

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.011

间位芳纶纸蜂窝压缩强度的影响因素

崔甜¹, 轩立新², 赵小娇¹, 苏韬², 陈丽春², 周凯运², 王宜¹, 胡健¹

(1. 华南理工大学, 广州 510641; 2. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023)

摘要: 通过采用将间位芳纶纸直接浸渍酚醛树脂模拟蜂窝格壁的方式, 来研究不同密度间位芳纶纸蜂窝异面压缩强度的影响因素。观察三种不同密度的间位芳纶纸蜂窝的微观压缩破坏形貌, 并对比间位芳纶纸蜂窝异面压缩强度实测值与三种计算模型计算值, 从而确定该规格下间位芳纶纸蜂窝受压破坏模式。根据蜂窝材料异面压缩强度理论计算公式进行验证, 间位芳纶纸蜂窝异面压缩强度实测值与塑性坍塌计算模型所得理论值对应性较好。对于孔格边长一定的蜂窝, 格壁材料本身的屈服应力和厚度是影响蜂窝异面压缩强度的关键因素, 而蜂窝格壁材料的厚度和拉伸弹性模量随着上胶量的增加而增加。

关键词: 间位芳纶纸蜂窝; 异面压缩强度; 蜂窝格壁材料; 力学模型

中图分类号: TS762.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0058-05

Factors Affecting Compressive Strength of Meta-aramid Paper Honeycomb

Cui Tian¹, Xuan Lixin², Zhao Xiaojiao¹, Su Tao², Chen Lichun², Zhou Kaiyun², Wang Yi¹, Hu Jian¹

(1. School of Light Industry and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite, AVIC, Jinan 250023, China)

Abstract: The influence factors of different densities of meta-aramid paper honeycomb on the compressive strength were studied by directly impregnating the meta-aramid paper with phenolic resin to simulate the honeycomb cell wall. By observing the micro compression failure morphology of three different densities of meta-aramid paper honeycomb, and comparing the measured value of different surface compression strength of meta-aramid paper honeycomb with the calculated value of three calculation models, the compression failure mode of meta-aramid paper honeycomb under this specification was determined. According to the calculation formula of honeycomb material's different surface compressive strength, the measured value of meta-aramid paper honeycomb's different surface compressive strength is in good agreement with the theoretical value of plastic collapse calculation model. For the honeycomb with a certain length of cell side, the yield stress and thickness of the cell wall material itself are the key factors affecting the compressive strength of the honeycomb, while the thickness and Young's modulus of the cell wall material increase with the increase of the amount of glue.

Keywords: meta-aramid paper honeycomb; different surface compressive strength; cellular wall material; mechanical model

夹层结构作为复合材料领域的重要结构形式之一, 由于具有质量轻、弯曲刚度和强度大、抗失稳能力强等优点, 在航空航天领域得到广泛应用^[1]。芳纶纸蜂窝因其具有耐高温、高强度等诸多优良性能常常被用来做夹层结构的芯材^[2]。芳纶纸经芯条胶粘结固化后拉伸定形, 浸胶烘干固化, 可加工成芳纶纸蜂窝^[3]。目前制作芳纶纸蜂窝芯材的原材料主要是来自于美国杜邦公司所生产的 Nomex 间位芳

纶纸和 Kevlar 对位芳纶纸, 国内华南理工大学已经可以生产出与美国杜邦公司外观、工艺以及性能相近的间位芳纶纸和对位芳纶纸^[4-5]。间位芳纶纸由间位芳纶纤维和浆粕混合抄造而成, 主要化学成分为间位芳族聚酰胺。芳纶纸的纸页结构和主要力学性能, 如抗张强度、断裂伸长率和模量, 对蜂窝的力学性能有着重要的影响。

有关蜂窝的力学性能, 国外力学专家围绕多孔

通信作者: 王宜, 研究员, 主要从事高性能纤维纸基复合材料领域的基础及应用研究

收稿日期: 2021-03-16

引用格式: 崔甜, 轩立新, 赵小娇, 等. 间位芳纶纸蜂窝压缩强度的影响因素 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 58-62.

Cui Tian, Xuan Lixin, Zhao Xiaojiao, et al. Factors affecting compressive strength of meta-aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 58-62.

固体力学性能开展了系统的理论研究工作。J. M. Alexander^[6]分析薄壳圆柱受轴向压力时发生的纵向折叠和横向折叠变形,给出了圆柱薄壁异面压缩载荷的计算公式。R. K. Mcfarland Jr^[7]通过观察六边形孔格在压缩过程中孔格壁折叠形成铰链结构和面内变形,运用极限计算得出六边形蜂窝的压缩破坏应力理论上下限值。T. Wierzbicki 等^[8-9]针对塑性材料制造的蜂窝进一步分析,认为蜂窝在受压过程出现塑性铰变形和结构内部的延伸变形,给出蜂窝异面压缩强度与格壁材料拉伸强度和厚度、孔格边长的关系。J. Zhang 等^[10]分析了蜂窝异面方向简单压缩行为下的破坏模式,并定义了三种破坏机制,分别为弹性屈曲、塑性坍塌和脆性破坏。根据不同特性的蜂窝格壁材料,受压时破坏机制不同,异面压缩强度的理论公式也有所不同。但从纸张角度,芳纶蜂窝破坏机理的实验验证性工作的相关研究仍不完备。

华南理工大学高性能纸基复合材料团队王厚林等^[11-12]认为格壁材料弹性模量和厚度的乘积值是影响芳纶纸蜂窝平压模量、剪切模量的关键纸页性能因素。笔者使用间位芳纶纸直接浸渍酚醛树脂模拟蜂窝孔格壁,研究了不同密度的蜂窝孔格壁的力学性能差异,以现有理论模型为基础,判断不同密度间位芳纶纸蜂窝的压缩破坏失效模式,从而建立纸张力学和蜂窝相关性的关键性能参数,为芳纶纸蜂窝材料的设计提供参考依据。

1 实验部分

1.1 原材料料

间位芳纶纸: Nomex T412, 2 mil (0.0508 mm), 定量 42.0 g/m², 杜邦公司;

醇溶性酚醛树脂: 自制。

1.2 仪器与设备

厚度仪: 250 型, 瑞典 Lorentzen & Wettre 公司;

万能材料试验机: 3300 型, 美国 Istron 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): G2 pro 型, 荷兰 Phenom 公司。

1.3 浸胶纸的制备

芳纶纸蜂窝是由芳纶纸经涂胶、叠块、固化、切割、拉伸等一系列工艺过程后, 再经过浸渍树脂定形, 同时通过控制树脂上胶量来获得密度和性能不同的蜂窝。制备浸胶纸过程为: 首先根据上胶量配置适当浓度的酚醛树脂, 将间位芳纶纸浸泡在酚醛树脂溶液至达到相应上胶量。

将间位芳纶纸浸渍酚醛树脂, 控制树脂上胶量使其与孔格边长为 1.83 mm、蜂窝密度为 64 kg/m³ (规格记为 1.83-64), 孔格边长为 1.83 mm、蜂窝密度为 80 kg/m³ (记为 1.83-80) 和孔格边长为 2.00 mm、蜂窝密度为 90 kg/m³ (记为 2.00-90) 的 3 种规格芳纶纸蜂窝的孔格壁定量相对应, 并对浸胶间位芳纶纸 (以下简称浸胶纸) 的力学性能进行测试。不同密度蜂窝的孔格壁定量和树脂上胶量如表 1 所示, 具体计算方式见式 (1)、式 (2)。

表 1 不同密度蜂窝格壁定量和上胶量

项目	编号			
	S1	S2	S3	S4
对应蜂窝规格		1.83-64	1.83-80	2.00-90
树脂上胶量/%	0	44.8	55.7	64.1
浸胶纸定量/(g·m ⁻²)	42	76.1	95.1	116.9

$$\rho = 1.54 \frac{\rho_s t}{l} = 1.54 \frac{M}{l} \quad (1)$$

$$D = \frac{M - M_0}{M} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ 为蜂窝密度, kg/m³; ρ_s 为浸胶纸密度, kg/m³; t 为浸胶纸厚度, mm; l 为蜂窝孔格边长, mm; M 为浸胶纸的定量, g/m²; M_0 为芳纶纸的定量, g/m²; D 为上胶量。

1.4 测试和表征

纸张厚度按 GB/T 451.3-2002 测量, 抗张强度采用 Instron 电子拉力试验机测试按 GB/T 22898-2008 测试。

蜂窝芯材的密度采用电子天平按 GB/T 1464-2005 测量, 平面压缩强度采用万能力学试验机按 GB/T 1453-2005 测试。

SEM 分析: 采用 SEM 观察浸渍酚醛树脂前后芳纶纸截面的微观形貌; 对 3 种不同密度的间位芳纶纸蜂窝受压破坏后的样品的截面进行观察。图 1 为理想化的蜂窝结构单元, 垂直于 A 处切开观察蜂窝双层壁受压后微观形貌, 垂直于 B 处切开观察蜂窝单层壁受压后微观形貌。图 2 为蜂窝受压前后的平面图。

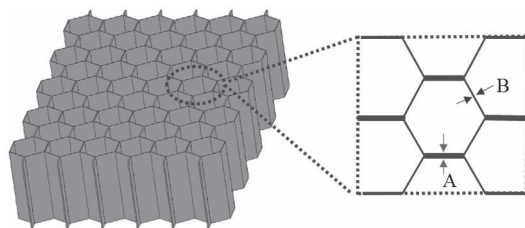
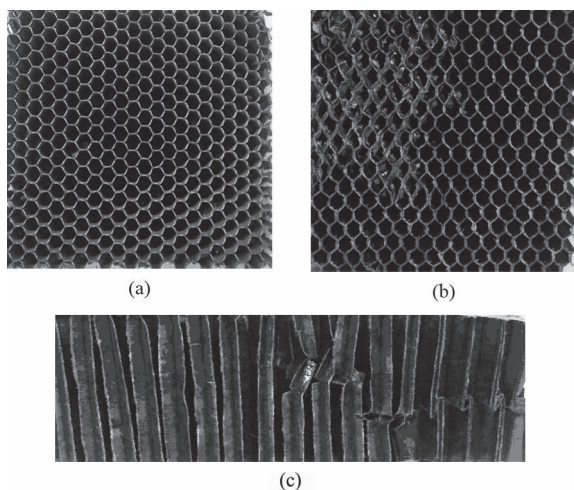


图 1 蜂窝受压后观察截面样品位置



a—受压前;b—受压后;c—蜂窝受压后侧面变形

图2 受压前后间位芳纶纸蜂窝的平面图

2 结果与讨论

2.1 芳纶纸蜂窝格壁的力学性能

图3、图4为间位芳纶纸浸胶前后的横向、纵向拉伸应力-应变曲线。从图3、图4可以直观看出,浸胶后间位芳纶纸的横向伸长率从5.1%降到1.0~1.7%,纵向伸长率从9.9%降低到1.7%~2.3%,但浸胶纸的最大拉伸应力是高于原纸的。浸胶后由于芳纶纤维空隙间填充了酚醛树脂,二者的紧密结合导致浸胶后芳纶纸的拉伸弹性模量均高于原纸^[13]。浸渍酚醛树脂后不同上胶量的浸胶纸的物理力学性能见表3。

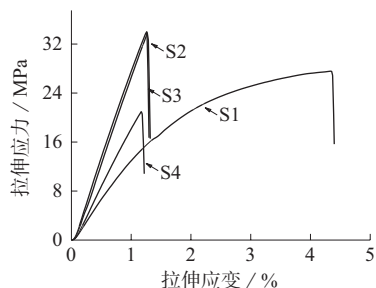


图3 间位芳纶纸浸胶前后横向拉伸应力-应变曲线

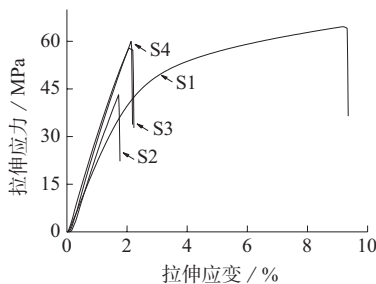


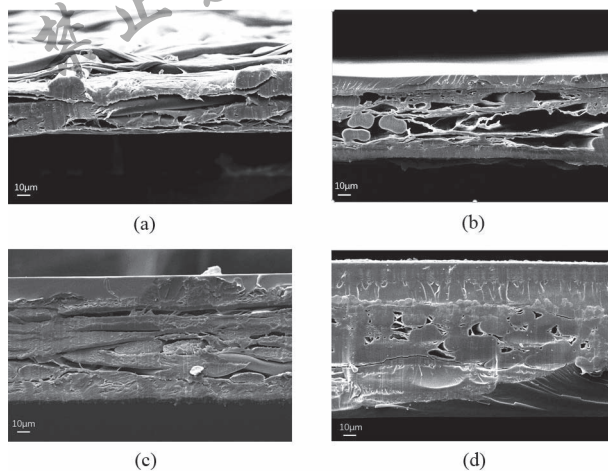
图4 间位芳纶纸浸胶前后纵向拉伸应力-应变曲线

表3 浸渍后不同上胶量浸胶纸的物理力学性能

编号	厚度 / μm	拉伸强度 / MPa		断裂伸长率 / %		弹性模量 / MPa	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
S1	63.9	60.6	23.3	9.9	5.1	2 592	1 517
S2	82.9	58.6	35.7	2.31	1.66	3 114	2 662
S3	125.6	54.8	28.9	2.04	1.06	3 376	3 132
S4	184.0	36.8	20.7	1.68	1.17	2 565	2 115

对比浸胶前,发现随着格壁定量增加,上胶量同时增加,纸页厚度也逐渐增加,纵向拉伸强度逐渐降低,横向拉伸强度先增加后降低,断裂伸长率也是逐渐降低的。结合应力-应变曲线图分析这可能是由于浸渍酚醛树脂后的芳纶纸页表现出类似脆性材料的性质^[1]。

图5为不同上胶量芳纶纸的截面SEM照片。从图5可看出,随着上胶量增加,芳纶纸页表面的胶层越来越厚,同时酚醛树脂渗入得越来越深,S2蜂窝格壁的胶层只是在芳纶纸页表面,S3蜂窝格壁的酚醛树脂部分进入纸页内部,S4蜂窝格壁的酚醛树脂已经全部渗入芳纶纸页内部。随着上胶量和浸胶时间增加,渗透压促使胶液进入纸页内部。



a—S1;b—S2;c—S3;d—S4

图5 不同上胶量芳纶纸的截面SEM照片

2.2 芳纶纸蜂窝压缩强度与纸页性能之间的关系

若对一个蜂窝体进行异面压缩,首先孔壁会产生线弹性变形,超出临界应变时,其孔穴会发生弹性屈曲、塑性坍塌和脆性断裂,这些取决于孔壁材料的性质。对于不同材料的蜂窝,在受到异面压缩时破坏模式不同,异面压缩强度理论公式有所不同。针对弹性材料,蜂窝在受压时孔壁出现周期性凸胀,受平行于加载方向的两边约束的孔壁屈曲^[14-15],异面压缩强度公式为:

$$\sigma \approx 21.9E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3)$$

针对塑性材料,蜂窝在受压时,孔壁产生周期性折叠,存在两个或两个以上塑性铰^[11],异面压缩强度公式为:

$$\sigma = 5.6\sigma_{ys}\left(\frac{t}{l}\right)^{5/3} \quad (4)$$

针对脆性材料,蜂窝在受压时,孔壁会发生拉伸断裂,出现变形、断裂,异面压缩强度公式为:

$$\sigma = 12\sigma_{fs}\left(\frac{t}{l}\right) \quad (5)$$

式(3)~式(5)中, σ 为异面塑性坍塌压缩强度,MPa; E_s 为格壁材料的弹性模量,MPa; σ_{ys} 为格壁材料的屈服应力,MPa; σ_{fs} 为格壁材料的拉伸断裂应力,MPa; t 为斜壁的厚度,mm; l 为蜂窝斜壁的长度,mm。

不同密度间位芳纶纸蜂窝异面压缩强度理论值与实测值见图6。

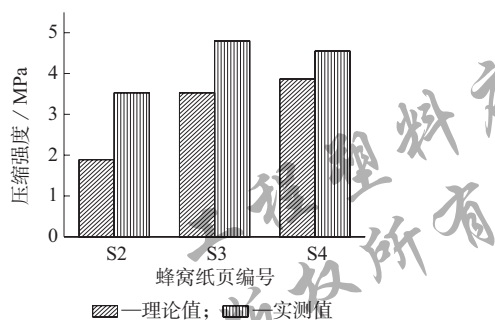
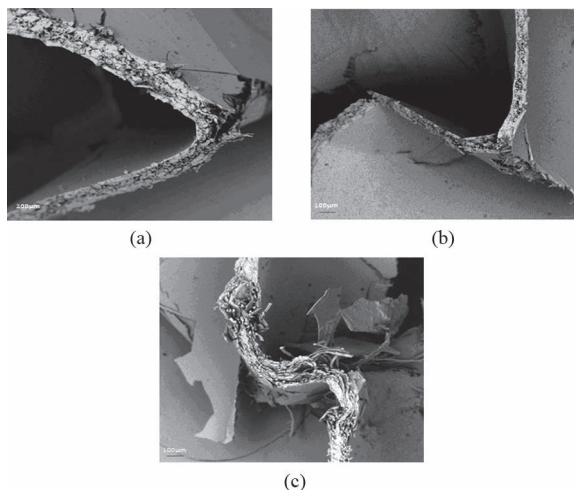


图6 间位芳纶纸蜂窝异面压缩强度塑性坍塌模型计算值与实测值

从图6可以看出,三种密度的蜂窝的异面压缩强度的理论值和实测值较符合塑性坍塌力学模型。为了进一步验证,对压缩破坏后的蜂窝取样,得到SEM照片如图7所示。



蜂窝纸页编号:a—S2;b—S3;c—S4

图7 受压破坏后蜂窝的SEM照片

图7中都是纸张压缩失效中比较典型“塑性铰”的变形,上述分析可以得出:该尺寸、规格范围内间位芳纶纸蜂窝在受异面压缩时主要发生的是塑性坍塌。

当蜂窝的孔格边长相同时,芳纶纸蜂窝的异面压缩强度正比于格壁材料本身的屈服应力和厚度的 $5/3$ 次方的乘积。

3 结论

(1) Nomex 芳纶纸蜂窝在压缩过程中,格壁会出现弯曲,产生线弹性形变,超出临界应变时,孔格壁会发生塑性屈服,观察到明显的塑性铰变形。根据蜂窝异面压缩强度计算值与理论值对比,判断间位芳纶纸异面压缩强度实测值更符合塑性坍塌计算公式的理论计算值。

(2) 对于 Nomex 芳纶纸蜂窝孔格边长一定时,蜂窝的异面压缩强度正比于格壁材料本身的屈服应力和厚度的 $5/3$ 次方的乘积。孔壁材料本身的屈服应力和厚度是影响蜂窝异面压缩强度的关键因素。

参考文献

- [1] Roy R, Park S J, Kweon J H, et al. Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties[J]. Composite Structures, 2014, 117:255–266.
- [2] 张建国,党晓娟. 芳纶纸蜂窝芯材的制备技术及其应用研究进展[J]. 新材料业, 2019(12):52–56.
Zhang Jianming, Dang Xiaojuan. Research progress on preparation technology and application of aramid paper honeycomb core[J]. New Materials Industry, 2019(12):52–56.
- [3] 刘杰,郝巍,罗玉清,等. 航空用芳纶纸蜂窝性能差异性研究[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(2):80–83.
Liu Jie, Hao Wei, Luo Yuqing, et al. Study on property difference of aviation aramid paper honeycomb[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(2):80–83.
- [4] 郝巍,罗玉清. 国产对位芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(6):21–25.
Hao Wei, Luo Yuqing. Study on the properties of China's p-aramid paper honeycomb[J]. High-tech Fiber and Its Application, 2009, 34(6):21–25.
- [5] 王宏磊. 蜂窝夹芯复合材料的力学性能研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
Wang Honglei. Research on mechanical properties of honeycomb sandwich composite material[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [6] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13(1):10–15.

- [7] McFarland Jr R K. Hexagonal cell structures under post-buckling axial load[J]. AIAA Journal, 1963, 1(6):1 380-1 385.
- [8] Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2):157-174.
- [9] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin-walled structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 1983. doi:10.1115/1.3167137.
- [10] Zhang J, Ashby M F. The out-of-plane properties of honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1992, 34(6):475-489.
- [11] 王厚林,王宜,姚运振,等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15):2 184-2 187, 2 192. Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper honeycomb[J]. Functional Materials, 2013, 44(15):2 184-2 187, 2 192.
- [12] 王厚林,王宜,姚运振,等. 芳纶纸蜂窝力学性能与纸张性能相关性的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(3):349-352. Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. The relationship between aramid paper honeycomb mechanical properties and paper performance[J]. Functional Materials, 2013, 44(3):349-352.
- [13] 郝巍,李勇,罗玉清. 中、高密度 Nomex 蜂窝力学性能研究[J]. 航空材料学报, 2002(2):41-45. Hao Wei, Li Yong, Luo Yuqing. Study on the mechanical properties of the moderate and high density Nomex honeycomb[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002(2):41-45.
- [14] Gibson L J. 多孔固体结构与性能[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2003. Gibson L J. Structure and properties of porous solids[M]. 2nd Ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [15] Huang J S, Gibson L J. Fracture toughness of brittle honeycombs[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39(7):1 617-1 626.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2021 年定价 20 元/期,全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2020 年底共 48 卷 374 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2020 年底

共 29 卷 141 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 260 元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>