

车用碳纤维 / 铝合金层板弹性模具 增塑成形极限及机理研究

李 倩, 刘一凡, 王耀耀, 刘 庆

(河南工学院 车辆与交通工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要:为解决车用碳纤维 / 铝合金层板传统成形工艺存在的异质材料变形协调性差、塑性成形极限低的问题,提出了一种碳纤维金属层板弹性模具增塑成形方法,并结合理论分析、有限元仿真、实验等方法,研究了弹性模具增塑成形过程中碳纤维金属层板的变形行为和成形极限。实验结果表明,所提方法能够显著提升碳纤维金属层板的成形性能,且随着弹性模具硬度的增加,层板的成形极限位移和承载极限均有所提高,当弹性模具硬度达到 HS90A 时与传统无弹性模具成形相比,层板的成形极限位移可提高 30.6%,承载极限可提高 21.8%。

关键词:碳纤维 / 铝合金层板; 弹性模具; 增塑成形

中图分类号: TG548

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2024)02-0008-09

纤维金属层板是一种层间超混杂材料,采用高强度合金与纤维增强树脂基体预浸料交替层叠,并在特定的温度和压强环境下固化粘接而形成。纤维金属层板作为一种新型复合材料,由于其具有高比强度、抗疲劳、高比刚度等良好的力学性能,被广泛用于汽车以及航天航空等运载装备领域^[1]。根据组成成分不同,纤维金属层板主要分为芳纶增强铝层压板、玻璃纤维增强铝层压板、碳纤维增强铝层压板以及石墨纤维增强钛合金层压板^[2-5]。目前应用最广泛的是碳纤维增强铝层压板,这是由于碳纤维增强复合材料(Carbon Fibre reinforced Polymer, CFRP)作为轻质高强材料,其抗拉强度约为钢材的 4—5 倍,但密度仅为普通钢材的 1/4,是制造纤维金属层板的理想材料^[6]。

碳纤维金属层板作为一种异质材料相比于单一材料的成形过程要更加繁杂,因此受到国内外学者的广泛关注。Guo 等^[7]首次提出钢 /CFRP 的温差成形工艺,探究了不同冲压速度和试件宽度条件下其成形极限变化规律,详细分析了其典型成形缺陷及其成形机理。Blala 等^[8]对碳纤维金属层板系统的失效模式、提高可拉深性等进行了研究,并将半固化层板热冲压成形方法与传统固化成形方法进行对比,通过实验证

明采用半固化成形方法生产的零件质量有明显提升。Rajabi 等^[9]对铝 /CFRP 层板固化后的冲压行为进行了研究,结果表明温度和压边力是影响成形质量的关键因素,验证了成形温度和压边力之间的高相互作用是消除起皱的必要条件。陈一哲等^[10]利用有限元软件对碳纤维铝合金层板成形过程进行了仿真,研究了预浸料种类、碳纤维层板厚度等对其应力和壁厚变化的影响。目前国内外针对碳纤维金属层板的研究主要集中于传统无弹性模具成形工艺,但该成形过程存在力学性能不佳、界面性能较差等问题,严重制约了碳纤维金属层板的大规模应用。

本文拟采用理论分析、Abaqus 有限元仿真等方法研究弹性模具增塑成形下碳纤维金属层板的变形行为和成形极限,揭示层板在成形过程中复杂应力应变状态下的响应行为和法向应力增塑效应的作用机制,并通过弹性模具增塑成形实验对仿真结果进行验证,以研究实现碳纤维金属层板的高质量成形。

1 材料及方法

1.1 材料

汽车领域所使用的铝合金主要有 2000 系(Al-

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(22B460003)

第一作者简介: 李倩(1987—),女,河南焦作人,讲师,硕士,主要从事机械设计及汽车 CAD/CAE 研究。

Cu-Mg)、5000 系 (Al-Mg)、6000 系 (Al-Mg-Si) 和 7000 系 (Al-Mg-Si-Cu)。相较于其他系列, 5000 系铝合金具有较强的比强度、较好的成形性能以及较强的抗腐蚀性, 因此被广泛用作汽车和航空航天轻量化材料^[1]。本文选取 5000 系中的 5052 铝合金作为碳纤维金属层板的金属材料, 其基本力学性能参数如表 1 所示^[12]。

表 1 5052 铝合金基础力学性能参数表	
性能指标	参数值
密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.68
抗拉强度 / MPa	215
屈服强度 / MPa	176
弹性模量 / GPa	88

在实际的工业制造中, 通常使用预浸料来制备碳纤维金属层板。本文使用的预浸料由威海光威复材有限公司生产, 组成成分为碳纤维与环氧树脂。碳纤维型号为 SYT35/3K, 其基础力学性能如表 2 所示。环氧树脂基体型号为 R5600W3K。预浸料单层厚度约为 0.25mm, 其中环氧树脂体积分数为 40%。

表 2 SYT35/3K 碳纤维基础力学性能表				
抗拉强度 / GPa	弹性模量 / GPa	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	单丝直径 / μm	伸长率 / %
3.5	230	1.78	7	1

在利用弹性模具增塑成形工艺加工碳纤维金属层板时, 常用的弹性模具材料有硅胶、丁腈橡胶和聚氨酯等。其中, 聚氨酯材料在其他条件一致的情况下提供的反作用力明显高于硅胶与丁腈橡胶。因此,

本文选取聚氨酯作为成形实验中的弹性模具材料。

1.2 碳纤维 / 铝合金层板制备

采用厚度为 0.5 mm 的 5052 铝合金和单层厚度为 0.25 mm 的碳纤维增强环氧树脂预浸料制备碳纤维 / 铝合金层板。铺层方式为 3+2 结构 (即三层铝合金板叠放两层碳纤维板)。铺层完成后, 在层板表面粘贴隔离膜与透气毡, 置于真空袋中进行真空处理。随后将装有层板的真空袋置于热压罐内固化, 整个固化工艺过程包含升温、预热、固化、降温四个阶段。为保证树脂能够在界面中均匀流动, 热压罐需先升温至 90℃, 在此温度下保持 30 分钟进行预热, 随后继续升温至 120℃并保持 60 分钟, 使层板得到充分固化, 最后待层板自然冷却至室温后取出。整体层板制备流程如图 1 所示。

1.3 弹性模具增塑成形技术

传统成形工艺在加工碳纤维 / 铝合金层板曲面件时, 成形悬空区极易产生失稳起皱破坏。弹性模具增塑成形技术在板料下方引入一个弹性模具, 能够对整个板料提供一个向上的法向压应力, 此时碳纤维 / 铝合金层板由传统成形悬空区的平面应力状态改变为两拉一压的三向应力状态。传统层板成形技术和弹性模具增塑成形技术的技术原理对比如图 2 所示。

根据塑性力学原理, 弹性模具增塑成形技术中提供的压应力可以促进塑性变形过程中的损伤闭合, 而拉应力则恰恰相反, 会导致损伤扩展。层板受到的静压力从拉深状态向压缩状态转变, 这样可以抵消不均匀变形产生的附加拉应力, 从而增强层板的塑性。

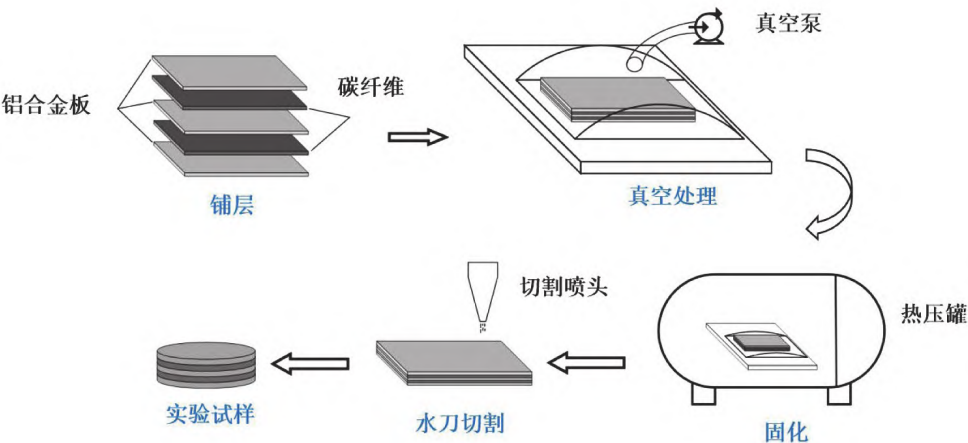


图 1 碳纤维 / 铝合金层板制备工艺流程图

2 理论模型分析

板料加工成形中, 成形极限反映了板料在一定成形条件下的最大变形能力, 是能够直观体现板料成

形能力的指标^[13]。在外载荷的作用下, 板料从开始发生变形到最终失效, 一共经历以下几个阶段: 板料发生变形时, 初期处于弹性变形阶段, 到达屈服点后, 进入塑性变形阶段, 当应力超过材料的强度极限后,

进入颈缩阶段,伴随着分散性失稳,应力不升反降,紧接着发生集中性失稳,并导致板料最终的失效。通常情况下板料由颈缩到失效时间很短,故将出现颈缩时的应变作为板料的成形极限^[14]。

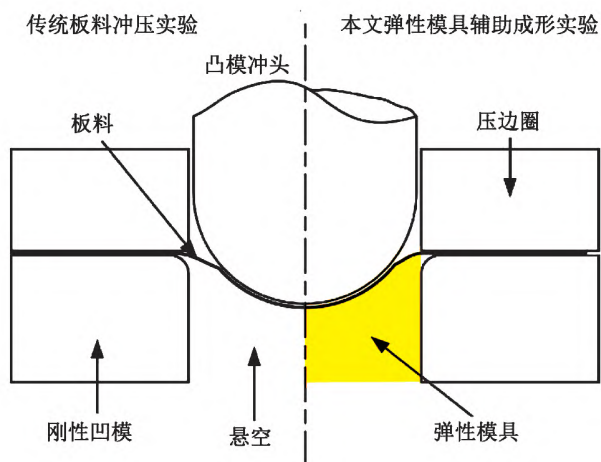


图2 弹性模具增塑成形技术示意图

M-K 理论中,存在变形协调假设、体积不变假设及力平衡假设^[15],第一主应变 ε_1 ,第二主应变 ε_2 ,板料均匀区域应变 ε_{1A} ,板料非均匀区域应变 ε_{1B} ,板料均匀区域厚度 t_{1A} ,板料非均匀区域厚度 t_{1B} ,板料均匀区域应力 σ_{1A} ,板料非均匀区域应力 σ_{1B} ,存在如下的数值关系:

$$\begin{cases} d\varepsilon_2 = d\varepsilon_{1A} = d\varepsilon_{1B} \\ d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 = 0 \\ t_{1B}\sigma_{1B} = t_{1A}\sigma_{1A} \end{cases} \quad (1)$$

M-K 模型以凹槽假设为理论核心,认为板料具有不可避免的厚度不均匀性。数值上,初始不均匀度 f_0 的取值范围是 $0 \leq f_0 \leq 1$ 。极端理想情况下,完全均匀不存在任何缺陷的板料,其初始不均匀度 f_0 为1;完全非均匀的板料,其初始不均匀度 f_0 为0。 f_0 取值越大,板料越均匀,集中性失稳可能性越低。本文定义板料的初始不均匀度

$$f_0 = \frac{t_{0B}}{t_{0A}} \quad (2)$$

式中: t_{0B} 为板料非均匀区域厚度, t_{0A} 为板料均匀区域厚度。

定义板料变形时的第三应变

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (3)$$

式中: t 为变形后板料厚度, t_0 为板料初始厚度。

定义等效应力 $\bar{\sigma}$ 与 σ_1 的比值

$$\varphi = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_1} \quad (4)$$

联立(1—4)式可解出

$$f_0 \exp(\varepsilon_{3B} - \varepsilon_{3A}) \frac{\bar{\sigma}_B}{\varphi_B} = \frac{\bar{\sigma}_A}{\varphi_A} \quad (5)$$

式中: ε_{3B} 为板料非均匀区域变形时的第三应变, ε_{3A} 为板料均匀区域变形时的第三应变。

板料变形时,根据体积不变假设和变形协调假设,第一应变 ε_1 ,第二应变 ε_2 ,第三应变 ε_3 间存在如下数值关系:

$$\begin{cases} d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \\ d\varepsilon_2 = d\varepsilon_{2A} = d\varepsilon_{2B} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ε_{2B} 为板料非均匀区域变形时的第二应变, ε_{2A} 为板料均匀区域变形时的第二应变。

忽略温度、变形速率对材料硬化行为的影响,采用本构模型

$$\bar{\sigma} = k (\bar{\varepsilon} + d\bar{\varepsilon})^n \quad (7)$$

式中: k 为材料的屈服强度, n 为材料的硬化指数。

公式(5)可改写为

$$f_0 \exp(\varepsilon_{1A} - \varepsilon_{1B}) \frac{\beta_B''(\varepsilon_{1B} + d\varepsilon_{1B})^n}{\varphi_B} = \frac{\beta_A''(\varepsilon_{1A} + d\varepsilon_{1A})^n}{\varphi_A} \quad (8)$$

板料变形过程符合 Mises 屈服准则及 Levy-Mises 增量理论

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \\ \frac{d\bar{\varepsilon}}{2\varphi} = \frac{d\varepsilon_1}{2-\alpha} = \frac{d\varepsilon_2}{2\alpha-1} = -\frac{d\varepsilon_3}{1+\alpha} \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 为第一主应力 σ_1 和第二主应力 σ_2 的比值。

结合公式(8)、(9),为获得本研究中板料的成形极限,采用 Newton-Raphson 迭代法编写 m 文件,将初始不均匀度 f_0 、应变 ε 、应力比值 α 等参数代入进行计算。一般认为板料初始不均匀度的范围为0.9—0.999,取初始不均匀度 f_0 的数值为0.9、0.95、0.99,以极小的应变增量 $d\varepsilon_{1A} = 0.001$ 驱动方程计算。令板料均匀区域第一主应力与第二主应力比值 α_A 、非均匀区域第一主应力与第二主应力比值 α_B 分别在[0,1]内遍历,由程序判断达到断裂准则时,得到最终迭代的 ε_1 、 ε_2 ,并以此作为 y 轴、x 轴输出图像,其结果如图3所示。由图3可知,板料初始不均匀度越高, f_0 取值越大,板料成形极限越高,成形过程中板料的变形能力越好。因此塑性成形过程中,为获得

高质量的板料类构件, 应选择不均匀度较高的原材料。

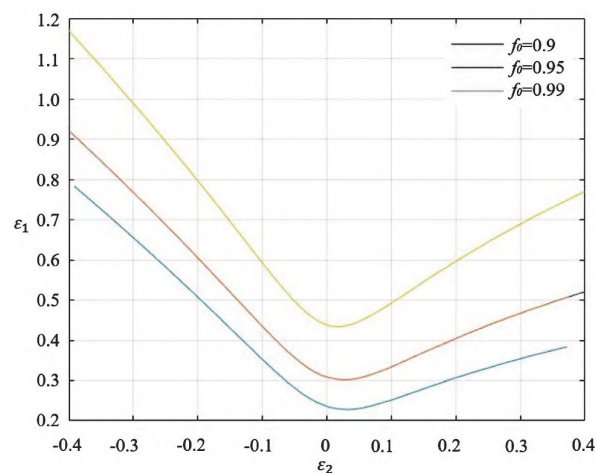


图3 不同初始不均匀度下层板成形极限图

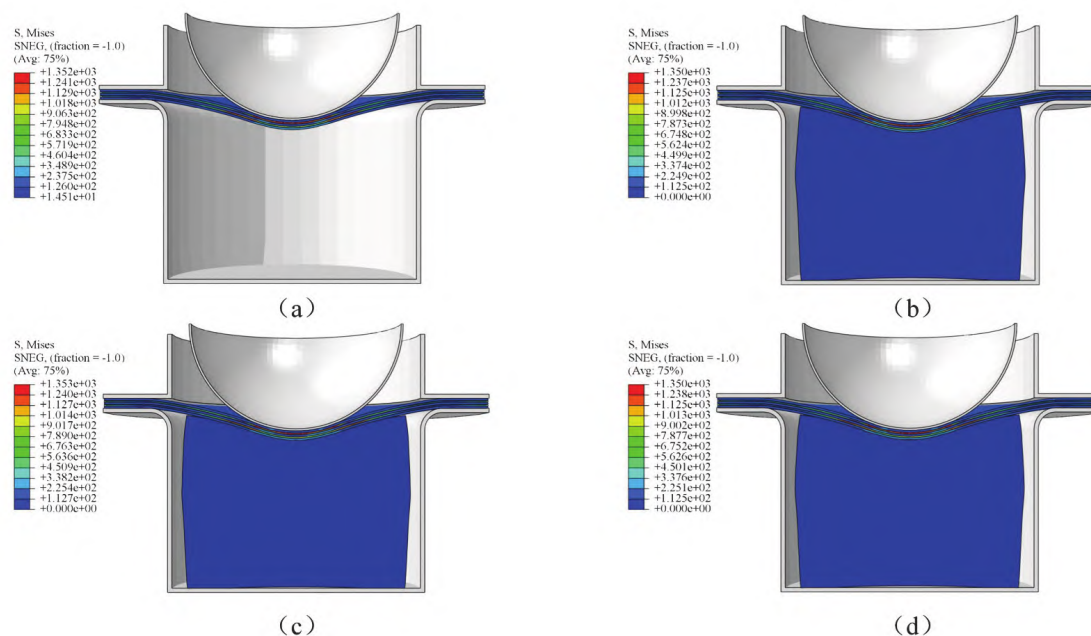
3 弹性模具增塑成形规律有限元仿真

为研究弹性模具增塑成形过程中碳纤维 / 铝合金层的变形行为和成形极限, 本文采用 Abaqus 建立碳纤维 / 铝合金层板弹性模具增塑成形有限元模型, 分析其成形的过程, 并与传统无弹性模具拉深成形进行比较, 以揭示层板成形过程中应力应变的变化规

律, 阐明弹性模具增塑成形的机理。

利用 Abaqus 建立碳纤维 / 铝合金层板弹性模具增塑成形有限元模型时, 板料与模具之间存在许多复杂的接触情况。具体设置如下: 刚性凹模、板料、弹性模具之间的接触类型均设置为面接触; 法向方向上的接触属性设置为硬接触; 切向行为的接触采用罚函数法; 板料与刚性凹模的接触摩擦系数设置为 0.2; 弹性模具与板料以及刚性凹模之间的摩擦系数设置为 0.5; 半球状冲头作为刚性凸模被定义为刚体, 运动方向限制于沿 z 轴方向; 对于板料的有限元模型, 在 x 轴方向与 y 轴方向限制其位移, z 轴不设限, 使其在 z 轴方向自由变形; 其余节点不施加约束。

图 4 所示为利用有限元仿真得到的碳纤维 / 铝合金层板成形在无弹性模具以及弹性模具硬度分别为 HS70A、HS80A、HS90A 情况下材料开始发生失效时的成形结果。此时板料有限元模型中发生了单元删除, 认为板料层板达到了成形极限。在此过程中凸模冲头下行, 板料的中心区域最先接触凸模冲头与弹性模具, 在两者的共同作用下开始变形, 向下凹陷, 带动其他区域运动, 随着成形的进行, 碳纤维 / 铝合



(a) 无弹性模具; (b) 硬度 HS70A; (c) 硬度 HS80A; (d) 硬度 HS90A

图4 碳纤维 / 铝合金层板有限元仿真结果

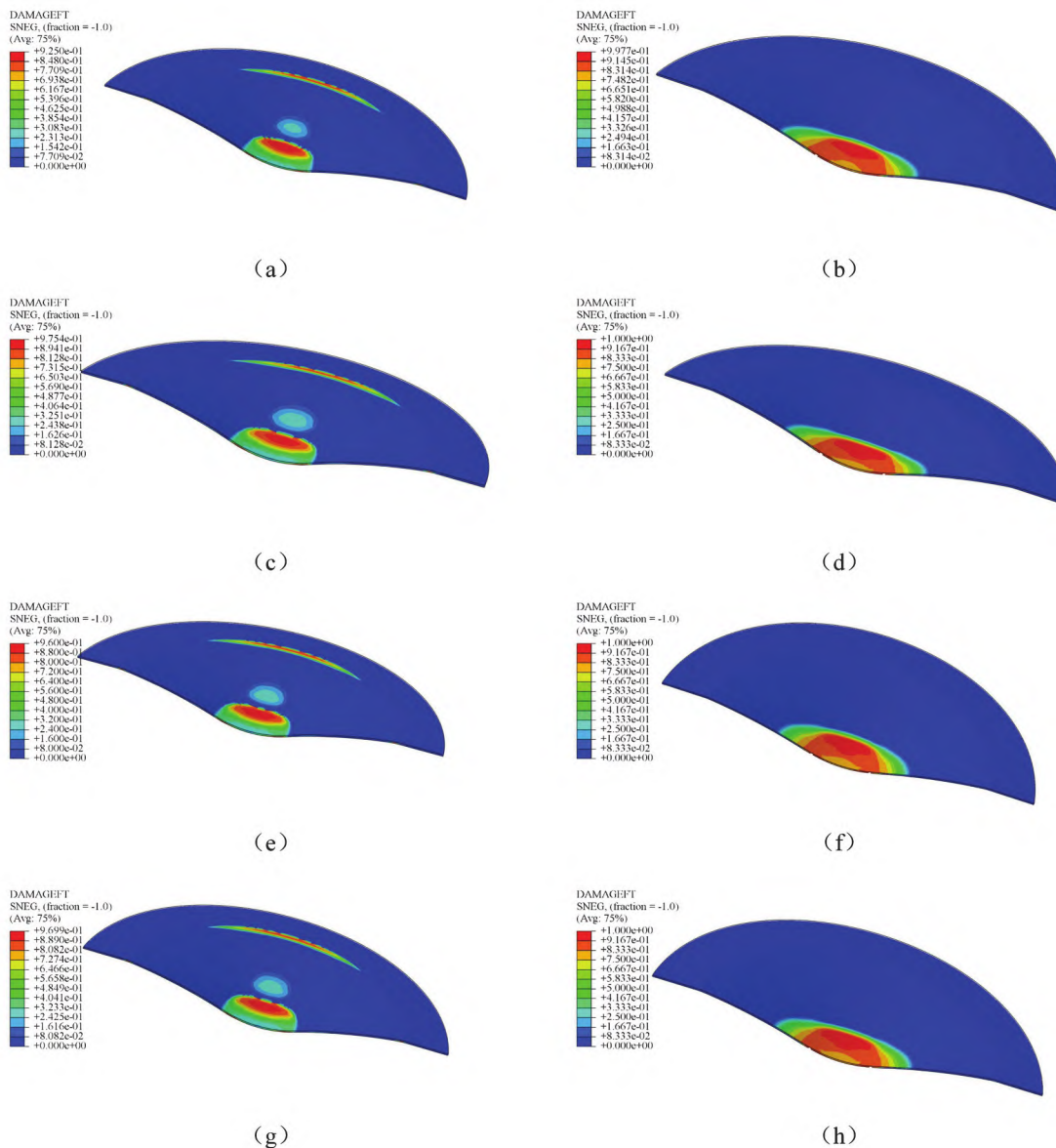
金层板中的下层碳纤维层率先发生失效。

图 5 为碳纤维 / 铝合金层板在无弹性模具以及弹性模具硬度分别为 HS70A、HS80A、HS90A 情况下失效初始阶段的损伤云图。由图 5 可知, 在不同情况

下损伤均率先发生于下层碳纤维, 原因在于下层碳纤维整体的变形程度大于上层碳纤维, 从而造成其变形抗力增加, 碳纤维层损伤, 板料发生失效。需要注意的是板料失效首先发生的位置位于中心区域的边缘,

而非最中心区域,这是由于层板首先接触半球状凸模与弹性模具的最中心区域,在两者的共同作用下该区

域的应力状态得到了改善。



(a) 无弹性模具上层; (b) 无弹性模具下层; (c) 硬度 HS70A 上层; (d) 硬度 HS70A 下层;
(e) 硬度 HS80A 上层; (f) 硬度 HS80A 下层; (g) 硬度 HS90A 上层; (h) 硬度 HS90A 下层

图 5 碳纤维 / 铝合金层板损伤状态云图

图 6 为碳纤维 / 铝合金层板达到成形极限时的位移云图。由图可知,碳纤维 / 铝合金层板在无弹性模具以及弹性模具硬度分别为 HS70A、HS80A、HS90A 情况下的成形极限位移分别为 6.405 mm、7.206 mm、7.607 mm、8.006 mm。由此可见弹性模具可显著增加碳纤维 / 铝合金层板的成形极限位移,当硬度达到 HS90A 可增加 24.9%。

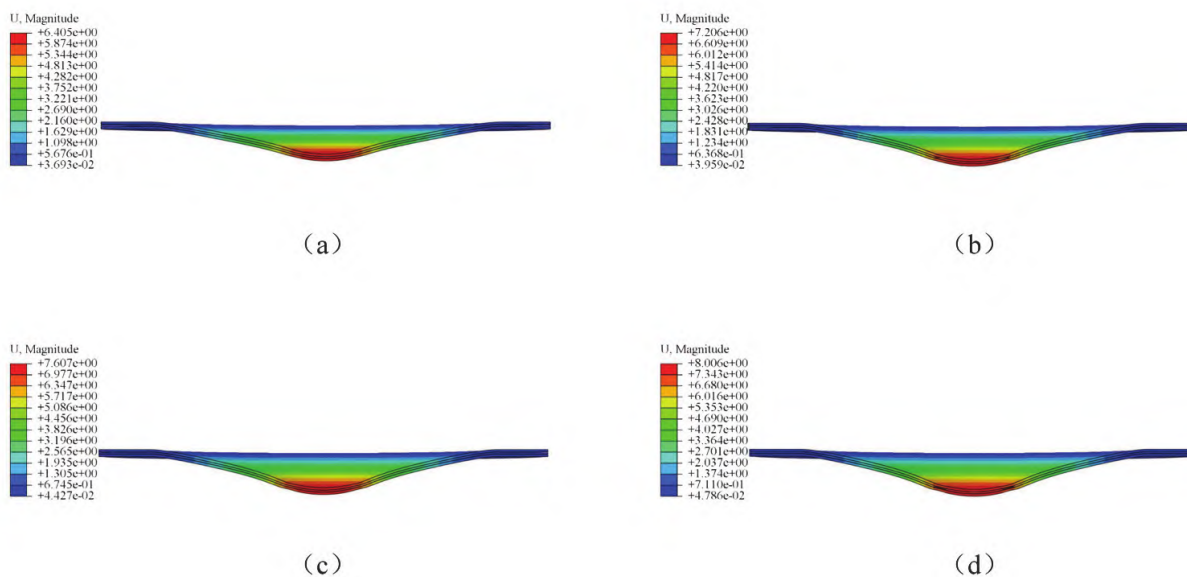
考虑到下层碳纤维层损伤程度最严重,因此将

下层碳纤维层应变作为研究重点,其真实应变云图如图 7 所示。由图 7 可知,下层纤维层在无弹性模具以及弹性模具硬度分别为 HS70A、HS80A、HS90A 情况下最大真实应变分别为 0.1275、0.1504、0.1746、0.1420。弹性模具的引入提高了碳纤维 / 铝合金层板的最大真实应变,其位置与损伤云图相对应。

由仿真结果可知,与传统无弹性模具成形相比,弹性模具增塑成形能够改善碳纤维 / 铝合金层板的成

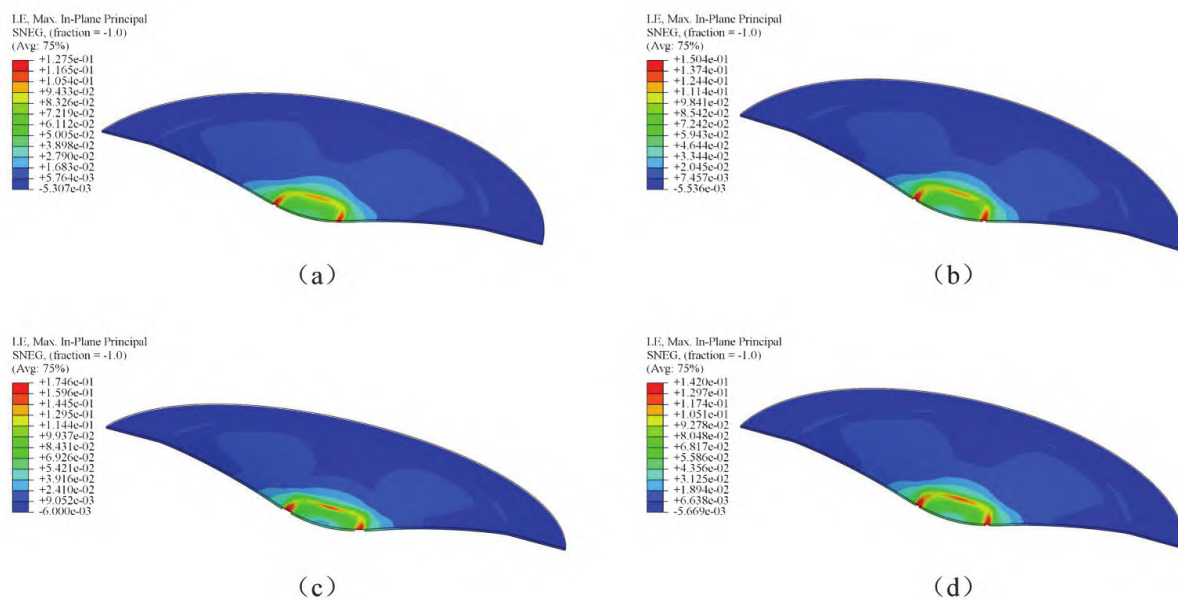
形性能, 减缓碳纤维层的损伤, 增大其成形极限位移和损伤时的最大真实应变, 提高碳纤维 / 铝合金层板的成形极限。此外随着弹性模具硬度的增加, 碳纤维层的成形极限位移和损伤时的最大真实应变也不断增加。当弹性模具硬度为 HS90A 时与传统无弹性模

具相比, 碳纤维 / 铝合金层板的成形极限位移增加了 24.9%, 最大真实应变增加了 11.4%。这是因为随着硬度的提升, 弹性模具变形越均匀, 所能提供的反作用力越大, 对碳纤维 / 铝合金层板成形质量的提升效果越显著。



(a) 无弹性模具; (b) 硬度 HS70A; (c) 硬度 HS80A; (d) 硬度 HS90A

图 6 碳纤维 / 铝合金层板成形极限位移云图



(a) 无弹性模具; (b) 硬度 HS70A; (c) 硬度 HS80A; (d) 硬度 HS90A

图 7 碳纤维 / 铝合金下层碳纤维层真实应变云图

4 弹性模具增塑成形实验研究

为验证有限元仿真结果的准确性, 本文设计了

对应的碳纤维 / 铝合金层板弹性模具增塑成形实验 (如图 8 所示), 以获取弹性模具硬度变化对于碳纤维 / 铝合金层板增塑成形极限的影响规律。

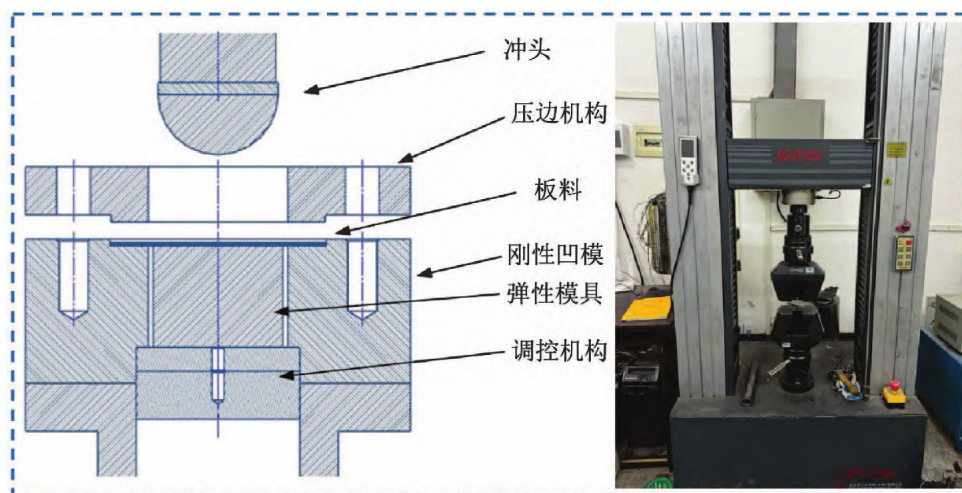


图 8 弹性模具增塑成形实验模具及装置

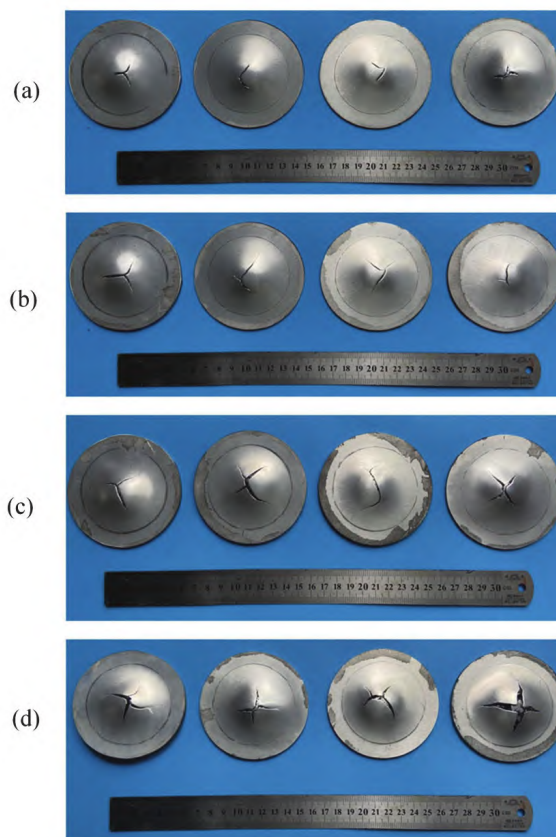
4.1 实验内容

实验采用的弹性模具硬度分别为 HS70A、HS80A、HS90A, 以分析不同硬度的弹性模具对成形极限的影响, 同时将实验结果与传统无弹性模具拉深结果进行对比。

实验中, 实验机冲头冲压速度为 5 mm/min。首先通过压边机构将提前制备的碳纤维 / 铝合金层板初始板料固定于刚性凹模之上, 通过调控机构将弹性模具置于刚性凹模型腔内的工作位置。然后启动实验机, 冲头下行, 层板在冲头凸模与凹模型腔内弹性模具的共同作用下, 开始变形。在变形过程中, 通过装置的测力单元、变形测量单元及相应的传感器记录下载荷与位移的变化, 当载荷不再有明显上升趋势时即表明层板已经处于成形极限, 此时冲头停止下行。最后通过调控机构将弹性模具置于待机位置, 冲头回程, 开模, 取出成形制件, 整个成形实验结束。

4.2 实验结果

通过实验观察可发现碳纤维 / 铝合金层板与冲头凸模率先接触的中心区域边缘位置首先发生破裂, 接着裂口由外向内逐渐扩展到中心区域, 这与有限元仿真结果相吻合。碳纤维 / 铝合金层板最终成形实验结果如图 9 所示, 其中板料的裂口大多表现为十字形且裂口边缘呈现出不规则的波浪状, 透过裂口可以观察到内部的碳纤维层发生了明显的损伤, 说明层板的失效主要与碳纤维层的损伤有关。



(a) 无弹性模具; (b) 硬度 HS70A;
(c) 硬度 HS80A; (d) 硬度 HS90A

图 9 不同硬度弹性模具碳纤维 / 铝合金层板增塑成形实验结果

为直观反映碳纤维 / 铝合金层板弹性模具增塑成形与传统无弹性模具拉深成形的区别, 提取层板在不同弹性模具性能下出现的成形极限位移与承载极限, 其结果分别如图 10 和图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知, 采用传统无弹性模具成

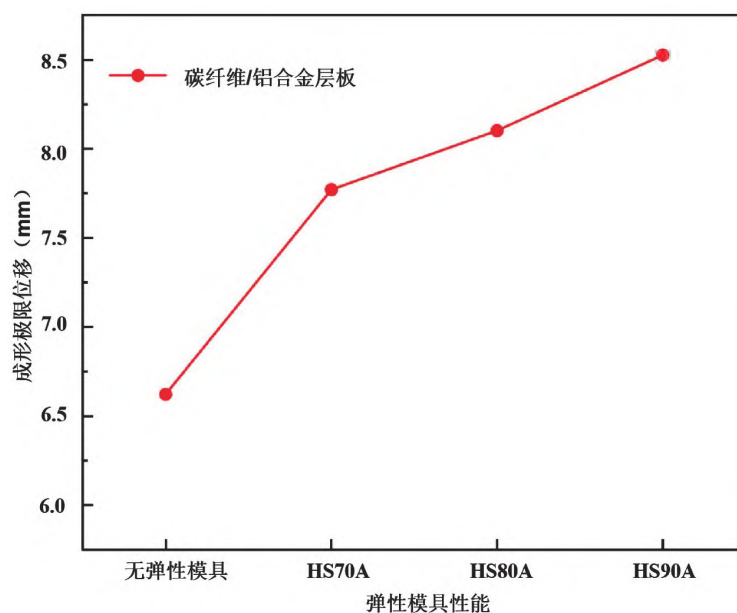


图 10 不同弹性模具性能下碳纤维 / 铝合金层板增塑成形的极限位移量

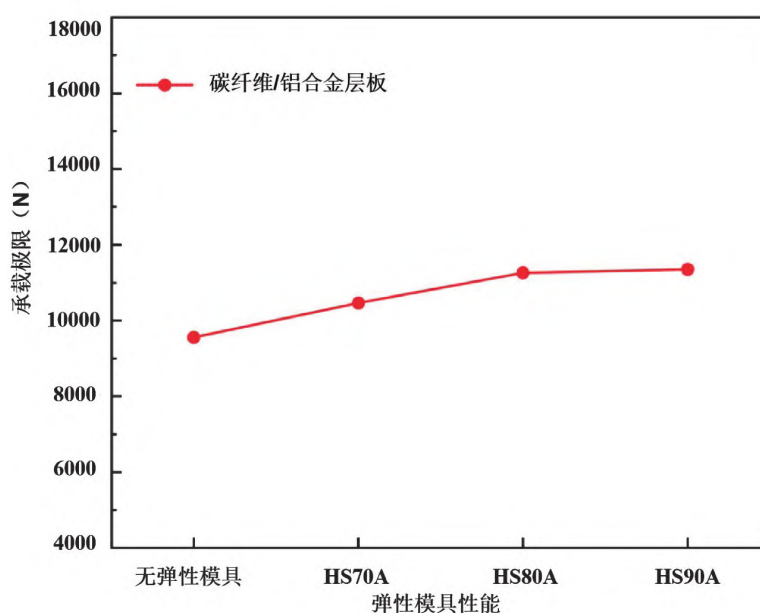


图 11 不同弹性模具性能下碳纤维 / 铝合金层板的承载极限

形时, 碳纤维 / 铝合金层板所获得的成形极限位移量为 6.528mm, 承载极限为 9322N。采用硬度 HS70A 与硬度 HS80A 的弹性模具时, 碳纤维 / 铝合金层板所获得的成形极限位移量为 7.771 mm 和 8.102 mm, 对应的承载极限为 10465 N 和 11260 N; 采用硬度为 HS90A 的弹性模具时, 碳纤维 / 铝合金层板所获得的成形极限位移量为 8.527 mm, 承载极限为 11351 N。

由此可见随着弹性模具硬度的增加, 碳纤维 / 铝合金层板的极限位移和承载极限均有所提高。相比于无弹性模具成形结果, 当弹性模具硬度为 HS90A 时, 层板的成形极限位移最大可提高 30.6%, 承载极限最大可提高 21.8%。这是因为在碳纤维 / 铝合金层板弹性模具增塑成形过程中, 随着弹性模具硬度的增加, 弹性模具提供的法向应力不断增大, 碳纤维 / 铝合金

层板成形过程中产生的微观裂纹、孔隙被抑制,从而层板的极限位移和承载极限显著提高。

以上结果显示,弹性模具的硬度对碳纤维/铝合金层板增塑成形结果影响显著,这与有限元仿真的结果相一致。相比于传统无弹性模具拉深成形,弹性模具增塑成形能够有效抑制碳纤维层的损伤,增加碳纤维/铝合金层板的成形极限位移,提升层板的承载极限,具有更优异的成形性能。

5 结论

本文以碳纤维/铝合金层板为研究对象,针对传统无弹性模具成形工艺异质材料变形协调性差、塑性成形极限低的问题,提出一种碳纤维金属层板弹性模具增塑成形方法。利用 Abaqus 有限元仿真分析和实验相结合的方法对弹性模具增塑成形下碳纤维/铝合金层板的变形行为和成形极限进行了研究。本文的主要结论如下:

(1) 针对碳纤维/铝合金层板,基于 M-K 理论模型,结合 Mises 屈服准则及 Levy-Mises 增量理论对模型进行修正,得到修正后的成形极限理论公式模型,采用 Newton-Raphson 迭代法,通过编程计算得到理论预测下层板的成形极限。结果表明,当板料不均匀度从 0.9 提至 0.99 时,其成形极限提高了 49.3%。

(2) 利用 Abaqus 软件对碳纤维/铝合金层板弹性模具增塑成形进行了仿真。与传统无弹性模具成形相比,弹性模具增塑成形能够提升碳纤维/铝合金层板的成形性能,减缓碳纤维层的损伤,层板成形极限位移由 6.405 mm 提高至 8.006 mm,提高了 24.9%;碳纤维层的最大应变由 0.1275 提高至 0.1420,提高了 11.4%。

(3) 开展了不同弹性模具性能下碳纤维/铝合金层板增塑成形实验。相比于传统无弹性模具拉深成形,弹性模具增塑成形能够提升碳纤维/铝合金层板的成形性能,且随着弹性模具硬度的增加,层板的极限位移和承载极限均有所提高,极限位移由 6.528 mm 提高至 8.527 mm,提高了 30.6%;承载极限由 9322 N 提高至 11351 N,提高了 21.8%。

参考文献:

- [1] 左可雷,关世伟. 复合材料在汽车轻量化设计中的应用[J]. 装备制造技术, 2015 (5): 258-260.
- [2] CHEN Y, LIN Y, WANG H, et al. Improvement of mechanical properties and forming efficiency during hot gas forming of cfrp curved surface components[J]. Materials, 2021, 14(18).
- [3] HYNES N R J, VELU P S. Microstructural and mechanical properties on friction welding of dissimilar metals used in motor vehicles[J]. Materials Research Express, 2018, 5(2): 026521.
- [4] Y L, H L, Z Z, et al. Low-Velocity impact resistance of Al/Gf/PP laminates with different interface performance[J]. Polymers, 2021, 13(24): 4416.
- [5] GUO Y, CHEN Z, LI F, et al. Study on formability and failure modes of steel/CFRP based FMLs consisting of carbon fiber reinforced polymer prepreg and steel sheet[J]. Composite Structures, 2022, 281.
- [6] DING Z, WANG H, LUO J, et al. A review on forming technologies of fibre metal laminates[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2021, 4(1): 110-126.
- [7] GUO Y Q, CHEN Z F, LI F Z, et al. Study on formability and failure modes of Steel/CFRP based FMLs consisting of carbon fiber reinforced polymer prepreg and steel sheet[J]. Composite Structures, 2022, 281: 114980.
- [8] BLALA H, LANG L, KHAN S, et al. A Comparative study on the GLARE stamp forming behavior using cured and non-cured preparation followed by hot-pressing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(5): 1461-1473.
- [9] RAJABI A, KADKHODAYAN M, MANOOCHERHI M, et al. Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental Investigations, Statistical Analyses and Finite Element Modeling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 159-170.
- [10] 陈一哲, 范宏德, 王祎纯, 等. 车用纤维金属层板构件冲压变形行为研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(3): 517-525.
- [11] 冯迪, 李鑫迪, 张新明, 等. 以多阶段和非等温为特征的新型铝合金热处理方法综述[J]. 中南大学学报(英文版), 2023, 30(9): 2833-2866.
- [12] 盛晓菲, 贺存孝, 程亚娟, 等. 快速获得 7055 铝合金淬火敏感温度区间的新方法及机理[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2023, 33(1): 36-45.
- [13] 杨晓明, 王宝雨, 校文超, 等. 基于 M-K 理论的 6016 铝合金成形极限曲线预测[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 485-491.
- [14] 刘文权, 盈亮, 荣海, 等. 基于损伤修正 M-K 模型的高强度钢成形极限预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1266-1271.
- [15] 傅垒, 李利, 刘成, 等. 基于 M-K 理论的 5182 铝合金汽车板成形极限预测[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(7): 58-62, 8.
- [16] XIANG F, PENG L H, LI L X. A consistently compressible Mooney-Rivlin model for the vulcanized rubber based on the Penn's experimental data[J]. Polymer Engineering & Science, 2021, 61(9): 2287-2294.
- [17] 陶杰, 李华冠, 潘蕾, 等. 纤维金属层板的研究与发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015 (5): 626-36.
- [18] ZHU W, XIAO H, WANG J, et al. Characterization and properties of AA6061-based fiber metal laminates with different aluminum-surface pretreatments[J]. Composite Structures, 2019, 227: 111321.

(下转第 26 页)

Research on Constructing a Mass Ontology-matching Model Based on Deep Learning

CHANG Wanjun, ZHANG Dongfang

(School of Computer Science & Technology, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003,China)

Abstract: Ontology-matching is an effective method for data communication and operation of multi-source heterogeneous ontologies in semantic network. It is a major challenge in the design of Ontology-matching algorithm for researchers to achieve scientific classification of mass ontology and reduce the time, space and consumption during the process of heterogeneous Ontology-matching. This paper presents autoencoder and Deep Learning technology of mass Ontology-matching algorithm design which provides important support for mass ontology semantic matching and data mining to deal with this problem. It consists of semantic embedding and model training for input ontology by using autoencoder, which can reduce the complexity of heterogeneous ontology and improve the accuracy of heterogeneous ontology classification. It is clearly showed that the algorithm has obvious advantages in time complexity and operation accuracy through experiments of multiple Ontology-matching systems, which has a high value of research and application.

Key words: ontology; autoencoder; semantic embedding; deep learning

(责任编辑 王磊)

(上接第 16 页)

Study on the Limit and Mechanism of Carbon Fiber/Aluminum Alloy Laminates for Automotive with Elastic Mold Plasticizing Forming

LI Qian, LIU Yifan, WANG Yaoyao, LIU Qing

(School of Vehicle And Traffic Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor deformation coordination of heterogeneous materials and low plastic forming limit of heterogeneous materials in the traditional forming process of automotive carbon fiber/aluminum alloy laminates, a method of elastic mold plastic forming for carbon fiber metal laminates is proposed. Combined with theoretical analysis, finite element simulation, experiments and other means, the deformation behavior and forming limit of carbon fiber metal laminates in the plastic forming process of elastic mold were studied. The experimental results show that the elastic mold can significantly improve the forming performance of carbon fiber metal laminates, and as the hardness of the elastic mold increases, both the forming limit displacement and the load-bearing limit of the laminates are improved. When the hardness of the elastic mold reaches HS90A, compared with the traditional non-elastic mold forming, the forming limit displacement of the laminates can be increased by 30.6% and the load-bearing limit can be increased by 21.8%.

Key words: carbon fiber / aluminum alloy laminates; elastic mold; plastic forming

(责任编辑 吕春红)