

钼铌微合金化灰铸铁材料的研制及其性能研究

孙冬¹, 张凌峰^{1,2}, 熊毅^{1,2}, 任凤章^{1,2}, 刘治军³, 高广东³, 秦小才³

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南洛阳 471023; 3. 中原内配集团股份有限公司, 河南孟州 454750)

摘要: 为了满足汽车日益严格的排放标准以及降低气缸套生产成本, 研发了高锰 ($w_{Mn}=2.0\%$) 和低锰 ($w_{Mn}=0.2\%$) 两种钼铌微合金化珠光体灰铸铁, 对比探讨了它们的微观组织、力学性能和切削加工性能。结果表明, 低锰灰铸铁为A型石墨, 珠光体片层间距较大 ($0.43\ \mu\text{m}$), 抗拉强度和布氏硬度分别达到404 MPa、HBW275; 对比低锰灰铸铁, 高锰灰铸铁的石墨形态更加细小致密, 珠光体片层间距缩小58% ($0.18\ \mu\text{m}$), 强度与硬度分别增长13%和25% (458 MPa、HBW345)。在相同切削条件下, 对比贝氏体灰铸铁而言, 低锰灰铸铁的切削抗力和切屑形貌与之相近, 而高锰灰铸铁的切削抗力和切屑尺寸相对较大, 材料加工性略差。从综合性能上考虑, 成本更低的珠光体灰铸铁完全可以替代贝氏体灰铸铁成为气缸套首选材料。

关键词: 灰铸铁; 微合金化; 微观组织; 力学性能; 切削性能

气缸套作为发动机的核心部件, 与气缸盖、活塞共同构成内燃机工作空间, 其质量直接影响发动机整机性能^[1]。灰铸铁因具有优异的铸造性、减振性和加工性^[2], 迄今仍是气缸套首选材料。但近年来随着国际排放标准日益严格、优质矿石能源匮乏以及铸铁产能过剩, 导致铸铁材料在性能、原料以及成本上的要求愈加苛刻^[3]。目前, 由于普通珠光体灰铸铁力学性能较低, 难以满足发动机高爆压、大功率化的服役条件, 贝氏体灰铸铁虽然力学性能和耐磨性能良好, 但生产成本较高, 并且贝氏体组织是在400~500 °C中温区域形成, 属于亚稳组织, 不如珠光体组织稳定可靠^[4], 因此企业工作者更倾向于研发一种以珠光体为基体的高性能合金灰铸铁来作为气缸套材料。

研究表明, 添加适量的Cr、Mn、Si、Ni、Mo、W、V、Ti等合金元素可以改善灰铸铁的组织, 提高其性能^[5-6]。Steffen Hoppe等人^[7]通过在普通灰铸铁中加入适量的Cr、Mo、Ni等元素, 充分细化了材料内部的珠光体组织, 实现了发动机缸套的薄壁高性能化; 王有超等人^[8]通过添加适量的Cr、Mo、Cu等元素, 研发了一种新型合金灰铸铁气缸套, 其抗拉强度与布氏硬度分别达到350 MPa、HBW290, 性能增强效果显著; 徐超等人^[9]通过添加适量的Nb、V、Ti等元素, 成功研发了一种高性能贝氏体灰铸铁气缸套材料, 其高温稳定性明显优于普通贝氏体灰铸铁。上述研究主要是通过合金化的方式来提高铸铁的使用性能, 而对材料加工性能以及成本考虑较少, 铸铁材料在力学性能显著提升的同时势必导致切削抗力增加, 恶化材料加工性能, 并且添加过多的合金元素, 必会加大生产成本, 从而降低气缸套的利润率以及市场竞争力, 不利于工厂长久发展。因此, 在气缸套力学性能、加工性能以及成本等因素综合考虑下, 本试验受中原内配集团股份有限公司委托, 开发了两种锰含量不同且总含量不超过0.5%的钼、铌微合金化珠光体灰铸铁材料 (高锰 $w_{Mn}=2.0\%$ 、低锰 $w_{Mn}=0.2\%$), 以期制备出低成本、低合金、高性能的灰铸铁气缸套。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

本试验采用离心铸造工艺, 在500 kg中频感应电炉中进行熔炼。主要配料选用

作者简介:

孙冬 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事高性能铸铁方面的研究。E-mail: dong_0916@126.com

通讯作者:

张凌峰, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。电话: 18303792083, E-mail: zh_lingfeng@163.com

中图分类号: TG143.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2020) 06-0572-05

收稿日期:

2019-12-10 收到初稿,
2020-01-14 收到修订稿。

Q12生铁(45%)、废钢(55%)、FeSi75铁硅合金、FeMn68铁锰合金、FeMo60铁钼合金以及FeNb70铁铌合金,具体化学成分设计如下:前半炉铁液元素质量分数为:2.9%C、2.1% Si、0.2% Mn、0.08% S、0.08% P、0.15% Mo、0.15% Nb、余量为Fe;后半炉铁液元素质量分数为:2.0%Mn,其余元素含量不变。对照组选用贝氏体灰铸铁气缸套,具体化学成分(质量分数)如下:2.85%C、2.1% Si、S≤0.1%、P≤0.1%、0.45% Mn、1.0% Ni、0.05% Ti、0.07% Nb、0.05% V、0.75% Mo、余量为Fe,其热处理工艺为530℃保温3 h后出炉空冷,处理后硬度达到HBW290左右,抗拉强度为410 MPa左右。

具体步骤如下:先将生铁、废钢放入电炉中熔炼成铁液,加入合金原料调整成分,随后升温至1 500℃,待铁料完全熔化10 min后,采用直读光谱仪进行成分分析;浇注前将模具内壁涂覆硅藻土湿涂料2遍,涂料厚度为0.7 mm,模具温度升至250℃;浇注时孕育剂选用SiBa-SiSr复合孕育剂,总量为0.7%,方式为随流孕育,铁液流入浇包时加入0.5%硅钡进行一次孕育,铁液自浇包流入模具时加入0.2%硅锆进行二次孕育;浇注机转速为1 400 r/min,浇注温度1 380℃;待铸件在模具中的温度降至800℃时出缸,出缸后空冷至室温下架,得到气缸套毛坯。随后将毛坯加工成半成品,对其进行退火处理,目的去除应力。热处理工艺为:530℃保温3 h,炉冷至300℃后出炉空冷。

1.2 试验方法

在距毛坯内壁4~4.5 mm处截取GB/T228.1—2010标准拉伸试样三根,采用WDW-300万能试验机分别测量每个试样的抗拉强度,结果取平均值;选取抗拉强度接近平均值的试样,利用320HBS-3000数显布氏硬度计(压头5 mm、载荷750 kg、保载20 s)测其硬度,每个试样至少压载三个点,结果取平均值;采用OLYMPUS PMG3型金相显微镜观察石墨形态,腐蚀剂为4%硝酸

酒精;采用JSM-7800F型扫描电镜观察基体组织。

利用CA6140A卧式车床(转速180 r/min、进给量0.2 mm/r)、QB-07型双平行八角环测力仪以及DH5923动静态应变测量系统分别测量试样切削深度为2.0、1.5、1.0和0.5 mm时刀具Z轴方向的切削力 F_z ,车刀统一选用AC405K刀具。切削前,在ZL201110458772.6标定装置^[10]上采用增减砝码方式进行测力仪标定,每个砝码重10 kg,得到的应力-应变线性关系式为 $F_z=20.37 \times 10^6 \varepsilon_z + 1.07$;切削前,保证每组缸套初始直径相同,以减小误差。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

灰铸铁在结晶过程中,约有80%的碳以片状石墨的形式析出,对材料性能影响很大。图1为三组试样的石墨形貌,如图所示三组试样均为A型石墨,其中图1a贝氏体试样的石墨分布较为密集,石墨片比较粗大,数量较多(石墨面积百分比为10.3%)。对比前者,图1b和图1c中石墨数量略有减少,分别为7.9%、8.9%,其中图1b低锰灰铸铁中石墨片比较细小平直,分布较为疏散均匀,对基体的切割作用小。而图1c高锰灰铸铁中石墨片相对细小弯曲,分布均匀无序。由此可见,灰铸铁经Mo、Nb元素微合金化后,石墨形貌有所改善。这是因为钼是反石墨化元素,对石墨生成有阻碍作用,可减少并细化石墨;而铌虽然是中性元素,对石墨生长影响不大,但却能细化石墨^[11]。对比低锰灰铸铁,高锰灰铸铁中石墨片之所以更加细小弯曲,是因为锰是阻碍石墨化元素,它能溶于铁素体和渗碳体中,稳定碳化物,当锰含量增至2.0%时,更多的锰元素将会与硫化物反应生成MnS硬质微粒,这不仅抵消了硫元素对石墨生长的不利因素,生成的硫化物还可能成为石墨的形核基质,从而促进石墨均匀形核、长大,生成更多细小弯曲且分布均匀的石墨片。

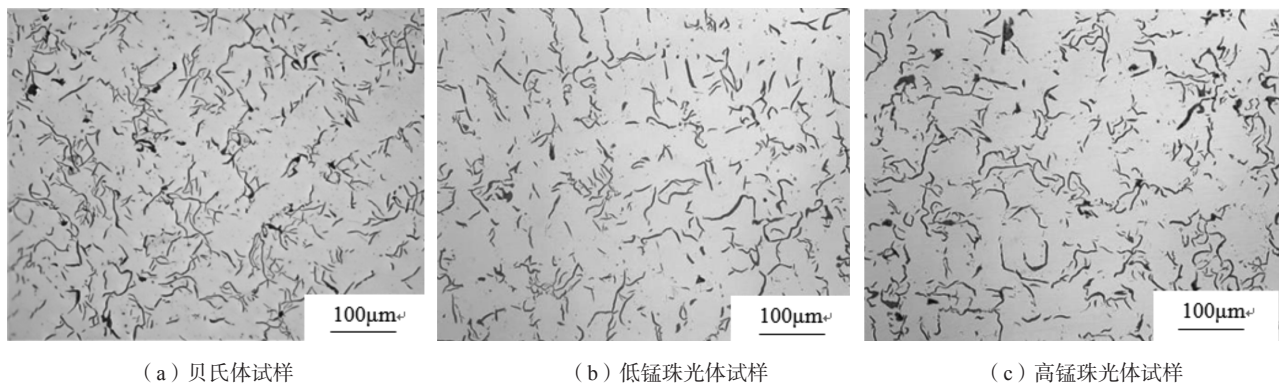
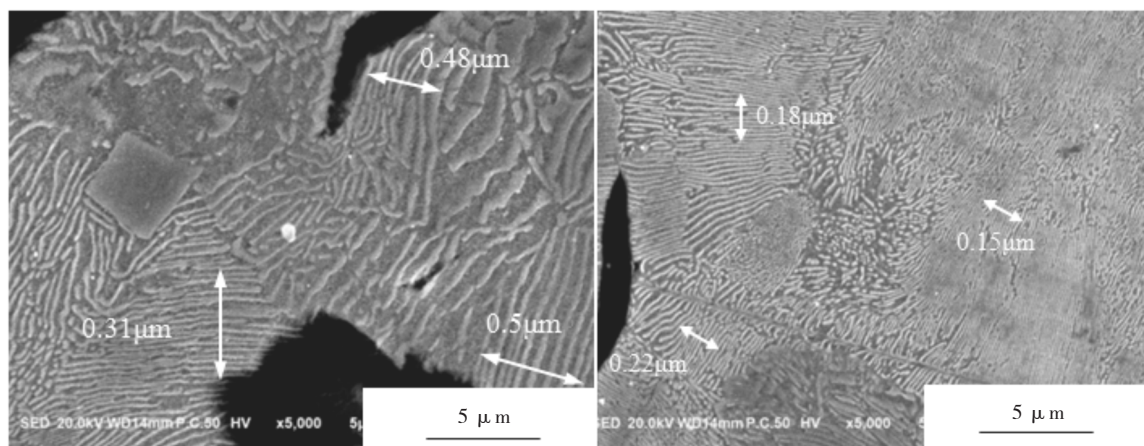


图1 灰铸铁的石墨形态

Fig. 1 Graphite morphologies of three kinds of gray cast iron

钼、铌元素除了细化石墨以外，还可以稳定和细化珠光体。珠光体是铁素体和渗碳体组成的共析体，可把它看似在铁素体中加入许多硬而脆的渗碳体片，起到第二相强化的作用，因此珠光体的力学性能主要取决于其片层间距，既一片铁素体与一片渗碳体的厚度之和^[12]。如图2所示，两组试样的基体组织均为珠光体，分布较为均匀，含量 $\geq 95\%$ 。其中图2a中珠光体平

均片层间距约为 $0.43\ \mu\text{m}$ ，与之相比，图2b中珠光体平均片层间距缩小58% ($0.18\ \mu\text{m}$)。由此可见，锰含量对珠光体分散度影响较大。这是由于锰是阻碍石墨化元素，可通过控制石墨化过程改变铸铁的组织与性能，当锰含量增加时，在共晶至共析转变中由奥氏体析出的二次石墨将会减少，这将促进珠光体形成，使珠光体组织更加稳定，分布更加致密。



(a) 低锰珠光体

(b) 高锰珠光体

图2 灰铸铁的基体组织

Fig. 2 Matrix structures of gray cast irons with low and high Mn levels

2.2 力学性能测试

灰铸铁的力学性能主要由基体组织和石墨的数量、大小和分布等因素决定^[13]。由于石墨本身强度较低，在基体中类似一条裂纹，割裂了基体组织的连续性，因此石墨对材料的拉伸性能影响较大，通常粗化以及增加石墨会恶化材料的抗拉强度，而基体组织对拉伸性能影响较小，缩小珠光体片层间距更多是提高材料的硬度^[14]。如表1所示，与贝氏体灰铸铁相比，低锰灰铸铁的强度与硬度变化不大，分别为404 MPa、HBW 275，而高锰灰铸铁的抗拉强度增加了12% (458 MPa)，布氏硬度增长19% (HBW345)。由此可见，经Mo、Nb元素微合金化后，低锰珠光体灰铸铁的力学性能基本到达贝氏体灰铸铁的水平，高锰珠光体灰铸铁的力学性能提升明显。这是因为钼、铌元素细化石墨效果明显，对基体产生的切割作用较小，有利于提高材料的强度，另外钼和铌还易于碳化，生成 Mo_2C 、 NbC 硬质相，弥散分布在基体中可以产生强化作用，提高材料的性能。由于高锰灰铸铁的石墨片相对细小弯曲，对基体的切割作用小，以及片层间距更加细小的珠光体显著提高了材料局部抵抗硬物压入的能力，故其强度与硬度显著提升。

表1 灰铸铁的力学性能

Table 1 Mechanical properties of three kinds of gray cast iron

灰铸铁	强度/MPa	硬度HBW
贝氏体	408	290
低锰珠光体	404	275
高锰珠光体	458	345

2.3 切削性能分析

材料的加工性主要由切削力、切削温度、加工表面质量、切屑情况和刀具磨损情况等因素决定。由于切削力直接影响着切削热的产生，并进一步影响刀具磨损、切屑形貌以及加工表面质量，从某种意义上讲，切削力越大，材料的加工性越差，刀具磨损也越严重，以致材料生产成本高居不下^[15-16]。如图3、图4所示，对比贝氏体灰铸铁而言，低锰灰铸铁的切削抗力与之近似，切屑尺寸约为 $4\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ ，基本无太大变化，而高锰灰铸铁的切削抗力增大明显，切屑尺寸约为 $6\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ ，切屑形貌更加弯曲。研究指出，灰铸铁的基体组织对材料的加工性起着决定性作用，均匀一致的组织是获得良好加工性能的关键，而石墨数量、大小、分布也会对材料加工性产生一定影响^[17-18]。

高锰灰铸铁由于其珠光体层片间距较小, 硬度较高, 加工时裂纹在基体中扩展的阻力较大, 所需消耗能量较多, 因此刀具所承受切削抗力较大。随着材料加工愈加困难, 工件表面温度升高, 迫使该区域塑性提高, 不利于切屑断屑, 从而切屑尺寸较长且弯曲。而低锰灰铸铁由于其珠光体片层间距较大, 对裂纹扩展阻碍较小, 并且其石墨较为平直, 石墨端部容易出现应力集中, 促使裂纹在尖端处萌生, 况且在切削过程中较长的石墨片被切掉的地方可以形成孔洞, 能储存更多的润滑油, 这将减小刀具与切屑界面处的摩擦系数, 从而降低了刀具的切削抗力^[19], 故低锰灰铸铁的加工性优于高锰灰铸铁。

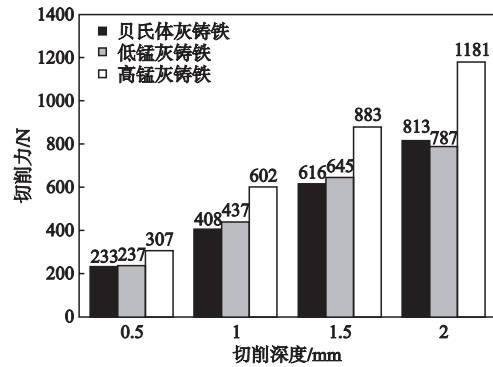


图3 气缸套在不同切削深度情况下的切削力
Fig. 3 Cutting force of cylinder liner at different cutting depths

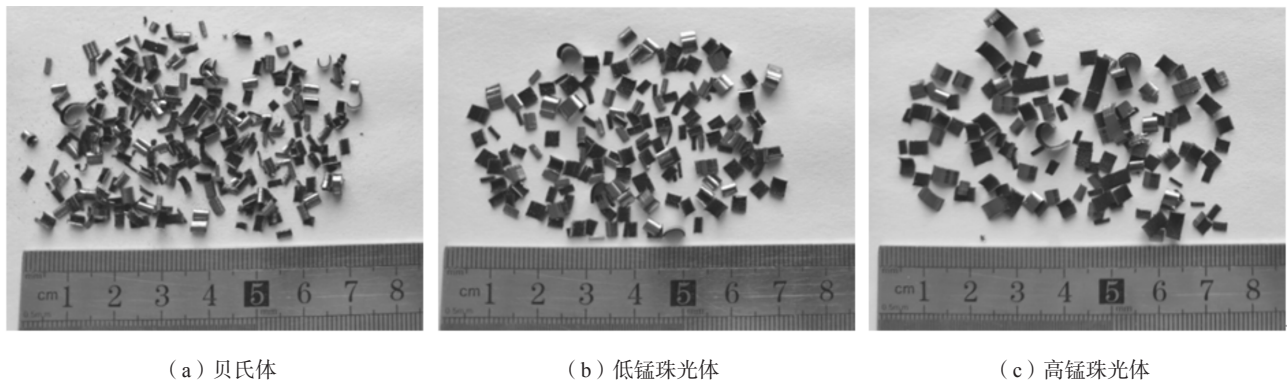


图4 灰铸铁的切屑形貌

Fig. 4 Chip forms of three kinds of gray cast iron

综合以上分析, 采用钼铌微合金化生产的高强度珠光体灰铸铁具有十分明显的经济效益, 主要体现在合金原料以及加工成本两方面。两组珠光体灰铸铁在保证抗拉强度 ≥ 400 MPa, 硬度 $HBW \geq 270$ 技术要求情况下, 仅添加总含量不超过0.5%Mo和Nb两种贵重的合金元素, 大大降低了材料生产成本, 同时低锰灰铸铁的加工性与贝氏体灰铸铁处于同一水平, 保障了材料的加工成本, 而高锰灰铸铁虽然加工性略有下降, 但其力学性能提升明显, 带来的利益足以弥补不足之处, 前景十分可观。

3 结论

(1) 两组新型铸铁的组织均为珠光体+A型石墨, 其中低锰灰铸铁的石墨片细小平直, 分布疏散均匀; 高锰灰铸铁的石墨片细小弯曲、分布致密, 珠光体更加细小。

(2) 低锰灰铸铁的抗拉强度、布氏硬度分别为404 MPa、HBW275, 接近于贝氏体灰铸铁; 而高锰灰铸铁的强度与硬度对比贝氏体材料分别增长12%和19%, 达到458 MPa、HBW345。

(3) 在相同切削条件下, 低锰灰铸铁的切削抗力和切屑尺寸较小, 与贝氏体材料加工性处于同一水平; 高锰灰铸铁的切削抗力和切屑尺寸较大, 加工性略有下降。

(4) 从灰铸铁的性能以及成本上考虑, 珠光体灰铸铁完全可以代替贝氏体灰铸铁, 成为高性价比气缸套首选材料。

参考文献:

- [1] 翟彦博, 刘昌明. Mg,Si颗粒增强自生铝基复合材料气缸套 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (6): 494-497, 483.
- [2] 曹琨, 赵子文, 祁庆花. 碳当量对合成铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (11): 1232-1236.
- [3] 闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. 预热温度对灰铸铁表面激光熔覆镍基涂层组织与性能的影响 [J]. 材料工程, 2015, 43 (1): 30-36.
- [4] 赵记霞, 卢琼, 方东森. 一种珠光体高强度灰铸铁气缸套材料 [J]. 内燃机与配件, 2018, 273 (21): 115-117.
- [5] LI Chengdi, XU Jiazi, XU Jiujun, et al. Rounded silicon edges on the surface of Al-Si alloy cylinder liner by means of mechanical grinding treatment [J]. Tribology International, 2016, 104: 204-211.
- [6] 肖丽丽, 任凤章, 王宇飞, 等. 灰铸铁合金化及加工性能研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (7): 685-689.
- [7] HOPPE S, FRITSCH E. High-performance cylinder liners for diesel engines [J]. MTZ Worldwide, 2006, 67 (2): 23-24.
- [8] 王有超, 黄帅, 历长云, 等. 铬钼铜合金灰铸铁气缸套的铸造工艺及力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (5): 78-80, 83.
- [9] 郝巧玲, 陈爱荣, 王守忠. 铸造工艺及合金元素对气缸套切削性能的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (8): 846-848.
- [10] 王宇飞, 任凤章, 张旦闻, 等. 车削测力仪在机标定的标定装置及标定方法 [J]. 计量学报, 2015, 36 (6): 603-606.
- [11] 周文彬. 铌在高碳当量灰铸铁中的作用及在制动盘生产中的应用 [D]. 上海: 上海大学, 2010.
- [12] 赵岩. 原料配比对球墨铸铁珠光体片层间距及硬度的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (4): 397-400.
- [13] LUIZ R M D, ANSELMO E D. Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2013, 35 (1): 17-29.
- [14] 张寅. ISO 185: 2005《灰铸铁》国际标准解读 [J]. 铸造, 2016, 65 (7): 683-686.
- [15] 任凤章, 张旦闻, 吴锐, 等. 材料加工性能评价中的切削力测量问题的实验研究 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35 (S1): 72-76.
- [16] LI Bin. An experimental investigation of dry cutting performance for machining gray cast iron with carbide coating tool [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71 (5-8): 1093-1098.
- [17] 王宇飞, 任凤章, 黄胜操. 发动机缸体用高强度灰铸铁切削加工性能研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (1): 47-49, 54.
- [18] COLLINI L, NICOLETTO G, KONEČNÁ R. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 488 (1): 529-539.
- [19] SILVA R B D, LIMA M L S, PEREIRA M F, et al. A surface and sub-surface quality evaluation of three cast iron grades after grinding under various cutting conditions [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99 (5-8): 1839-1852.

Development and Performance Study of Mo-Nb Microalloyed Gray Cast Iron

SUN Dong¹, ZHANG Ling-feng^{1,2}, XIONG Yi^{1,2}, REN Feng-zhang^{1,2}, LIU Zhi-jun³, GAO Guang-dong³, QIN Xiao-cai³

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Henan Province Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals, Luoyang 471023, Henan, China; 3. ZYNP Corporation, Mengzhou 471023, Henan, China)

Abstract:

In order to meet the increasingly stringent emission standards of automobiles and reduce the production cost of cylinder liners, two kinds of Mo-Nb microalloyed pearlite gray cast iron with high manganese content (2.0%) and low manganese content (0.2%) have been developed and their microstructure, mechanical properties and cutting performance have been compared and analyzed. The results show that type A graphite is obtained in low-manganese gray cast iron, while the pearlite lamellar spacing is large (0.43 μm), and the tensile strength, Brinell hardness reach 404 MPa, 275 HBW, respectively. Compared with low-manganese gray cast iron, the graphite of high-manganese gray cast iron is more fine and dense, and the pearlite layer spacing is reduced by 58% (0.18 μm), the strength and hardness are increased by 13% and 25% (458 MPa, 345 HBW), respectively. The cutting resistance and chip morphology of low-manganese gray cast iron are similar to those of bainite gray cast iron under the same cutting conditions, while the cutting resistance and chip size of high-manganese gray cast iron are relatively large, resulting in slightly poor machinability. From the perspective of comprehensive performance, pearlite gray cast iron with lower cost can completely replace bainite gray cast iron as the preferred material for cylinder liners.

Key words:

gray cast iron; microalloyed; microstructure; mechanical properties; cutting performance