

橡胶阻尼材料纳秒激光打孔实验及机理分析

陈 列 汪 军 刘 顿* 翟中生 杨奇彪 娄德元 Peter Bennett

湖北工业大学机械工程学院,湖北 武汉 430068

摘要 针对丁腈橡胶阻尼材料的打孔问题,采用波长为 1064 nm 的纳秒激光器进行了相关实验,观察了激光作用下橡胶材料呈现的特殊状态,并着重讨论了不同脉宽条件下,其状态的变化规律。结果表明由于热量的作用以及空气中氧的侵蚀,孔壁处出现了如蜂窝状的烧蚀状态;在热影响区内,橡胶材料中的氧扩散速度升高,橡胶氧化反应加剧,导致该区域内的橡胶发生了氧化变性。当采用脉宽较短的激光进行打孔时,由于瞬时高温所产生的冲击波更强、时间能量密度更高等因素,所得到的孔径、深度都更大;当激光脉冲宽度较长时,激光能量在孔壁附近的累积更严重,其烧蚀的程度较严重。为减轻因烧蚀、老化等造成橡胶性能下降的问题,应尽量选择脉宽较短的激光参数,同时可考虑采用外部冷却、保护气体等手段,尽可能减小打孔时产生的热影响区。

关键词 激光技术;激光打孔;纳秒激光;橡胶阻尼材料;激光脉宽;热影响区

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s216004

Experimental and Mechanism Analysis of Holes Drilling on Rubber Damping Material Using Nanosecond Laser

Chen Lie Wang Jun Liu Dun Zhai Zhongsheng Yang Qibiao
Lou Deyuan Peter Bennett

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract In order to drill hole on the damping materials of nitrile butadiene rubber, a 1064 nm nanosecond laser is used for relevant experiments. Special state of rubber material in this process is observed, and the changing law of its state under the conditions of different pulse width is investigated and analyzed. The results show that honeycomb ablation state appears on the inside of the hole due to the effect of heat and oxygen erosion in the air. And as a result, the increasing velocity of oxygen diffusing into rubber material, oxidation reaction of the rubber in heat affected zone is aggravated, and oxidative denaturation of rubber is occurred. The diameter and depth of the hole that drilled by laser with shorter pulse width are larger, owing to more powerful shock wave generated by instantaneous higher temperature and higher energy density with time. Under the condition of drilling hole with longer laser pulse width, the energy of laser can be accumulated on the inside of the hole. Ablation of rubber in this area is more serious. For the sake of reducing the influence on the performance of rubber by ablation and aging, pulse width of laser should be as short as possible. At the same time, some auxiliary measures should also be adopted to decrease the area of heat affected zone, such as external cooling, injecting protective gas, and so on.

Key words laser technique; laser drilling; nanosecond laser; rubber damping materials; pulse width; heat affected zone

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.5470

1 引 言

橡胶作为吸声及阻尼降噪材料的重要组成部分,已被广泛地应用于航空、航天、航海、交通运输、建筑等

收稿日期: 2015-03-04; **收到修改稿日期:** 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(51405141)、湖北省自然科学基金(2014CFB596)、国家科技支撑计划(2015BAF20B03)

作者简介: 陈 列(1983—),男,博士,讲师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail:cangn1983@163.com

***通信联系人。** E-mail:liudun98@163.com

各个领域^[1]。但其功能和使用范围却受到橡胶材料本身的限制,远不能满足多种应用场合的需要。为此,许多研究者尝试改变橡胶吸声的结构,比如在橡胶材料表面制备出多孔结构,并通过改变孔的大小、形状等调整材料的有效弹性模量和损耗,达到增强材料吸声性能的目的^[2-5]。

对于橡胶材料表面的开孔,当前常用的方法主要有机械加工、硫化成型等^[6-8]。机械加工虽然效率较高、成本较低,但对于高弹性的橡胶而言,其加工的质量往往难以控制,而且难以完成异型孔的加工;硫化成型的方法则是采用设计的模具进行直接成型,在脱模时往往会有部分材料残留在模具上,从而产生粘结或脱模难的问题,而且其单件生产的周期长、成本高,难以适应单件、小批量定制的需求。此外,对于加工 1 mm 以下的小孔,这些方法都难以实现。

相比之下,采用脉冲激光打孔时^[9-10],由于其脉冲能量高、热影响区小、光斑大小及扫描方式可控性好、材料范围广等优势,而且易于控制盲孔加工的深度,特别适合于精密小孔的加工,当前在各类薄膜材料、工程塑料、铝、钢等多种材料上均取得了较好的应用效果^[11-12]。从查阅的文献资料来看,当前还少有应用脉冲激光对橡胶阻尼材料进行打孔的相关报道,橡胶材料与激光相互作用的现象与机理还有待于进一步研究,为此,本文将采用纳秒激光,开展橡胶阻尼材料打孔的相关实验,观察其特殊现象,探索激光作用下橡胶材料的变化机理,为今后寻求橡胶材料激光加工的理想方案打下基础。

2 实验设备与材料

实验中所用为波长 1064 nm 的纳秒激光器的主要参数如表 1 所示,采用振镜扫描的方式进行打孔。

表 1 纳秒激光器主要参数
Table 1 Main parameters of the nanosecond laser

Parameter	Unit	Range
Average output power	W	0~68
Maximum pulse energy	mJ	>1.0
Output repetition frequency	kHz	70~752
Pulse width range (see pulse waveform table)	ns	10~240
Overlap rate		3.39
Spot diameter	μm	50

所用的橡胶材料为普通丁腈橡胶合成材料,厚度 5 mm,打孔前研磨机和抛光机处理样品,乙醇去除表面污垢后,采用超声波清洗机进一步洁净表面,处理后的橡胶材料表面粗糙度(R_a)为 0.18 μm 。

3 橡胶阻尼材料纳秒激光打孔的实验及分析

由于橡胶材料激光打孔可借鉴的实验经验较少,本文将观察该材料在激光作用下所呈现的特殊状态,分析其特殊机理,并重点考察激光脉冲宽度对其的影响。

3.1 橡胶材料激光打孔时的状态观察与分析

首先采用的激光参数如下:激光功率 9.5 W,脉宽 26 ns,重复频率 200 kHz,在 $\Phi=0.8$ mm 内的圆面采用螺旋扫描的方式进行打孔,扫描速度 2.9 m/s,重复扫描 20 次。实验过程中,伴随着激光束的扫描,加工区域内产生了较多的烟尘,为避免烟尘附着在试样表面影响观测结果,采用乙醇擦拭和超声波清洗的方法对加工后的橡胶进行了清洗,并通过电子显微镜对其打孔状态进行观察,结果如图 1 所示。

从以上结果可以看到,丁腈橡胶在吸收激光能量后,并没有如同铝、铁等材料一样,产生液态物质的喷溅,在洞口上表面也没有因此而形成的堆积层^[13-14],孔的外表面仍然比较平整。而所得到的孔径超过了 0.45 mm,说明在激光光斑之外有部分橡胶材料也被去除。

为更好地分析打孔以后橡胶材料的情况,利用扫描电镜(SEM)对孔的表面以及内部进行了观察,如图 2 所示。

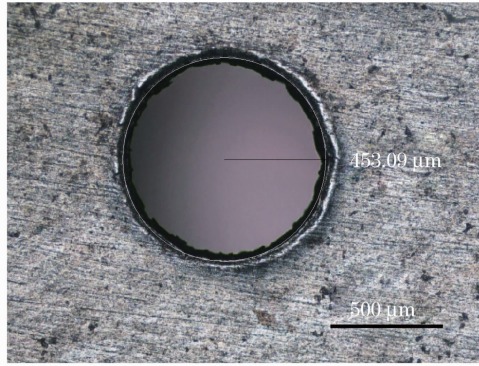


图 1 橡胶材料激光打孔后的加工结果

Fig. 1 Processing result of rubber after drilling hole by nanosecond laser

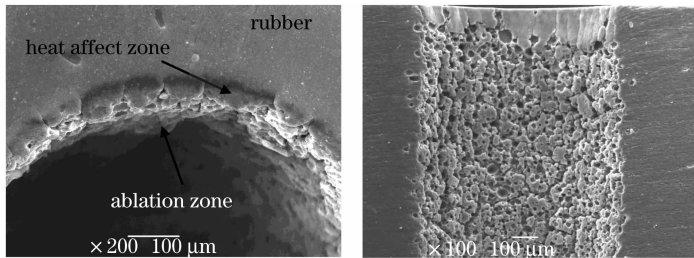


图 2 橡胶材料激光打孔后的表面形貌

Fig. 2 Surface condition of rubber after drilling hole by nanosecond laser

究其原因,作者认为,由于丁腈橡胶的导热能力较差,在激光作用下,所产生的热量极大地聚集在扫描区域内,其热影响区相对金属要小得多,造成这些区域内的橡胶材料温度迅速升高,在热、氧环境下,这部分橡胶材料迅速发生热氧老化,出现热裂解甚至燃烧现象,其分子链发生断裂,生成各种碳素的裂解产物,并被高温产生的冲击波,抛射至空气中,由此也导致在加工中出现大量的烟尘。在孔的内壁,由于热量的作用以及空气中氧的侵蚀,橡胶材料发生了龟裂老化,从而出现了如蜂窝状的烧蚀状态。而在热影响区内,由于温度的升高,橡胶材料中的氧扩散速度升高,活化氧化反应加剧,橡胶氧化反应速度加快,导致该区域内的橡胶发生氧化,导致在扫描电镜下观测到的该区域呈现明显的黑色。

为了便于分析,从孔的内壁沿其径向依次划分为三个区域:烧蚀区、热影响区、本体,如图 2 所示。为了观察各个区域内的橡胶材料变化情况,采用能谱仪(EDS)对其元素情况进行了检测,结果如图 3 所示。

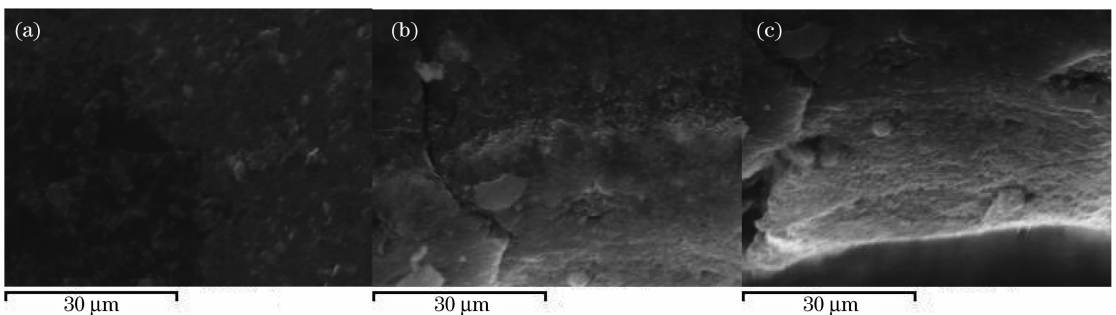


图 3 各区域内的橡胶材料状态.(a)本体材料;(b)热影响区;(c)烧蚀区

Fig. 3 States of rubber in different areas. (a) Bulk; (b) heat affected zone; (c) ablation zone

结合之前的分析,元素分析时主要选取碳(C)、氧(O)两种元素,测定其在各个区域内的含量,结果如表 2 所示。从元素检测的结果来看,由于激光产生的局部高温,烧蚀区内 C 元素随着裂解产物被抛射至空气中,而导致该区域内的 C 元素含量最低,而热影响区内,由于其温度升高,在外部氧的侵蚀以及自身氧元素扩散加快的条件下,其氧含量最高,以上结果也印证了之前分析的结果。

表 2 各区域内的元素含量(质量分数,%)

Table 2 Content of elements in different areas (mass fraction, %)

Area	C(%)	O(%)
Rubber ontology	56.66	18.58
Heat-affected zone	51.97	19.54
Burning region	39.01	14.09

3.2 激光脉宽对打孔状态的影响

为了进一步讨论激光参数对于打孔状态的影响,并与之前的结果进行比较,首先选取了 220 ns 和 13 ns 两种脉宽,在其他参数均保持不变的情况下,得到了橡胶材料打孔的结果,如图 4、图 5 所示。

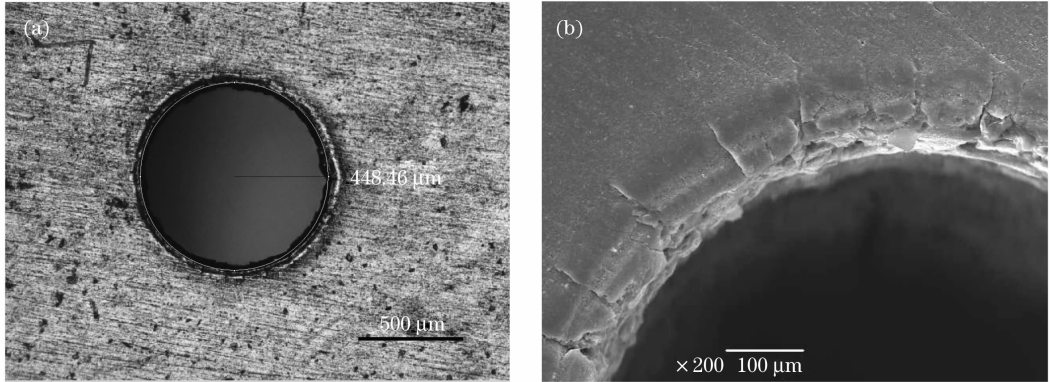


图 4 脉宽 220 ns 时的打孔情况。(a)表面形貌;(b)SEM

Fig. 4 Condition of drilling hole when pulse width is 220 ns. (a) Surface morphology; (b) SEM

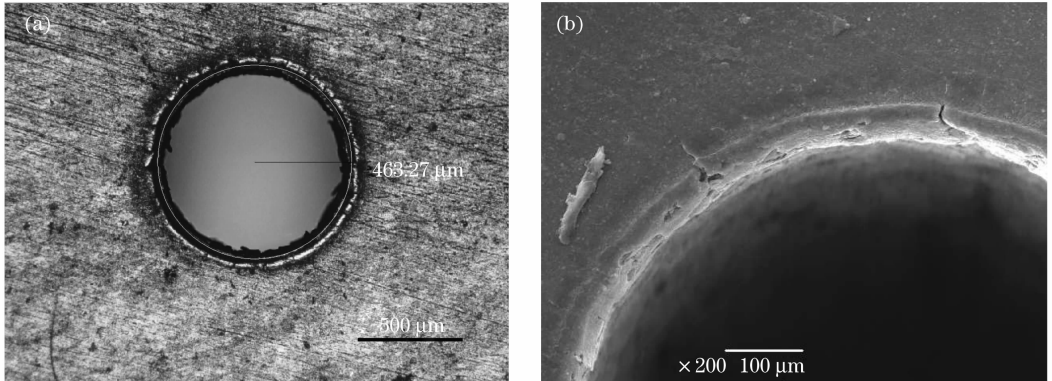


图 5 脉宽 13 ns 时的打孔情况。(a)表面形貌;(b)SEM

Fig. 5 Condition of drilling hole when pulse width is 13 ns. (a) Surface morphology; (b) SEM

从结果来看,在激光平均功率、重复频率、扫描速度等参数相同的情况下,单个脉冲的激光能量不变,但脉宽越短,单个脉冲的峰值功率更高,意味着单位时间内激光的作用越集中,扫描区域内橡胶材料的热裂解甚至燃烧速度更快,分子链断裂后生成的裂解产物迅速地被激发至空气中,并带走大部分地热量,传导至橡胶内部的热量也就相对较少,因此所得到的孔内壁烧蚀程度较轻、孔径较大。相反,脉宽越长,单位时间激光的作用时间更长,热量在扫描区域内累积时间更长,热影响区更大,同时由于相对于时间的激光能量密度降低,在孔壁周围处所产生的热量还不足以将橡胶材料完全分解,只能让该区域内的橡胶材料产生龟裂,造成孔壁的烧蚀程度更严重,而得到的孔径却相对较小。

为了更好地讨论激光的脉冲宽度对打孔状态的影响,选取了多种脉宽进行了打孔,观察各个脉宽对孔的直径和深度影响,结果如图 6 所示。

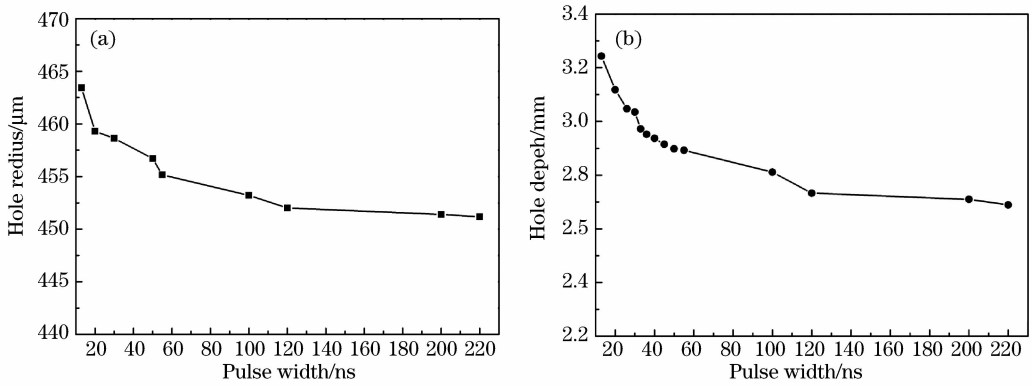


图 6 不同脉宽条件下孔的尺寸变化。(a)孔径的变化;(b)孔深的变化

Fig. 6 Size of hole drilled by different pulse widths. (a) Hole diameter variations; (b) hole depth variations

从结果来看,随着激光脉宽的增加,所得到的孔直径和深度均呈现下降趋势,通过之前的分析结果可以得到这样的结论:应用纳秒激光对橡胶材料进行打孔时,孔的形成主要是由激光输入产生的热量,造成橡胶材料内分子链的断裂,出现热裂解甚至燃烧,再由瞬间高温所导致的冲击波将各种碳素产物抛射出去。在脉宽较长时,由于其在时间上的能量密度较低,一方面在孔壁周围处所产生的热量还不足以将橡胶材料完全分解,造成孔的直径和深度都较小;另一方面,脉宽越短、峰值功率越高,激光能量作用于材料时生成的局部高温,将诱导产生更强的冲击波,将橡胶材料的裂解产物以及燃烧后的剩余物从孔内抛射出去,实验中发现,当采用较长脉宽的激光进行打孔以后,孔内会出现较多的残留物,就是因为此时激光产生的冲击波不足以将这些残留物抛射出去,留在孔内会对激光产生遮蔽的作用,这也是其导致孔深度较小的一个原因。

此外,从图 6 中还可以发现,当采用激光的脉宽大于 120 ns 以后,无论孔的深度和直径,其变化的趋势均明显减缓,作者认为,出现该现象的原因主要有两点:1)此时橡胶材料的热裂解产物和燃烧的剩余物残留在孔洞内,对激光的屏蔽作用比较明显;2)抛射物带走的热量、传导入橡胶内部的热量以及激光输入的能量基本达到平衡,孔壁附近的橡胶材料所得到的能量不足以使其彻底分解,因此孔的直径变化并不明显。

事实上,橡胶出现老化、龟裂等问题时,将极大地影响其使用性能,包括硬度、弹性、抗冲击性能等^[15-16],因此在应用激光打孔时,应尽量应用脉宽较短的激光参数,从而减小打孔区域内橡胶的烧蚀和热影响区。此外,还可应用外部冷却、保护气体等,以减轻因打孔区域内的高温、含氧环境等导致的氧化活化反应,降低热影响区内橡胶材料的变性程度。本文将在后续的研究中,进一步分析讨论激光功率、重复频率、扫描速度等对孔状态的影响,以期获得符合工程实际要求的理想参数组合。

4 结 论

应用纳秒激光对橡胶阻尼材料进行了打孔实验,观察了脉冲激光作用下橡胶材料所呈现的特殊现象,并分析了其机理,着重讨论了不同脉宽条件下,橡胶材料打孔时其状态的变化规律:

1) 沿着孔壁向材料内部,可划分为烧蚀区、热影响区和橡胶本体。烧蚀区内,由于热量的作用以及空气中氧的侵蚀,橡胶材料发生了龟裂老化,从而出现了如蜂窝状的烧蚀状态。而在热影响区内,由于温度的升高,橡胶材料中的氧扩散速度升高,活化氧化反应加剧,橡胶氧化反应速度加快,导致该区域内的橡胶发生了氧化变性;

2) 当采用脉宽较短的激光进行打孔时,由于瞬时高温所产生的冲击波更强、时间能量密度更高等因素,所得到的孔径、深度都更大;当激光脉冲宽度较长时,激光能量在孔壁附近的累积更严重,其烧蚀的程度较严重;

3) 为减轻因烧蚀、老化等造成橡胶性能下降的问题,应尽量选择脉宽较短的激光参数,同时可考虑采用外部冷却、保护气体等手段,尽可能减小打孔时产生的热影响区。

参 考 文 献

- 1 Zhou Hong, Huang Guangsu, Chen Xirong, *et al.*. Polymers sound absorption material[J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(3): 450—455.
周 洪, 黄光速, 陈喜荣, 等. 高分子吸声材料[J]. 化学进展, 2004, 16(3): 450—455.
- 2 Kohji H, Atusi K, Keishin K, *et al.*. Piezo-electric sensors using rubber sensing film[J]. Applied Physics, 1998, 37(5B): 2836—2841.
- 3 Daiji M, Tomoki Y, Akio H, *et al.*. Sound power reduction of underwater array projector caused by mutual radiation impedance [J]. Applied Physics, 1997, 36(5B): 3340—3344.
- 4 Qian Junming, Li Xuxiang. The research on rubber and plastic bubble absorption material [J]. Journal of Functional Polymers, 2000, 13(3): 309—311.
钱军民, 李旭祥. 橡塑型泡沫吸声材料的研究[J]. 功能高分子学报, 2000, 13(3): 309—311.
- 5 Corsaro R D, Klunder J D, Jarzynski J. Filled rubber materials system: Application to echo absorption in waterfilled tanks [J]. Acoustical Society of America, 1980, 68(2): 654—664.
- 6 Durashevich G, Cvetkovski V, Jovanovich V. Effect of thermomechanical treatment on mechanical properties and electrical conductivity of a CuCrZr alloy [J]. Bulletin of Materials Science, 2002, 25(1): 59—62.
- 7 Peng X N, Guo H Z, Shi Z F, *et al.*. Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3): 682—689.
- 8 Li Q L, Li F B, Xia T D, *et al.*. Effects of *in-situ* γ -Al₂O₃ particles and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 627(5): 352—358.
- 9 Wang Defei, Yu Jiping, Guo Chunfeng, *et al.*. Thermal effect analysis of metal film ablation by ultra-short laser pulse [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(10): 1579—1584.
王德飞, 于继平, 郭春风, 等. 超短脉冲激光烧蚀金属薄膜材料的热效应分析[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1579—1584.
- 10 Jiang L, Li L S, Wang S M, *et al.*. Microscopic energy transport through photon-electron-phonon interactions during ultrashort laser ablation of wide bandgap materials [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 780—789.
- 11 McNally C A, Folkes J, Pashby I R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: State of the art and future challenges [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(7): 805—813.
- 12 Banks P S, Feit M D, Rubenchik A M, *et al.*. Material effects in ultra-short pulse laser drilling of metals [J]. Applied Physics A, 1999, 69(9): 377—380.
- 13 Mikolutskiy S I, Khomich V Y, Shmakov V A, *et al.*. Formation and growth of nanostructures on the surface of solids melted by laser pulses [J]. Nanotechnologies in Russia, 2011, 6(11): 733—738.
- 14 Cristoforetti G, Legnaioli S, Pardini L, *et al.*. Comparison of detection limits, for two metallic matrices, of laser-induced breakdown spectroscopy in the single and double-pulse configurations[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, 385(2): 316—325.
- 15 Wang Q, Zhang Q, Huang Y H, *et al.*. Preparation of high temperature vulcanized silicone rubber of excellent mechanical and optical properties using hydrophobic nano silica sol as reinforcement [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2008, 26(4): 495—500.
- 16 Zhi P Z, Ji M Z, Tao H Y, *et al.*. Hydrogen production by reforming methane in a corona inducing dielectric barrier discharge and catalyst hybrid reactor [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(20): 2162—2166.

栏目编辑: 张浩佳