

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.09.019

基于修正 Archard 模型的聚醚醚酮磨损数值模拟^{*}肖博升¹, 王新宇¹, 李征¹, 谷俊峰¹, 阮诗伦^{1,2}, 申长雨^{1,2}

(1. 大连理工大学工程力学系, 大连 116024; 2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 基于端面摩擦磨损实验, 研究了摩擦条件对聚醚醚酮 (PEEK) 磨损率的影响, 并以此建立了 PEEK 的修正 Archard 磨损计算模型。结合有限元分析软件与网格自适应处理技术, 该磨损计算模型被用于实现 PEEK 在多种摩擦工况下的仿真与预测模拟, 模拟结果与试验结果吻合良好, 说明提出的磨损模型与数值模拟方法的合理性, 适用于 PEEK 在复杂接触条件下的磨损预测。

关键词: 聚醚醚酮; 摩擦磨损; Archard 模型; 数值模拟

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)09-0088-05

Numerical Simulation of PEEK Wear Based on Modified Archard Model

Xiao Bosheng¹, Wang Xinyu¹, Li Zheng¹, Gu Junfeng¹, Ruan Shilun^{1,2}, Shen Changyu^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the end face friction and wear experiments, the influence of friction conditions on the wear coefficient of polyether ether ketone (PEEK) was studied, and a modified Archard wear calculation model for PEEK was established. Combined with finite element analysis software and adaptive grid technology, the wear calculation model was used in the wear simulation and prediction of PEEK under various frictional conditions, and the simulation results are in good agreement with the experimental results, indicating the rationality of the wear model and numerical simulation method proposed. This method is suitable for wear prediction of PEEK under complex contact conditions.

Keywords: polyether ether ketone; friction and wear; Archard model; numerical simulation

聚醚醚酮 (PEEK) 是一种半结晶性的热塑性特种工程塑料^[1], 具有力学性能优异、耐高温、阻燃、无毒、耐高温水解等优良性质, 且可采用传统热塑性塑料的成型加工工艺, 因而在航空航天、电子电气、汽车制造、医疗卫生等领域已经得到了广泛的应用。除此之外, 在高温下突出的耐磨损性能, 使得 PEEK 在许多特殊领域作为关键耐磨材料可以替代金属、陶瓷等传统材料, 比如汽车、能源领域中的轴承、齿轮, 医疗领域中的人工关节材料等。

材料的摩擦磨损性能作为一种基础性能, 不仅关系着其制品在使用中的能源消耗, 优异的摩擦磨损性能可以实现节能、节材、环保, 更重要的是, 摩擦磨损性能关系着其制品的可靠性与安全性^[2-3]。磨损是零部件失效的一种基本类型。据统计分析表明, 每年大约有 70% 的零件失效是由于各种形式的磨损引起的^[4]。如果能掌握材料的磨损规律, 预测材料在不同工况下的磨损特性, 并据此改善加工工艺以控制摩擦、减少磨损、改善润滑性能, 那么就能大

大节约能源和原材料, 并且缩短设备的维修时间和延长其使用寿命^[5]。传统的磨损研究方法大多来源于实验研究, 针对某种工况以特定的试验条件在专门的试验仪器上进行大量的模拟实验^[6-8]。这种实验研究方法耗费大量时间、人力、物力和财力, 并且某些模拟实验结果并不能很好地应用在摩擦学系统的建设和实际的工程应用中, 比如磨损寿命预测、磨损过程动态检测等^[9]。而数值仿真技术可以弥补这些不足, 为摩擦学研究提供一种新的手段。磨损数值模拟的关键在于磨损模型的建立上, 部分研究者通过将 Archard 磨损模型与有限元结合的方式实现磨损的数值分析^[10-11]。但传统的 Archard 磨损模型

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (11432003), 863 计划项目 (2015AA033803), 中央高校基本科研业务项目 (DUT17LK08), 辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目 (LZ2015016), 111 引智计划项目 (B14013)

联系人: 谷俊峰, 副研究员, 主要研究方向为制造工艺力学

收稿日期: 2017-06-16

在实际应用中具有一定的局限性,不能反映摩擦条件对于材料磨损性能的影响。而实际上,材料在不同的摩擦条件下,会表现出不同的磨损特性,因此需要对该模型进行修正^[12-13],以实现材料磨损的精确仿真与预测。

笔者通过控制变量法设计了 PEEK 关于摩擦条件的端面摩擦磨损实验,并以此建立了 PEEK 的 Archard 磨损修正模型,并将该模型与有限元相结合,对不同实验条件下 PEEK 材料磨损进行模拟,模拟结果与实验结果有很好的 consistency。所提出的磨损数值仿真方法对于掌握摩擦磨损演变规律及磨损寿命预测具有很好的指导意义。

1 基于修正 Archard 模型的磨损数值模拟方法

在磨损的数值模拟中,磨损计算模型的确定是其中的关键问题。经典的 Archard 模型^[14]考虑了法向载荷和材料的屈服极限对磨损的影响,把其他因素影响归结到磨损率上,其计算公式见式 (1)。

$$\frac{dV}{ds} = \frac{K}{H} F \quad (1)$$

式中: V 表示磨损体积, s 表示相对滑动距离, K 表示磨损系数, H 表示材料硬度, F 为载荷。

经等价变换 $dV=A \cdot dh$, $ds=v \cdot dt$, $P=F/A$, 其中 A 为实际接触面积, dh 为磨损深度, P 为接触压力, $v \cdot dt$ 表示 dt 时间内的相对滑移量,可得到 Archard 磨损计算公式的有限元表达形式见式 (2)。

$$dh = \frac{K}{H} P v dt \quad (2)$$

在进行有限元分析时,提取每个 dt 节点的接触压力、相对滑移量,代入式 (2) 得到 dt 时间的节点磨损深度 dh ,以此作为节点位移值,更新模型,进入下一个 dt ,如此循环,直到达到总磨程。有限元中,节点第 i 个时间子步的磨损深度及总磨损深度分别为式 (3)、式 (4)。

$$dh_i = \frac{K}{H} P v dt_i \quad (3)$$

$$h_i = h_{i-1} + dh_i \quad (4)$$

从式 (3)、式 (4) 可以看出,磨损模拟的关键问题是确定磨损率 K/H (单位时间内单位载荷下材料的磨损量 $dh/Pvdt$)。在经典 Archard 磨损模型中,同种材料的磨损率认为是一定值,忽略了摩擦条件对于制品磨损率的影响,然而实际上,材料磨损率和诸多因素有关,例如相对滑动速度、接触压力、润滑

条件等,这就严重影响了磨损数值模拟的精度。为了解决此问题,首先基于 PEEK 端面摩擦磨损实验,以获得不同摩擦条件下磨损率,建立修正的 Archard 磨损模型,并以此发展新型的 PEEK 磨损数值模拟方法,具体步骤如下:

(1) A. Rezaei 等^[15]的研究指出对于高聚物材料和高聚物复合材料,磨损率与压力与滑动速度的乘积相关。所以,笔者首先以压力与转速乘积为变量进行摩擦磨损实验,建立 PEEK 磨损率预测模型。

$$\frac{K}{H} = f(P \cdot v) \quad (5)$$

(2) 将 PEEK 磨损率预测模型整合到 Archard 磨损计算公式中,并将其转化为有限元格式,写入 Abaqus 子程序 Umeshmotion 中。

(3) 应用有限元分析软件 Abaqus 结合 Umeshmotion 子程序对实验工况进行模拟,提取接触节点的磨损深度,最终实现给定摩擦条件下 PEEK 材料的磨损模拟。

2 基于端面摩擦磨损实验的修正 Archard 磨损模型

2.1 原材料

PEEK: 550G, 吉林省中研高性能工程塑料股份有限公司。

2.2 仪器及设备

真空干燥箱: DZF-6050 型, 上海一恒科技有限公司;

注塑机: BOY22A 型, 德国 Boy 公司;

电液伺服材料端面高温摩擦磨损试验机: MM-U10G 型, 济南时代试金试验机有限公司;

电子天平: FA/JA 型, 上海民桥精密科学仪器有限公司;

便携式粗糙度仪: 178-560-01DC 型, 日本三丰公司。

2.3 实验过程

(1) 磨损试样制备。

将 PEEK 置于真空干燥箱中, 在 160℃、真空的条件下干燥 2 h。随后通过注射成型试验得到相同注塑工艺下的摩擦样品。注塑工艺参数设置见表 1。

表 1 注塑工艺参数设置

模具温度 / ℃	熔体温度 / ℃	注塑压力 / MPa	保压压力 / MPa	保压时间 / s
190	380	81	65	5

(2) 磨损性能测试。

为使注射成型得到的 PEEK 试样能与磨损试

验机匹配使用。先要对 PEEK 试样进行打孔加工,最后 PEEK 下试样模型如图 1 所示,圆盘高 4 mm,直径 41 mm,中间圆孔直径为 8 mm,两边圆孔对称直径 4.5 mm,圆心间距 35 mm。对摩上试样为高温钢,模型如图 2 所示。摩擦副底面圆环与圆盘接触,圆环厚度为 3 mm,内圆直径 20 mm,外圆直径为 25.6 mm。实验之前先通过表面粗糙度仪对 PEEK 试样表面粗糙度进行测试,得到其表面粗糙度均为 0.12 μm。随后在室温条件下,以压力与转速乘积为变量,进行摩擦磨损实验,为了减少温度对材料摩擦磨损性能的影响,控制压力与转速乘积范围 314~494 MPa·mm/s,实验时间为 360 min。具体设置见表 2。

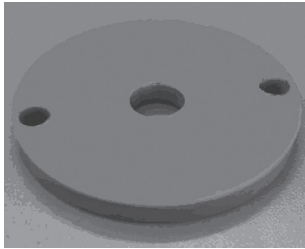


图 1 PEEK 磨损试样加工模型及尺寸

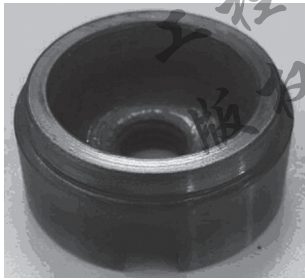


图 2 HRC 钢摩擦副模型

表 2 实验方案

试验号	压力 × 相对运动速度 / (MPa · mm · s ⁻¹)
1 [#]	314.121
2 [#]	358.996
3 [#]	403.871
4 [#]	448.745
5 [#]	493.619

2.4 实验结果与讨论

磨损实验所得到的磨损率与压力和滑动速度乘积之间的关系如图 3 所示,可以看出两者之间具有非常明显的非线性关系。为了获得磨损率与摩擦工艺之间的定量关系,借助 MATLAB 软件对表 3 实验结果进行插值,采用二次回归模型去拟合这种关系,拟合结果如表 4 所示。至此建立了磨损率关于压力与相对滑动速度乘积的数学表达式。

二次回归拟合模型:

$$\frac{K}{H} = [a(P \cdot v)^2 + bP \cdot v + c] \times 10^{-9} \quad (6)$$

将上述模型代入式 (2) 中得到修正的 PEEK 材料磨损计算模型:

$$dh = [1.011(P \cdot v)^2 - 638.4P \cdot v + 103900] \times 10^{-12} Pvd t \quad (7)$$

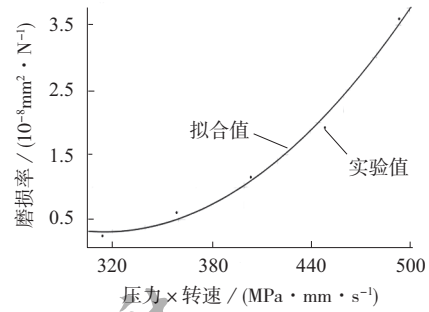


图 3 拟合磨损率-压力转速乘积的二次回归模型

表 3 磨损实验结果

试验号	磨损前质量 / g	磨损后质量 / g	密度 / (g · mm ⁻³)	磨损体 积 / mm ³	磨损率 / (mm ³ · N ⁻¹)
1 [#]	6.0169	6.0128	1.2148	3.374	2.494 × 10 ⁻⁹
2 [#]	6.0188	6.0073	1.2152	9.463	6.119 × 10 ⁻⁹
3 [#]	6.0225	5.9980	1.2159	20.148	1.158 × 10 ⁻⁸
4 [#]	6.0194	5.9768	1.2153	37.146	1.921 × 10 ⁻⁸
5 [#]	6.0219	5.9288	1.2158	76.570	3.601 × 10 ⁻⁸

表 4 二次回归结果

系数	拟合值 (95% 置信区间)
a	0.001 011 (2.293 × 10 ⁻⁵ , 0.002)
b	-0.638 4 (-1.438, 0.161 8)
c	103.9 (-54.84, 262.6)
r ²	0.983

3 摩擦磨损数值模拟

为了验证所提出的修正 Archard 模型以及数值模拟方法,所建立的用于磨损分析的有限元模型如图 4 所示,由钢摩擦副和 PEEK 圆盘组成,有限元模型的尺寸与实验保持一致,材料参数如表 5、表 6 所示。整个模型共包含 5 192 个六面体单元和 7 026 个节点,单元属性选用六面体减缩积分单元 C3D8R。以圆环底面为主面,圆盘上表面为从面设

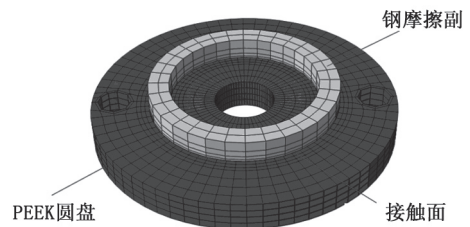


图 4 数值模拟模型

置面接触,给圆环施加垂直于圆盘上表面的压力并绕自身旋转。为了测试模拟精度,首先按照表3所示磨损实验方案进行了五次模拟分析,模拟中所采用的压力及转速与实验值保持一致。

表5 PEEK 圆盘材料属性

密度 / ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	泊松比
1.215	4.1	0.4

表6 钢摩擦副材料属性

密度 / ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	泊松比
7.8	200	0.3

整个分析过程可分为三个时间步即只加载、加载-自转-磨损、只卸载,在第二个时间步调用 Umeshmotion 子程序,设置圆盘上表面与圆环接触的区域为自适应网格域。选取公共接触面位于圆盘面上的第 975 号节点,其位移随时间变化曲线如图 5 所示,共分为三个阶段,即初始只加载产生的位移、中间子程序的引入导致位移的增加以及最后卸载位移的回复。图 6 为磨损深度随距圆盘中心距离的变化,可以看到边缘磨损深度大于内部,这是由于外侧接触压力与相对运动速度乘积大于内侧,调用子程序提取节点压力代入磨损公式计算得到的外部位移就会大于内部。

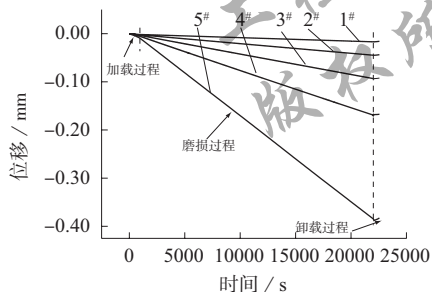


图5 接触面 975 号节点位移随时间变化

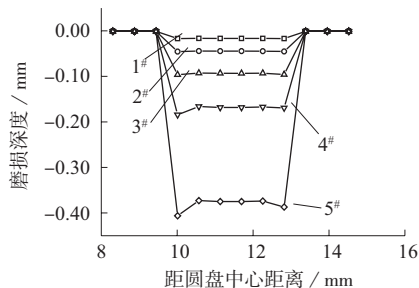


图6 磨损深度随距圆盘中心距离的变化

通过 Python 语言提取圆盘表面与圆环接触的节点位移并取平均值作为 PEEK 圆盘的磨损深度。模拟磨损形貌图与实验磨损形貌图如图 7 所示。磨损深度模拟值与实验值对比结果如表 7 及图 8 所示,平均误差为 4.136 2%,实验值比模拟值偏大,这是由

于数值模拟接触分析过程中由于上试样受压力作用,且绕中心转动,导致接触面节点产生切向位移,这将导致接触面积变大,并且在模拟过程中,接触面节点并不是完全平整的,它会随着磨损的进行而存在微小的高度差,这都会使得数值模拟过程中节点接触压力小于实验值,所以导致磨损实验值比模拟值偏大。图 9 所示为接触面的一个截面各节点接触压力随时间的变化曲线,可以看到压力转速乘积为 $358.996\ 1\ \text{MPa} \cdot \text{mm/s}$ 的实验工况对应的数值模拟接触压力稳定以后其值均小于实验的接触压力平均值;压力转速乘积为 $448.745\ 1\ \text{MPa} \cdot \text{mm/s}$ 的实验工况对应的数值模拟在接触边缘节点的接触压力后期有上升趋势且值大于实验平均值,这将导致接触边缘节点磨损深度增加,这也是数值模拟在该实验工况下误差减小的原因。

为了进一步考察所提出方法的预测能力,另外采用磨损率拟合点外的摩擦条件进行了 3 组磨损数

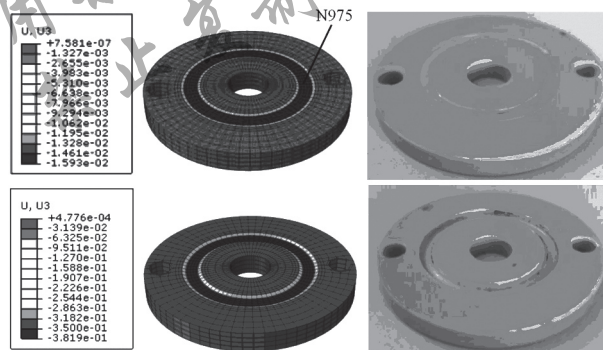


图7 压力转速乘积最小、最大时模拟及实验磨损形貌对比图

表7 磨损深度模拟值与实验值对比

试验号	实验磨损深度 / ($10^{-2}\ \text{mm}$)	模拟磨损深度 / ($10^{-2}\ \text{mm}$)	误差 / %
1#	1.682 7	1.584 3	5.847 7
2#	4.718 3	4.435 8	5.987 3
3#	10.045 9	9.460 1	5.831 2
4#	18.521 3	18.136 5	2.077 6
5#	38.178 4	37.820 6	0.937 2

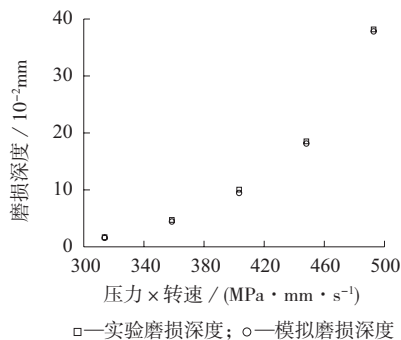


图8 磨损率拟合点处模拟磨损深度与实验磨损深度对比

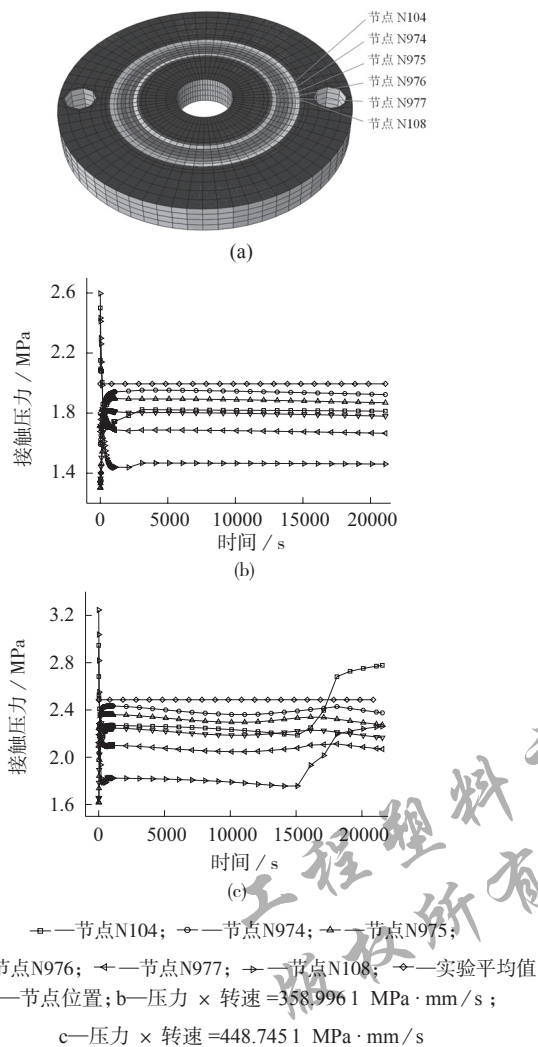


图9 接触压力随时间变化曲线

值模拟分析,并通过摩擦磨损实验进行了验证,结果如表8所示。磨损模拟值和实验值的平均误差为8.43%,该误差比拟合点处误差大,这是由于预测点处误差是由两部分叠加而成的,第一部分为拟合所得到的磨损率与实际磨损率的误差,第二部分为数值模拟所带来的误差,而拟合点处磨损的数值模拟的误差仅由第二部分造成。总的来说,预测结果与实验吻合良好,说明提出的修正 Archard 模型更能反映材料在不同摩擦条件下的磨损,适用于 PEEK 材料的磨损仿真与预测。

表8 不同压力转速乘积条件下模拟磨损深度与实验值对比

压力 × 转速 / (MPa · mm · s ⁻¹)	试验磨损深度 / (10 ⁻² mm)	模拟磨损深度 / (10 ⁻² mm)	误差 / %
332.07	1.513	1.690	10.467%
381.43	3.107	2.912	6.288%
426.31	8.037	7.352	8.519%

4 结语

材料使用过程中磨损的严重程度关系到设备

和人身安全,通过实验建立了 PEEK 干摩擦条件下的磨损预测模型,并将该模型与有限元分析软件相结合,实现了磨损的数值模拟。分析结果表明,应力和转速的乘积对 PEEK 在干摩擦条件下的磨损影响趋势近似于开口向上的二次函数。提出的磨损数值模拟方法对于复杂工况下材料磨损的预测具有很好的指导意义。

参考文献

- [1] 李恩重,徐滨士,王海斗,等. PEEK 与 GF/PEEK 摩擦学性能研究 [A]. 第十一届全国摩擦学大会论文集,2013:1-4.
Li Enzhong, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Study on the tribological properties of polyetheretherketone and polyetherketone composites reinforced with glass fiber[A]. The Proceedings of the Eleventh National Tribology Conference, 2013:1-4.
- [2] Sun Y, Zhang Z. Relevance-based reliability theory of mechanical systems[J]. Mechanical Science & Technology, 2006, 25(5):576-579.
- [3] Antsupov A V, Antsupov A V, Antsupov V P. Development of the theory predicting the reliability of machine parts[J]. Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2014(2):26-30.
- [4] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2002.
Wen Shizhu, Huang Ping. Tribology principle[M]. Beijing:Tsinghua University Press Limited, 2002.
- [5] Ebrahimi B, Bauer E. Numerical simulation of the effect of interface friction of a bounding structure on shear deformation in a granular soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(12):1 486-1 506.
- [6] Ji W, Zou B, Liu Y, et al. Frictional behavior and wear resistance performance of gradient cermet composite tool materials sliding against hard materials[J]. Ceramics International, 2017, 43(10):7816-7826.
- [7] Zamula M V, Varchenko V T, Umerova S A, et al. Friction and wear of the TiB₂-30 vol% B₄C composite consolidated in spark plasma sintering[J]. Powder Metallurgy & Metal Ceramics, 2017, 55(9-10):567-573.
- [8] 林卜阳. 聚醚醚酮摩擦磨损性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2016.
Lin Buyang. Research on the tribological and wear behavior of PEEK[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2016.
- [9] Sang M C, Khonsari M M. Wear simulation for the journal bearings operating under aligned shaft and steady load during start-up and coast-down conditions[J]. Tribology International, 2016, 97:440-466.

(下转第 104 页)

- Zhao Xin, Du Youru, Ye Zhaohui. Studies on radiation induced crosslinked cis-1,4-polybutadiene by ^{13}C -NMR[J]. Acta Polymerica Sinica, 1999, 2(1):167-170.
- [11] Bovey F A. High resolution NMR of macromolecules[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [12] 华正江, 俞雄飞, 袁丽凤, 等. 傅立叶变换红外光谱法测定聚苯醚-聚苯乙烯混合物中的组分含量[J]. 化学分析计量, 2009, 18(6):16-19.
- Hua Zhengjiang, Yu Xiongfei, Yuan Lifeng, et al. Determination of the content of each component in polyphenylene oxide-polystyrene blends by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Chemical Analysis And Meterage, 2009, 18(6):16-19.
- [13] 张玉冰, 孔雅琼, 于永良. 核磁共振方法研究工业级聚苯乙烯的热老化[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3):251-255.
- Zhang Yubing, Kong Yaqiong, Yu Yongliang. Thermal degradation behaviors of PS Studied by NMR[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(3):251-255.
- [14] 张玉冰, 高照明, 徐庆强, 等. 多次注塑 HIPS 的力学性能与化学结构的关联性研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(1):85-93.
- Zhang Yubing, Gao Zhaoming, Xu Qingqiang, et al. Study on relationship between mechanical properties and molecular structure of repetitious injection molded HIPS[J]. China Plastics, 2010, 24(1):85-93.
- [15] 唐惠儒, 王玉兰. 代谢组研究[J]. 生命科学, 2007, 19(3):272-278.
- Tang Huiru, Wang Yulan. Metabonomics[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2007, 19(3):272-278.
- [16] Tang H R, Wang Y L. Metabonomics: A revolution in progress[J]. Prog Biochem Biophys, 2006, 33(5):401-417.
- [17] 罗先汉. 物信论-多层次物质信息系统及其哲学探索[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(3):440-447.
- Luo Xianhan. Matter information theory: Matter information system of various layers and their philosophical explorations[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: Natural Science Edition, 2005, 41(3):440-447.
- [18] 梁逸曾, 吴海龙, 沈国励, 等. 分析化学计量学的若干新进展[J]. 中国科学 B, 2006, 36(2):93-100.
- Liang Yizeng, Wu Hailong, Shen Guoli, et al. Some new progress in analytical chemometrics[J]. Science in China, Series B: Chemistry, 2006, 36(2):93-100.
- [19] 徐光宪. 关于化学信息学的探索与思考[J]. 中国科学 B, 2007, 37(1):6-11.
- Xu Guangxian. Exploration and thinking about the cheminformatics[J]. Science in China, Series B: Chemistry, 2007, 37(1):6-11.

三星将在 Galaxy Note 8 零售包装中 增加透明塑料手机壳

据韩国媒体报道,三星将首次在 Galaxy Note 8 零售包装中增加透明塑料手机壳。这款手机壳将覆盖手机的背面和四周,以防抓痕的出现。

据悉这款手机壳已由韩国三至四家手机配件制造商制造,三星为 Galaxy Note 8 预订了 1000 万个这样的手机壳,这个数字显然不足以支持三星手机的全球销量。

这款透明手机壳单独售卖的价格将在 17 美元(约合人民币 114 元)至 27 美元(约合人民币 182 元)之间。传闻称这款手机壳将不会包含在美国、欧洲和俄罗斯的 Galaxy Note 8 包装中。

不过,如果这款手机壳对 Galaxy Note 8 的销量可以起到相当大的推动作用,那么它在韩国首发后,可能还会出现在其它市场。用户对这款手机壳的反馈将至关重要。

(中塑在线)

(上接第 92 页)

- [10] Hegadekotte V, Huber N, Kraft O. Finite element based simulation of dry sliding wear[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(1):57-75.
- [11] Massi F, Bouscharain N, Milana S, et al. Degradation of high loaded oscillating bearings: Numerical analysis and comparison with experimental observations[J]. Wear, 2014, 317(1-2):141-152.
- [12] 陈杰. H13 钢表面磨损行为的数值模拟研究及模具寿命预测[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Chen Jie. Numerical simulation research on surface wear behavior of H13 steel and prediction of the mould life[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [13] 张方宇. 制动器热-应力-磨损耦合行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Zhang Fangyu. Study on coupled heat transfer, stress and wear behavior in brakes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [14] Shen X, Gao L, Li R. Numerical simulation of sliding wear based on archard model[J]. International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering, 2010:325-329.
- [15] Rezaei A, Paepegem W V, Baets P D, et al. Adaptive finite element simulation, of wear evolution in radial sliding bearings[J]. Wear, 2012, 296(1-2):660-671.