

高速列车用 PMI 泡沫力学性能研究

孙春方, 李文晓, 薛元德, 胡 培

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 本文对车用复合材料夹层结构用 PMI 泡沫 ROHACELL 71S 进行了拉伸、压缩、剪切试验。试验表明, ROHACELL 71S 泡沫的性能优于 AIREX R82 8Q 能满足高速列车车体夹层结构用泡沫的要求。

关键词: 列车车体; 聚合物泡沫; 力学性能

中图分类号: TU 532⁺ · 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999 (2006) 04-0013-04

1 引言

泡沫材料是一种由形成孔穴的棱边和壁面的固体杆或固体板所构成的相互联结的多孔固体。泡沫材料的孔穴由三维空间填充的多面体构成。如果组成泡沫体的固体是孔穴的棱边(孔穴通过开口的壁面相连), 则泡沫体是开孔的, 孔穴与其相邻的孔穴相互封闭隔离, 则泡沫体是“闭孔的”, 有些泡沫材料含有一部分开孔, 也含有一部分闭孔。多孔固体区别于其它材料的最重要特征是其相对密度 $\bar{\rho} / \rho_s$, 即多孔固体的密度 $\bar{\rho}$ 除以构成孔壁固体的密度 ρ_s 。聚合物的发泡是通过气体充入液态单体或热聚合物使气泡长大并稳定, 然后经交联或冷却使其整体固化。气体充入方式一是机械搅拌, 二是发泡剂混入聚合物。泡沫材料的性能取决于两组独立的参数。第一组是描述泡沫体几何结构的孔穴的大小和形状、物质在孔棱和孔面之间的分配方式及其相对密度或孔率; 第二组是描述孔壁构成材料的内在性质的参数。

2 PMI 发泡材料

PMI 是一种用于轻质夹层结构的闭孔刚性发泡材料, 通过加热甲基丙烯酸/甲基丙烯腈共聚板发泡制造。发泡过程中共聚物转变成聚甲基丙烯酰亚胺。发泡温度在 170℃ 以上, 根据密度和型号不同而不同。发泡后泡沫块温度冷却至室温。图 1 为其结构的显微照片和微观结构。空穴大小 0.5~0.7 mm。PMI 材料的压缩杨氏模量为 5200 MPa, 压缩屈服强度为 90 MPa, 密度为 1200 kg/m³。PMI 泡沫是一种各向同性 100% 闭孔泡沫, 能与湿法和预浸料及热塑性树脂兼容, 具有较好的强度-重量比、抗疲劳性能、防火性能和燃烧时不释放有害物质, 可热

成形, 加工中具有较好的抗压缩蠕变性能。PMI 泡沫的这些性能特点使得它在车辆、船舶、航空航天得到运用, 如日本新干线 E4 型高速火车头、UMOE Manda 公司的 MTB 高速船、“虎”式直升机的引擎罩、空中客车 A340-500 和 600 选择 PMI 泡沫加强气密机舱的隔板、Delta II 运载火箭有效载荷整流罩、Delta III 火箭级间段及 Delta IV 火箭有效载荷整流罩、级间段、中间体、隔热罩和推进器鼻锥结构等。

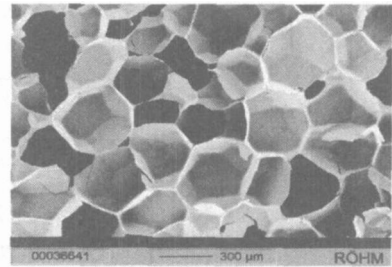


图 1 PMI 泡沫结构的显微照片和微观结构
夹层结构的泡沫芯材会受到拉伸、压缩、剪切的作用, 研究泡沫拉伸、压缩、剪切时的力学性能对高速列车车体夹层结构的设计是非常重要的。

泡沫拉伸与压缩很大区别是拉伸应力可引起快速断裂, 而压缩则引起渐进式的压损。在线弹性阶段, 闭孔泡沫的模量由空棱弯曲、孔面延伸和闭合气体压力等决定。文献 [1] 给出了近似表达式

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \Phi^2 \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \Phi) \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_0 (1 - 2\nu^*)}{E_s (1 - \bar{\rho}^* / \rho_s)} \quad (1)$$

$$\frac{G^*}{E_s} \approx \frac{3}{8} \left[\Phi^2 \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \Phi) \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right) \right] \quad \nu^* \approx \frac{1}{3} \quad (2)$$

式中相对密度 $\bar{\rho} / \rho_s = 80 / 1200 = 0.067$, Φ 为孔穴棱边所含固体的体积分数, 对 PMI 泡沫 $\Phi = 0.8$ ($1 - \Phi$) 为孔壁所含固体的体积分数, p_0 为初始闭合气体压力一般为大气压 0.1 MPa, PMI 材料压缩杨氏模

收稿日期: 2005-10-26

作者简介: 孙春方 (1963-), 男, 副研究员, 博士研究生。

量 $E_s = 5200\text{MPa}$ 则可得 PM I 泡沫的杨氏模量 $E^* = 84\text{MPa}$ 剪切模量 $G^* = 32\text{MPa}$ 须指出闭合气体压力的影响极小。

非线性弹性阶段, 压缩时由于孔棱非线性弹性屈曲, 得到一长长的几乎水平的平台, 拉伸时与轴线有夹角的孔棱, 会朝该轴旋转, 作用孔棱上的弯矩会减小, 刚性增大, 随着孔棱变为一线排列, 变形由弯曲控制变为孔壁延伸控制。为制造出具有自主知识产权的高速列车, 根据高速列车对车辆结构、强度、刚度、疲劳、腐蚀、噪声、振动和防火等要求, 结合工艺制造的特点, 本文对高速列车车体用 PM I 泡沫 RO-HACELL 71S 力学性能进行了研究和总结。

表 1 拉伸试验结果 (试样标距 = 50mm)

试 样	1	2	3	平均	工艺 2	1	2	3	平均
	工艺 1	工艺 1	工艺 1	工艺 1		工艺 3	工艺 3	工艺 3	工艺 3
破断力 /N	657 3	676 2	663 4		323 6	619 0	628 0	621 2	
破断应力 /MPa	2 58	2 65	2 59	2 60	1 30	2 41	2 45	2 42	2 43
破断时总变形 /mm	2 273	2 476	2 548		8 2	1 043	1 404	1 251	
总伸长率 $\delta_{50}/\%$	4 54	4 95	5 10	4 86	16 4	7 09	9 60	8 51	8 4
弹性模量 /MPa	118	123 2	124 4	122	118	105 1	97 8	109 5	104
泊松比 ν						0 331	0 392	0 356	0 36

工艺 1 破断应力最大达 2 60MPa 弹性模量 122MPa 但总伸长率 δ_{50} 最小仅 4 8%; 工艺 2 总伸长率 δ_{50} 最大达 16 4%, 但破断应力最小仅为 1 30MPa 弹性模量 49MPa 工艺 3 破断应力为 2 43MPa 弹性模量 104MPa 稍小于工艺 1 但远好于工艺 2 总伸长率 δ_{50} 为 8 4%, 工艺 3 与 A REX R82 80 相比, 总伸长率 δ_{50} 稍小外, 强度和模量都好于 A IREX R82 80Q 从拉伸性能来看, ROHACELL 71S 工艺 3 能满足要求。

泊松比 ν 试验较难, 电阻应变片无法粘于泡沫表面, 本次试验采用应伸计测定试样横向应变后, 再测轴向应变, 在相同的两个应力点得到横向应变范围和轴向应变范围, 相比得泊松比 ν 图 2 是工艺 3 试样 1 的应力与应变曲线。

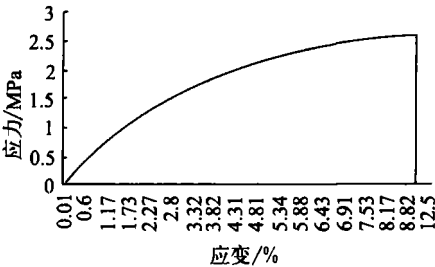


图 2 工艺 3 试样 1 拉应力与应变

3 力学性能研究

3.1 拉伸性能

相对来讲, 拉伸试验易实现, 对 PEI 泡沫 A REX R82 80 进行了拉伸试验, 拉伸强度 2 0MPa 拉伸模量 54MPa 与报道值相符。破断时总伸长率 $\delta_{50} = 11\%$ 。延性非常好。最初对 Degussa 公司 PM I 泡沫 ROHACEL 711G 进行了拉伸试验, 强度和模量都高于 A REX R82 80Q 但破断时总伸长率 δ_{50} 小于 3%, 呈脆性状态。随后采用 3 种制造工艺, 对 Degussa 公司 PM I 泡沫 ROHACELL 71S 进行了试验, 拉伸试验结果由表 1 所示。

3.2 压缩性能

闭孔泡沫压缩时由于孔棱非线性弹性屈曲, 得到一长长的几乎水平的平台, 文献 [1] 中给出了闭孔泡沫压缩时坍塌强度的最佳描述:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.3 \left(\Phi \frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + 0.4 (1 - \Phi) \frac{\bar{\rho}}{\rho_s} + \frac{\rho_0 - \rho_{at}}{\sigma_{ys}}$$

(3)

式中相对密度 $\bar{\rho}/\rho_s = 80/1200 = 0.067$ Φ 为孔穴棱边所含固体的体积分数, 对 PM I 泡沫 $\Phi = 0.8$ $(1 - \Phi)$ 为孔壁所含固体的体积分数, P_0 为初始闭合气体压力一般为大气压 $P_{at} 0.1\text{MPa}$, PM I 材料压缩屈服强度 $\sigma_{ys} = 90\text{MPa}$ 则可得 PM I 泡沫压缩时坍塌强度约 0.9MPa 须指出闭合气体压力的影响极小。表 2 为测试结果。

表 2 压缩试验测试结果 (面积 $50 \times 50\text{mm}^2$)

试样	试样厚度 /mm	密度 /Kg·m ⁻³	加载速度 /mm·min ⁻¹	坍塌强度 /MPa
1- 1	25	78 00	5	1.38/1.38
1- 2	25	77 61	5	1.43/1.40
1- 3	25	77 21	5	1.47/1.43
1- 4	25	77 93	5	1.46/1.39
1- 5	25	77 85	5	1.45/1.42

续表				
试样	试样厚度 /mm	密度 /Kg·m ⁻³	加载速度 /mm·m in ⁻¹	坍塌强度 /MPa
平均		77.72		1 438/1.40
2-1	25	77.53	3	1 41/1.38
2-2	25	77.77	3	1 41/1.38
2-3	25	78.01	3	1 39/1.38
2-4	25	77.46	3	1 42/1.38
2-5	25	77.85	3	1 40/1.37
平均		77.72		1 405/1.38
3-1	50	81.88	5	1 63/1.61
3-2	50	82.07	5	1 61/1.65
3-3	50	81.04	5	1 64/1.61
3-4	50	81.68	5	1 62/1.61
3-5	50	81.44	5	1 55/1.64
平均		81.6		1 61/1.62
4-1	50	80.72	3	1 56/1.54
4-2	50	82.16	3	1 60/1.62
4-3	50	80.30	3	1 60/1.56
4-4	50	80.88	3	1 57/1.56
4-5	50	80.58	3	1 61/1.57
平均		80.93		1 59/1.57

表中的密度由 Degussa公司试验得到。试样制备与拉伸试验中工艺 3 相同。从表 2 得到 PM I 泡沫的压缩时坍塌强度与密度和加载速度呈正相关。相同的工艺条件下密度是决定坍塌强度最主要的因素。例如密度约 76 kg/m³, 其坍塌强度约 1.1MPa。不同的加载速度得到的结果略有不同。例如加载速度从 0.5 mm/m in 突然提高到 5 mm/m in, 应力约提高 10%。一般情况下, 测强度用 5 mm/m in, 测模量用 1 mm/m in。采用工艺 3 密度在 78~80kg/m³ 是较好的方案, 拉伸和压缩性能均良好。图 3 是试样 3-1 的应力与应变。

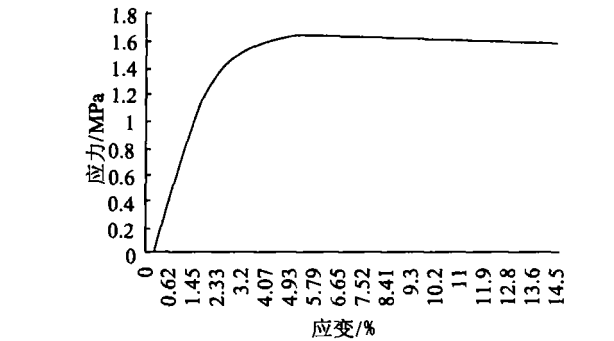


图 3 试样 3-1 压缩应力与应变

3.3 剪切性能

夹层结构的力学性能 (强度和刚度) 取决于表层和芯部材料的力学性能及几何尺寸。高速列车车体夹层结构设计须知泡沫的剪切强度和模量。由方程 (2) 计算得剪切模量 $G_c = 32 \text{ MPa}$ 。文献 [2] 给出了泡沫的剪切强度 τ_c ,

$$\tau_c' = C_{11} (\bar{\rho} / \rho_s)^{2/3} \sigma_{ys} \tag{4}$$

式中, C_{11} 为比例常数。由纯剪单元体知, 剪应力 τ 与最大压应力相等, 而方程 (3) 给出了闭孔泡沫压缩时坍塌强度的最佳描述。笔者认为方程 (3) 较方程 (4) 物理意义更清楚。由方程 (3) 得泡沫压缩时坍塌强度约 0.9MPa, 因此剪切强度约 0.9MPa。表 3 为测试结果。图 4 是试样 1 的剪切应力与应变。与 A REX R82 80 相比, ROHACELL®71S 的剪切模量较高, 而剪切强度略低。

表 3 剪切试验结果

试样	剪切强度 /MPa	剪切模量 /MPa
1	1.02	31.72
2	0.996	29.85
3	0.988	34.05
平均	1.00	31.87

注: 试样尺寸为 200×50×20mm³。

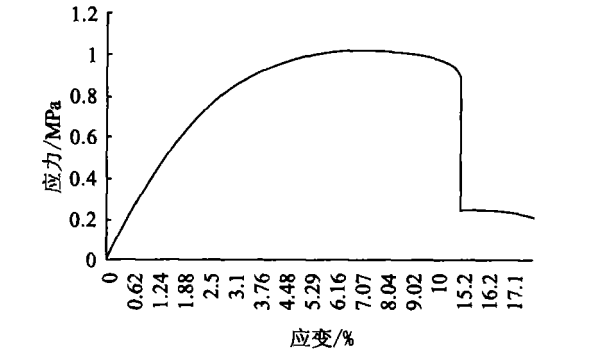


图 4 试样 1 剪应力与剪应变

4 结 论

- (1) ROHACELL 71S 的拉伸、压缩、剪切性能可满足高速列车车体夹层结构泡沫的要求;
- (2) ROHACELL 71S 与 A REX R82 80 密度相近时, 前者的拉伸、压缩、剪切模量高, 拉伸、压缩强度也高, 只是延性略低;
- (3) ROHACELL 71S 的拉伸模量 E 、剪切模量 G 和泊松比 ν 的测试值基本符合各向同性弹性理论。

参考文献

[1] Lona J Gibson and Michael F Ashby. Cellular Solids Structure and Properties [M]. Cambridge University Press 1997. 175-231

(下转第 19 页)

- 1998 58: 224-233.
- [4] Povirk G L. Incorporation of microstructural information into models of two-phase materials [J]. *Acta Metall Mater* 1995 43: 3199-3206.
- [5] Zeman J, Sejnoha M. Numerical evaluation of effective elastic properties of graphite fiber tow impregnated by polymer matrix [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2001 49: 69-90.
- [6] Matous K, Leps M, Zeman J and Sejnoha. Applying genetic algorithms to selected topics commonly encountered in engineering practice [J]. *Comput Methods Appl Mech Engrg* 2000 190: 1629-1650.
- [7] Bai J, Seelethner P and Bonpard P. Mechanical behaviour of 55 filament wound glass-fiber/ epoxy resin tubes. I Microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanism of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading [J]. *Composites Science and Technology* 1997, 57: 141-153.

NUMERIAL EVALUATION OF COMPOSITE MICROSTRUCTURE WITH CONTINUOUS FIBER

SUN Jiang XIAO Qi

(Jiaxing University, Zhejiang 314001, China)

Abstract Through numerical evaluation of the composite microstructure with continuous fiber, the paper presented the second intensity function $K(r)$ and then a represented volume element of the original composite microstructure by creating an object function based on $K(r)$ and using Matlab genetic algorithm toolbox. The represented volume element can represent the original composite microstructure.

Key words composite with continuous fiber, microstructure, second intensity function, represented volume element

(上接第 15 页)

- [2] 孙春方等. 复合材料泡沫夹层结构力学性能与试验方法 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2005 2: 3-6.
- [3] ASIM D 638-00M, ISO 527 2-1993. Tensile Properties of Plastics (Metric) [S].
- [4] ASTM D 638-00M, ISO 527 2-1993. Modulus of Elasticity in Tension [S].
- [5] ASIM D 1621-00. Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics (flat wise compressive strength of Sandwich constructions) [S].
- [6] ASIM C 273-00. Shear Test in Flat wise Plane of Flat Sandwich Construction or Sandwich Cores (in Compression) [S].

MECHANICAL PROPERTIES OF PMI FOAM USED IN HIGH SPEED TRAIN

SUN Chun-fang LI Wen-xiao XUE Yuan-de HU Pei

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The paper discusses the mechanical properties of A REX R82 80 used in TR08 Transrapid Maglev train. The equation of elasticity modulus and strength is given for the rigid polymer foam. Tension, compression and shear strength and elastic modulus of ROHACELL 71S foam are higher than those of A REX R82 80 in the tests.

Key words high speed train, polymer foam, mechanical properties

(上接第 40 页)

STUDY ON RHEOLOGIC CHARACTERISTICS OF CYANATE ESTER RESIN

ZHONG Xiang-yu¹, HONG Yi-qiang², BAO Jian-wen¹, CHEN Xiang-bao¹

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Institute of Clothing Technology, Beijing 100029, China)

Abstract Rheologic characteristics of modified cyanate ester resin system used in RTM are investigated in this article. The rheologic characteristic equations of this resin system under dynamic and isothermal condition are established. This investigation shows that the rheologic characteristics conform with Arrhenius rheologic models. The computation results of these models are consistent with the test data. The study can provide the powerful support for the establishment and optimization of the cyanate ester resin system process.

Key words cyanate ester resin, rheological characteristics, resin transfer molding (RTM)