大则回弹越小^[20,26,29],如图4^[26]所示。

Albert等^[26]针对C型和L型结构,比较了8铺层厚度和16铺层厚度在不同工艺条件下的回弹值,可以发现当工艺条件相同时,厚度为16层构件的回弹要明显小于8铺层厚度的构件,如图4^[20]和图5^[20]所示。Twigg等^[20]研究了层合板结构,在4、8和16层厚度情况下的翘曲值,可以发现在一定工艺条件下,铺层厚度越厚,翘曲越小,且回弹减小是呈非线性趋势的,如图6^[20]所示。

研究表明,对于层合板结构而言,一般情况下翘曲值与厚度的平方类似成反比关系,厚度越大翘曲越小,如图6^[20]所示。构件厚度增加,增加了截面的惯性矩,因此相同残余应力产生的面外弯矩引起结构的变形更小,因此,构件厚度越大,固化变形越小。但是厚度较大的层板内温度梯度较大,可能会引起较大残余应力。另外,文献[16]、[27]、[30]研究表明,厚度对回弹的影响规律不明显,这可能是由于其他工艺条件不同所造成的。

3 夹角对回弹的影响

对于L型与C型结构而言,其设计角度由模具角度决定。研究表明,设计夹角越大,结构的回弹越小^[28,31-32]。Huang等^[31-32]利用不同角度的模具,分别制作了夹角为 45° 、 75° 、 135° 和 165° 的构件,研究了一定铺层下不同夹角下复合

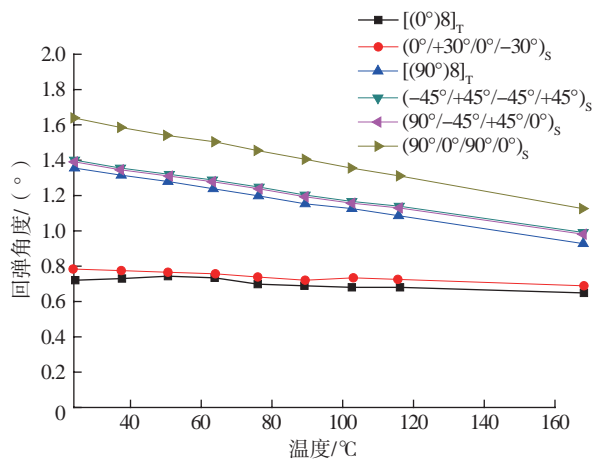


图3 不同铺层角度在不同温度下的回弹角度

Fig.3 Effect of different ply orientation on spring-in angle with varying temperature

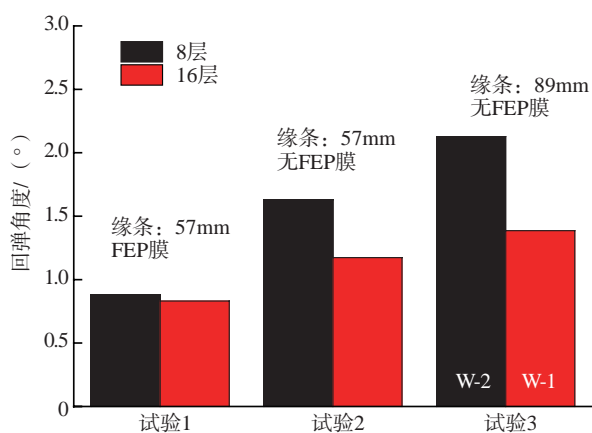


图4 厚度对回弹的影响

Fig.4 Effect of different thickness of laminate part on spring-in angle

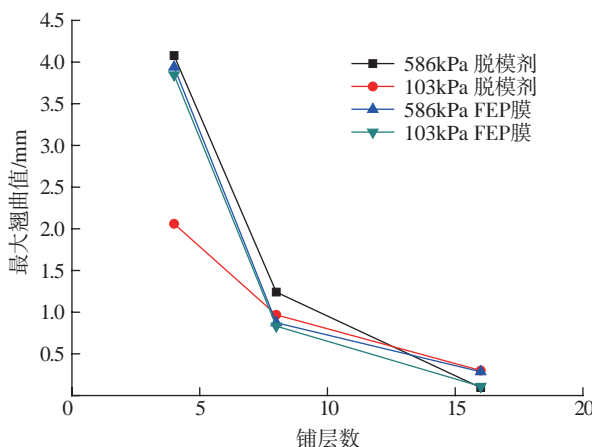


图5 厚度对翘曲的影响

Fig.5 Effect of different thickness of laminate part on warpage value

材料的回弹,如图7所示。

由图7可以看出,随着模具角度的增加,结构的回弹值下降明显,规律性较强,且呈非线性的变化,这可能是由于角度增大,降低了转角处纤

维和树脂分布的不均匀,从而减小转角区域的面外弯矩。

4 R角半径对回弹的影响

除了结构夹角的角度的,我们也关心R角设计半径的大小对回弹的影

响。但文献 [29]、[31]、[32] 研究表明, 随半径增加和回弹角的改变不显著。由图 8^[31] 可以发现, 随着 R 角半径的增大, 回弹不断减小, 但是也有研究表明, R 角半径越大, 回弹也越大^[17]。

Huang 等^[16] 认为, 复合材料预浸料 R 区成型机理和金属不同, 金属 R 区的形成是由材料产生弹塑性变形导致的。因此, R 角越小塑性区越大, 残余应变越大, 回弹就越小。但是复合材料预浸料在固化前与模具紧密贴合无残余应力, 所以 R 角大小可能与回弹值没有明显关系。但是对于阴模或者阳模, 转角处的纤维体积分含量的变化和铺层形式不同, 都可能在转角引起的附加弯矩, 从而对变形结果造成影响, 因此, R 角半径对回弹的影响机理尚不明确。

外因对固化变形的影响

外在因素主要是指与工艺过程相关的参数, 主要包括模具、固化温度、压力等参数。外在因素对固化变形的影响比较复杂, 尤其是模具对固化变形的影响是近年来的研究热点。

1 模具对复合材料固化变形的影响

1.1 热膨胀系数的影响

一般情况下, 模具热膨胀系数与复合材料的越接近, 在界面附近对产生的残余应力越小, 复合材料固化变形量也就越小。模具通常选用 Invar 钢、普通钢和铝等材料, 其中 Invar 钢的热膨胀系数最小与复合材料最接近, 因此制件的回弹就小, 而铝模的热膨胀系数最大, 制件的回弹也会较大^[20,26,28,33-34]。

Albert 等^[26] 比较了铝模、钢模和复合材料模具对回弹的影响, 可以发现模具热膨胀系数与复合材料越接近, 回弹越小, 与理论预测值一致(图 9^[28])。同时也可以发现, 模具的夹角越大回弹值越小, 与内在因素对固化变形影响的结论一致。虽然实际情况中, 有时使用钢模和 Invar 钢模的回弹差别很小, 但是这个变化趋

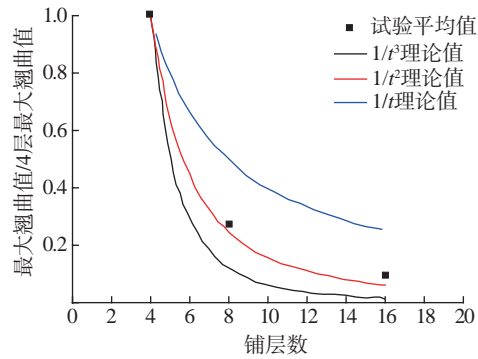


图6 翘曲与铺层数的函数关系

Fig.6 Relationship between warpage value and thickness

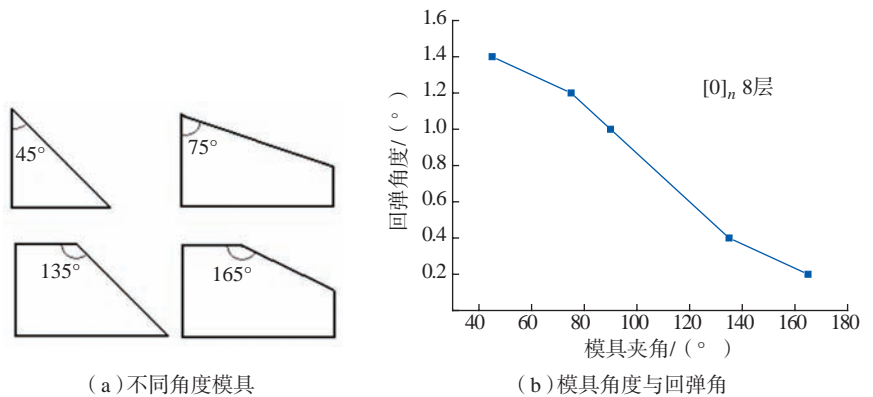


图7 模具及其角度与回弹角

Fig.7 Schematic model configuration of tool and spring-in angle

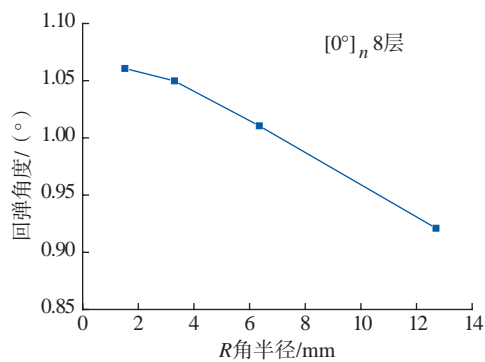


图8 R 角半径对回弹的影响

Fig.8 Effect of radii of tool on spring-in angle

势一般是确定的。

1.2 界面的影响

复合材料结构固化完成后, 为了便于脱模, 一般会在模具与复合材料的界面处涂刷脱膜剂或铺 FEP 膜, 以减小复合材料与模具的界面作用力。研究表明, 改变涂刷脱膜剂的次数和铺贴 FEP 膜可能会影响结构的固化变形^[16,26]。

图 10^[26] 表明在其他工艺条件相

同的情况下, 脱模剂加 FEP 膜的界面处理方法可有效减小结构的回弹, 比单纯使用脱膜剂的效果要好^[26]。但是也有研究表明增加脱模剂与脱模布对减小回弹影响不明显, 甚至出现相反的结论^[16], 这可能是由于其他一些工艺条件改变造成的。

1.3 “几何锁闭”的影响

结构的形状特征应该归结为影响固化变形的内在因素, 但是研究发现,

C型结构由于可能与模具相互作用出现“几何锁闭”现象,导致不能及时释放残余应力,会比相应的L型结构的回弹更大^[16],这属于与模具做用的结果,因此将该因素归为外在因素。但是有些研究发现,这样的几何锁闭现象不明显,C型和L型结构的回弹差别不大^[26],如图11^[26]所示。学者认为“几何锁闭”现象的发生与模具和复合材料的界面处理有密切关系,因此很难准确描述这种现象^[26]。

1.4 结构长度的影响

结构长度是属于几何外形参数,较长的长度会增加复合材料与模具的接触面积,从而增加了界面力,在引起结构内部更大的残余应力,导致了更大的翘曲变形^[20,26]。对于C型和L形结构,缘条和腹板的长度越长,形成的残余应力越大,结构的固化变形也越大,如图12所示。Twigg等^[20]对复合材料平板的长度与翘曲进行了更细致的研究,研究表明翘曲可能与结构长度的3次方成正比。

2 保温平台对回弹的影响

目前,常用的固化制度分为1个保温平台和2个保温平台。对于1个保温平台的工艺设计,树脂的凝胶过程和固化过程均是在这个平台上发生。而对于2个保温平台的工艺,在第1个保温平台树脂凝胶,第2个平台进行固化。因此,选择不同的固化制度和材料体系特性有很大关系,一般情况下,灵活的固化制度选择可以更好地减小复合材料的固化变形^[14]。

经研究表明,1个保温平台的工艺产生的回弹值要<2个保温平台^[16,26,35],如图13所示。但是White等^[36]的研究结果却是相反的,这可能和材料体系不同有关,还需要进一步研究。

3 固化压力对变形的影响

Twigg^[20]认为不同固化压力会改变复合材料与模具界面的接触压力,较大的固化压力会引起较大的界

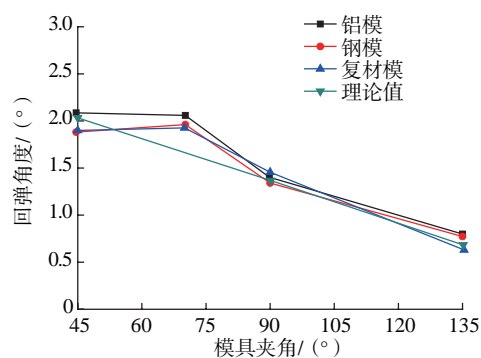


图9 热膨胀系数对回弹的影响

Fig.9 Effect of coefficient of thermal expansion on spring-in angle

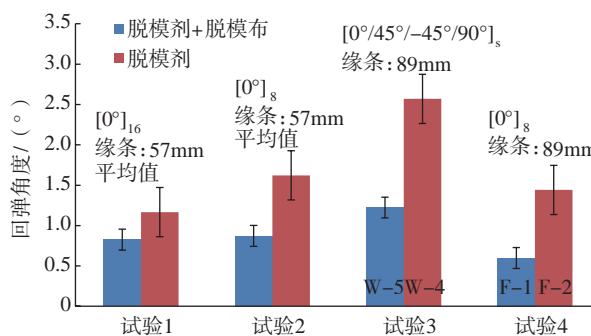


图10 界面处理对回弹的影响

Fig.10 Effect of tool surface on spring-in angle

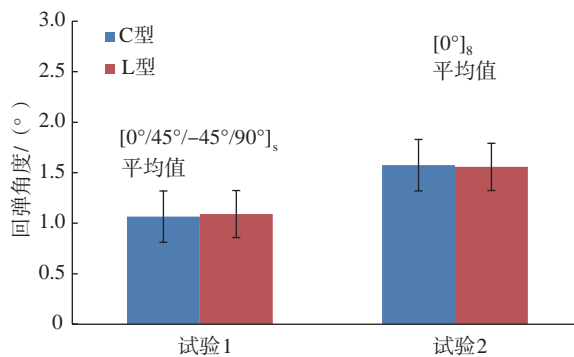


图11 结构形式对回弹的影响

Fig.11 Effect of geometrical configuration of part on spring-in angle

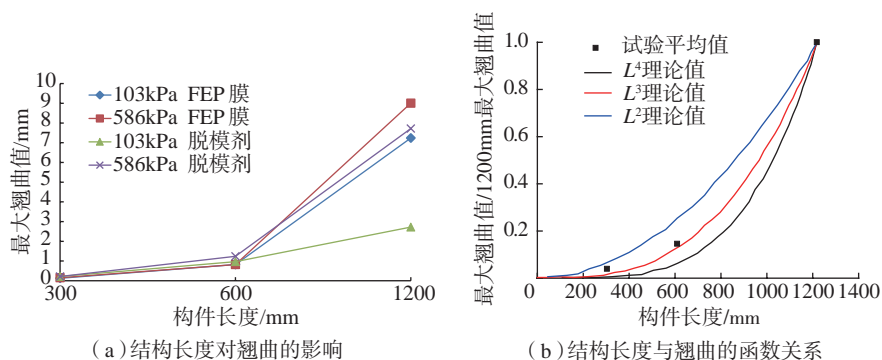


图12 结构长度与翘曲

Fig.12 Relationship of part length and warpage

面摩擦力,从而增加复合材料内部的残余应力,导致变形增大。

由图 14^[20]可见,除了一组构件试验外,其他构件的翘曲均随固化压力的增加而增加,且近似成线性关系。较小的固化压力引起的结构变形较小,但是可能会导致材料的密度下降等质量问题。也有研究表明^[37],较大的固化压力会增加复合材料与介质件的换热,有利于提高复合材料温度的均匀性,从而减小残余变形,提高零件质量。因此,固化压力对变形的影响程度大小也很难确定。

试验验证

为进一步验证文献研究归纳的结果,本文制造试件进行测量验证。试验所用材料为 T800 碳纤维环氧树脂预浸料,固化工艺采用热压罐固化和文献一致,模具为阳模,分别采用普通钢和铝,模具板厚 10mm,依据不同的夹角和 R 半径要求开模。

首先制造试样,研究不同铺层厚度、不同缘条和腹板夹角情况下, L 型构件的回弹变化,如图 15~16 所示。

由图 15 可以发现,铺层厚度 8 层、16 层和 32 层的情况下,随铺层厚度增加回弹值减小非常明显,同文献 [20]、[26]、[29] 的结论一致。由图 16 可已发现,随着缘条和腹板夹角从 80°、90°、95°、100° 到 110° 逐渐增大的情况下,回弹值越小,和文献 [31]、[32] 的结论一致。不同文献得到结论不一致,这里补充相关试验,测试不同 R 角半径对回弹的影响结果,如图 17 所示。由图 17 可以发现,相同铺层形式零件,当 R 角半径从 5mm、10mm、15mm、18mm、25mm 到 30mm 逐渐增加的情况下,对回弹值逐渐增加,与文献 [17] 结论一致,但是同文献 [29]、[31]、[32] 结论不一致。这一矛盾结论可能与材料体系不同有关,因而在实际问题分析时,先进行试验确认上述规律,再进行应用。

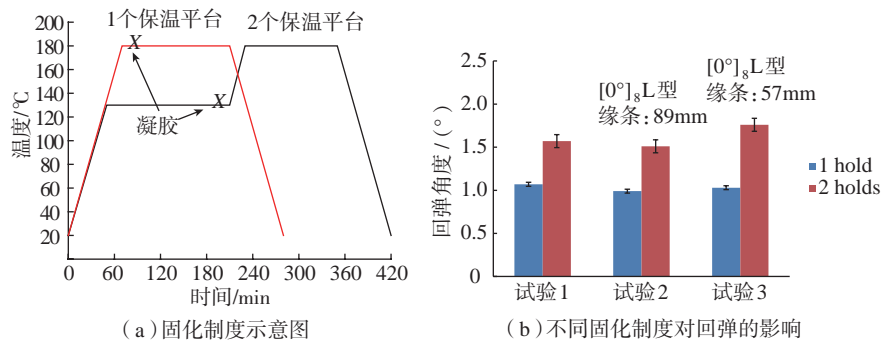


图13 固化制度示意图及对回弹的影响
Fig.13 Schematic of cure cycle and effect of cure cycle on spring-in

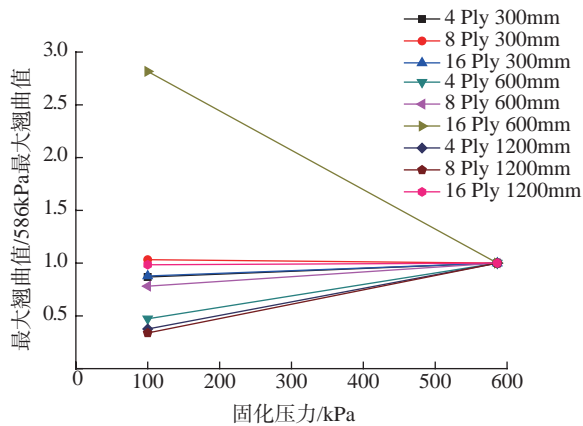


图14 固化压力对翘曲的影响
Fig.14 Effect of cure pressure on warpage

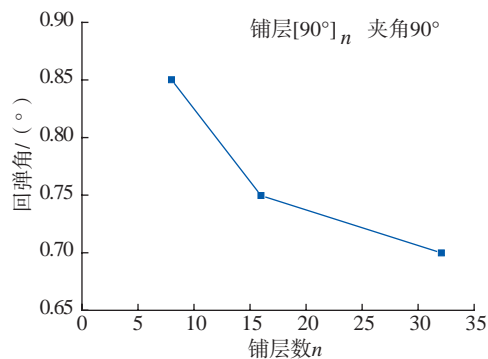


图15 不同铺层厚度对回弹的影响
Fig.15 Effect of different thickness of part on spring-in angle

对于前文提到的“几何锁闭”对回弹的影响,由于文献 [16] 和 [26] 结论也不一致,因而制作试样进行验证。分别制作 R 区半径为 15mm 和 18mm 的 C 型构件和 L 型构件,通过钢模和铝模成型后测量其回弹变形,其中 C 型构件腹板长度为 800mm, L 型构件腹板 / 缘条长度为 150mm,如图 18 所示。

由图 19 可以发现“几何锁闭”的

确会对零件回弹带来影响,相对应的 C 型和 L 型构件相比, C 型构件的回弹更大,与文献 [16] 的结果一致。同样由图 19 可以发现,模具热膨胀系数越大引起的回弹越大,因而铝模的零件回弹大于钢模,说明了文献 [20]、[26]、[28]、[34] 得到的结论是正确的。

结论

通过上述文献分析和开展试验

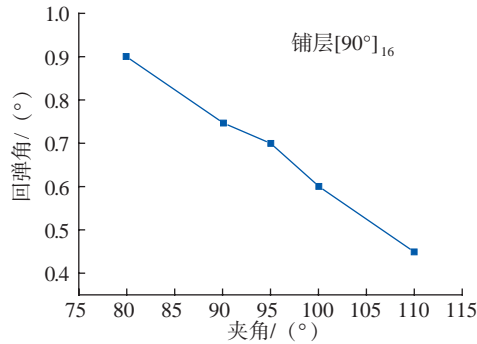


图16 不同夹角对回弹的影响

Fig.16 Effect of different angle of part on spring-in angle

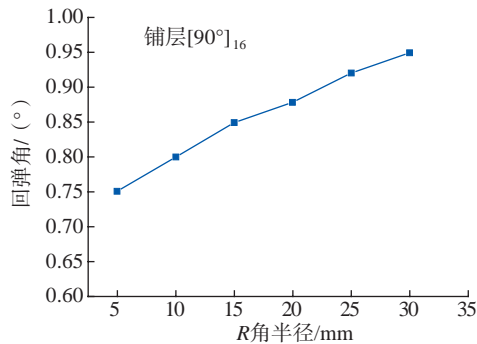


图17 不同R区半径对回弹的影响

Fig.17 Effect of radii of part on spring-in angle

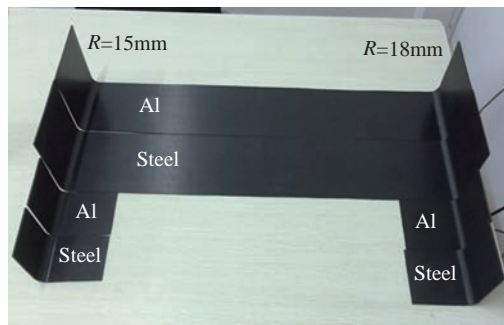


图18 腹板长度不同的C型和L型构件

Fig.18 C and L part with different web length

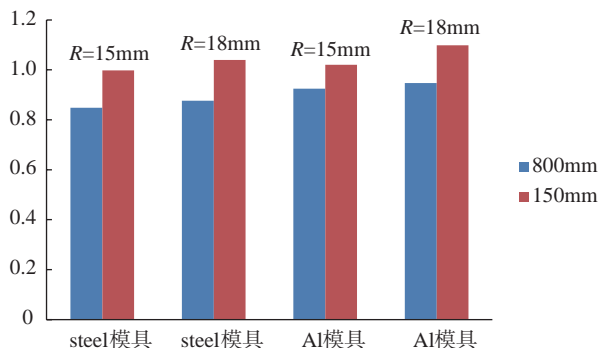


图19 几何锁闭对回弹的影响

Fig.19 Effect of geometry lock on spring-in angle

验证,可以得到以下确切结论:(1) 构件厚度越大,固化变形越小;(2) 构件缘条和腹板夹角的夹角越大(模具夹角越大),构件的回弹越小;(3) 模具的热膨胀系数越大引起与复合材料的热膨胀系数越接近,固化变形越小;(4) 构件的长度越大,回弹变形越大,因而不需要进行试验验证;(5) “几何锁闭”通过试验验证发现该因素会导致回弹变大;(6) 缘条和腹板夹角的 R 角半径对回弹影响,文献研究结论不一致,但是通过试验验证发现该 R 角半径越大,回弹越大。

另外,以下影响因素对回弹的影响机理也并不明确,需要后续进一步进行深入研究:(1) 固化工艺中 1 个保温平台和 2 个保温平台对变形的影响机理尚不明确,不同研究人员的研究结果不尽相同,可能与材料体系有关;(2) 增加 FEP 膜或者脱模剂涂刷次数可以减小复合材料与模具的界面作用力,减小回弹,该现象不明显,容易被其他因素影响,较难验证;(3) 固化压力对变形的影响机理较为复杂,对变形的影响也很难确定。

参考文献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.

DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[2] 孙玺, 叶宏军, 翟全胜, 等. 复合材料构件热压罐成型制造技术专利分析[J]. 纤维复合材料, 2011(2): 3-16.

SUN Xi, YE Hongjun, ZHAI Quansheng, et al. Patent analysis for autoclave molding composite component manufacturing technology[J]. Fiber Composites, 2011(2): 3-16.

[3] 贾丽杰. 树脂基复合材料结构固化变形的研究进展[J]. 航空制造技术, 2011, 54(15): 102-105.

JIA Lijie. Advance in curing deformation of resin matrix composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(15): 102-105.

- [4] BIRT E A, SMITH R A. A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2004, 46(11): 681-685.
- [5] RENNICK T, RADFORD DW. Components of manufacturing distortion in carbon fiber/epoxy angle brackets[C]// *Proceedings of the 28th International SAMPE Technical Conference*. Seattle, 1996: 189-197.
- [6] RADFORD DW, DIEFENDORF R J. Shape instabilities in composites resulting from laminate anisotropy[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1993(12): 58-75.
- [7] NELSON R H, CAIRNS D S. Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure[C]// *Proceedings of Tomorrow's Materials: Today Society for the Advancement of Material and Process Engineering*. Nevada, 1989: 2397-2410.
- [8] 杨青, 刘卫平, 余木火, 等. 复合材料 C 型梁回弹变形影响因素权重分析[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 72-81.
- YANG Qing, LIU Weiping, YU Muhuo, et al. Weighting analysis of factors of spring-back for C-shaped composite spars[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(7): 72-81.
- [9] 徐娟, 李建川, 彭建, 等. 固化工艺参数对复合材料帽形加筋壁板固化变形的影响研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(4): 6-11.
- XU Juan, LI Jianchuan, PENG Jian, et al. Study on the effect of curing parameters on the curing deformation of cap-shaped stiffened composites panels[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(4): 6-11.
- [10] 徐鹏, 晏冬秀, 刘卫平, 等. 大厚度复合材料层合板固化制度数值模拟[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(1/2): 99-102.
- XU Peng, YAN Dongxiu, LIU Weiping, et al. Numerical simulation study of the curing process of large thickness composites laminate[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(1/2): 99-102.
- [11] 张江涛, 尚云东, 张梅, 等. 复合材料固化相关黏弹性性能演化及残余应力分析[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(5): 978-986.
- ZHANG Jiangtao, SHANG Yundong, ZHANG Mei, et al. Analysis on the process dependent viscoelastic properties and residual stress of composites during cure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(5): 978-986.
- [12] PAGLIUSO S. WARPAGE. A nightmare for composite parts producers[C]// *Proceedings of ICCM IV*. Tokyo, 1982: 1617-1623.
- [13] NAIRN J A, ZOLLER P. Matrix solidification and resulting residual thermal stress in composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1985(20): 355-367.
- [14] WHITE S R, HAHN H T. Process modeling of composite materials: residual stress development during cure[J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(16): 2423-2453.
- [15] JOHNSTON A, VAZIRI R, POURSARTIP A. A plane strain model for process induced deformation of laminated composite structures[J]. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(16): 1435-1469.
- [16] FERNLUND G, RAHMAN N, COURDJI R, et al. Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, aspect ratio, and the lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts[J]. *Composites Part A*, 2002(33): 341-351.
- [17] RIDGARD C. Accuracy and distortion of composite parts and tools causes and solutions[R]. SAE Tech Paper, 1993.
- [18] FLANAGAN R. The dimensional stability of composite laminates and structures[D]. UK: Queen's University of Belfast, 1997.
- [19] MELO J D, RADFORD D W. Modeling manufacturing distortions in flat symmetric[C]// *Composite laminates*, 31st International Technical Conference. Chicago, 1999: 592-603.
- [20] TWIGG G, POURSARTIP A, FERNLUND G. Tool part interaction in composites processing: Part I: Experimental investigation and analytical model[J]. *Composites: Part A*, 2004(35): 121-133.
- [21] RAHIM A, ARAFATH A, VAZIRI R, et al. Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part I: flat geometries[J]. *Composites: Part A*, 2008(39): 1106-1117.
- [22] 杨青, 刘卫平, 晏冬秀, 等. 复合材料固化变形预测的理论模型[J]. *材料导报 A*, 2015, 29(11): 65-69.
- YANG Qing, LIU Weiping, YAN Dongxiu, et al. Theoretical models for predicting curing distortion in composites[J]. *Materials Review*, 2015, 29(11): 65-69.
- [23] 丁安心, 王继辉, 倪爱清, 等. 热固性树脂基复合材料固化变形解析预测研究进展[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1362-1376.
- DING Anxin, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. A review of analytical prediction of cure-induced distortion in thermoset composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1362-1376.
- [24] RAHIM A, ARAFATH A, VAZIRI R, et al. Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part II: Curved geometries[J]. *Composites: Part A*, 2009, 40: 1545-1557.
- [25] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(5): 626-659.
- [26] ALBERT C, FERNLUND G. Spring-in and warpage of angled composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62: 1895-1912.
- [27] PATTERSON J M, SPRINGER G S, KOLLAR L P. Experimental observations of the spring-in phenomenon[C]// *Proceedings of the 8th international conference on composite materials (ICCM8)*. Honolulu: 1991: 10D1-10D8.
- [28] JAIN L K, LUTTON B G, MAI Y W, et al. Stress and deformations induced during manufacturing. Part II: a study of the spring-in phenomenon[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997(31): 696-719.
- [29] RADFORD D W, RENNICK T. Separating sources of manufacturing distortion in laminated composites[J]. *Journal of Reinforced Plastic Composites*, 2000, 19(8): 621-641.
- [30] WIERSMA H W, PEETERS J B, AKKERMAN R. Prediction of springforward in continuous-fibre/polymer l shaped parts[J]. *Composites Part A*, 1998: 29A(11): 1333-1342.
- [31] HUANG C K, YANG S Y. Study on accuracy of angled advanced composite tools[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1997, 12(3): 473-486.
- [32] HUANG C K, YANG S Y. Warping in advanced composite tools with varying angles and radii[J]. *Composites Part A*, 1997(28A): 891-893.
- [33] KIM C G, KIM T W, KIM I G, et al. Spring-in deformation of composite laminated bends[C]// *Proceedings of the 7th international*

Research on Springback of Invar Alloy Smooth Composite Mould Plate Stamping Process

LI Yuyang¹, ZHAO Anan¹, ZHANG Likang¹, YANG Chao¹, HUANG Chaoyan², HU Yong²

(1. AVIC Aircraft Co., LTD., Xi'an 710089, China;

2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

[ABSTRACT] To predict the springback of double curvature plates is difficult. Springback has negative effects on forming efficiency and quality. A series of experiments were carried out to study the springback problem of Invar alloy smooth mould plate forming process based on the flexible square pressure head technique. The experiment aimed at punching different sail and saddle shaped plates. Due to the complexity of the forming mechanical state of the equipment, springback has certain uncertainties, but there are clear rules: The distance from the edge of the plate has an important impact on the springback, the springback of plate at middle position is obviously smaller than the edge; The larger the curvature is, the springback is smaller, but not stable; The springback of saddle shape is smaller than that of the sail shape. The results are useful to guide the forming of smooth sheet products with uniform deformation by flexible die.

Keywords: Composite; Invar alloy mould plate; Springback; Adjustable mould; Forming experiment

(责编 大漠)

(上接第94页)

conference on composite materials (ICCM7). New York, 1989.

[34] JOGSNTON A, HUBERT P, FERNLUND G, et al. Process modeling of composite structures employing a virtual autoclave concept[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 1996, 5(3-4): 235-252.

[35] FERNLUND G, POURSAARTIP A.

The effect of tooling material, cure cycle and tool surface finish on spring-in of autoclave processed curved composite parts[C]//12th international conference on composite materials(ICCM12). Vancouver, 1999.

[36] WHITE S R, HAHN H T. Cure cycle optimization for reduction of processing-induced residual stress in composite materials[J]. Journal of

Composite Materials, 1993, 27(14): 1352-1378.

[37] ANDREW A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structure [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1997.

通讯作者: 杨青, E-mail: 45212401@qq.com。

Effect Factors on Curing-Induced Distortion of C/L Composite Structures in Manufacturing Processing

YANG Qing^{1,2}, WEI Yuanping^{1,2}, LIU Weiping³

(1. Shanghai Superior Die Technology Co., Ltd., Shanghai 201209, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Advanced Automotive Body Manufacturing, Shanghai 201209, China;

3. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Curing-induced distortion in manufacturing processing, which is related to many different effect factors, has important influence on the dimensional accuracy of composite parts. The different effect factors can be classified as intrinsic or extrinsic factors. For intrinsic factors, these are with respect to material properties, stacking sequence of plies and geometry of structures, whereas extrinsic factors are generally related to the art of curing process and tooling properties. These factors could bring structures the process-induced residual stresses that will lead to the distortion after parts de-tooling. Through observing the current research results, the effects of these different factors on curing-induced distortion are concluded, then we can use these conclusions as the basis to predict and control the distortion of composite parts.

Keywords: Composite structures; C/L; Curing process; Curing-induced distortion; Effect factor

(责编 大漠)