

## 冲击载荷下泡沫铜-聚氨酯的缓冲性能

齐明思，赵志芳，张伟，孙起帆，王俊元，张纪平，王志坚  
(中北大学，太原 030051)

**摘要：**目的 通过冲弯实验，测定泡沫铜-聚氨酯复合材料结构在动载荷作用下的缓冲吸能性能，对比研究该复合材料结构抗高冲击、高过载的性能差异。方法 向泡沫铜试件中填充不同体积分数的聚氨酯，按照《金属常温冲击韧性实验法》在夏比冲击试验机上进行冲弯试验，测定试样的吸收功值，从而对比探究该种复合材料的力学性能。结果 聚氨酯在试样中所占体积分数为 50%时其能量均值相对最大，此时材料韧性较好，且材料抵抗冲击载荷能力较强。结论 将聚氨酯填充到开孔泡沫铜材料中可构成一种性能优良的抗冲击吸能结构，其性能优于泡沫铜和聚氨酯单体，在抗高冲击、高过载的军工产业和民用产业中具有广阔的应用前景。

**关键词：**泡沫铜-聚氨酯；冲击载荷；缓冲性能

中图分类号：TB484.4；TB485.1 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2017)19-0133-04

### Buffer Performance of Foamed Copper-polyurethane under Impact Load

QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang, ZHANG Wei, SUN Qi-fan, WANG Jun-yuan,  
ZHANG Ji-ping, WANG Zhi-jian  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to measure the energy absorption properties of the foamed copper-polyurethane composite structure under dynamic load by the bending test, and compare and research the difference in the properties of such composite to resist the high impact and high overload. The polyurethanes with different volume fractions were filled in the foamed copper samples. The bending test was carried out on a Charpy impact tester according to the "experimental method of metal impact toughness at room temperature". The absorbance of the sample was measured to explore the mechanical properties of the composite. When the volume fraction of polyurethane in the sample accounted for 50%, the mean of energy absorption was relatively the maximum, at which time the toughness of the material was better and the material had better resistance to impact load. An anti-impact energy-absorbent structure with excellent performance could be fabricated by injecting polyurethane into the open-cell copper foams. The performances of such structure were superior to foamed copper and polyurethane monomer, and such structure has wide application prospect in military industry and civil industry resistant to high impact and high overload.

**KEY WORDS:** foamed copper-polyurethane; impact load; buffer performance

近年来，泡沫金属与高分子材料的复合结构成为缓冲吸能领域的一大研究热点。高过载环境下产品的防护与结构耐撞保护等是目前该领域研究的重点和难点。泡沫铜是近几年发展起来的一种集结构与功能于一体的新型轻质高阻尼材料，具有低密度、高孔隙率、高比强度、高冲击能吸收率和稳定的变形能力，

被广泛应用于结构的抗冲击和震动能量的吸收方面<sup>[1-2]</sup>。由于泡沫铜基体中含有大量孔洞，其强度和弹性模量不高，不宜单独作为结构材料使用。聚氨酯弹性体本身就是一种具有缓冲、吸能和减震的粘弹性材料，其最大特点是硬度可调、范围宽而富有弹性，以及耐磨性和承载性优越，但由于其弹性模量过低，

收稿日期：2017-03-03

基金项目：山西省自然科学基金（201601D102035）

作者简介：齐明思（1979—），男，博士，中北大学副教授，主要研究方向为缓冲防护技术、机械系统动态测试等。

同样不能作为单独的结构材料<sup>[3]</sup>。由此,考虑将聚氨酯填充到具有三维连通孔结构的泡沫铜材料中,得到一种泡沫金属与高分子粘弹性材料交织互穿的复合结构。这种复合材料其组成部分在内部三维空间尺度方向是连续的,并以拓扑的形式遍及整个结构,因此可以利用高分子材料的超弹性,让复合材料具有较大的可恢复变形能力,从而使泡沫铜复合材料既有很高的阻尼特性,又有良好的力学性能,可承受较高冲击载荷<sup>[4—5]</sup>。这里旨在通过冲击试验,测定所制得的泡沫铜-聚氨酯复合结构在冲击载荷下的缓冲吸能性能,得到聚氨酯和泡沫铜材料复合的最佳组分配比。

## 1 实验

由于冲击实验的方法简便,试件尺寸小,实验结果对材质的变化较为敏感,能揭露金属在静荷试验中不能发现的一些缺陷,所以它是动荷试验中最常用的一种方法,在生产中得到广泛应用<sup>[6—7]</sup>。冲击实验主要用来测定材料的冲击韧性,它是指带缺口试件断口单位面积所消耗的能量。冲击韧性是材料的重要机械性质,冲击韧性愈高,表示材料抵抗冲击载荷的能力愈好。此外冲击韧性十分灵敏地表现了结晶粒大小和内部金相组织对合金的影响,如回火脆性、时效等,冲击韧性是控制和稳定产品质量的重要指标<sup>[8]</sup>,但这些因素对力学性能的影响用静荷试验并不能发现。

泡沫铜-聚氨酯复合材料试样在夏比冲击试验机上处于简支梁状态,以试验机举起的摆锤作一次冲击把试样冲断。用折断时摆锤重新升起的高度差计算试样的吸收功<sup>[9—12]</sup>,可在不同温度下进行冲击实验,该实验在常

温环境下进行。吸收功值越大,表示材料韧性越好,对结构中的缺陷或其他应力集中情况不敏感。

### 1.1 泡沫铜-聚氨酯复合材料的制备

泡沫铜采用聚氨酯软泡沫为基体,经预处理、化学沉积、电沉积和焚烧及热还原工艺进行制备,其空隙率大于95%,且具有一定的拉伸强度。试件按照《金属常温冲击韧性实验法》进行制作,用锯子将泡沫铜板材锯成10 mm×10 mm×55 mm的24个长方体试样。将24个试件分成8组,每组3个。考虑到泡沫铜材料本身孔径较大,泡沫铜试样不用钻孔。聚氨酯由A料和B料按其先后顺序进行质量比为1:1的混合,搅拌至发泡、发热后,将聚氨酯填充到泡沫铜试件中,等待24 h以上待其充分凝固后再进行冲击实验。

填充后的泡沫铜-聚氨酯复合材料试件中1~3号泡沫铜试样不填充聚氨酯作为对比,4~6号泡沫铜试样在试样中间填充1滴混合好的聚氨酯,7~9号泡沫铜试样在试样中间对称地灌封2滴聚氨酯,10~12号泡沫铜试样在试样中间对称地灌封3滴聚氨酯,13~15号泡沫铜试样在试样中间对称地灌封4滴聚氨酯,16~18号泡沫铜试样在试样一面涂满聚氨酯,19~21号在体积分数为50%的泡沫铜处涂上聚氨酯,22~24号泡沫铜整个浸入聚氨酯。8组试样中,聚氨酯在泡沫铜的孔隙中所占体积分数分别为0, 6%, 12%, 18%, 24%, 30%, 50%, 100%, 分别定义为I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII组。泡沫铜每组试样实验前断口处的截面尺寸见表1。由于加工误差以及测量误差,泡沫铜试件的截面尺寸存在一定的差异,但均在误差允许范围内。

表1 冲断前泡沫铜试样截面尺寸  
Tab.1 Sectional size of foamed copper sample before bursting

组别	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	mm <sup>2</sup>
1	109.76	115.50	110.00	105.00	107.80	121.00	129.80	107.00	
2	110.00	99.00	105.00	102.00	105.80	110.00	115.50	101.20	
3	118.80	101.20	94.50	110.16	132.16	126.50	94.30	107.38	

### 1.2 冲击试验

利用在度盘上显示出来的摆锤冲击前位能与冲击后剩余位能之差,得到试样的吸收功。在试验机上,度量经过一定比例的换算,可直接显示功值,实验者可直接读出其吸收能量的数值。冲断试件所消耗的功W可表示为:

$$W=m(h_0-h_1)$$

式中:m为带有冲击刃口的摆锤的质量;h<sub>0</sub>为摆锤初始抬升高度;h<sub>1</sub>为摆锤冲断试件后的上升高度,且h<sub>1</sub><h<sub>0</sub>。

启动试验机后根据其数字显示屏的显示设定每

组进行3次实验。这样,试验机就可以在每次实验后记录实验数据,一组实验做完后,自动计算该组实验冲击能量的平均值。做完该组3次实验后,按下退消按钮进入下一组,如此往复,直到完成所有实验。泡沫铜-聚氨酯复合材料每组试样实验后得到的冲击过程所消耗的冲击能量及其平均值见表2。

冲击韧性是指带缺口试件断口单位面积所消耗的能量<sup>[13—14]</sup>。由此可得冲击韧性 $\alpha_k$ 的计算公式: $\alpha_k=W/A$ 。其中A为实验前试件断口处的最小截面积( mm<sup>2</sup> )。由此可求得泡沫铜-聚氨酯复合材料每组试样冲击实验后的冲击韧性。

表2 泡沫铜-聚氨酯试样冲击过程所消耗的冲击能量  
Tab.2 Impact energy consumed in the impact process of foamed copper-polyurethane sample J

组别	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	5.61	5.36	4.85	5.0	7.79	5.78	7.17	5.52
2	5.69	5.61	5.61	5.02	5.19	6.47	6.82	6.55
3	5.69	6.73	5.95	6.55	5.69	5.78	6.47	6.47
平均值	5.67	5.90	5.47	5.53	6.22	6.01	6.82	6.18

## 2 实验结果分析

泡沫铜-聚氨酯复合材料的冲击实验数据可归纳为表3。由分析实验结果可得, 泡沫铜-聚氨酯复合材料试样的能量均值、冲击韧性与聚氨酯在复合试样中所占体积分数有很大的关系。虽然由于加工误差和测量误差的存在, 试样截面尺寸存在差异, 但均在误差允许范围内, 且泡沫铜-聚氨酯复合材料的冲击能量均值与截面积之间不存在明显的数学关系, 而聚氨酯所占体积分数为主要影响因素, 所以不同截面积的试样其冲击能量均值和冲击韧性具有可比性。试样的冲击能量均值及冲击韧性均先随聚氨酯的填充体积分数增加而增大, 随后出现上下波动, 其能量均值、冲击韧性的最大值出现在聚氨酯填充体积分数为50%处<sup>[15]</sup>。可见在泡沫铜-聚氨酯复合材料试样中, 聚氨酯在试样中所占体积分数为50%时其能量均值(即吸收功值)相对最大, 表示此时材料韧性相对最好, 对结构中的缺陷或其他应力集中情况最不敏感。同时, 材料的冲击韧性相对最高, 表示此时的材料抵抗冲击载荷能力相对最好。此外, 冲击韧性十分灵敏地表现了结晶粒大小和内部金相组织对合金内的影响, 且冲击韧性是控制和稳定产品质量的重要指标。

表3 泡沫铜-聚氨酯试样冲击实验数据  
Tab.3 Impact test data of foamed copper-polyurethane sample

组别	填充体积 分数/%	最小截 面积/mm <sup>2</sup>	能量 均值/J	冲击韧性/ (J·mm <sup>-2</sup> )
I	0	109.76	5.67	0.0517
II	6	99.00	5.90	0.0596
III	12	94.50	5.47	0.0579
IV	18	102.00	5.53	0.0542
V	24	105.80	6.22	0.0588
VI	30	110.00	6.01	0.0546
VII	50	94.30	6.82	0.0723
VIII	100	101.20	6.18	0.0611

## 3 结语

为探究泡沫铜-聚氨酯复合材料在冲击载荷下的力学性能及缓冲吸能性能, 这里利用夏比数显式半自

动冲击试验机对8组聚氨酯填充体积分数不同的试件进行了冲击实验, 并得到了相应的能量均值及冲击韧性值, 以此为依据求得一种缓冲吸能性能优良的复合材料。

在泡沫铜-聚氨酯复合材料试样中, 聚氨酯在试样中所占体积分数为50%时其能量均值(吸收功值)达到8组试样中的最大值, 表示此时材料韧性最好, 且抵抗冲击载荷能力最强。相对填充聚氨酯体积分数为4.9%时的泡沫铝-聚氨酯复合材料试样, 填充聚氨酯体积分数为50%时的泡沫铜-聚氨酯复合材料试样的能量均值、冲击韧性也更高一些, 说明其对结构中的缺陷或其他应力集中情况更不敏感, 其抵抗冲击载荷能力也更好。由此可以得出, 填充体积分数为50%的聚氨酯时泡沫铜-聚氨酯复合材料结构的缓冲性能相对最好, 是一种理想的抗高冲击、高过载的缓冲防护结构。

## 参考文献:

- [1] 陶醉, 张晓伟, 张庆明. 泡沫材料动态压缩力学性能两种实验方法的比较[J]. 兵工学报, 2014(S): 151—156.  
TAO Zui, ZHANG Xiao-wei, ZHANG Qing-ming. Comparison between Two Experimental Methods for Dynamic Compression Test of Foam Materials[J]. Acta Armamentarii, 2014(S): 151—156.
- [2] DEGISCHER H P, KRISZT B. Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2002.
- [3] 刘厚钧. 聚氨酯弹性体手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.  
LIU Hou-jun. The Handbook of Polyurethane Elastomer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [4] 刘欣, 薛向欣, 张瑜, 等. 泡沫铝复合材料的研究[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 79—82.  
LIU Xin, XUE Xiang-xin, ZHANG Yu, et al. Study on Aluminum Foams Composites[J]. Materials Review, 2007, 21(1): 79—82.
- [5] WEGNER L D, GIBSON L J. The Mechanical Behaviour of Interpenetrating Phase Composites III: Resin-Impregnated Porous Stainless Steel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(4): 1061—1072.
- [6] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 516—522.  
WANG Yong-gang, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Simulation Research of Numerical and Experimental Shock Wave Characteristics under Explosion Load of Foam Aluminum Material[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 516—522.
- [7] 傅永华. 有限元分析基础[M]. 武汉: 武汉大学出版

- 社, 2003.
- FU Yong-hua. Fundamentals of Finite Element Analysis[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [8] 李久林. 金属夏比缺口冲击试验方法国家标准实施指南[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- LI Jiu-lin. Charpy Notch Impact Test Method of National Standard Implementation Guide[M]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [9] QI Ming-si, SUN Liang, WANG Xing, et al. High on Shock-cushioning and Energy-absorption-performance Analysis on Aluminum Foam-polyurethane Composite [J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 245: 101—117.
- [10] CESARINO I, MARINO G, CAVALHEIRO E. A Novel Graphite-polyurethane Composite Electrode Modified with Thiol-organofunctionalized Silica for the Determination of Copper Ions in Ethanol Fuel[J]. Fuel, 2010, 89(8): 1883—1888.
- [11] 王艳, 石心余, 蔡立君, 等. 新型小载荷冲击磨损试验机的研制及其实验研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(5): 487—491.
- WANG Yan, SHI Xin-yu, CAI Li-jun, et al. Development and Experimental Study of a New Small Load Impact Wear Test Machine[J]. Tribology, 2007, 27(5): 487—491.
- [12] 张红梅, 郝爽, 马奎星. 金属材料夏比摆锤冲击试验研究[J]. 重型汽车, 2011(6): 25—26.
- ZHANG Hong-mei, HAO Shuang, MA Kui-xing. Study on Charpy Pendulum Impact Test of Metallic Materials[J]. Heavy Truck, 2011(6): 25—26.
- [13] HWANG S, MEYERHOFF M E. Polyurethane with Tethered Copper II Cyclen Complex: Preparation, Characterization and Catalytic Generation of Nitric Oxide from S-Nitrosothiols[J]. Biomaterials, 2008, 29(16): 2443—2452.
- [14] SHEIKH F A, KANJWAL M A, SARAN S, et al. Polyurethane Nanofibers Containing Copper Nanoparticles as Future Materials[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 3020—3026.
- [15] 孙亮, 齐明思, 王俊元, 等. 基于冲击实验的泡沫铝-聚氨酯缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 73—76.
- SUN Liang, QI Ming-si, WANG Jun-yuan, et al. Cushion Performance of Aluminum Foam-polyurethane by Impact Test[J]. Packaging Engineering, 2015, 36 (15): 73—76.