

文章编号:1001-4888(2022)04-0475-13

不同预加载对聚酰胺 66 后继屈服强度影响的研究^{*}

詹鑫鑫, 罗雅云, 王鹤峰, 金涛, 树学峰

(太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 利用万能试验机对施加了不同预加载位移的聚酰胺 66(PA66)试样在 3 种不同应变率条件下进行单轴压缩、剪切和复合压剪测试,研究预加载和应变速率对材料力学性能的影响。结果表明,不同预加载位移下 PA66 的后继屈服行为和硬化行为都表现出显著的应变率敏感性,且预加载位移的大小对 PA66 后继屈服强度有明显的影响。在压缩和剪切复合加载实验中,利用压剪杆试样(SCBS)的测试方法引入了 4 种不同的加载角度(15° 、 30° 、 45° 、 50°);对不同预加载位移的 PA66 后继屈服正、剪应力进行分析可知,4 个角度的正、剪应力均随着预加载位移的增加而增大,基于此引入改进的 von-Mises(MMC)屈服准则,对测试得到的不同应变率下 PA66 的实验屈服轨迹进行理论描述。进一步结合 von-Mises 等效塑性应变标定了预加载后 PA66 后继屈服面的演化参数,结果表明,在一定的塑性应变范围内 PA66 的后继屈服行为表现出等向强化的加工硬化规律。

关键词: PA66; 预加载位移; 后继屈服行为; 应变率效应; 准静态

中图分类号: O334.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-161

0 引言

半晶态聚合物聚酰胺 66(PA66),由于具有良好的韧性、自润性、摩擦性及优良的机械性能,常被应用在国防、汽车、化工和电器等领域^[1-3]。而 PA66 材料在使用过程中常处于较为复杂的环境,因此了解材料在复杂工况下的力学性能有助于优化相应结构件的设计及提高其服役寿命预测的精度。通常可以通过改进加载装置或改变试件形状等方式,来实现材料的复合加载测试。自 21 世纪以来,研究者们通过单轴拉伸实验和压缩实验对 PA66 的力学性能进行了广泛的研究^[4-7]。为研究材料在复杂应力状态下的力学性能,Zhou 等^[8]通过 SCBS(Shear-Compression Bar Specimen)测试方法研究了有机玻璃(PMMA)在压剪工况下的变形失效行为,并分析了加载速率对其在复杂应力状态下力学响应的影响。类似的,金涛等^[9,10]利用倾斜试样研究了 PMMA 在复合应力状态下的力学性能及变形特性。但前述关于材料在复杂应力状态下力学性能的研究,均是在初始无应力/应变状态条件下进行的,并没有考虑变形历史对材料力学响应的影响。而理清变形历史对材料性能的影响,有助于加深对材料力学性能的理解。试样的初始应力/应变状态一般可通过预加载实验来实现,而所谓的预加载是指预先对试件施加一个初始设定的加载位移,然后进行二次加载并研究其在有初始应力/应变状态下的后继屈服行为,由于 SCBS 测试方法操作简单且能够实现试样的复合加载实验,因此,本文采用 SCBS 测试方法来研究不同

^{*} 收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-08-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11802199);西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金(SV2019-KF-15);国家自然科学基金(11772217);2020 年度山西省高等学校科技创新项目(2020L0063)资助

通信作者: 树学峰(1964—),男,博士,教授。研究领域:固体力学、弹塑性力学、冲击动力学。Email: shuxuefeng@tyut.edu.cn

金涛(1989—),男,博士,讲师。主要研究领域:弹塑性力学、冲击动力学。Email: tyutjintao@163.com

预加载位移下的 PA66 的后继屈服行为。

1 实验试样与过程

实验采用的 PA66 是注塑成型的半成品棒材,由制造商 Quadrant EPP Belgium NV 提供,牌号为 ERTALON® 66 SA,性能参数见表 1。试样采用铣削和车削加工等机加工方式获得,具体形状和尺寸见图 1。

表 1 PA66 材料性能参数

Tab. 1 Performance parameters of PA66 material

熔融温度/℃	密度/(g · cm ⁻³)	自燃温度/℃	热分解温度/℃
260	1.14	>450	>350

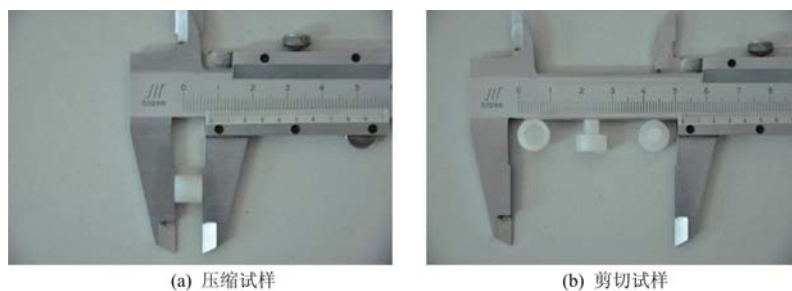


图 1 PA66 试样形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of PA66 samples

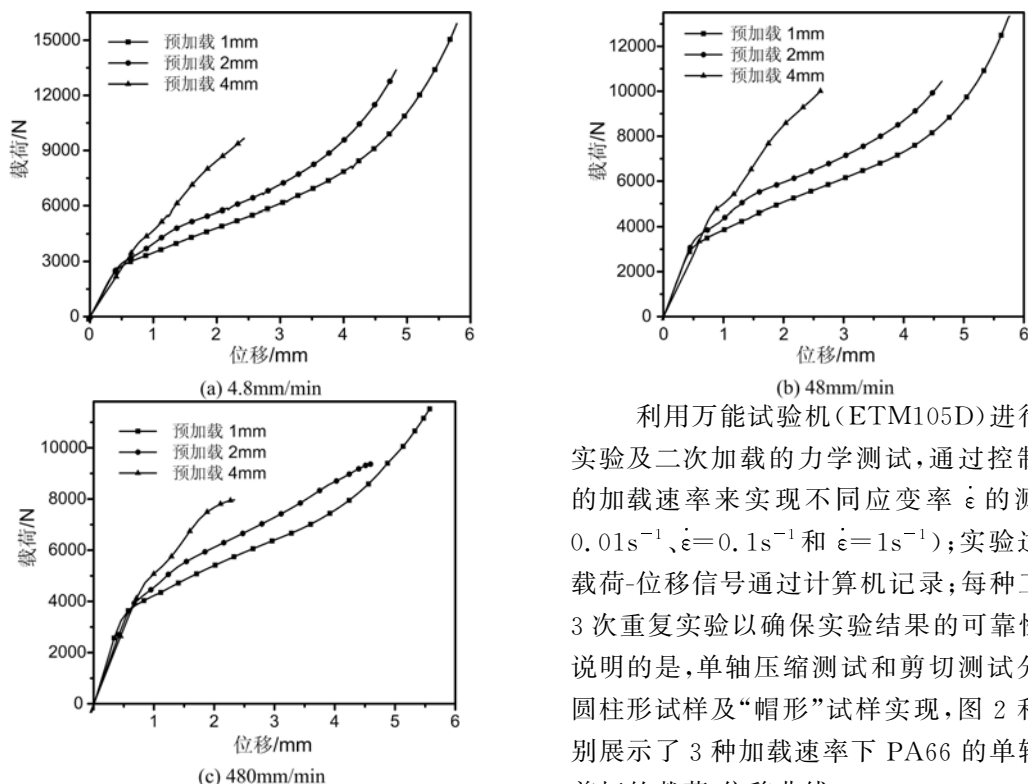


图 2 3 种不同加载速率下 PA66 的
压缩载荷-位移曲线

Fig. 2 The compression load-displacement curve
of PA66 under three different loading rates

利用万能试验机(ETM105D)进行预加载实验及二次加载的力学测试,通过控制试验机的加载速率来实现不同应变率 $\dot{\epsilon}$ 的测试($\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon}=1\text{s}^{-1}$);实验过程中的载荷-位移信号通过计算机记录;每种工况进行 3 次重复实验以确保实验结果的可靠性。需要说明的是,单轴压缩测试和剪切测试分别利用圆柱形试样及“帽形”试样实现,图 2 和图 3 分别展示了 3 种加载速率下 PA66 的单轴压缩和剪切的载荷-位移曲线。

为了进一步研究 PA66 在复杂工况下的力学性能,引入了 SCBS 测试方法。本文所采用的 SCBS 测试方法所涉及的加载装置由 4 种不同倾斜角度的金属垫块(15° 、 30° 、 45° 和 50°)及

聚四氟乙烯套筒组成,相应的加载装置如图 4 所示。PA66 在复合加载条件下的载荷-位移曲线如图 5

~图7所示。

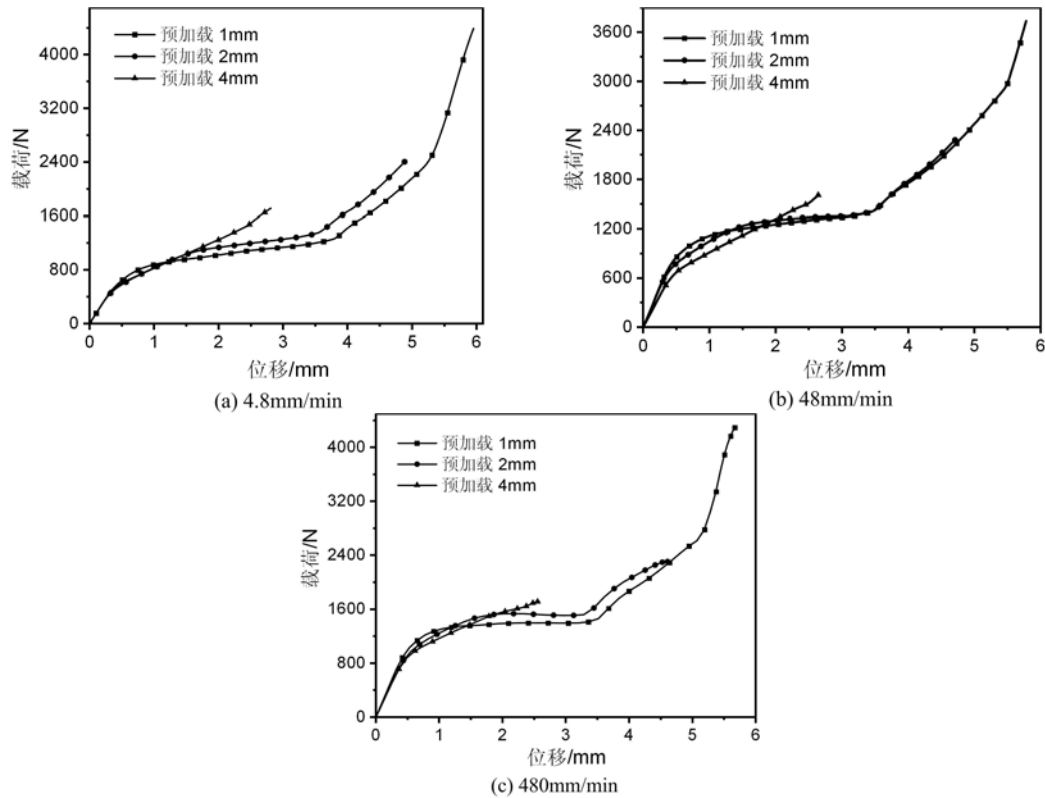


图3 3种不同加载速率下PA66的剪切载荷-位移曲线

Fig. 3 The shear load-displacement curve of PA66 under three different loading rates



图4 PA66复合压剪实验装置

Fig. 4 PA66 combined shear-compression test device

2 实验结果分析

2.1 压缩实验和剪切实验结果

从图2中可以看出,3种预加载测试在加载的起始阶段均表现出载荷随着位移的增加而线性增加的趋势,此时对应于材料响应的弹性阶段;而当材料达到屈服点之后,载荷增加的速率有明显变缓的现象,对应于材料的塑性响应,表现出一定的硬化行为;随着预加载位移的增加,材料的后继屈服载荷也同样表现出增大的趋势。对于相同的预加载位移,材料的后继屈服载荷随着应变率的增加而变大,表现出一定的率敏感性。由图3可知,剪切实验的后继屈服载荷变化趋势与单轴压缩的相同。

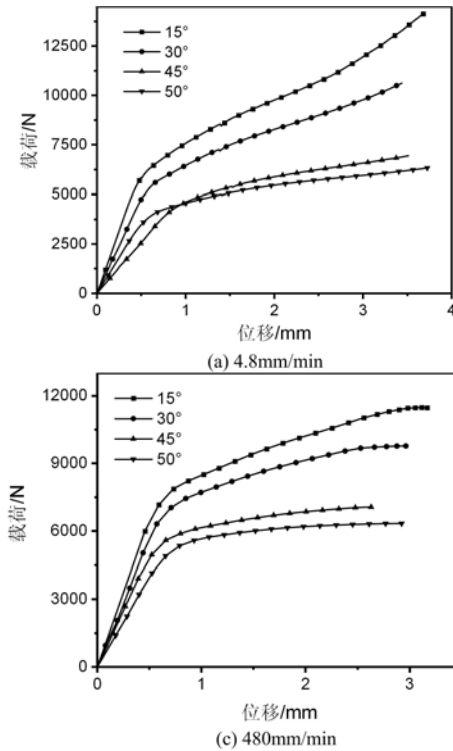
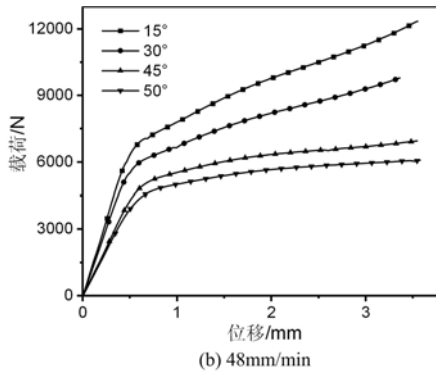


图 5 预加载 1mm 下 PA66 的压剪载荷-位移曲线
Fig. 5 The combined shear-compression load-displacement curve of PA66 under a preload of 1mm



2.2 压剪实验结果

图 5~图 7 展示了不同应变率、不同预加载位移条以及不同加载角度下 PA66 的压剪载荷-位移曲线。从图 5~图 7 中可以观察到在相同的预加载位移条件下,随着加载速率的增加,各角度的后继屈服载荷增加;而随着加载角度的增大,材料的后继屈服载荷表现出减小的趋势。在相同的应变率下,随着预加载位移的增加,材料的后继屈服载荷增加。

为了深入讨论 PA66 在复合压剪加载条件下的力学响应,先对引入双斜截面金属垫块的 PA66 压缩过程进行受力分

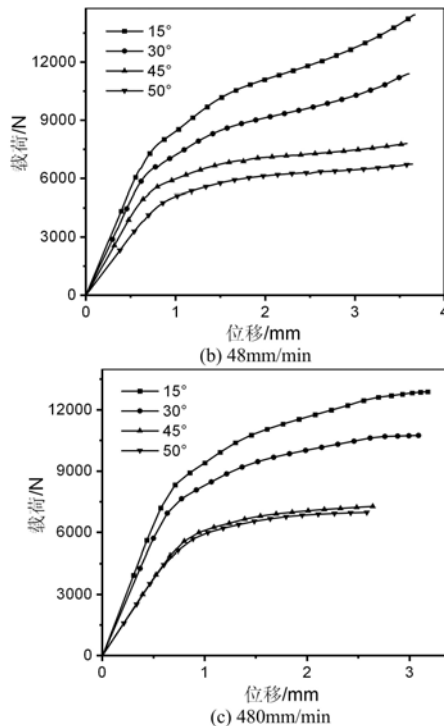
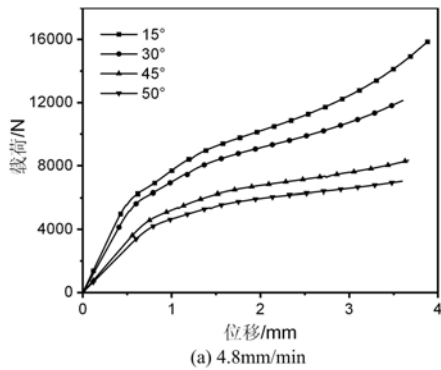


图 6 预加载 2mm 下 PA66 的压剪载荷-位移曲线

Fig. 6 The combined shear-compression load-displacement curve of PA66 under a preload of 2mm

析,由图 8 可知,沿加载方向有

$$F_n \cos \theta + F_s \sin \theta = \frac{1}{2} F_{UTM} \quad (1)$$

式中: F_{UTM} 为万能试验机记录下的载荷; F_n 为法向力; F_s 为切向力。由压剪试件的变形分析发现,试件在复合加载时的正应变 ϵ 和切应变 γ 可以分别描述为

$$\epsilon = \frac{l \cos \theta}{L}, F_s = \tau A_s = A_s G \gamma \quad (2)$$

式中: τ 为切应力; A_s 为截面面积; E 为弹性模量; G 为切变模量; L 为试样高度; l 为压头下降距离; θ 为倾斜角。当材料处于弹性极限范围内时存在如下关系:

$$F_n = \sigma A_s = A_s E \epsilon, F_s = \tau A_s = A_s G \gamma \quad (3)$$

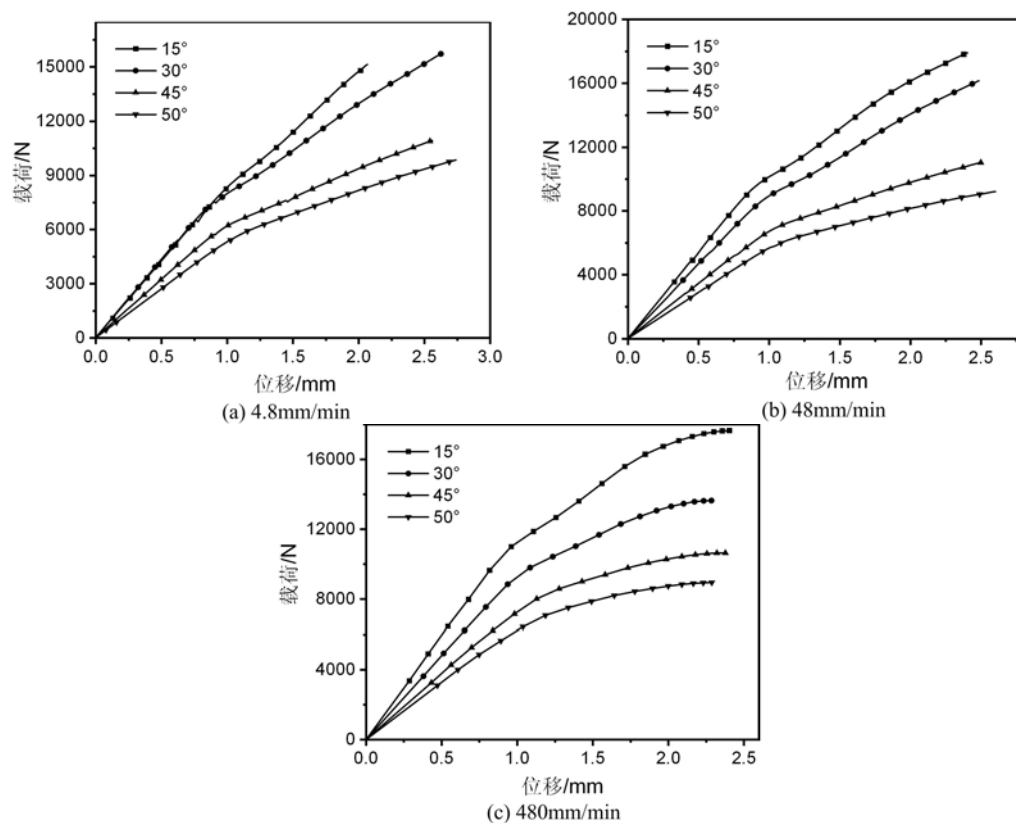


图7 预加载4mm下PA66的压剪载荷-位移曲线

Fig. 7 The combined shear-compression load-displacement curve of PA66 under a preload of 4mm

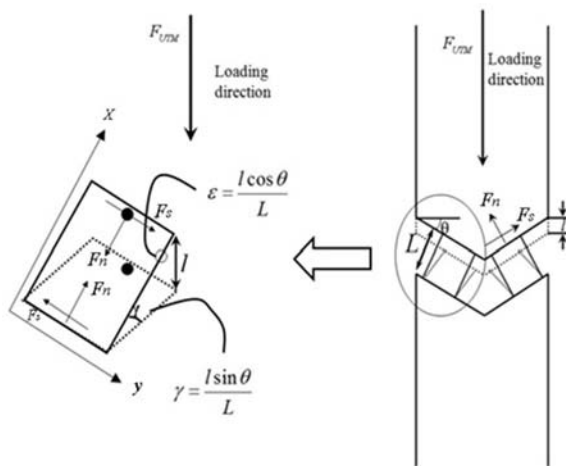
图8 SCBS受力分析及变形^[11]

Fig. 8 SCBS the force analysis and deformation^[11]

由此可得

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{E\varepsilon}{G\gamma} = \frac{2(1+\nu)}{\tan\theta} \quad (4)$$

式中： σ 为正应力； ν 为泊松比。联立式(1)~(4)可以得到正应力及切应力的表达式分别为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F_n}{A_s} = \frac{(1+\nu)\cos\theta F_{UM}}{[(1+2\nu)\cos^2\theta + 1]A_s} \\ \tau &= \frac{F_s}{A_s} = \frac{\sin\theta F_{UM}}{2[(1+2\nu)\cos^2\theta + 1]A_s} \end{aligned} \quad (5)$$

对应的正应变和剪应变为

$$\epsilon = \frac{l \cos \theta}{L}, \gamma = \tan \gamma \approx \frac{l \sin \theta}{L} \quad (6)$$

可以得到如图 9~图 11 所示的 PA66 在复合压剪加载条件下的正应力-正应变和剪应力-剪应变曲线。

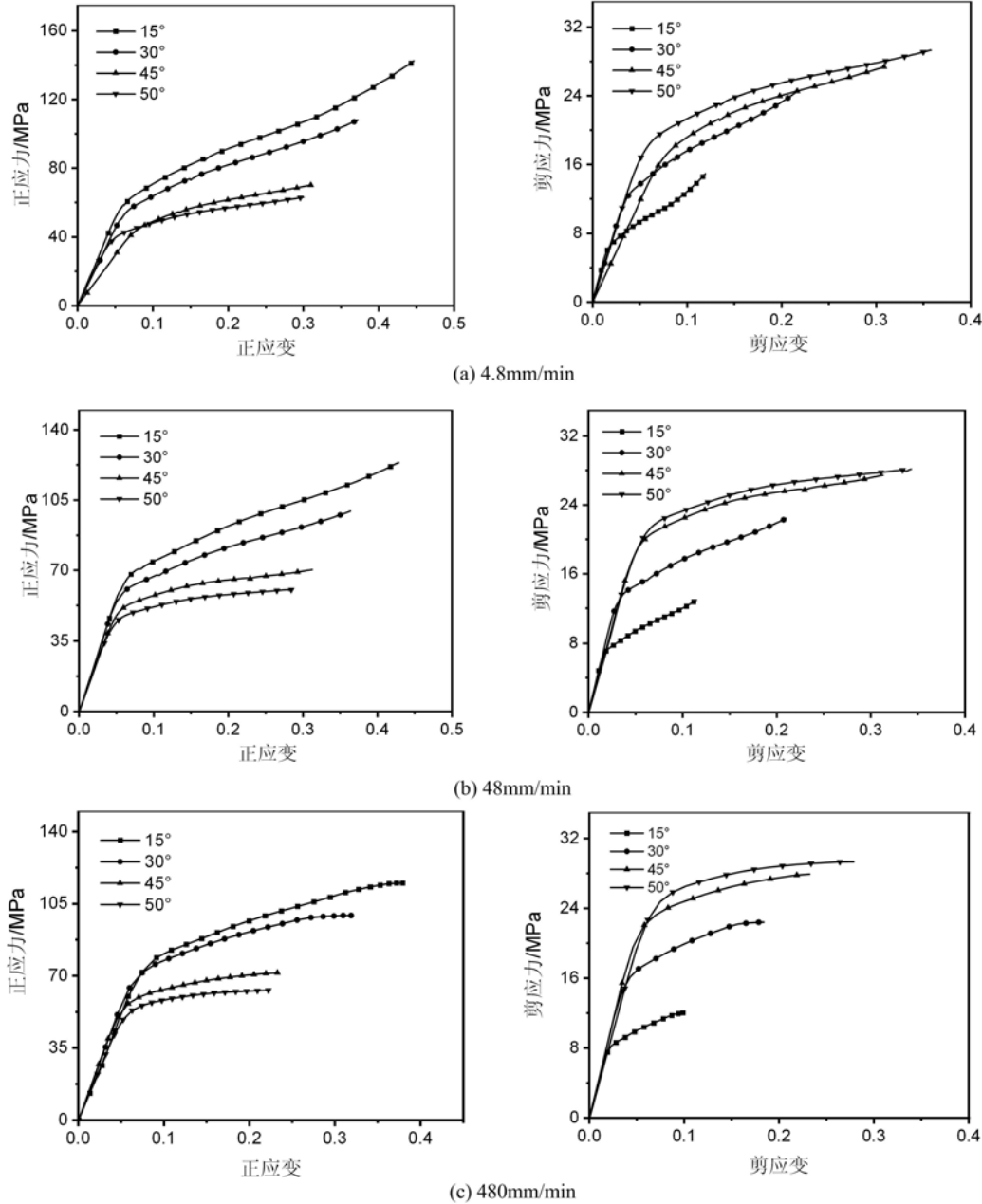


图 9 预加载 1mm 的 3 种加载速率下 SCBS 正应力-正应变、剪应力-剪应变曲线

Fig. 9 Normal stress-normal strain and shear stress-shear strain curves of SCBS under three loading rates with a preload of 1mm

由图 9~图 11 可知,在相同的预加载位移和加载速率下,材料后继屈服时的正应力随着加载角度的增加而降低,剪应力则相反。相同应变率时,材料后继屈服的正应力和剪应力强度都随着预加载位移增大而增加。为了实现对不同预加载下 PA66 后继屈服强度的定量描述,采用回推法^[12,13]定义 PA66 试样的后继屈服点,不同预加载位移以及 3 种加载速率下 PA66 后继屈服时对应的压剪应力分量见表 2 和表 3。

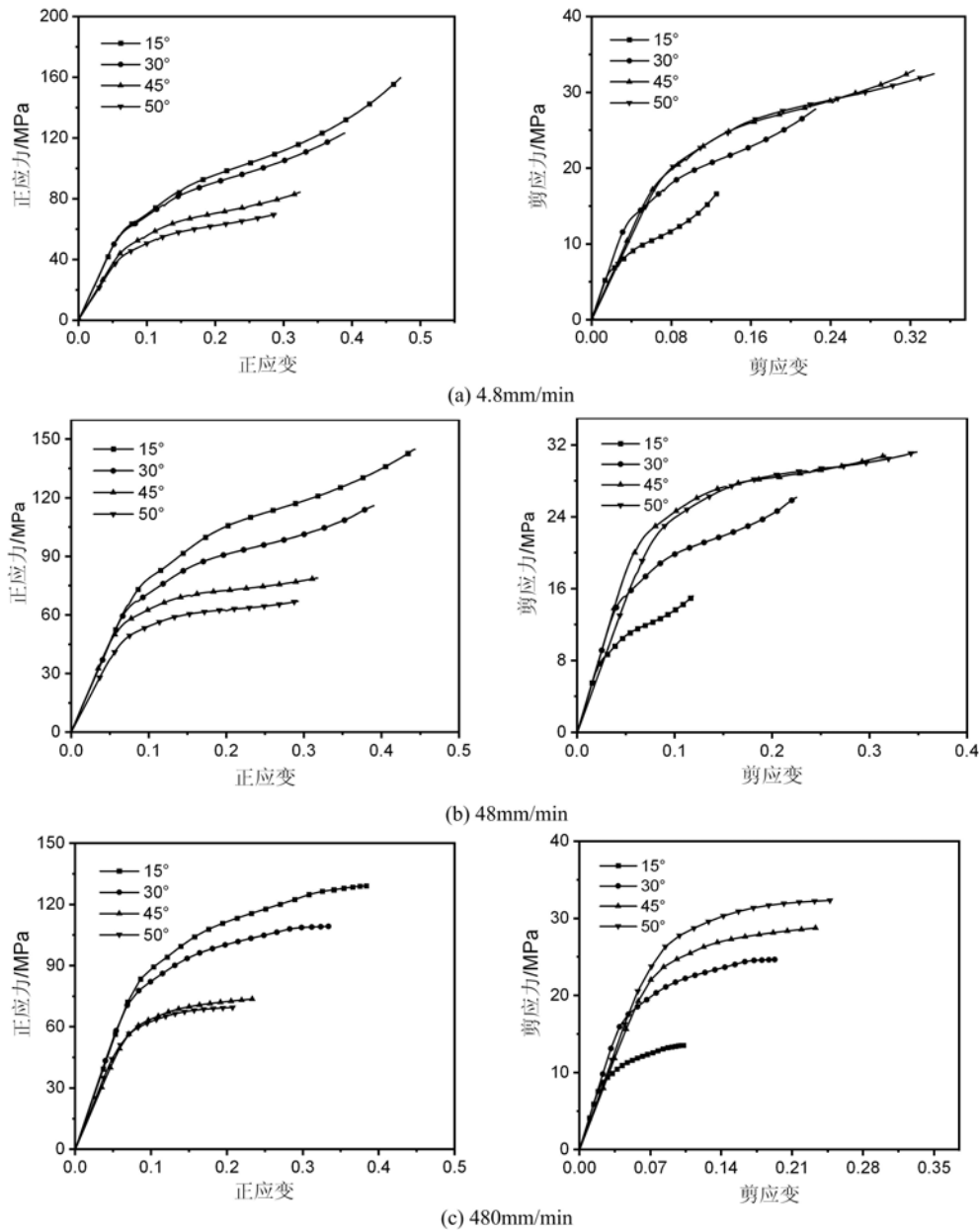


图 10 预加载 2mm 的 3 种加载速率下 SCBS 正应力-正应变、剪应力-剪应变曲线

Fig. 10 Normal stress-normal strain and shear stress-shear strain curves of SCBS under three loading rates with a preload of 2mm

表 2 3 种预加载位移下不同加载速率 PA66 的压缩和剪切后继屈服强度

Tab. 2 Compression and shear subsequent yield strength of PA66 with different loading rates under three preload displacements

预加载位移/mm	1			2			4		
加载速率/(mm/min)	4.8	48	480	4.8	48	480	4.8	48	480
压缩/MPa	56.82	66.86	73.91	66.40	77.58	90.74	79.13	91.23	103.46
剪切/MPa	29.55	33.48	36.22	35.19	40.34	44.46	41.15	47.71	52.76

将通过式(2)~(6)得到的 PA66 后继屈服应力代入主应力表达式中：

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (7)$$

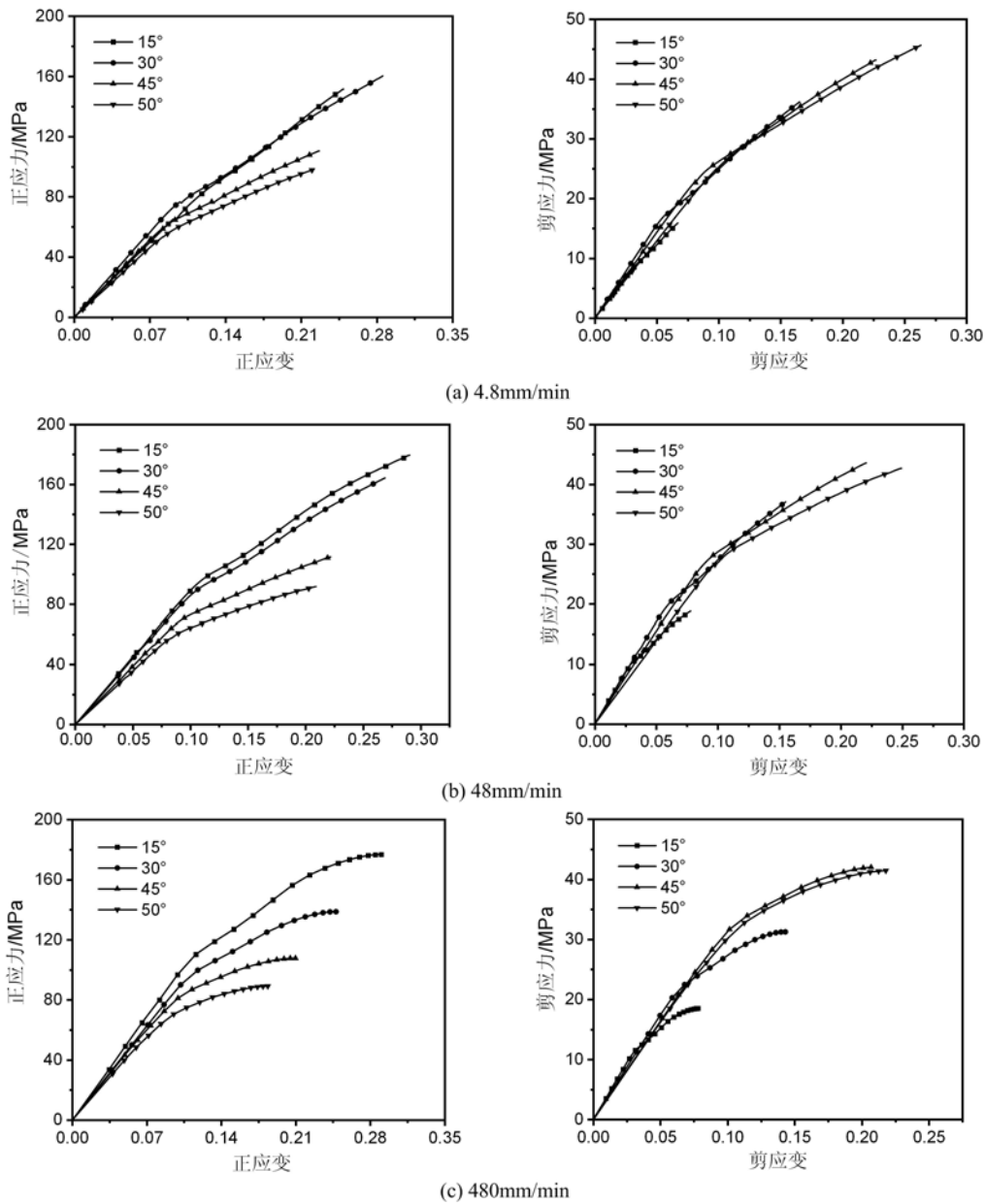


图 11 预加载 4mm 的 3 种加载速率下 SCBS 正应力-正应变、剪应力-剪应变曲线

Fig. 11 Normal stress-normal strain and shear stress-shear strain curves of SCBS under three loading rates with a preload of 4mm

式中: $\sigma_{\max}$ 表示最大主应力; $\sigma_{\min}$ 表示最小主应力。由式(7)可以得到不同工况下 PA66 后继屈服时的主应力状态,进而可以得到应力张量第一不变量及偏应力张量第二不变量:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{3}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1] = \frac{1}{3}(\sigma^2 + 3\tau^2) \quad (9)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别表示第一主应力、第二主应力和第三主应力。通过式(7)~(9)可以获得不同预加载位移及 3 种加载速率条件下 PA66 在主应力空间及应力张量不变量空间下的实验屈服点(见表 4 和表 5)。

表 3 不同预加载的 3 种加载速率下 PA66 的压剪应力分量

Tab. 3 Compression and shear stress components of PA66 under three loading rates of different preloads

预加载位移	加载速率	应力	15°	30°	45°	50°
1mm	4.8mm/min	压缩	60.64MPa	55.22MPa	50.21MPa	45.36MPa
		剪切	6.89MPa	13.39MPa	19.77MPa	21.30MPa
	48mm/min	压缩	70.91MPa	65.37MPa	56.31MPa	49.94MPa
		剪切	7.51MPa	14.12MPa	20.24MPa	23.26MPa
	480mm/min	压缩	79.37MPa	73.82MPa	60.02MPa	56.69MPa
		剪切	8.07MPa	15.09MPa	21.89MPa	25.26MPa
2mm	4.8mm/min	压缩	68.02MPa	65.84MPa	54.73MPa	49.31MPa
		剪切	7.07MPa	14.70MPa	20.65MPa	22.44MPa
	48mm/min	压缩	83.76MPa	72.12MPa	63.70MPa	55.24MPa
		剪切	8.89MPa	16.25MPa	24.53MPa	25.20MPa
	480mm/min	压缩	93.93MPa	83.80MPa	65.17MPa	58.64MPa
		剪切	9.58MPa	19.34MPa	25.43MPa	27.96MPa
4mm	4.8mm/min	压缩	80.09MPa	73.00MPa	61.28MPa	56.22MPa
		剪切	8.41MPa	15.92MPa	23.91MPa	26.24MPa
	48mm/min	压缩	94.18MPa	84.96MPa	70.89MPa	61.30MPa
		剪切	9.31MPa	19.00MPa	27.66MPa	28.65MPa
	480mm/min	压缩	107.21MPa	98.20MPa	83.85MPa	71.78MPa
		剪切	10.88MPa	21.65MPa	32.51MPa	33.05MPa

表 4 PA66 压缩和剪切时在主应力空间下的屈服应力

Tab. 4 Compression and shear yield stress of PA66 in principal stress space

预加载位移	加载速率	应力	压缩	剪切
1mm	4.8mm/min	σ_1	0MPa	29.55MPa
		σ_2	-56.82MPa	-29.55MPa
	48mm/min	σ_1	0MPa	33.48MPa
		σ_2	-66.86MPa	-33.48MPa
	480mm/min	σ_1	0MPa	36.22MPa
		σ_2	-73.91MPa	-36.22MPa
2mm	4.8mm/min	σ_1	0MPa	35.19MPa
		σ_2	-66.40MPa	-35.19MPa
	48mm/min	σ_1	0MPa	40.34MPa
		σ_2	-77.58MPa	-40.34MPa
	480mm/min	σ_1	0MPa	44.46MPa
		σ_2	-90.74MPa	-44.46MPa
4mm	4.8mm/min	σ_1	0MPa	41.15MPa
		σ_2	-79.13MPa	-41.15MPa
	48mm/min	σ_1	0MPa	47.71MPa
		σ_2	-91.23MPa	-47.71MPa
	480mm/min	σ_1	0MPa	52.76MPa
		σ_2	-103.46MPa	-52.76MPa

表 5 不同预加载位移在主应力空间下 PA66 的实验屈服应力

Tab. 5 Yield stress of PA66 under different preload displacement in principal stress space

预加载位移	加载速率	应力	15°	30°	45°	50°
1mm	4.8mm/min	σ_1	0.77MPa	3.08MPa	6.85MPa	8.43MPa
		σ_2	-61.41MPa	-58.3MPa	-57.07MPa	-53.79MPa
	48mm/min	σ_1	0.79MPa	2.29MPa	6.52MPa	9.16MPa
		σ_2	-71.70MPa	-68.29MPa	-62.83MPa	-59.10MPa
	480mm/min	σ_1	0.82MPa	2.97MPa	7.14MPa	9.63MPa
		σ_2	-80.19MPa	-76.79MPa	-67.16MPa	-66.32MPa
	4.8mm/min	σ_1	0.73MPa	3.13MPa	6.92MPa	8.69MPa
		σ_2	-68.75MPa	-68.97MPa	-61.65MPa	-58.00MPa
	48mm/min	σ_1	0.93MPa	3.49MPa	8.35MPa	9.77
		σ_2	-84.69MPa	-75.61MPa	-72.05MPa	-65.01MPa
	480mm/min	σ_1	0.97MPa	4.25MPa	8.75MPa	11.19MPa
		σ_2	-94.90MPa	-88.05MPa	-73.92MPa	-69.83MPa
2mm	4.8mm/min	σ_1	0.88MPa	3.32MPa	8.23MPa	10.34MPa
		σ_2	-80.97MPa	-76.32MPa	-69.51MPa	-66.56MPa
	48mm/min	σ_1	0.91MPa	4.06MPa	9.52MPa	11.31MPa
		σ_2	-95.09MPa	-89.02MPa	-80.41MPa	-72.60MPa
	480mm/min	σ_1	1.05MPa	4.56MPa	11.12MPa	12.90MPa
		σ_2	-108.30MPa	-102.76MPa	-94.97MPa	-84.67MPa

2.3 实验屈服面与理论屈服面对比

大量研究表明,高分子聚合物材料的屈服行为对温度和应变率敏感^[14,15],也有部分学者指出半晶态聚合物材料的屈服应力与静水压相关^[16],因此,在建立描述此类材料屈服行为的理论屈服面时需全面考虑上述因素的影响。常用的 Tresca 和 von-Mises 准则由于忽略了应力张量第一不变量及静水应力的影响,因此不足以充分描述聚合物材料的屈服行为。而经典的塑性理论则提出了静水压相关的屈服准则,如 Mohr-Coulomb 准则涵盖了静水压力的影响:

$$\tau_c = \tau_c^0 - \frac{\mu_c}{3} I_1 \quad (10)$$

式中: I_1 表示矩阵 σ 的对角线元素之和; τ_c^0 和 μ_c 是材料常数。Bowden 等^[17]讨论了 Mohr-Coulomb 屈服准则的适用范围,并提出一种修正的 von-Mises 准则,也就是 MMC 准则,它更适用于描述半晶态聚合物材料的塑性行为:

$$\frac{\sqrt{6J_2}}{3} = \tau_{Mc}^0 - \frac{\mu_{Mc}}{3} I_1 \quad (11)$$

式中: τ_{Mc}^0 和 μ_{Mc} 是材料常数,可以通过简单的力学实验确定。基于 MMC 屈服准则对聚合物塑性行为描述的适用性,同时考虑本文所研究的 PA66 为一种典型的半晶态聚合物,因此采用 MMC 准则描述 PA66 的后继屈服行为是可行的。图 12~图 14 给出了 PA66 在主应力空间下的后继屈服轨迹,在同一加载速率下,材料的实验屈服轨迹表现出随着预加载位移的增加而增大的趋势,所对应的理论屈服面也展示出几乎各向同性的扩张,表明了 MMC 屈服准则可以有效地反映 PA66 在不同预加载位移下 PA66 的塑性行为。

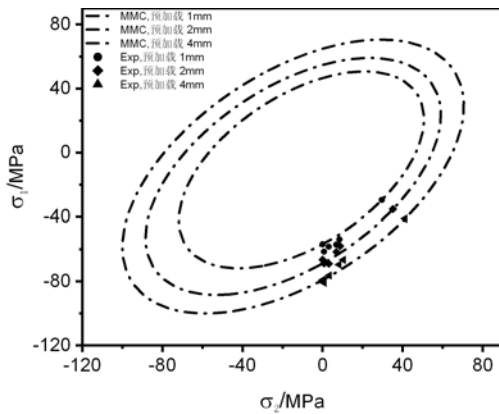


图12 加载速率4.8mm/min下PA66

在主应力空间的实验屈服面

Fig. 12 Experimental yield surface of PA66 in the principal stress space at a loading rate of 4.8mm/min

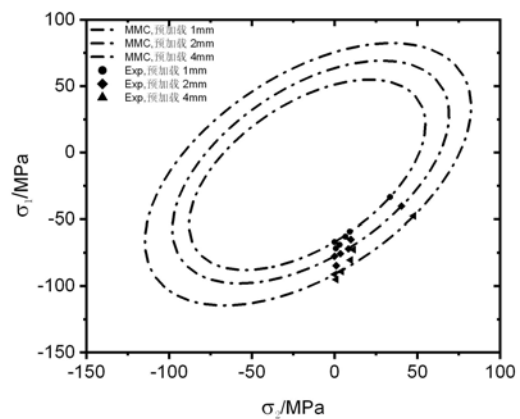


图13 加载速率48mm/min下PA66

在主应力空间的实验屈服面

Fig. 13 Experimental yield surface of PA66 in the principal stress space at a loading rate of 48mm/min

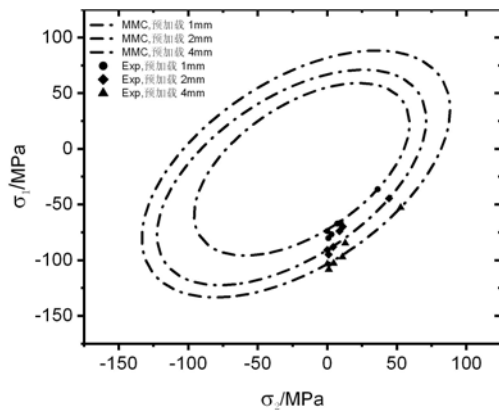


图14 加载速率480mm/min下PA66

在主应力空间的实验屈服面

Fig. 14 Experimental yield surface of PA66 in the principal stress space at a loading rate of 480mm/min

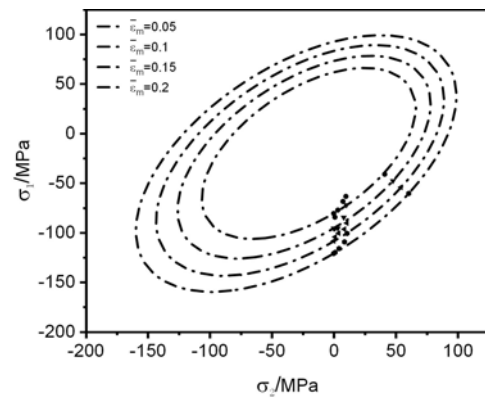


图15 PA66后继屈服面的演化

Fig. 15 The evolution of the subsequent loading surface of PA66 mises

2.4 PA66 后继屈服面的演化

为了更好地理解 PA66 的力学性能,需要对其后继屈服面的演化行为有充分的认识。这里需要指出的是,后继屈服面的演化需在同一塑性应变水平的基础上加以分析,而屈服面的演化是考虑了全应力状态的,因此需采用塑性应变的等效形式来反映材料的变形程度,且在遵循塑性功等效原理的基础上确定理论后继屈服面参数的变化。考虑到 von-Mises 等效应变相较于其他准则具有更简洁的表达形式,本文采用 von-Mises 等效塑性应变标定 PA66 后继屈服面的演化参数,得到如图 15 所示的 PA66 在不同等效塑性应变水平上的后继屈服面。由图可知,PA66 的后继屈服面随着等效塑性应变的增加,屈服面的中心位置保持不变,而屈服面的尺寸则不断增大,这表明 PA66 材料的后继屈服行为表现出等向强化的硬化规律。

3 结论

本文对不同预加载条件下 PA66 在压缩、剪切以及复合压剪工况下的力学行为进行了实验研究,分析了预加载工况及应变率对 PA66 后继屈服行为的影响,基于 MMC 准则讨论了 PA66 的后继屈服面,得到如下结论:

(1) 预加载提高了 PA66 的后继屈服强度,且材料的后继屈服强度表现出预加载位移的正相关性,预加载对 PA66 后继屈服行为的强化影响在全应力空间下是各向同性的。

(2) PA66 的后继屈服行为表现出显著的率敏感性,后继屈服强度随着应变率的增加而增加,应变率对 PA66 后继屈服强度的影响同样呈现出各向同性的特性。

(3) 通过不同等效塑性应变水平 PA66 后继屈服轨迹的演化分析发现,在本文所研究的等效塑性应变范围内,PA66 的后继屈服行为表现出等向强化的应变硬化规律。

参考文献:

- [1] Holmes D W, Loughran J G, Suehrcke H. Constitutive model for large strain deformation of semicrystalline polymers[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2006, 10(4):281—313.
- [2] 韩小梅. 汽车用尼龙国内外发展现状及其应用[J]. *科技创新与应用*, 2012(24):78 (HAN Xiaomei. The current situation of domestic and international development of Nylon for automobiles and its application[J]. *Technology Innovation and Application*, 2012(24):78 (in Chinese))
- [3] 段茜, 金涛, 邱吉, 等. 复合加载工况下 PA66 的屈服行为研究[J]. *太原理工大学学报*, 2018, 49(4):628—634 (DUAN Qian, JIN Tao, QIU Ji, et al. Yield behavior of PA66 under combined loading[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2018, 49(4):628—634 (in Chinese))
- [4] 吴衡毅, 马钢, 夏源明. PMMA 低、中应变率单向拉伸力学性能的实验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(2):193—199 (WU Hengyi, MA Gang, XIA Yuanming. Experimental study on mechanical properties of PMMA under unidirectional tensile at low and intermediate strain rates[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(2):193—199 (in Chinese))
- [5] 谢中秋, 张蓬蓬. PMMA 材料的动态压缩力学特性及应变率相关本构模型研究[J]. *实验力学*, 2013, 28(2):220—226 (XIE Zhongqiu, ZHANG Pengpeng. On the dynamic compression mechanical properties and strain rate related constitutive model of PMMA material[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(2):220—226 (in Chinese))
- [6] Jin Tao, Zhou Zhiwei, Shu Xuefeng, et al. Experimental investigation on the yield loci of PA66[J]. *Polymer Testing*, 2016, 51:148—150.
- [7] 索涛, 李玉龙, 刘元镭. 温度、应变率对航空 PMMA 压缩力学性能的影响研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2006, 24(4):547—550 (SUO Tao, LI Yulong, LIU Yuanyong. Study on temperature and strain rate effects on mechanical behavior of aeronautical PMMA[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2006, 24(4):547—550 (in Chinese))
- [8] Zhou Zhiwei, Su Buyun, Wang Zai, et al. Shear-compression failure behavior of PMMA at different loading rates [J]. *Materials Letters*, 2013, 109:151—153.
- [9] Jin Tao, Zhou Zhiwei, Wang Zai, et al. Quasi-static failure behaviour of PMMA under combined shear-compression loading[J]. *Polymer Testing*, 2015, 42:181—184.
- [10] 刘振国, 金涛, 树学峰. 压缩-剪切复合应力下 PMMA 材料的静态力学特性研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(6):760—768 (LIU Zhenguo, JIN Tao, SHU Xuefeng. Investigation on static mechanical properties of PMMA material subjected to compression-shear combined stress [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(6):760—768 (in Chinese))
- [11] 金涛. 半晶态聚合物屈服行为及宏观唯象本构研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016:1—108 (JIN Tao. Yield behavior and macroscopic phenomenological constitutive of semi-crystalline polymer [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016:1—108 (in Chinese))
- [12] 苏莉, 张克实, 张光, 等. 多晶铜后继屈服面的试验分析[J]. *机械强度*, 2008, 30(4):565—570 (SU Li, ZHANG Keshi, ZHANG Guang, et al. Experimental analysis on subsequent yield surface of polycrystalline copper[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2008, 30(4):565—570 (in Chinese))
- [13] Mair W M, Pugh H L D. Effect of pre-strain on yield surfaces in copper [J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1964, 6(2):150—163.
- [14] Serban D A, Weber G, Marsavina L, et al. Tensile properties of semi-crystalline thermoplastic polymers; effects

- of temperature and strain rates[J]. *Polymer Testing London*, 2013, 32(2):413–425.
- [15] Farrokh B, Khan A S. A strain rate dependent yield criterion for isotropic polymers: low to high rates of loading [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2010, 29(2):274–282.
- [16] Silano A A, Bhateja S K, Pae K D. Effects of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of polymers: polyurethane, polyoxymethylene, and branched polyethylene[J]. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 1974, 3(2):117–131.
- [17] Bowden P B, Jukes J A. The plastic flow of isotropic polymers[J]. *Journal of Materials Science*, 1972, 7(1):52–63.

Research on the influence of different preloads on the subsequent yield strength of PA66

ZHAN Xinxin, LUO Yayun, WANG Hefeng, JIN Tao, SHU Xuefeng

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In order to understand the effect of preloading on the mechanical properties of materials, a universal material testing machine was used to perform quasi-static tests of uniaxial compression, shear and combined compression-shear loaded with three strain rates on PA66 with different preload positions in this work. The research results show that the subsequent yield behavior and hardening behavior of PA66 under different preloading displacements perform significant strain rate sensitivity, and the magnitude of the preloading displacement has a significant effect on the subsequent yield strength of PA66. For the combined Shear-Compression test, the SCBS (Shear-Compression Bar Specimen) test method is used to introduce four different angles of the chute (15° , 30° , 45° and 50°), and the subsequent yielding of PA66 with different preload displacements is positive. Shear stress analysis shows that the positive and shear stresses of the four angles all increase with the increase of the preload displacement. The MMC yield criterion is introduced to verify the experimental yield loci and theoretical yield surface of the corresponding strain rate of different preloads. Finally, Mises equivalent plastic strain is used to calibrate the evolution of the subsequent yield surface of PA66 after preloading. The results show that within a certain range of plastic strain, the subsequent yield behavior of PA66 material exhibits an isotropically strengthened work hardening law.

Keywords: PA66; preload displacement; subsequent yield behavior; strain rate effect; quasi-static