

发动机特殊材质蠕墨铸铁 RuT400 的研发与应用

林勇传¹, 黄健友¹, 谢正良², 韦珏宇¹

(1. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004; 2. 玉柴工程研究院, 南宁 530012)

Development and Application of Vermicular Graphite Cast Iron RuT400 for Engines

LIN Yongchuan¹, HUANG Jianyou¹, XIE Zhengliang², WEI Jueyu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Yuchai Engineering Research Institute, Nanning 530012, China)

Abstract: In order to solve the processing difficulty of a new vermicular graphite cast iron RuT400 used in engines, the addition experiment of micro boron nitride(BN) on vermicular graphite cast iron was carried out, and the microstructure and mechanical properties of graphite cast iron were analyzed by means of metallographic test, tensile test, hardness test and friction test. Experimental results show that BN has no influence on the morphology and content of graphite, pearlite and ferrite, and has little effect on the tensile strength and hardness, but has a great influence on the friction properties. When the content of BN is 0.014 4%, the wearing resistance is the best. BN can effectively reduce the surface roughness of vermicular graphite cast iron in turning, and it would make the process more stable. Therefore, it is feasible to improve the process ability by adding micro BN to produce self-lubrication function without affecting the mechanical properties of vermicular graphite cast iron.

摘要:为了解决新型发动机材料 RuT400 应用过程中加工困难的问题,对蠕墨铸铁进行了氮化硼(BN)微量添加试验,然后通过金相试验、拉伸试验、硬度试验和摩擦试验分析了 BN 对蠕墨铸铁的金相组织和力学性能的影响。试验结果表明:BN 对蠕墨铸铁的石墨、珠光体和铁素体的形态和含量均不会产生影响;BN 对蠕墨铸铁的抗拉强度和硬度的影响甚微,但是对蠕墨铸铁的摩擦性能影响较大;当 BN 含量为 0.014 4% 时,蠕墨铸铁的耐磨性能最佳;BN 能有效降低蠕墨铸铁车削加工的表面粗糙度,并且使其加工过程更加稳定。因此,在不破坏蠕墨铸铁力学性能的基础上,通过添加微量 BN 使其产生自润滑功能,从而改善其加工性能是可行的。

关键词: 内燃机;蠕墨铸铁;发动机材料;氮化硼;自润滑

Key words: vermicular graphite cast iron; engine material; BN; self-lubrication

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.06.014

中图分类号: TK405

文献标识码: A

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 广西区自然科学基金项目(2014GXNSFAA118347);玉林市-广西大学市校科技合作资助项目(玉市校科合 201402801)

Fund Project: Natural Science Foundation of Guangxi(2014GXNSFAA118347); Yulin City-Guangxi University Science and Technology Cooperation Project(201402801)

作者简介: 林勇传(1972—),男,副教授,博士,主要研究方向为细微切削加工及自动化,E-mail:loyoco@163.com;

黄健友(联系人),男,硕士生,主要研究方向为先进制造技术及其智能检测,E-mail:huangjianyou2000@163.com。

0 概述

新型发动机的设计制造通常要支持 3~4 代的车辆技术发展^[1],所选用发动机材料不仅要满足当前的设计要求,还要能满足将来发动机性能提高所带来的更高要求,否则将不得不重新对发动机进行总设计。蠕墨铸铁以其优越的力学性能被广泛应用于发动机制造业中,并能很好地满足日益严苛的环保要求。

与传统的灰铸铁相比,用蠕墨铸铁设计发动机具有以下优势:壁厚更小,比性能更高,铸态性能波动更小,降低噪声、振动和改善平顺性,缸筒变形更小等。因此,用蠕墨铸铁设计发动机与用灰铸铁相比,能普遍减重 10%~15%,最多可达 29.4%^[2-3]。而与选用铝合金相比,生产蠕墨铸铁具有能耗更低的优势。文献[1]指出,当前生产铸铁(包括灰口铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁)的能耗约为 10 500 MJ/t,而生产铝的能耗则为 90 000 MJ/t,大规模使用铝合金材料来生产发动机,势必会给整个社会带来沉重的能源负担。

然而,蠕墨铸铁优越的材料性能却给其切削加工带来了严重的困难。蠕墨铸铁切削加工过程中过低的刀具寿命导致了加工成本高居不下,给企业带来了沉重的负担。文献[4-9]研究了不同切削条件下蠕墨铸铁加工的刀具磨损机理,结果发现在蠕墨铸铁切削中刀具磨损机理主要有黏结磨损、黏附磨

损、扩散磨损和氧化磨损等。并且,文献[4]指出,蠕墨铸铁切削性能不如灰铸铁主要是由于蠕化剂中的 Mg 在铸造过程中与铁水中的 S 发生反应,导致蠕墨铸铁中的 S 含量甚微,从而无法在切削过程中形成 MnS 保护膜保护刀具。针对蠕墨铸铁难加工的问题,文献[10]提出使用含 10%极压添加剂(硫系)的切削液对蠕墨铸铁进行冷却加工,改善刀具与工件之间的摩擦及其散热条件等。该方法可改善蠕墨铸铁切削性能,但含硫的切削液在使用过程中易产生刺激性气味且废液排放易污染环境。

由于改善刀具与工件、刀具与切屑之间的摩擦能有效减轻刀具磨损,延长刀具寿命。本文中对蠕墨铸铁进行氮化硼(BN)微量添加,研究出一种具有自润滑功能的蠕墨铸铁 RuT400,通过减轻加工时与刀具之间的摩擦来达到延长刀具寿命的效果。

1 试验设计

1.1 试样制备

试验用材料为蠕墨铸铁 RuT400,其化学成分(含量均为质量分数)如表 1 所示。本次试验中添加的 BN 粉末为六方 BN(h-BN),其特性如表 2 所示。该粉末在出炉前及蠕化前往熔融的铁水中添加,并通过铁水的对流作用使其均匀分布。BN 粉末添加时,炉内温度(T)为 1 813 K。本文中试样 A、试样 B、试样 C 和试样 D 的 BN 含量分别为 0%、0.014 4%、0.022 3%和 0.028 8%。

表 1 RuT400 的化学成分

项目	参数														
成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Re	Mg	Ca	Ce	Cr	Mo	Ni	V	Fe
含量/%	3.760	2.540	0.341	0.023	0.013	0.275	0.016	0.012	0.019	0.013	0.581	0.113	0.794	0.346	余量

表 2 h-BN 粉末的特性

型号	晶体类型	颜色	平均微粒/ μm	晶体/ μm	表面积/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	摇实密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含氧量/%	可溶性硼酸/%	碳含量/%	钙含量/%
NX1	六方	白色	0.7	0.2~0.5	20	0.12	0.9~1.2	0.10	0.03	<0.01

1.2 金相试验

金相试验的设备包括金相抛光机、4XC-MS 光学显微镜。金相试验的过程为:(1) 分别将试样 A、试样 B、试样 C 和试样 D 先后用 800[#]、1 500[#]、2 000[#]、3 000[#]和 5 000[#]的金相砂纸磨光;(2) 试样经过金相砂纸磨好后,将其放在金相抛光机上抛光,依次使用的抛光膏的粒度为 W3.0、W2.0 和 W1.0;抛光结束后,先用清水和酒精将试样清洗干净,然后用风筒将试样吹干;(3) 将吹干后的试样用 4XC-MS 光学显微镜在 100X 条件下观测其石墨形态,并拍下照片;(4) 观测完石墨形态后,将试样放入 4%的硝

酸酒精溶液浸蚀 3 s,最后将试样再次用清水和酒精清洗并吹干;(5) 将浸蚀后的金相试样用 4XC-MS 光学显微镜分别在 100X 和 500X 条件下观测试样的组织变化,并拍下照片。

1.3 力学性能试验

1.3.1 硬度试验

首先,将 4 种试样制成 $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱体;将制备好的试样置于 HBE-3000A 电子布氏硬度计上,用 10 mm 的钢球以 1 500 kgf 的载荷压在试样表面,保压 15 s;然后卸载,取下试样,量出压痕直径,对照布氏硬度表查出对应的测量硬度值,随机测

3 点,最终取其平均值。

1.3.2 拉伸试验

首先,将 4 种试样按照文献[10]的规定,制备成图 1 所示的形状;然后,在 WDW3100 上装夹试样后,以 2 mm/min 的拉伸速度进行试验,直至试样拉断。每种试样做 3 次拉伸试验,最终取其平均值。

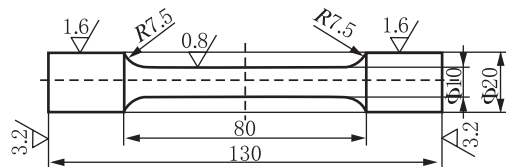


图 1 拉伸试样的机加工图纸

1.3.3 摩擦试验

将 4 种试样先后置于 MMF-1000 试验机中,并与 $\Phi 12.7$ mm 的 GCr15 钢球(表面粗糙度 $R_a = 0.05 \sim 0.10 \mu\text{m}$,硬度 62 HR)构成摩擦副;根据表 3 中的参数进行摩擦试验,该试验的摩擦方式为往复式摩擦;最后,在室温下对比各试样和钢球在试验前后的质量变化,计算出其磨损量和摩擦系数。每种试样做 3 次摩擦试验,最终取其平均值。

表 3 摩擦试验参数

试验力/ N	转速 1/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	时间 1/ h	转速 2/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	时间 2/ h	行程距离/ mm
200	5	0.5	100	0.5	40

1.4 切削试验

试验设备包括 CY-K360n/1000 数控机床、SJ-410 表面粗糙度仪、牌号为 YBD152 的硬质合金涂层刀片(CNMA120408-HM)。

试验流程为:(1)车削试验前先将试样 A 和试样 B 加工成 $\Phi 68 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 的棒料, $R_a \leq 3.2 \mu\text{m}$;(2)将加工后的试样 A 和试样 B 分别按表 4 中的切削参数进行车削试验;(3)每组试验车削 1 min 后,拆下工件测量表面粗糙度。

表 4 切削参数

切削速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	切削深度/mm	进给速度/($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)
200, 220, 240, 260, 280	1	0.1

2 结果与分析

2.1 BN 对蠕墨铸铁金相的影响

铸铁中的石墨形态对金相组织有较大影响,蠕墨铸铁的材料特性可以通过其蠕化率反映出来^[11]。通过对 4 种试样的金相观察,试样组织中的石墨形态如图 2 所示。通过与文献[12]中所提供的蠕化率评级标准图谱进行对比,可知这 4 种试样的石墨形态、

疏密程度均与蠕化率评级标准图谱中的蠕 95 相似,故可判断 4 种试样的蠕化率均 $> 95\%$ 。此外,这 4 种试样间的石墨形态亦无显著区别,因此可认为 BN 添加不会对蠕墨铸铁的蠕化率产生影响。

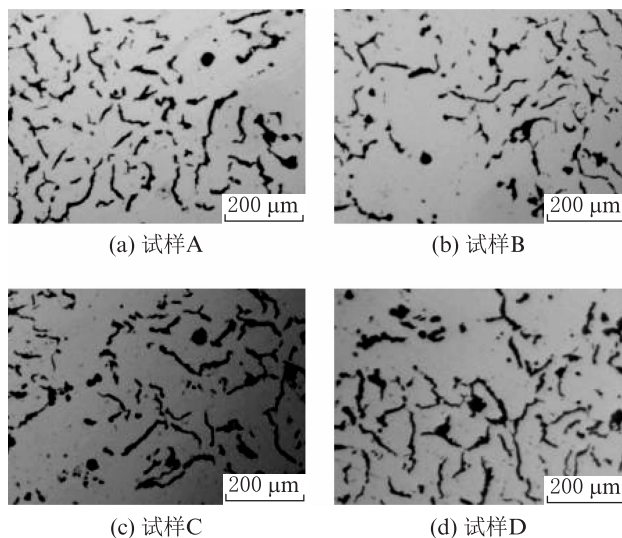


图 2 石墨形态

蠕墨铸铁主要的基体组织为珠光体和铁素体^[13]。在不同型号的蠕墨铸铁中,珠光体和铁素体的含量和分布形式均不相同,因此蠕墨铸铁中的珠光体和铁素体在很大程度上决定着其自身的材料性能。各试样浸蚀后的金相组织形态如图 3 所示。其中,白色部分是铁素体,黑色部分是石墨,暗灰色部分中铁素体薄层和渗碳体薄层交替叠压的层状物是珠光体。通过与文献[12]中所提供的珠光体标准图谱进行对比,可知 4 种试样浸蚀后的表面形态均与标准图谱中的珠 25 相似,而且 4 种试样间的铁素体、珠光体形态均未见显著差异。

根据图 3 还可知,各试样中的铁素体均环绕着石墨分布。然而,在相同试样中,环绕在各石墨周围的铁素体的宽度均有较大变化,说明试样自身的组织不够均匀。此外,各试样的栅状珠光体的分布也极为相似,尤其是它们的栅状密度基本相一致。综上所述,BN 对蠕墨铸铁中珠光体和铁素体的比例及其分布形态影响甚微。

2.2 BN 对蠕墨铸铁力学性能的影响

根据拉伸试验和硬度试验,4 种试样的硬度和抗拉强度如图 4 所示。由图 4 可见,当试样中的 BN 含量从 0% 增加到 0.028 8% 时,试样的抗拉强度和硬度虽有波动,但差值不大。尤其是抗拉强度和硬度最小的试样 C 和不含 BN 的试样 A 相比,试样 C 的抗拉强度和硬度仅仅比试样 A 的小 2.11% 和 0.93%。此外,试样 A、试样 B 和试样 C 的抗拉强度和硬度基

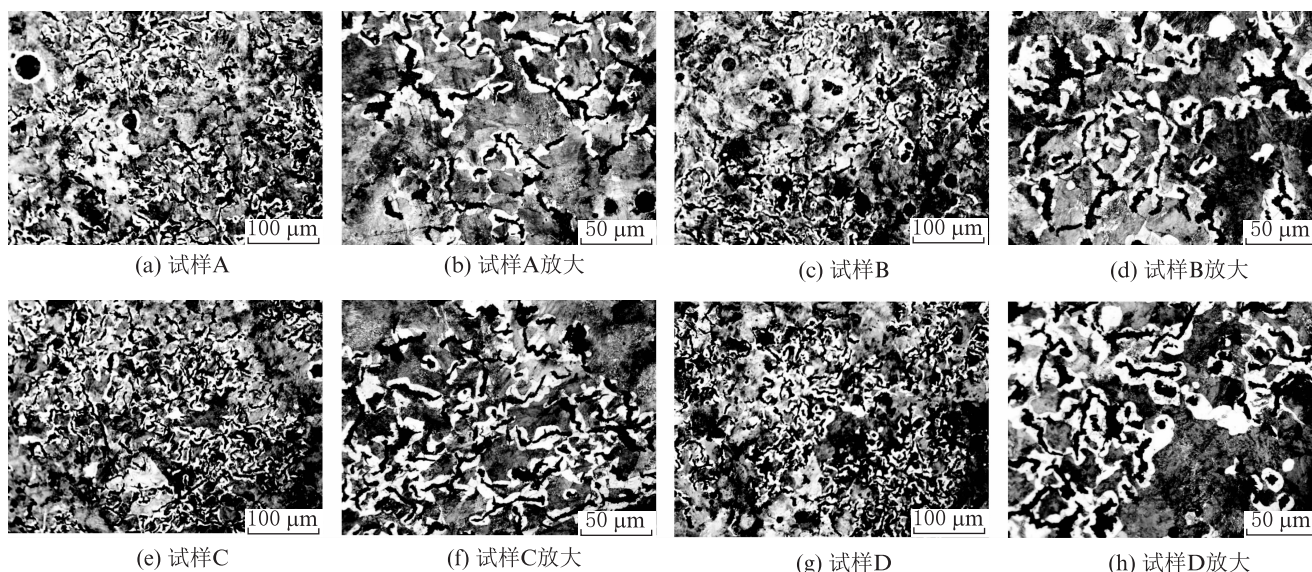


图 3 各试样浸蚀后的表面形态

本相一致。考虑到试样自身存在铸造误差,基本可以认为 BN 对蠕墨铸铁的抗拉强度和硬度无影响。分析其根本原因是 BN 对蠕墨铸铁的珠光体、铁素体和蠕虫状石墨影响甚微,而蠕墨铸铁的基体组织形态是其抗拉强度和硬度的决定性因素。

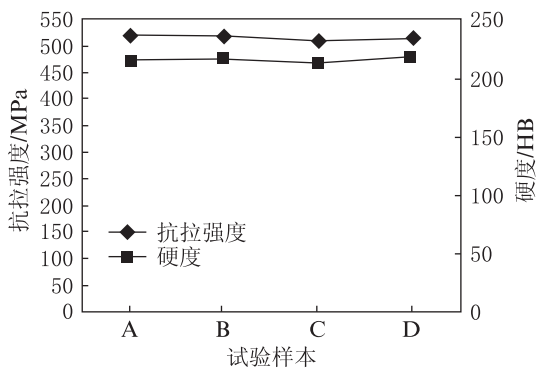


图 4 各试样的抗拉强度和硬度

4 种试样的摩擦系数和磨损量如图 5 所示。由图 5 可见,BN 对蠕墨铸铁的摩擦性能影响较大,尤其是当 BN 含量为 0.014 4% 时,其摩擦系数和磨损量分别下降了 11.3% 和 10.9%。然而当材料中 BN 含量超过 0.014 4% 时,随着 BN 含量的增加,蠕墨铸铁的摩擦系数和磨损量反而增加了。出现以上现象的主要原因是层状结构的 h-BN 具有润滑作用,在试样发生滑动摩擦时试样中的 BN 剥落到摩擦界面上,在摩擦界面上形成润滑膜,从而对试样起到保护作用,降低试样的磨损^[14-15]。然而,随着 BN 含量的增加,材料的致密化程度发生下降,不利于在摩擦表面形成润滑膜,BN 润滑膜对摩擦件的保护能力也随之下降。

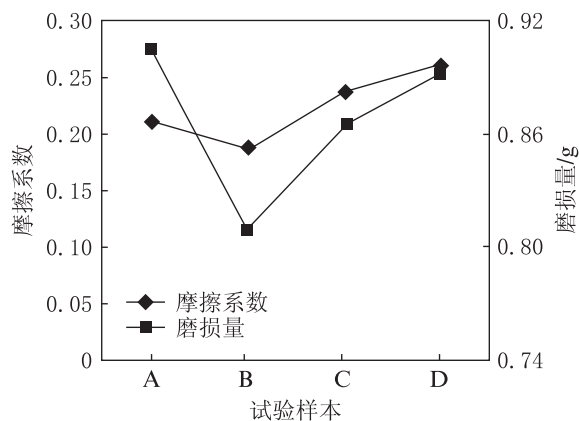


图 5 各试样的摩擦系数和磨损量

2.3 BN 对蠕墨铸铁车削性能的影响

加工的表面粗糙度不仅是表面质量的衡量指标之一,同时也反映了该材料的切削性能。根据车削试验,各试样的表面粗糙度如图 6 所示。由图 6 可知,在不同的切削速度下,试样 B 的表面粗糙度值均比试样 A 的小,并且切削速度越小,影响的效果越显著。分析其原因:一方面是 BN 的润滑作用改善了蠕墨铸铁的切削性能^[16];另一方面可能是由于 BN 在无氧高温高压的条件下与刀具涂层中的成分发生化学反应形成保护膜,类似于切削灰铸铁时在刀具表面所生成的 MnS ^[4-5] 保护膜,对刀具起到保护作用。其中,后者是目前正在开展的研究工作。此外,随着切削速度的增加,切屑从前刀面上流过的速度增大,切屑和前刀面接触的时间变短,因此 BN 对蠕墨铸铁切削性能的影响程度随着切削速度的增大而下降。

另外,由于蠕墨铸铁的抗拉强度较高,切削时

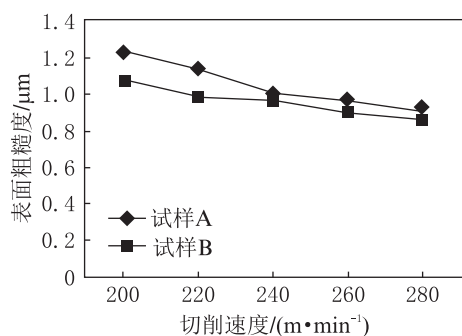
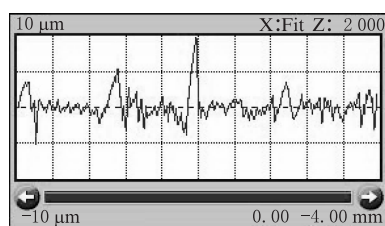
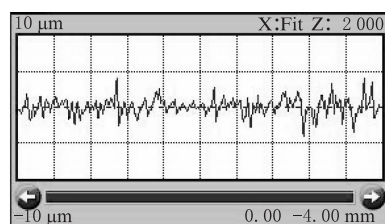


图 6 BN 对表面粗糙度的影响

容易发生粘结^[8-9],在工件表面产生毛刺。通过表面粗糙度仪对试样表面检测的波形图可以反映出切削过程的稳定性,如图 7 所示。由图 7 可见,在切削速度为 220 m/min 条件下试样 B 的表面粗糙度的波形要比试样 A 的稳定。在异常波峰处,说明该点除了毛刺;在异常波谷处,则说明了粘结在刀尖上的切屑刮伤了工件表面,破坏了加工质量。通过粗糙度值的比较可以知道添加 BN 的蠕墨铸铁的切削过程更加稳定,不易出现毛刺和粘结现象。



(a) 试样A



(b) 试样B

图 7 表面粗糙波形图(切削速度 200 m/min)

在切削速度为 220 m/min 条件下车削试样 A 和试样 B 得到的切屑如图 8 所示。由图 8 可见,两者切削均属于挤裂状切屑,而切削试样 B 得到呈曲率半径较小的 C 形切屑,而且切屑外形整体一致性较好,反映了整个切削过程较为稳定。然而,在切削试样 A 时,切屑多趋于短直状,并且切屑的长度多变不稳定。出现这种差异的主要原因是切屑流经前刀面时,试样 B 的摩擦系数较小,摩擦剧烈程度相比试样 A 的要轻微,铁屑的流出更容易,有利于减少切削刀具的磨损^[17]。



(a) 试样A



(b) 试样B

图 8 切屑形态(切削速度 200 m/min)

3 结论

(1) BN 对蠕墨铸铁的石墨、珠光体和铁素体的形态均不会产生影响。

(2) BN 对蠕墨铸铁的抗拉强度和硬度的影响甚微,但是对蠕墨铸铁的摩擦性能影响较大。

(3) 当 BN 含量为 0.014 4% 时,蠕墨铸铁的摩擦性能最佳。

(4) BN 能有效降低蠕墨铸铁车削加工的表面粗糙度,并且使其加工过程更加稳定。

参考文献:

- [1] 史蒂夫·道森. 蠕墨铸铁——现代柴油发动机缸体和缸盖的材料[J]. 铸造技术, 2009, 30(4): 455-460.
DAWSON S. Compacted graphite iron—a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads[J]. Foundry Technology, 2009, 30(4): 455-460.
- [2] 金晓春, 刘金城, 史蒂夫·道森. 蠕墨铸铁发动机的优势及最新进展[C]//济南: 2013 中国铸造活动周, 2013.
- [3] 史蒂夫·道森. 蠕墨铸铁—现代发动机设计的材料[C]//烟台: 中国铸造协会汽车铸件分会 2012 年会暨汽车轻量化铸造技术研讨会, 2012.
- [4] HECK M, ORTNER H M, FLEGE S, et al. Analytical investigations concerning the wear behaviour of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1988, 66(5): 535-543.
- [5] GASTEL M, KONETSCHNY C, REUTER U, et al. Investigation of the wear mechanism of cubic boron nitride tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard

- Materials, 2000, 18(6): 287-296.
- [6] GASTEL M, REUTER U, SCHULZ H, et al. SIMS analysis of the wear of boron nitride tools, for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1999, 365(1): 142-146.
- [7] NASCIMENTODINIZ S D, EDUARDO ANDRADE A, GUESSE C L F, et al. Analysis of tool wear, surface roughness and cutting power in the turning process of compact graphite irons with different titanium content [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2010, 32(3): 234-240.
- [8] SILVA M B D, NAVES V T G, MELO J D B D, et al. Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron [J]. Wear, 2011, 271(9): 2426-2432.
- [9] NAYYAR V, KAMINSKI J, KINNANDER A, et al. An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations [J]. Procedia Cirp, 2012, 1(7): 488-493.
- [10] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [11] GOWDA H S D, MUKUNDA P G, HERBERT M A. Correlation of tribological properties with microstructure and mechanical properties of graphite cast irons centrifugally cast for engine liner [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2014, 67(5): 731-740.
- [12] 全国铸造标准化技术委员会. 蠕墨铸铁金相检验: GB/T 26656—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [13] GREGORUTTI R W, GRAU J E. Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2014, 27(5): 275-281.
- [14] 冯艳, 王日初, 余琨. Ni-Cr/BN 自润滑材料摩擦磨损机理分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(10): 1820-1823.
- FENG Y, WANG R C, YU K. Analyses of frictional wear mechanics of Ni-Cr/BN self-lubricating composites [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2007, 36(10): 1820-1823.
- [15] 蒋冰玉, 刘世民, 王日初, 等. BN 含量对 BN/Ni(Cr) 自润滑材料力学及摩擦性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14(1): 57-62.
- JIANG B Y, LIU S M, WANG R C, et al. Effect of BN on mechanical and tribological properties of BN/Ni(Cr) self-lubricating composites [J]. Materials Science & Engineering of Powder Metallurgy, 2009, 14(1): 57-62.
- [16] 王毓男, 包燕平, 王敏, 等. BN 型易切削钢的冶炼工艺及其切削加工性 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 869-874.
- WANG Y N, BAO Y P, WANG M, et al. Smelting process and machinability of BN-type free cutting steel [J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2013, 35(7): 869-874.
- [17] FREEMANTLE C S, JOHNSON O T, SIGALAS I, et al. Interaction of boron suboxide with compacted graphite cast iron [J]. Ceramics International, 2011, 37(3): 1121-1125.

2017 年《内燃机工程》征订启事

《内燃机工程》由中国内燃机学会主办, 是经国家科委批准的大型综合学术性专业刊物。《内燃机工程》刊登各种用途的柴油机、汽油机、煤气机和特种发动机等研究成果及重要学术会议的消息动态, 内容主要涉及整机研制、零部件、燃料供应与调节、冷却润滑、增压技术、噪声振动、设计与计算、材料与工艺、测试技术、燃料、节能与净化、计算机模拟工作过程等。

《内燃机工程》双月 15 日出版, 国内统一刊号 CN 31-1255/TK。国内外公开发行人, 国内邮发代号 4-257, 国外代号 Q242, 国内定价 20.00 元/册, 全年 120.00 元, 全国各地邮局均可订阅。编辑部地址为上海市闵行区华宁路 3111 号; 邮政编码 201108; 电话 021-31310107, 31310211, 31310951; 传真 021-31310973; 银行账号 033267-00881002247, 户名为中国内燃机学会, 开户银行为农业银行上海五角场支行。

《内燃机工程》编辑部