

测试·分析

轨道车辆空调实心密封框的压缩试验及分析

毕研亮, 姜晓天, 王林华

(山东朗进科技股份有限公司, 山东 济南 271100)

摘要:对轨道车辆空调实心密封框(简称密封框, 采用三元乙丙橡胶作主体材料)进行了压缩试验与分析。结果表明:密封框的压缩率超过50%会发生不可恢复形变,在实际使用过程中需要控制密封框的压缩率,避免过度压缩导致密封框的损坏;25%压缩率下密封框的压缩力与中心线总长度近似呈线性关系;通过任意尺寸、任意压缩量(压缩率小于30%)下压缩力计算公式可提前对密封框的压缩力进行理论计算,有效避免空调装车不合格的问题。

关键词:轨道车辆空调;密封框;三元乙丙橡胶;压缩试验

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2024)04-0299-06

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2024.04.0299



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轨道车辆空调实心密封框(简称密封框)用于轨道空调风口与车顶风口对接处的密封^[1],要求装车时密封框的有效压缩率不小于25%,以保证密封的有效性。密封框的材质通常为三元乙丙橡胶(EPDM)材料^[2],截面形状有空心和实心。由于市售密封框的试验报告检测项目有限,密封框设计选型时难以判断装车后其压缩率能否超过25%^[3],常常出现密封框的选型不适当而造成其压缩率不足,导致空调无法安装到位、风道无法充分密封的情况。以北京某线地铁空调为例,其所使用的密封框如图1所示。



图1 密封框实例

Fig. 1 Example of sealing frame

密封框100 mm局部段的压缩试验相关参数如表1所示,压缩曲线如图2所示。

表1 密封框的压缩试验数据

Tab. 1 Compression test data of sealing frame

项 目	数 据	项 目	数 据
压缩率/%	25	最大负荷/N	264
温度/℃	23	断裂负荷/N	264
湿度/%	50		

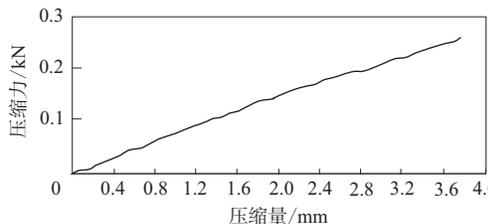


图2 密封框的压缩曲线

Fig. 2 Compression curve of sealing frame

该空调的质量约为800 kg,空调安装后密封框压接区域受力(G_k)为5.488 kN,密封框中心线总长为13 564 mm,经过计算得出密封框达到25%压缩率所需的压缩力(F_z)为35.266 kN,即 $F_z > G_k$,因此空调是无法将密封框压缩至25%的压缩率,但密封条实际是可以正常安装使用的,所以图2的数据与实际不符。

作者简介:毕研亮(1987—),男,山东济南人,山东朗进科技股份有限公司副高级工程师,学士,主要从事轨道车辆空调结构的设计和应用研究工作。

E-mail:biyanliang@longertek.com

引用本文:毕研亮,姜晓天,王林华.轨道车辆空调实心密封框的压缩试验及分析[J].橡胶工业,2024,71(4):299-304.

Citation: BI Yanliang, JIANG Xiaotian, WANG Linhua. Compression test and analysis of solid sealing frame for rail vehicle air conditioning[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(4): 299-304.

通过现行标准试验方法,模拟密封框实际装车的安装形式,在相同温度和相同湿度下测量密封框整体的压缩力,可探究密封框的压缩力与压缩率的关系,以得到计算压缩力的经验公式。本工作通过压力试验机对不同尺寸密封框进行压缩试验,并对试验结果进行分析,可为轨道空调密封框选型时提供帮助和依据,有助于实现密封框选型的规范化和标准化^[4]。

1 实验

1.1 主要原材料

EPDM,牌号K10660C,具有耐老化、耐油、耐热、耐光、耐臭氧、耐介质以及绝缘性能好、吸水率低的特点,阻燃性能可达到欧盟标准EN45545的HL3级,可广泛应用于汽车部件、防水电线电缆、密封件等领域^[5]。

1.2 试样

分别对不同尺寸的密封框进行压缩试验,密封框的材料属性^[6]如下:密度 $0.87 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,邵尔A型硬度 (30 ± 5) 度,弹性模量 15.85 MPa ,泊松比 0.47 。

密封框的厚度均为15 mm,长度与宽度如表2所示。

表2 密封框的长度×宽度
Tab. 2 Lengths×wides of sealing frames mm×mm

试样编号	长度×宽度	试样编号	长度×宽度
1	329×249	6	859×296
2	365×285	7	868×321
3	419×249	8	903×355
4	454×284	9	964×364
5	819×259	10	1 001×401

1.3 试验设备

HDW-100型压力试验机,试验速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,量程为 $0 \sim 100 \text{ kN}$,符合GB/T 2611—2022《试验机通用技术要求》。

密封框及其实际装车的截面(单边)如图3所示。

为模拟装车时密封框的安装情况,并结合试验设备的有效使用,制作的密封框压缩试验工装即压力试验机^[7-8]如图4所示。对于不同尺寸的密封框,其需要不同的安装框架,密封框的安装框架

如图5所示。

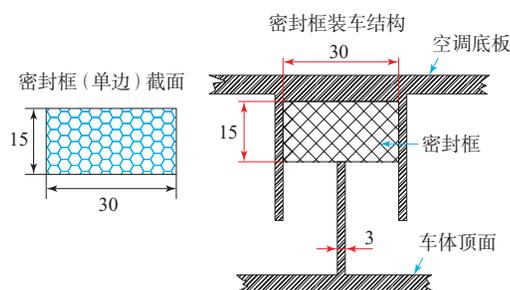


图3 密封框及其实际装车的截面(单边)示意
Fig. 3 Diagram of sealing frame and its actual installation section (one side)



图4 压力试验机
Fig. 4 Pressure test machine



图5 密封框的安装框架
Fig. 5 Installation frame of sealing frame

1.4 试验方法

压力试验机的操作界面如图6所示。试样尺寸根据GB/T 2941—2006《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》而定,对于相同材料、相同型号、同一批次的密封框,其横截面积相同,在密封框表面的压板厚度相同,因此同一组试验探究压缩力与其体积的关系即可转化为压缩力与密封框总长的关系。

(1) 将试样组合件放入压力试验机中心,以 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度压缩试样,直到压缩率达到30%为止。

(2) 以相同的速度卸载试样,并静置5 min。重



图6 压力试验机的操作界面

Fig. 6 Operation interface of pressure testing machine

复此操作3次,视为机械调节。

(3) 记录第4次压缩力-压缩量的曲线。

当试样被压缩至50%左右时,试样在端面约束效应的影响下会发生非均匀的超弹性变形,整个试样截面(单边)由初始的矩形呈现出饼状特征。卸载后试样只能恢复部分原貌,试样表面无宏观压缩损伤,厚度略有减小,因此需控制压缩率不超过50%,避免产生永久变形对后续试验造成影响。

2 结果与分析

不同尺寸密封框的压缩力-压缩量曲线(压缩率为25%)如图7和8所示(3 mm宽的304不锈钢板施加压力)。其中, x 轴为压力试验机对密封框的压缩量,该组密封框的厚度均为15 mm,因此25%压缩率下压力试验机对密封框的压缩量为3.75 mm。将压力试验机对密封框的压缩率控制在30%以内,记录压缩过程中压缩量和压缩力。根据以上数据可以得到25%压缩率下密封框的压缩力-中心线总长度曲线,如图9所示。

从图9可以看出,25%压缩率下密封框的压缩力与密封框中心线总长度呈近似线性的关系^[9-12]。也就是说,相同批次、相同材料、相同单边截面形状的密封框,其中心线总长度与压缩力成正比关系,满足以下公式:

$$F=L \cdot k_z \quad (1)$$

式中: F 为密封框的压缩力,N; L 为密封框的中心线总长度,mm; k_z 为单位长度压缩力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

$$k_z = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{n} \quad (2)$$

$$k_i = F_i / L_i (i=1, 2, 3, \dots, 10) \quad (3)$$

当 $n=10$ 时,可得 $k_z=0.257 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

因此得:

$$F=L \cdot k_z=0.257L \quad (4)$$

由于该组密封框的压缩力与中心线总长度(压缩率小于30%)近似呈线性关系,因此进一步分析得到任意压缩量(压缩率小于30%)下的压缩力,即下式:

$$F=k_0 \cdot L \cdot \Delta y \quad (5)$$

式中: k_0 为单位长度下单位压缩量的压缩力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; Δy 为压缩量,mm。

根据表2的密封框的尺寸,可得相应的 F ,如表3所示。

当 $n=10$ 时,可得 $k_0=0.0684 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

即得到下式:

$$F=0.0684 \cdot L \cdot \Delta y \quad (6)$$

通过式(6)计算任意尺寸、任意压缩量(压缩率小于30%)下的压缩力。

对文章开头中提及的密封框压缩量进行复核, $G_k=5.488 \text{ kN}$, $L=13\,564 \text{ mm}$,压缩量为3.75 mm,则得 $F_z=0.0684 \cdot L \cdot \Delta y=0.0684 \times 13\,654 \times 3.75=3\,479.166 \text{ N} \approx 3.48 \text{ kN}$ 。

即 $F_z < G_k$ 。

通过计算,空调装车时密封框可以实现压缩率为25%以上的压缩力,符合现场情况,侧面验证了试验推导公式的准确性,可用于初步判断车顶密封结构的可行性。

3 结论

(1) 目前大部分密封框的压缩曲线测试未考

虑密封框的实际应用情况,测得的压缩力偏大,不适于实际安装分析。

(2) 密封框的压缩率超过50%会发生不可恢复形变,在实际使用过程中需要控制密封框的压缩率,避免过度压缩导致密封框损坏。

(3) 25%压缩率下密封框的压缩力与中心线总长度近似呈线性关系。

(4) 通过任意尺寸、任意压缩率(小于30%)下

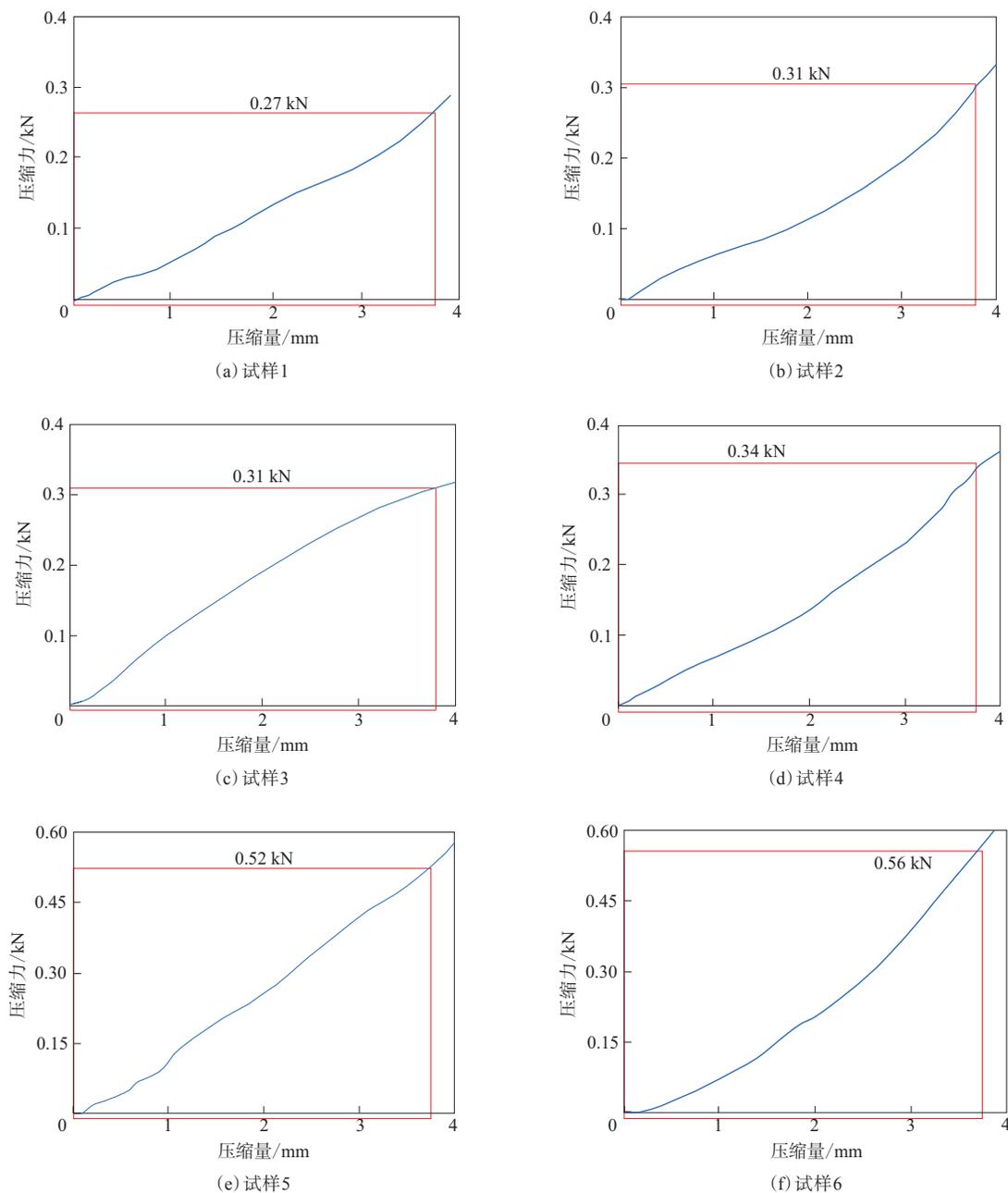


图7 密封框的压缩力-压缩量曲线(一)

Fig. 7 Compression force-compression amount curves of sealing frames (first)

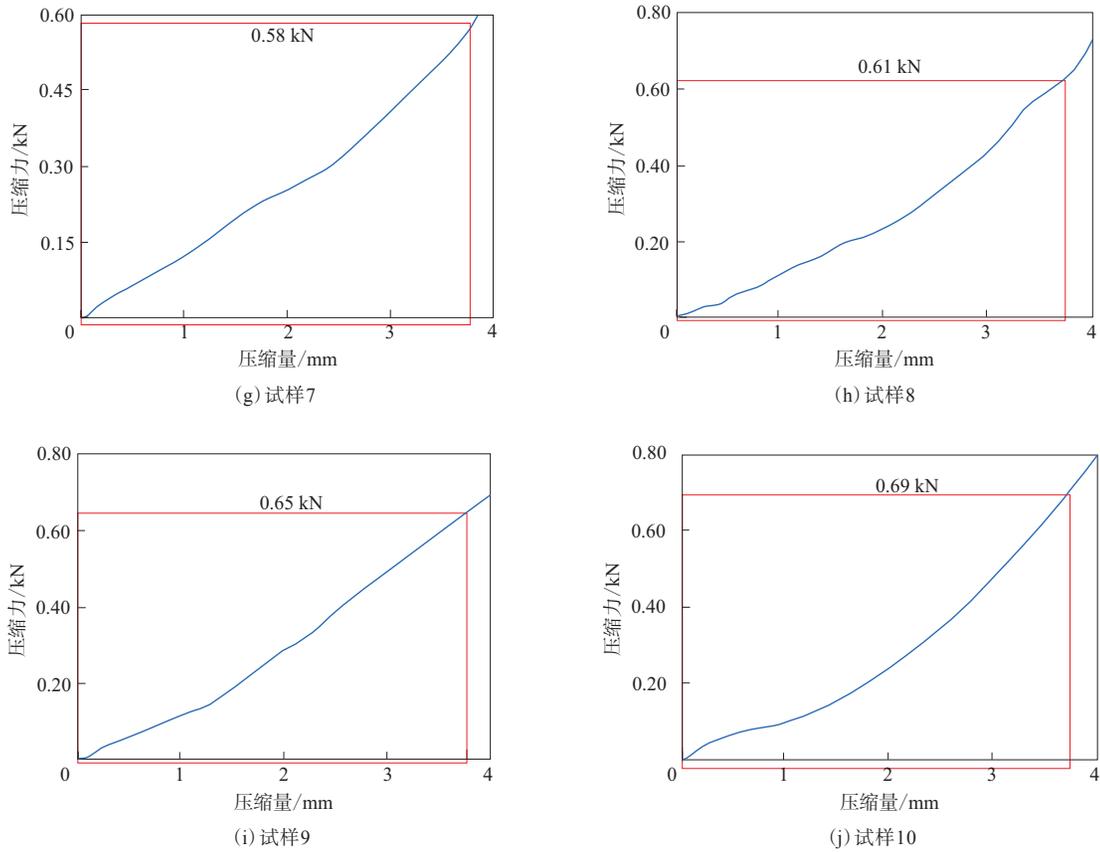


图 8 密封框的压缩力-压缩量曲线(二)

Fig. 8 Compression force-compression amount curves of sealing frames (second)

压缩力计算公式可提前对密封框的压缩力进行理论计算,有效避免空调装车不合格的问题,进而避免物料浪费,有利于该类型橡胶件在轨道车辆中的进一步应用和推广。

参考文献:

[1] 杨晓东,王虎高,柳晓峰,等. 地铁列车整车密封防水技术及措施研究[J]. 技术与市场,2022,29(4):66-70.
 YANG X D, WANG H G, LIU X F, et al. Research on sealing and waterproofing technology and measures for the whole vehicle of subway trains[J]. Technology and Market,2022,29(4):66-70.
 [2] 许文雄,周子荣,魏科邻,等. 减振胶滞在分体式空调器室外机的应用研究[J]. 日用电器,2014(9):76-78,84.

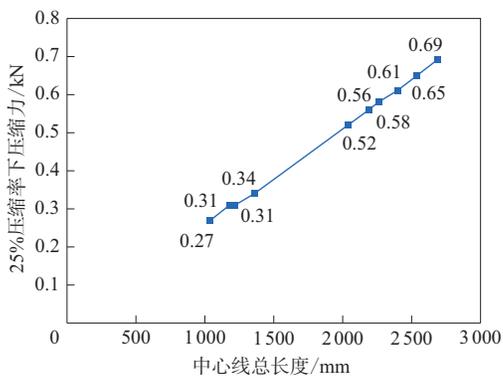


图 9 25%压缩率下密封框的压缩力-中心线总长度曲线

Fig. 9 Compression force-centerline total length curve of sealing frame under 25% compression ratio

表 3 F和Δy的取值

Tab. 3 Values of F and Δy

项 目	试样编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L/mm	1 036	1 180	1 216	1 356	2 036	2 190	2 258	2 396	2 536	2 684
Δy/mm	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
F/N	270	310	310	340	520	560	580	610	650	690

- XU W X, ZHOU Z R, WEI K L, et al. Applied study on sticky damping outdoor unit of split air conditioner[J]. *Electrical Appliances*, 2014(9):76-78,84.
- [3] 廖丽娜. 浅析汽车用EPDM密封胶条生产工艺控制[J]. *时代汽车*, 2022(11):131-133.
- LIAO L N. The production process control of EPDM sealing rubber strip on vehicle analysis[J]. *Auto Time*, 2022(11):131-133.
- [4] 郭志伟,张杰. 轨道车辆空调送/回风口处橡胶密封条的压缩性能分析[J]. *橡胶工业*, 2023,70(8):627-632.
- GUO Z W, ZHANG J. Analysis on compression performances of rubber sealing strips at air supply/return outlet of railway vehicle air-conditioner[J]. *China Rubber Industry*, 2023,70(8):627-632.
- [5] 李龙辉,贺俊,樊丽丹,等. YF503炭黑的研制及其在橡胶密封条中的应用[J]. *橡胶科技*, 2018,16(7):35-38.
- LI L H, HE J, FAN L D, et al. Development of carbon black YF503 and its application in rubber sealing strips[J]. *Rubber Science and Technology*, 2018,16(7):35-38.
- [6] 闫伟涛,潘坡,郭恒如,等. 磁性橡胶在汽车密封条中的应用[J]. *汽车工艺与材料*, 2016(4):56-59.
- YAN W T, PAN P, GUO H R, et al. Application of magnetic rubber in automotive sealing strips[J]. *Automobile Technology & Material*, 2016(4):56-59.
- [7] 吴健,张传兵,王友善,等. 航空用三元乙丙橡胶的拉伸/压缩力学行为研究[J]. *橡胶工业*, 2018,65(11):1210-1213.
- WU J, ZHANG C B, WANG Y S, et al. Research on tensile/compression mechanical behavior of EPDM for aviation applications[J]. *China Rubber Industry*, 2018,65(11):1210-1213.
- [8] 张启青,贺占蜀,邵丽娜. 橡胶材料力学性能试验方法研究[J]. *汽车电器*, 2019(5):62-64.
- ZHANG Q X, HE Z S, SHAO L N. Study on test method of mechanical properties of rubber material[J]. *Auto Electric Parts*, 2019(5):62-64.
- [9] 王海军,谷洲平. 三元乙丙橡胶海绵车门密封条压缩变形的仿真分析与试验验证[J]. *橡胶工业*, 2018,65(7):814-817.
- WANG H J, GU Z P. Simulation analysis and test verification on compression deformation of EPDM sponge auto weatherstrip[J]. *China Rubber Industry*, 2018,65(7):814-817.
- [10] 王晓辉,常亮,聂小华,等. 基于典型分段模型的车门密封条压缩变形数值分析[J]. *工程与试验*, 2020,60(1):75-77.
- WANG X H, CHANG L, NIE X H, et al. Numerical analysis of compression deformation of doors weatherstrip seals based on typical segmentation model[J]. *Engineering & Test*, 2020,60(1):75-77.
- [11] 曾鹏,王坚,张旭辉,等. 不同截面EPDM密封圈密封性能仿真分析[J]. *客车技术与研究*, 2022,44(3):30-33,36.
- ZENG P, WANG J, ZHANG X H, et al. Simulation and analysis of sealing performance of EPDM seal ring with different cross section[J]. *Bus & Coach Technology and Research*, 2022,44(3):30-33,36.
- [12] 张敏霞,董平,章孟辉. 密封圈低温压缩永久变形测量方法的研究[J]. *分析测试技术与仪器*, 2019,25(1):11-14.
- ZHANG M X, DONG P, ZHANG M H. Study on measurement method of permanent deformation of sealing ring after low temperature compression[J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2019,25(1):11-14.

收稿日期:2024-01-16

Compression Test and Analysis of Solid Sealing Frame for Rail Vehicle Air Conditioner

BI Yanliang, JIANG Xiaotian, WANG Linhua

(Shandong Langjin Technology Co., Ltd., Jinan 271100, China)

Abstract: The compression test and analysis were conducted on the solid sealing frame (referred to as the sealing frame, using EPDM as the main material) of rail vehicle air conditioner. The results showed that if the compression rate of the sealing frame exceeded 50%, irreversible deformation would occur. In actual use, it was necessary to control the compression ratio of the sealing frame to avoid damage of the sealing frame caused by excessive compression. Under 25% compression rate, the compression force of the sealing frame was approximately linearly related to the centerline total length. By using the compression force calculation formula at any size and compression amount (compression ratio less than 30%), the theoretical calculation of the compression force of the sealing frame could be carried out in advance, effectively avoiding the problem of unqualified air conditioning installation.

Key words: rail vehicle air conditioner; sealing frame; EPDM; compression test