

不同负荷下锦纶帘线失效行为试验与仿真研究

罗行, 吴健*, 陈达, 栗本龙, 王友善, 李哲

[哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所, 山东 威海 264209]

摘要:建立了锦纶帘线的有限元模型,并通过仿真和试验研究不同负荷下锦纶帘线的失效行为。结果表明:随着负荷的增大,锦纶帘线的捻距增大,捻径减小,捻角也相应减小;锦纶帘线各相关参数变化呈非线性,仿真值与试验结果吻合;由于断裂时两股单线受力不均,帘线断裂处呈绒毛状断口,拉伸速率和环境温度对其断口形态具有显著影响。

关键词:锦纶帘线;仿真模型;负荷;失效行为;几何特征;断裂

中图分类号:TQ330.38⁺9

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2020)12-0718-04

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2020.12.0718



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

锦纶帘线与橡胶复合使用可在保证橡胶高弹性的同时,极大地提高复合材料的性能,已被广泛应用于航天、航空和轮胎制造等领域^[1]。橡胶帘线复合材料制品在各种复杂工况下往往承受多种非线性负荷,导致材料性能下降,严重时会发生断裂失效,直接影响制品安全性。

钟绍明等^[2]从分子结构层面研究了锦纶与聚丙烯共混物的极限失效强度。R. D. Averett等^[3-4]研究了锦纶66纤维在单调和循环载荷下的力学行为。A. Vahidifar等^[5]研究表明,锦纶纤维用作橡胶帘线时施加循环负荷引起的材料软化可能取决于所施加的最大负荷。同时,帘线对于橡胶复合材料的界面力学性能也具有重要影响^[6-11]。A. Lechtenboechmer等^[12]研究了锦纶纤维与橡胶的界面力学性能及标准。此外,锦纶帘线具有很大的优势,饶盛^[13]研究了锦纶-芳纶复合帘线在航空轮胎中的应用,它是航空轮胎的理想骨架材料。锦纶纤维对冲击也有较好改善,R. J. M. Borggreve等^[14]研究了改性锦纶/橡胶复合材料的抗冲击特性。黄小双等^[15]提出了一种考虑应变率效应的帘线/橡胶复合材料各向异性粘-超弹性本构模型,

基于此研究了不同加载和变形条件下的力学行为。邢春鹏等^[16]建立了帘线/橡胶复合材料的本构关系,对缓冲器的力学性能进行了分析。任杰等^[17]提出了一种基于纤维帘线/橡胶复合材料细观力学的精确建模方法,对适应性橡胶底座受压膨胀过程进行了数值模拟与试验研究。张丰发等^[18]提出了一个新的帘线/橡胶复合材料的拉伸断裂失效准则。张淑芳等^[19]研究了三元乙丙橡胶增韧锦纶等几种复合材料的断裂行为。刘健等^[20-21]使用rebar单元模拟帘线层建立了橡胶帘线制品的有限元模型。综上所述,锦纶帘线的结构和失效行为对帘线/橡胶复合材料等制品的力学性能具有重要影响,帘线的失效行为研究对高性能复合材料制品的研制具有重要意义。

本工作研究锦纶帘线在不同负荷情况下的几何特征变化规律,并结合帘线的拉伸试验,建立应力应变与几何特征的关系,采用数码显微镜分析不同工况下锦纶帘线的断裂形貌,揭示其断裂失效的影响因素,为帘线增强橡胶复合材料制备与性能分析奠定基础。

1 帘线拉伸试验

按照GB/T 32108—2015《浸胶线绳、纱线和帘线拉伸性能的试验方法》进行1400dtex/2锦纶66帘线拉伸试验。采用砝码进行负荷加载,根据锦纶帘线拉伸断裂所能承受的最大拉力以及所持有的砝码规格拟定0,2,5和7 kg四种负荷进行锦纶

基金项目:国家自然科学基金重大项目课题(51790502);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018QEE004);山东省重点研发计划项目(2019GGX102051);威海科技计划资助项目(2017DXGJ011)

作者简介:罗行(1997—),男,重庆人,哈尔滨工业大学(威海)在读硕士研究生,主要从事橡胶帘线复合材料力学性能测试与仿真研究。

*通信联系人(wujian@hitwh.edu.cn)

帘线的几何特征分析。采用B011型数码显微镜记录加载状态下的锦纶帘线,测量其各参数的变化情况,选择帘线各段多次测量,结果取平均值,记录数据并分析。

2 帘线有限元仿真

2.1 本构模型

经多次拉断试验得到的锦纶帘线拉伸应力-应变关系曲线如图1所示。

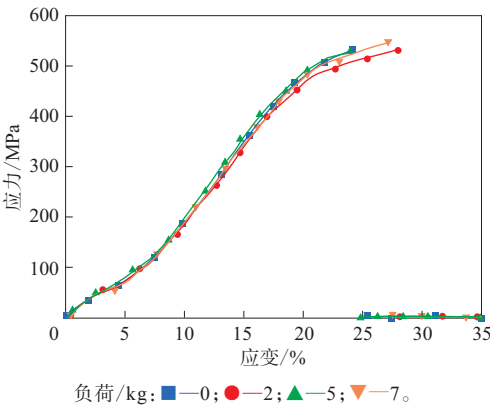


图1 锦纶帘线拉伸应力-应变关系曲线

从图1可以看出,锦纶帘线拉伸曲线具有典型的非线性特征。基于此,建立锦纶帘线的Yeoh超弹性本构模型。

2.2 有限元模型

将结构为双股加捻的锦纶帘线作为最基本帘线单元,采用Abaqus软件建立了锦纶帘线结构的有限元模型,如图2所示。

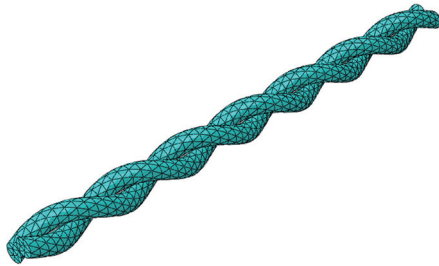


图2 双股加捻锦纶帘线有限元模型

由于锦纶与锦纶的静摩擦因数介于0.15~0.25之间,可建立两股锦纶帘线束表面间的接触关系,摩擦因数取0.2。锦纶帘线网格采用C3D10H,共4 270个单元。帘线两端施加约束,一端施加固定边界条件,另一端分别施加2,5和7 kg

的负荷。

3 结果与讨论

3.1 几何特征

自然状态下锦纶帘线数码显微照片如图3所示, L 为捻距, d 为捻径, θ 为捻角。不同负荷情况下锦纶帘线的几何特征参数如表1所示。



图3 锦纶帘线的数码显微照片

表1 不同负荷情况下锦纶帘线的几何特征参数

负荷/kg	L/mm		d/mm		$\theta/(\text{^\circ})$
	试验值	仿真值	试验值	仿真值	
0	2.76	2.761 19	0.74	0.739 58	24.5
2	2.88	2.838 08	0.70	0.696 45	23.9
5	3.04	3.015 91	0.64	0.636 15	22.8
7	3.12	3.185 92	0.62	0.612 52	21.7

从表1可以看出:随着负荷的增大,锦纶帘线的捻距增大,捻径减小,捻角也相应减小;锦纶帘线各相关参数变化呈非线性;仿真值与试验结果吻合,说明仿真模型是准确的。

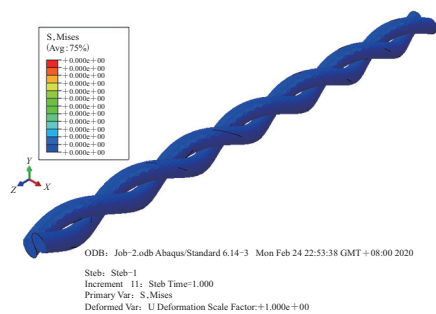
基于仿真模型预测的锦纶帘线有限元应力云图如图4所示。

从图4可以看出,最大应力位于两股锦纶帘线束相接触处,且帘线在负荷状态下伸长,各相关参数发生相应变化。

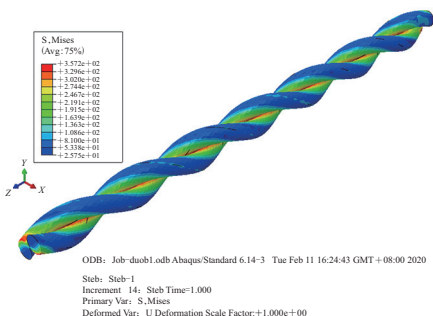
3.2 断口形态

不同拉伸速率下的锦纶帘线断口形态如图5所示。

从图5可以看出,拉伸速率增大,锦纶帘线单股分离更明显,断口更齐整,温度高时断口更散。帘线断裂处基本上呈绒毛状断口,且加捻的两股单线被分开,靠近断口分岔处捻度急剧增大。这是因为两股单线受力不均,其中一股受力更大使伸长率增大,另一股被拉断后略有回弹缠绕其上使捻度增大。同时,锦纶帘线的拉伸强度随拉伸速率的增大和环境温度的不同有所变化,其力学性能的差异明显表现在断口形态上。



(a) 零负荷



(b) 2 kg负荷

图4 锦纶帘线有限元应力云图

4 结论

分析了锦纶帘线在不同负荷状态下的拉伸特性,并建立了其有限元仿真模型。通过试验和仿真得到以下结论。

(1)随着负荷的增大,锦纶帘线的捻距增大,捻径减小,捻角也相应减小;锦纶帘线各相关参数变化呈非线性,仿真值与试验结果吻合。

(2)锦纶帘线断裂处呈绒毛状断口,主要是因为断裂时两股单线受力不均,拉伸速率和环境温度对其断口形态具有显著影响。

参考文献:

- [1] 白荣光,杨朝勇,李洪,等. 锦纶66浸胶帘线研究进展[J]. 轮胎工业, 2016, 36(8): 455-457.
- [2] 钟绍明,朱兴元,谢志民,等. 聚丙烯/尼龙1010的失效强度预报[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 21(1): 255-259.
- [3] Averett R D, Realf M L, Michielsen S, et al. Mechanical Behavior of Nylon 66 Fibers under Monotonic and Cyclic Loading[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(11-12): 1671-1681.
- [4] Li X, Wei Y, Feng Q, et al. Mechanical Behavior of Nylon 66 Tyre Cord under Monotonic and Cyclic Extension: Experiments and Constitutive Modeling[J]. Fibers and Polymers, 2017, 18(3): 542-548.

(a) 100 mm · min⁻¹, 20 °C(b) 200 mm · min⁻¹, 20 °C(c) 300 mm · min⁻¹, 20 °C(d) 100 mm · min⁻¹, 50 °C

图5 不同拉伸速率下的锦纶帘线断口形态

- [5] Vahidifar A, Esmizadeh E, Naderi G, et al. Ratcheting Response of Nylon Fiber Reinforced Natural Rubber/Styrene Butadiene Rubber Composites under Uniaxial Stress Cycles: Experimental Studies[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 41(2): 348-357.
- [6] 李杨. 帘线-橡胶复合材料界面力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

- [7] 黄良平, 李燕敏, 杨军. 空气弹簧胶囊帘线与橡胶粘合性能的研究[J]. 橡胶科技, 2008, 6(5): 24-26.
- [8] 贺惠英, 李彤. 浸胶帘线带式屈挠疲劳试验方法研究[J]. 轮胎工业, 2018, 38(6): 375-377.
- [9] 于晓波, 董彬, 刘畅, 等. 环氧化天然橡胶和偶联剂Si69对芳纶帘线与天然橡胶粘合性能的影响[J]. 橡胶工业, 2015, 62(5): 298-300.
- [10] 万纪君, 李英哲, 李卓, 等. 增粘树脂对间苯二酚-甲醛-胶乳体系浸渍连续玄武岩纤维帘线/橡胶粘合性能的影响[J]. 橡胶工业, 2018, 65(7): 756-760.
- [11] 祁世宇. 聚酯帘线与橡胶粘合用间苯二酚-甲醛树脂胶乳混合液改性剂的合成[J]. 轮胎工业, 2018, 38(12): 757-759.
- [12] Lechtenboehmer A, Moneypenny H G, Mersch F. A Review of Polymer Interfaces in Tyre Technology[J]. Polymer International, 1990, 22(4): 265-301.
- [13] 饶盛. 航空轮胎的理想骨架材料[J]. 军民两用技术与产品, 2014, 26(6): 57-58.
- [14] Borggreve R J M, Gaymans R J, Schuijjer J. Impact Behaviour of Nylon-Rubber Blends: VI. Influence of the Mechanical Properties of the Elastomer[J]. Polymer, 2017, 30(1): 71-77.
- [15] 黄小双, 彭雄奇, 张必超. 帘线/橡胶复合材料各向异性粘-超弹性本构模型[J]. 力学学报, 2015, 48(1): 140-145.
- [16] 邢春鹏, 赵衡柱, 吴新跃. 帘线/橡胶复合材料缓冲器力学性能优化[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, 1(3): 60-63.
- [17] 任杰, 仲健林, 马大为. 一种基于帘线/橡胶复合材料细观力学的精确建模方法[J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1516-1524.
- [18] 张丰发, 杜星文, 匡震邦. 拉伸条件下帘线/橡胶复合材料的失效准则[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 832-835.
- [19] 张淑芳, 冀克俭, 张银生. 几种复合材料的微观断裂行为研究[J]. 工程塑料应用, 1996, 24(2): 41-44.
- [20] 刘健, 何琳, 赵应龙, 等. 基于三维实体仿真模型的气囊隔振器刚度特性研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(6): 28-31.
- [21] 林国英, 刘少义, 许恒波. 基于Abaqus的汽车用空气弹簧的有限元分析及试验研究[J]. 橡胶工业, 2015, 62(6): 363-366.

收稿日期: 2020-07-25

Experimental and Simulation Research on Failure Behavior of Nylon Cord under Different Loads

LUO Hang, WU Jian, CHEN Da, SU Benlong, WANG Youshan, LI Zhe

(Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: A finite element model of nylon cord was established, and the failure behavior of nylon cord under different loads was investigated by simulation and experiment. The results showed that, with the increase of load, the twist length of the nylon cord increased, the twist diameter decreased and the twist angle decreased accordingly. The changes of the relevant parameters of the nylon cord were non-linear and the simulation results were consistent with the test results. Because of the uneven stress on the two strands during the break, the fractured surface was fluffy, and the tensile rate and ambient temperature had a significant effect on the fracture morphology.

Key words: nylon cord; simulation model; load; failure behavior; geometric feature; fracture

一种采用熔盐热处理废旧轮胎制备炭黑的方法

由安徽省克林泰迩再生资源科技有限公司申请的专利(公布号 CN 111484758A, 公布日期 2020-08-04)“一种采用熔盐热处理废旧轮胎制备炭黑的方法”,公开了一种采用熔盐热处理废旧轮胎制备炭黑的方法,通过梯度加热对废旧轮胎与熔盐混合料进行热处理,使轮胎胶粒的内外温度得以同步均匀升高,有助于实现后续轮胎胶粉内外的同步高效裂解,同时利用熔盐的熔融特性,使

热裂解过程中胶粉内部的二硫键断裂,并使热裂解中的无机硫、钙等杂质组分溶出分散于熔盐体系中;利用高温的气态水分子热能对轮胎胶粉进行热裂解处理,高温气态水分子能够促使轮胎胶粉裂解以形成炭黑等固态产物与烷烃气、水、二氧化碳等气态产物,同时熔盐可溶解于水中得以去除,不仅有效去除无机硫、钙等杂质,且熔盐溶解后在形成的炭黑产物内部留下丰富的孔隙结构,从而获得高品质的炭黑产物。

(本刊编辑部 马 晓)