

特约来稿

帘线/橡胶复合材料多层结构的力学特性及失效形式研究

吴健, 罗行, 郭晓浓, 赵悦皓, 粟本龙, 李哲, 王友善

[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: 研究不同帘线层接头搭接形式和不同搭接段间距下的帘线/橡胶复合材料的力学特性和失效形式。结果表明: 帘线/橡胶复合材料在不同搭接形式下的力学行为具有较大非线性, 搭接段间距为5 mm时的凹型凸型搭接试样的综合力学性能最优; 帘线/橡胶复合材料的搭接段间距为5和15 mm时, 试样主要失效形式为搭接处断裂, 此处的帘线层和橡胶层所受应力最大; 当搭接段间距为25 mm时, 易发生界面滑脱和端头断裂失效。

关键词: 帘线; 橡胶; 复合材料; 搭接形式; 搭接段间距; 力学特性; 失效形式

中图分类号: TQ330.38⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2021)02-0067-04

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2021.02.0067



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

帘线/橡胶复合材料因其优异的力学性能,在轮胎等橡胶制品中得到广泛应用,但当受到过大的突变载荷时常常发生断裂失效。由于实际橡胶制品中所采用的帘线搭接方式的差异和搭接段间距等工艺参数的不同,通常会导致不同的复合材料强度和失效形式。

近几十年来,国内外对橡胶复合材料力学性能已开展了较多的研究,也取得了一些成果。张福范^[1]利用能量法研究了胶层复合材料接头的层间应力。张阿盈^[2]基于Tsai等人的理论分析方法

(TOM方法)又提出了复合材料胶层接头分析的改进方法,并用于接头剪应力的分析。J. Whitney^[3]结合高阶板理论,提出了对于复合材料双搭接接头的应力分析方式。W. Leslie等^[4]用扫描波长干涉法对复合材料搭接接头疲劳损伤的研究表明,搭接方式和搭接接头对材料强度有很大影响。李澄^[5]研究了拼接与搭接铺层对复合材料力学性能的影响。陶永强等^[6]揭示了搭接长度对Z销头加固的单搭接接头连接性能的影响。张丰发等^[7]提出了一种在拉伸条件下帘线/橡胶复合材料新的失效准则。郭震等^[8]针对复合材料单搭接接头的拉伸性能进行了有限元建模,分析了不同搭接长度对搭接接头的应力和破坏模式的影响。

此外,陈想等^[9]对帘线/橡胶复合材料的界面粘合性能进行了研究,主要研究了频率和温度的影响。李利等^[10]对帘线-橡胶力学性能测试开展了研究。可见,目前对于帘线/橡胶复合材料试验研究主要集中在单一帘线与橡胶的粘合性能。然而,帘线/橡胶复合材料多层结构形式对其失效也有显著影响。在多层搭接时需考虑到搭接段间距的影响,这方面的相关研究较为欠缺。由于接头不同搭接形式及多层结构工艺参数对帘线/橡胶复合材料的力学性能有着至关重要的影响,因此,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075119); 国家自然科学基金重大项目课题(51790502); 山东省自然科学基金青年基金资助项目(ZR2018QEE004); 山东省重点研发计划项目(2019GGX102051)



作者简介: 吴健(1984—),男,浙江义乌人,现任哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院院长助理,副教授,博士生导师。2010年博士毕业于哈尔滨工业大学,面向国家大飞机等重大战略需求,长期从事橡胶等柔性复合材料设计、仿真分析与测试评价等技术研究。承担了国家自然科学基金重大项目子课题及面上项目、航天支撑基金、山东省重点研发计划、山东省青年基金及中国航发合作项目等15项课题,在国内外科技期刊上发表论文30余篇,授权国家发明专利6项,软件著作权3项。

E-mail: wujian@hitwh.edu.cn

研究搭接段间距对复合材料多层结构的力学性能影响尤为重要。

为此,本工作针对典型帘线/橡胶复合材料结构,开展不同帘线层接头搭接形式和不同搭接段间距下橡胶复合材料结构的力学行为研究,以揭示其对帘线/橡胶复合材料的失效形式以及强度等力学性能的影响规律,为工程中橡胶复合材料制品的设计与制备提供依据。

1 实验

1.1 试样制备

帘线层接头搭接被广泛应用于帘线/橡胶复合材料,当帘线增强层的层数较多时,接头搭接段间距是影响搭接性能的重要因素之一。搭接段间距是指相邻两层帘线的搭接重叠部分之间的间距,如图1所示。基于帘线/橡胶复合材料3层搭接设计结构的基本搭接组合形式包括顺型顺式、顺型逆式和凹型凸型,如图2所示。

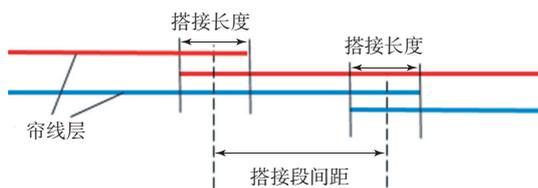


图1 帘线搭接段间距示意



(a) 顺型顺式组合



(b) 顺型逆式组合



(c) 凹型凸型组合

图2 3种基本搭接组合形式示意

为研究不同帘线层与橡胶间形成结构的失效状态,制备3种搭接形式下搭接段间距分别为5、15和25 mm的试样若干个,搭接长度均为45 mm,试样尺寸为250 mm×12 mm×6 mm。将试样按不同搭接结构排布在自制的模具中,然后在平板硫化机上加热硫化成型,硫化条件为160 °C/20 MPa×30 min。

1.2 测试方法

采用UH4204GD型高低温拉伸试验机在室温下进行拉伸性能测试,拉伸速率为500 mm·min⁻¹,标距为100 mm,采用定制的气动夹具进行夹持,拉伸试验机和气动夹具分别如图3和4所示。每种相同参数的试验重复3次,记录试验数据并分析。

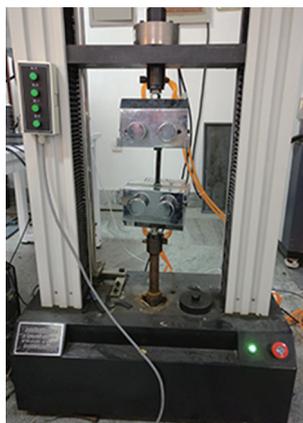


图3 拉伸试验机



图4 气动夹具

2 结果与讨论

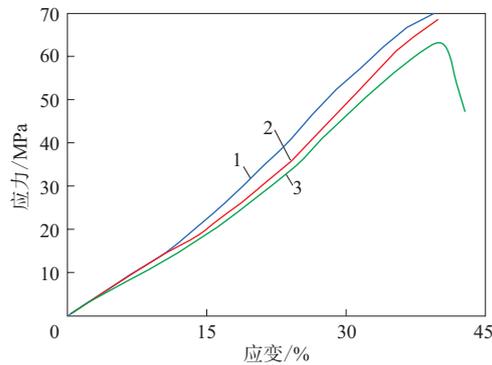
2.1 力学特性

3种不同搭接方式的试样在不同搭接段间距下拉伸,所得应力-应变关系曲线如图5所示。

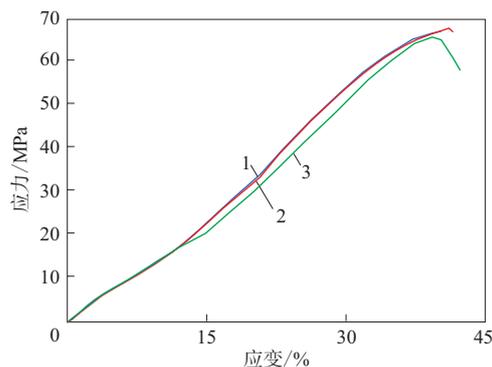
从图5可以看出,帘线/橡胶复合材料的应力-应变曲线均具有较大非线性,3种搭接方式虽在数值上有所不同,但总体变化规律相似。

不同搭接形式下帘线/橡胶复合材料的拉伸强度和拉断伸长率测试结果如表1所示。

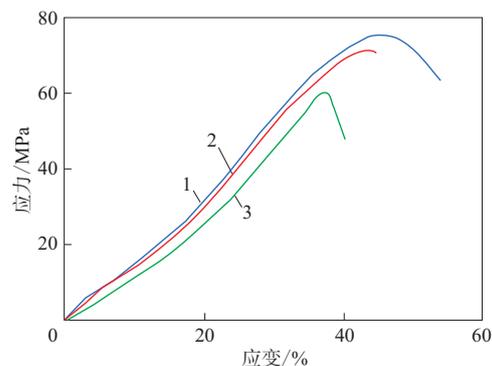
从表1可以看出:随着搭接段间距的增大,凹型凸型的帘线/橡胶复合材料拉伸强度下降最明显,顺型顺式虽变化不大但仍可体现下降趋势,而顺型逆式受搭接段长度影响变化不明显;随着搭



(a) 顺型顺式



(b) 顺型逆式



(c) 凹型凸型

搭接段间距/mm: 1—5; 2—15; 3—25。

图5 不同搭接形式下帘线/橡胶复合材料的应力-应变曲线

搭接段间距的增大,凹型凸型的帘线/橡胶复合材料拉断伸长率下降最明显,顺型顺式和顺型逆式变化不明显。

综合来看,搭接形式为凹型凸型的帘线/橡胶复合材料力学性能明显优于其余2种搭接形式的复合材料。

表1 不同搭接形式下帘线/橡胶复合材料的拉伸强度和拉断伸长率

项 目	搭接形式		
	顺型顺式	顺型逆式	凹型凸型
拉伸强度/MPa			
5 mm搭接段间距	69.03	67.43	74.79
15 mm搭接段间距	68.54	68.47	71.04
25 mm搭接段间距	63.06	66.39	63.06
拉断伸长率/%			
5 mm搭接段间距	39.6	40.9	53.4
15 mm搭接段间距	39.4	41.4	44.1
25 mm搭接段间距	42.3	39.8	40.3

2.2 失效分析

通过对试验后的失效试样进行分析,发现复合材料失效形式主要有3种,如图6所示。

不同搭接形式下帘线/橡胶复合材料的失效形式分析结果如表2所示。

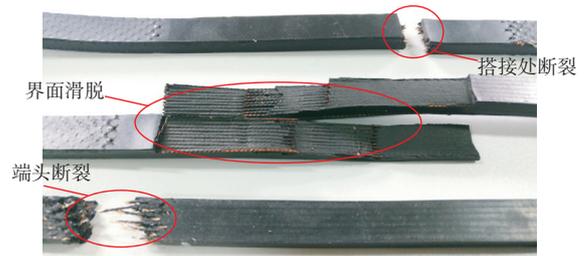


图6 帘线/橡胶复合材料的失效形式

表2 不同搭接形式下帘线/橡胶复合材料的失效形式

搭接段间距/mm	搭接形式		
	顺型顺式	顺型逆式	凹型凸型
5	搭接处断裂	搭接处断裂	搭接处断裂
15	搭接处断裂	端头或搭接处断裂	搭接处断裂
25	界面滑脱	端头或搭接处断裂	端头断裂或界面滑脱

从表2可以看出:帘线/橡胶复合材料的搭接段间距为5 mm时,3种不同搭接形式的试样失效形式均为搭接处断裂;搭接段间距为15 mm时,除顺型逆式试样存在端头处应力集中断裂外,其余试样的失效形式均为搭接处断裂;搭接段间距为25 mm时,顺型顺式试样的失效形式为界面滑脱,顺型逆式试样的失效形式为端头或搭接处断裂,凹型凸型试样出现端头断裂或界面滑脱现象。

综上所述:帘线/橡胶复合材料的搭接段间距为5和15 mm时,试样失效形式主要为搭接处断裂,此处的帘线层和橡胶层所受应力最大;当搭接段

间距为25 mm时,复合材料易发生界面滑脱和端头断裂失效。

3 结论

(1) 帘线/橡胶复合材料在不同帘线层接头搭接形式下的力学行为具有较大非线性,搭接段间距为5 mm时的凹型凸型搭接试样的综合力学性能最优。

(2) 帘线/橡胶复合材料的帘线层接头搭接段间距为5和15 mm时,试样失效形式主要为搭接处断裂,此处的帘线层和橡胶层所受应力最大;当搭接段间距为25 mm时,复合材料易发生界面滑脱和端头断裂失效。

参考文献:

- [1] 张福范. 叠层复合材料搭接接头的层间应力[J]. 中国科学: 数学 物理学 天文学 技术科学, 1987, 17(7): 41-49.
[2] 张阿盈. 复合材料胶接搭接接头应力分析方法研究[J]. 航空工程

进展, 2012, 3(2): 11-17.

- [3] Whitney J. Stress Analysis of a Composite Double-lap Joint Using Higher Order Plate Theory[C]. Kissimmee: Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2013.
[4] Leslie W, Nabil C, John W, et al. Fatigue Damage Monitoring of a Composite Step Lap Joint Using Distributed Optical Fibre Sensors[J]. Materials, 2016, 9(5): 374.
[5] 李澄. 拼接与搭接铺层对复合材料性能影响研究[J]. 山东工业技术, 2019(12): 14-15.
[6] 陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 搭接长度对Z-pins增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 22(4): 593-598.
[7] 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.
[8] 郭霞, 关志东, 刘遂, 等. 搭接长度对复合材料单搭接胶接接头的影响[J]. 科技导报, 2013, 31(7): 37-41.
[9] 陈想, 陈波宇. 频率和温度对帘线与胶料动态粘合性能的影响[J]. 轮胎工业, 2020, 40(6): 360-362.
[10] 李利, 刘潇冬, 王瑞. 试样因素对橡胶-钢丝帘线粘合性能测试的影响[J]. 橡胶工业, 2018, 65(2): 227-230.

收稿日期: 2020-11-14

Mechanical Property and Failure Modes of Cord/Rubber Composite Multilayer Structure

WU Jian, LUO Hang, GUO Xiaonong, ZHAO Yuehao, SU Benlong, LI Zhe, WANG Youshan

(Center for Rubber Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The mechanical property and failure modes of cord/rubber composites with different overlap forms and different distance of overlap section were studied. The results showed that, the mechanical behavior of cord/rubber composite under different overlap forms was nonlinear, and the comprehensive mechanical properties of the concave-convex overlap form were the best when the distance of the overlap section was 5 mm. When the distance of overlap section of cord/rubber composite material was 5 and 15 mm, the main failure mode of samples were the fracture at the overlap joint, where the stress of the cord layer and rubber layer was the largest. When the distance of the overlap section was 25 mm, the interface slippage and end fracture failure would easily occur.

Key words: cord; rubber; composite; overlap form; distance of overlap section; mechanical property; failure mode

一种全钢巨型工程子午线轮胎胎面胶配方及制备方法

由福建省海安橡胶有限公司申请的专利(公布号 CN 111748132A, 公布日期 2020-10-09)“一种全钢巨型工程子午线轮胎胎面胶配方及制备方法”, 涉及的全钢巨型工程机械子午线轮胎胎面胶配方为天然橡胶 55~65, 炭黑 20~25, 白炭

黑 5~10, 硅烷偶联剂 1~2, 氧化锌 2~3, 硬脂酸 1~2, 防老剂 2~3, 软化剂 1~2, 防焦剂 0.2~0.5, 硫黄 1~2, 促进剂 0.5~1; 采用两段母炼和一道终炼的方法完成胎面胶制备。

本发明胎面胶适合在煤矿等特定环境中使用。

(本刊编辑部 马 晓)