

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.02.018

聚四氟乙烯复合材料力学性能研究与有限元分析*

吴兴彬,李大永,唐伟琴

(上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

摘要:在万能材料试验机上对聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料进行不同温度及不同拉伸速率下的单轴拉伸性能测试,获得温度范围为 253~333 K、拉伸速率范围为 10~200 mm/min 条件下的一系列拉伸应力-应变曲线,发现 PTFE 复合材料的拉伸性能对温度变化敏感,对拉伸速率变化不敏感。为了能定量描述 PTFE 复合材料的力学特性,同时也为有限元数值模拟提供材料模型,根据拉伸试验结果,建立了 PTFE 复合材料单轴拉伸本构模型,该本构模型以数学公式的形式较好地表达了 PTFE 复合材料应力-应变曲线随拉伸速率及温度的变化关系。最后,对 PTFE 复合材料板材进行了单向压缩实验,并利用 ABAQUS 软件,使用所建立的本构模型,对 PTFE 复合材料板材进行单向压缩的有限元分析,通过仿真结果与实际试验结果对比,验证了建立的本构模型的正确性,表明该本构模型具有一定的通用性。

关键词:聚四氟乙烯;拉伸应力-应变曲线;本构模型

中图分类号:TQ325.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2014)02-0074-04

Study on Mechanical Properties and FEM Analysis of PTFE Composites

Wu Xingbin, Li Dayong, Tang Weiqin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstracts: The uniaxial tensile properties tests of PTFE composites were done using the universal material testing machine under different temperatures and tensile rates, a series of tensile stress-strain curves under temperatures ranging from 253 K to 333 K and tensile rates ranging from 10 mm/min to 200 mm/min were obtained for the PTFE composites. It is found that the tensile properties of PTFE composites are sensitive to the temperature change and not to the tensile rate change. In order to describe the mechanical properties of PTFE composites quantitatively and supply a material model for FEM simulation, based on the experimental results, a uniaxial tensile constitutive model was developed. The constitutive model can describe the stress-strain relationship under different temperatures and tensile rates quantitatively. At last, the uniaxial compression test of PTFE composite panel was done, then using ABAQUS and the constitutive model, A FEM analysis for compression of PTFE composite panel was carried out. Compared with the data obtained from simulation and experiment, the constitutive model was verified, which indicates the constitutive model set up has good generality.

Keywords: polytetrafluoroethylene; tensile stress-strain curve; constitutive model

聚四氟乙烯 (PTFE) 自 20 世纪 50 年代投入工业生产以来,以其优异的性能广泛应用于机械、石油化工、航天航空等诸多领域。PTFE 性质稳定,具有很高的耐腐蚀、耐老化、自润滑以及不粘性,是工业领域一种重要的密封材料、耐腐蚀材料。PTFE 作为工业设备中的一个重要部件,其力学性能对设备整体运行的稳定性有重要的影响,因此,研究 PTFE 的力学性能具有重要的意义。

目前国内对 PTFE 的研究主要集中在各种改性填料对 PTFE 力学性能和摩擦性能的影响。例如何春霞等^[1]对 4 种不同纳米材料填充 PTFE 复合材料进行了拉伸和硬度试验,结果表明纳米氧化铝填充

PTFE 有比较好的力学性能;牛永平等^[2]研究了纳米氧化铝改性 PTFE 复合材料中,不同纳米氧化铝含量对复合材料硬度、摩擦系数和磨痕宽度的影响。然而,PTFE 复合材料的性能除了受改性填料的影响外,还受应变率及环境温度的影响,但目前国内外还没有这方面的研究。

为此,笔者先通过单轴拉伸试验,对 PTFE 复合材料在不同拉伸速率及环境温度下的力学性能进行了研究。由于 PTFE 复合材料的变形是一种典型

* 国家 863 计划项目 (2013AA031604)

联系人:吴兴彬,硕士,主要研究方向为塑性成型

收稿日期:2013-11-18

的非线性大变形过程。在有限元仿真计算中,对于非线性大变形的高分子材料没有统一的材料模型与之对应。为此,根据试验结果,建立了 PTFE 复合材料本构模型,该模型可以为 PTFE 复合材料仿真计算中材料模型的编写提供理论基础。最后,利用 ABAQUS 软件,结合之前得到的本构模型,对 PTFE 板材进行有限元分析,通过仿真结果与单向压缩试验结果的对比,验证了本构模型的正确性及通用性。

1 PTFE 单轴拉伸试验

单轴拉伸试样通过裁切由某公司提供的厚度 1.5 mm、直径 206 mm 的 PTFE 复合材料膜片而制得。试样形状及尺寸如图 1 所示,拉伸试验参照 GB/T 1040—2006 执行,引伸计标距为 25 mm,试验设备为德国 Instron 公司 E3000 型万能材料试验机。

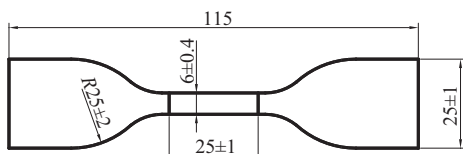


图 1 单轴拉伸试样

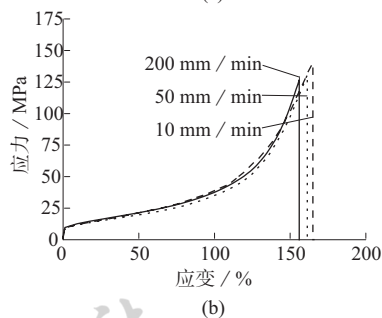
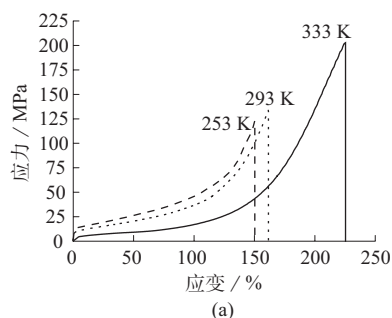
环境温度选择 253、293 和 333 K,拉伸速率选择 10、50 和 200 mm/min,共做 5 组试验,每组试验重复 3 次,如表 1 所示。

表 1 PTFE 复合材料单轴拉伸试验条件

试验序号	拉伸速率/(mm·min ⁻¹)	环境温度/K
1 [#]	10	293
2 [#]	50	253
3 [#]	50	293
4 [#]	50	333
5 [#]	200	293

图 2 为 PTFE 复合材料单轴拉伸应力-应变曲线。从图 2 可以看到,试样在加载后开始弹性变形,在很小的应变范围内经历非线性弹性阶段达到屈服;然后材料进入平缓的塑性变形阶段,在很小的应力下,即可产生很大的塑性变形;随后出现应变硬化现象,应力随应变的增大而急剧变大,并最终达到试样的强度极限(拉伸强度)而产生断裂。同时可以看出,PTFE 复合材料的应力-应变曲线对温度变化敏感,对拉伸速率变化不敏感。

根据 PTFE 复合材料单轴拉伸应力-应变曲线,对试验数据进行处理可得到 PTFE 复合材料的拉伸弹性模量、屈服应力、拉伸强度及断裂伸长率,如表 2 所示。由表 2 中的 2[#]、3[#]、4[#] 可以看出,PTFE 复合材料的拉伸弹性模量和屈服应力与温度呈负相关,温度升高,材料的拉伸弹性模量和屈服应力都会明



a—拉伸速率 50 mm/min; b—环境温度 293 K

图 2 不同拉伸条件下 PTFE 复合材料的拉伸应力-应变曲线

显降低;而拉伸强度和断裂伸长率与温度呈正相关,温度越高,拉伸强度越高,断裂伸长率也越大。由 1[#]、3[#]、5[#] 可看出,拉伸速率对 PTFE 复合材料拉伸性能的影响趋势与温度正好相反,但影响程度并不大。

表 2 不同拉伸条件下 PTFE 复合材料试样的拉伸性能

试验序号	拉伸弹性模量 / MPa	屈服应力 / MPa	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
1 [#]	400.8	9.62	140.0	426.8
2 [#]	670.1	13.17	122.8	351.5
3 [#]	407.9	9.79	133.1	418.2
4 [#]	285.9	7.32	202.8	1536.5
5 [#]	500.2	10.16	125.9	393.7

2 单轴拉伸本构模型

PTFE 是一种典型的高分子材料,其力学性能具有很强的黏弹性行为^[3]。建立高聚物黏弹体本构模型的方法主要有唯象性方法和分子论方法^[4]。分子论方法通过建立描述高聚物大分子链流动的模型,研究微观结构对宏观运动的影响。唯象性方法则是直接给出高聚物黏弹体在变形过程中应力、应变、应变率和温度等变量间的关系,其中的系数则要通过试验确定。PTFE 复合材料单轴拉伸是典型的非线性大变形过程,故采用唯象性方法建立本构模型。

美国塔夫茨大学的 Y. P. Duan 提出了一种能较好描述玻璃态聚合物力学性能的唯一性本构模型——DSGZ 模型^[5-6]。通过分析比较 DSGZ 模型曲线与 PTFE 复合材料应力-应变曲线的异同,发现两者除在变形软化区存在较大差异外,其它区域变

化基本一致。因此在 DSGZ 模型的软化区添加因式 $1/[1-e^{-\varepsilon\delta(T/n)}]$, 建立了 PTFE 复合材料单轴拉伸本构模型, 称之为 WDSGZ 模型。模型表达式如式 (1)、式 (2)、式 (3) 所示。

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = K \left\{ f(\varepsilon) + \left[\frac{\varepsilon e^{1-\frac{\varepsilon}{C_3 h(\dot{\varepsilon}, T)}}}{C_3 h(\dot{\varepsilon}, T)} \frac{1}{1 - e^{-\varepsilon \delta \frac{T}{n}}} - f(\varepsilon) \right] e^{[\ln g(\dot{\varepsilon}, T) - C_4] \varepsilon} \right\} h(\dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

$$f(\varepsilon) = (e^{-C_1 \varepsilon} + \varepsilon^{C_2})(1 - e^{-a\varepsilon}) \quad (2)$$

$$h(\dot{\varepsilon}, T) = \dot{\varepsilon}^m e^{\frac{a}{T}} \quad (3)$$

式中: ε ——拉伸应变;

$\dot{\varepsilon}$ ——拉伸速率;

T ——绝对温度;

K ——单轴拉伸比例系数;

C_3, C_4 ——材料系数;

δ ——软化系数;

n, a ——温度敏感常数;

$g(\dot{\varepsilon}, T)$ —— $h(\dot{\varepsilon}, T)$ 的无量纲形式;

C_1, C_2, α ——应变硬化系数;

m ——拉伸速率敏感系数。

按照该模型系数的计算方法和步骤, 并通过一定的数学处理方法, 最终得到所有的参数值如表 3 所示。

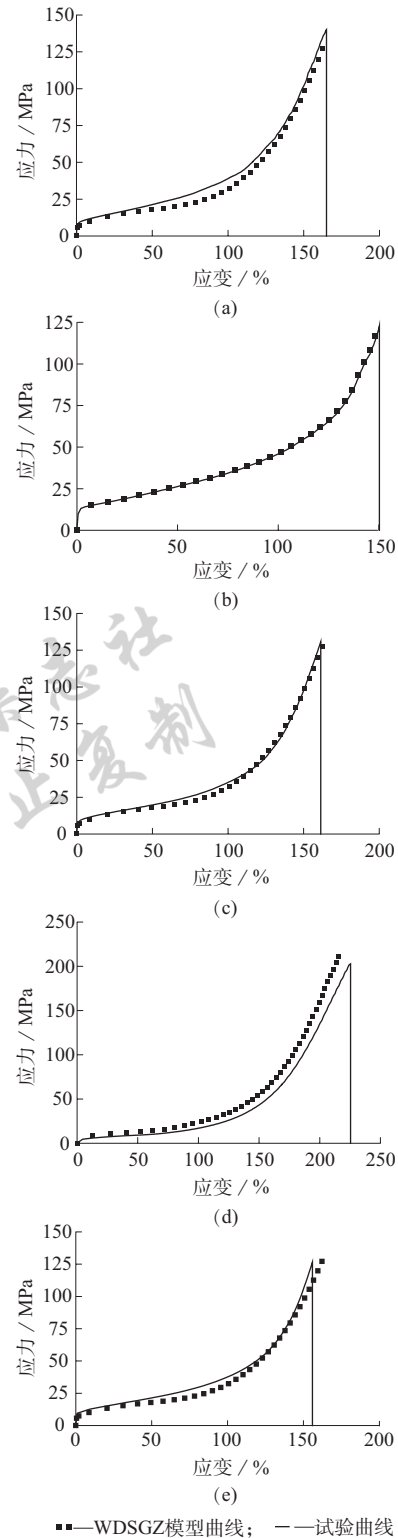
表 3 WDSGZ 模型参数

C_1	C_2	m	a	K	C_4	α	C_3	n	δ
0.47	3.5	0.0019	608	3	8.5	36	0.17	118.2	1.95

将上述参数代入本构方程, 绘出 PTFE 复合材料单轴拉伸应力-应变曲线, 与试验所得曲线进行比较, 如图 3 所示。由图 3 可知, 笔者提出的本构模型计算结果与实际试验结果相差不大, 能够较好地反映 PTFE 复合材料在单轴拉伸时的力学曲线, 故 WDSGZ 模型可适用于对 PTFE 复合材料进行力学分析。

3 有限元分析及验证

由于材料模型是由单轴拉伸试验获得的, 因此, 该模型可以通过单轴拉伸试验得到准确验证。为了进一步验证该模型是否具有通用性, 笔者进行了 PTFE 复合材料单向压缩试验, 并进行了相应的有限元数值模拟。通过 ABAQUS 软件, 建立两面均匀受压的 PTFE 复合材料薄板三维有限元模型, PTFE 复合材料薄板规格为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 材料模型使用 WDSGZ 模型。PTFE 复合材料薄板压缩量为 0.35 mm , 计算采用三维线性缩减积分单元。同时, 结合有限元



拉伸试验条件: a—1[#]; b—3[#]; c—2[#]; d—4[#]; e—5[#]

图 3 WDSGZ 模型预测的拉伸应力-应变曲线和试验结果对比图
模型, 进行 PTFE 复合材料的单向压缩试验。图 4 为仿真结果与试验结果对比图, 下压 0.35 mm 时, PTFE 复合材料薄板上的最大应力为 118 MPa 。从图 4 可以看到, 受压后, 两者形状变化基本一致。

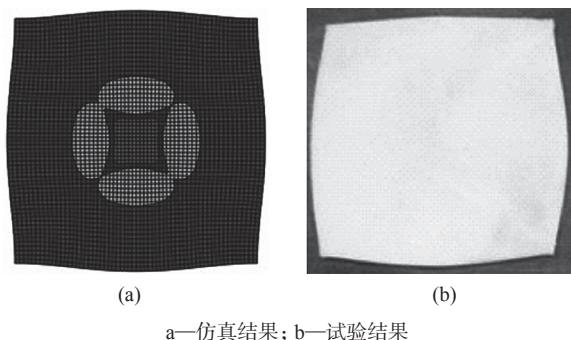


图4 仿真结果与试验结果对比图

提取有限元模型的支反力,可以得到模型受压时的压力-位移曲线,将该曲线与试验所得曲线进行比较,如图5所示。由图5可知,有限元模型所得结果与试验结果相符度很好,从而可以验证本构模型的正确性。

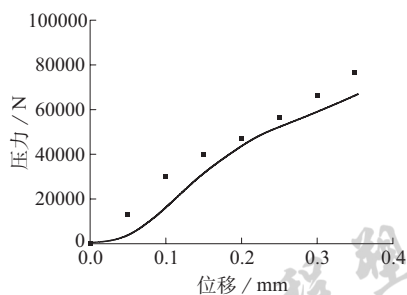


图5 仿真结果与试验压力-位移曲线对比图

4 结论

(1) 通过 PTFE 复合材料单轴拉伸试验,研究了其在不同温度及不同拉伸速率下的拉伸应力-应变曲线的变化规律,发现 PTFE 复合材料拉伸性能对温度变化敏感,对拉伸速率变化不敏感,这为进一步研究 PTFE 复合材料的力学性能提供了试验依据。

(2) 根据拉伸试验结果,基于 DSGZ 模型,建立了 PTFE 复合材料的拉伸本构模型。所建立的拉伸本构模型较好地反映了不同温度和不同拉伸速率对

其拉伸性能的影响,为研究建立比较全面的材料模型提供了一定的参考依据。

(3) 通过对 PTFE 复合材料单向压缩的有限元模拟和试验对比分析,验证了该模型的正确性。这说明该模型不仅能描述 PTFE 复合材料受拉时的力学性能,同时也能很好地描述 PTFE 复合材料受压时的性能。该模型可以作为材料模型用于 PTFE 复合材料有限元分析,具有一定的通用性。

参考文献

- [1] 何春霞,顾红艳,丁为民. 不同纳米材料填充聚四氟乙烯复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用,2000,28(12):1-3.
He Chuanxia, Gu Hongyan, Ding Weimin. Mechanical properties of PTFE composites filled with different nanometer materials[J]. Engineering Plastics Application, 2000, 28(12):1-3.
- [2] 牛永平,韩明,杜三明,等. 纳米氧化铝改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能研究[J]. 工程塑料应用,2010,38(2):59-62.
Niu Yongping, Han Ming, Du Sanming, et al. Study on friction and wear properties of nano- Al_2O_3 modified PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(2):59-62.
- [3] 王仁,陈晓红. 高分子材料粘弹塑性本构关系研究进展[J]. 力学进展,1995,25(3):289-302.
Wang Ren, Chen Xiaohong. Progress of the study on constitutive relation of polymer materials[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(3):289-302.
- [4] 顾国芳,浦鸿汀. 聚合物流变学基础[M]. 上海:同济大学出版社,2000.
Gu Guofang, Pu Hongting. Polymer rheology basis[M]. Shanghai: Tongji University press, 2000.
- [5] Duan Y, Saigal A, Greif R, et al. Impact behavior and modeling of engineering polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 2003, 43(1):112-124.
- [6] Singh R, Saigal A, Greif R. Impact behavior of recycled core composite polymeric enclosures[J]. Composite structures, 2003, 61(4):321-332.

2013 年塑料市场整体情况表现不均衡

2013 年塑料市场整体情况表现不均衡,亮点较少,除聚烯烃行业略有起色之外,大部分产品在供应过剩、产能过剩、库存过剩、需求增长低于产能扩张等一系列因素的影响下,走出疲软行情。生意社塑料分析师认为,2014 年仍是不容乐观的一年,从成本方面来看,在美元持续贬值的经济背景及地区局势紧张的政治背景下,原油、单体以及化工原材料市场价格将继续高企,未来一年高成本将是制约塑料行业发展的重要因素,企业的利润率将进一步下滑,成本向终端转嫁会更加困难,塑料原料的价格将会在成本激增效应下被动跟涨。

从供需方面来看,塑料原料供需矛盾或将进一步激化,

2014 年塑料投产扩能的比例仍较大,尤其是聚烯烃,另外, PVC, PS, ABS 这些产能严重过剩的行业仍将受房地产开工率降低、汽车及家电行业的增速下滑等负面因素拖累;工程塑料方面,廉价进口料的冲击、低端料的严重过剩等因素使其 2014 年难以走出不景气现状。

外需利好或难以拉动塑料行情:2013 年 1~11 月份塑料制品出口总量 814.77 万 t,较 2012 年同期增长 5.6%,增速小幅回升,受欧美经济体复苏影响,预计 2014 年出口增速会继续小幅回升,但需求的增长仍然难以抵消产能的扩张,后果就是开工率的下滑。总之,2014 年塑料市场将面临严峻考验,低利润、低开工率、高成本与低需求将继续存在或升级。
(生意社)