

铌在发动机缸盖上的应用

许景峰¹, 梁亚茹¹, 吕清钊¹, 戚鹏超¹, 董志鹏¹, 李孝艳², 彭广涛²

(1. 潍柴重机股份有限公司, 山东潍坊 261001; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061)

摘要: 为满足柴油机日益严格的排放标准以及降低缸盖生产成本, 本文研究将Cu-Cr-Nb合金铸铁代替Cu-Cr-Mo合金铸铁。试验表明, 在基本元素及其他合金元素控制范围相同条件下, 将Nb含量0.1%~0.2%代替Mo含量0.2%~0.4%, 获得了组织性能均满足要求的合格铸件, 达到降低成本的目的。

关键词: 灰铸铁; 微合金化; 微观组织; 力学性能

气缸盖作为发动机核心零部件之一, 与气缸套、活塞共同构成内燃机工作空间, 其质量对发动机的整体性能起着关键作用^[1]。灰铸铁因其优异性能被广泛用于缸体缸盖, 但近年来随着国家排放标准要求日益严苛, 发动机关键性能指标持续升级, 对其核心零部件材料也提出更高要求。当前, 灰铸铁正朝着高碳当量、高强度方向发展, 微合金化技术是实现这一目标的关键手段。

我厂现有材质HT300产品使用Cu-Cr-Mo微合金化工艺实现性能提升。然而, 随着Mo元素含量的增加, 铁液收缩倾向增大, 产品缺陷率攀升, 难以满足高性能灰铸铁稳定生产的需求。此外, 近年来钼铁价格的剧烈波动导致生产成本急剧上升, 鉴于此, 急需探索新的合金元素, 旨在保证产品性能的前提下, 减少或完全替代钼铁的使用, 从而实现生产成本优化, 提高产品市场竞争力。

铌与钼元素位于同一周期, 具有相似性质, 可提高铸铁的抗拉强度及高温组织稳定性^[2]。大量研究表明^[3-5], 铌在灰铸铁中有两方面作用: 一是细化共晶团, 净化共晶团晶界, 促进晶粒细化和组织均匀化; 二是形成硬质颗粒均匀分布在基体中, 起到弥散强化作用。迄今为止, 铌元素在灰铸铁中的应用主要集中在制动盘领域^[2, 5-7], 而在发动机缸体缸盖上的应用研究较少。因此, 本文采用砂型铸造工艺, 对比钼微合金化与铌微合金化对灰铸铁缸盖显微组织和性能的影响, 从而为多合金化工艺路线切换提供数据参考。

1 化学成分

1.1 基本化学成分选择

C和Si元素对灰铸铁显微组织和力学性能具有显著影响, 生产中通过调控C、Si含量, 控制碳当量(CE)的范围预设材料初步性能。低CE有助于石墨细化和奥氏体枝晶数量增加, 从而提升灰铸铁的强度和硬度, 但铸造性能和加工性能恶化。高CE可改善铁液流动性, 降低缩松倾向, 相应强度有所降低。因此, 高CE及合金化元素的使用是高强度铸铁发展的正确方向。通过生产验证, HT300牌号灰铸铁 $w(\text{C})$ 控制在3.8%~4.2%。进一步验证确定 $w(\text{C})$ 为3.1%~3.4%, $w(\text{Si})$ 为1.8%~2.2%。

S元素对石墨具有双重作用: 一是阻碍石墨化, 稳定渗碳体, 与铁、碳形成的硫共晶在晶界偏析, 增大热裂倾向; 二是S与Mn结合形成高熔点的硫化锰, 以颗粒状存在并作为石墨形核位点, 促进石墨析出与长大^[8]。鉴于S的以上特性, $w(\text{S})$ 一般控制在0.06%~0.12%; Mn可阻碍共析转变石墨化, 促进珠光体形成, 显著改善灰铸

作者简介:

许景峰(1981-), 男, 硕士, 研究方向为铸铁材料的开发及应用。E-mail: jingfeng9699@163.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0818-06

收稿日期:

2025-02-26 收到初稿,

2025-03-19 收到修订稿。

铁力学性能,然而,过量的Mn导致碳化物析出增多,降低力学性能,因此 $w(\text{Mn})$ 控制在0.5%~0.1.0%;P常以磷共晶的形式分布在晶界处,降低铸铁塑性,增加疏松和冷裂风险,一般 $w(\text{P})$ 低于0.07%。

1.2 合金元素使用

灰铸铁因其独特的片状石墨结构表现出优良的热导率和耐磨性能,但若满足工业需求,实现性能的进一步优化还需进行微合金化处理。选用的合金元素作用机制如下。

(1) Cu元素: Cu作为有效的石墨化促进剂,能够降低奥氏体的临界转变温度,提高基体强度,抑制白口组织形成,并有细化石墨颗粒和珠光体的作用,考虑 $w(\text{Cu})$ 一般控制在0.4%~0.8%。

(2) Cr元素: Cr一方面抑制铁素体形核,促进并稳定珠光体形成,细化珠光体片层间距;另一方面会加剧铸件白口倾向,常与Cu元素协同作用,可以改善灰铸铁的铸造性能。鉴于Cr以上特性, $w(\text{Cr})$ 控制在0.2%~0.4%。

(3) Mo元素: Mo作为石墨化抑制剂,在铸铁生产中常与Cu和Cr等合金元素联合使用,起到细化石墨和提高珠光体含量的作用,从而增强灰铸铁的强度和抗热裂性能^[9],因此 $w(\text{Mo})$ 一般控制在0.2%~0.4%。

(4) Nb元素: Nb与C、N元素形成Nb(C, N)相作为石墨形核位点,提高灰铸铁的抗磨性能和高温组织稳定性^[5]。Nb还可细化共晶团,减小珠光体片层间距,阻碍位错运动和微裂纹扩展。 $w(\text{Nb})$ 控制在0.1%~0.2%。

2 熔炼工艺

2.1 熔炼设备及炉料

生产中采用8 t中频感应电炉熔炼,热电偶测温。炉料选用生铁、废钢和回炉料,其中回炉料为本厂浇冒口和废铸件,此外还需加入大块硅铁、锰铁和增碳剂。各炉料化学成分范围控制如表1所示。

表1 炉料成分
Tab. 1 Composition of furnace charge $w_B/\%$

炉料	C	Si	Mn	P	S
生铁	>4.3	≤1.5	<0.22	<0.06	≤0.02
废钢	<0.8	-	<1.5	≤0.05	≤0.05
回炉料	3.0~3.4	1.5~2.2	0.5~1.0	≤0.06	≤0.12
硅铁	-	72.0~80.0	-	-	-
锰铁	-	-	65~72	-	-
增碳剂	≥98	-	-	-	-

2.2 试验过程

按照HT300的成分范围称重配料,向感应电炉中依次加入0~10%生铁、30%~40%回炉料和50%~60%废钢,熔炼过程中加入硅铁、锰铁和增碳剂进行成分调控。炉前使用热分析仪测定碳当量(CE)并动态调控铁液成分。使用红外碳硫分析仪检测原铁液及试块成分中C和S元素含量,同时使用直读光谱仪对原铁液及试块成分中Si、Mn、P、Cu等其他元素快速检测。原铁液成分范围控制如表2所示。

表2 原铁液成分范围
Tab. 2 Original composition range of molten iron $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S
3.1~3.4	1.4~1.6	0.5~1.0	<0.07	0.06~0.12

铁液完全熔化后,需断电静置5~15 min,便于残渣上浮。使用钼铁时,取消钼铁,Cu-Cr-Mo合金铸铁调整为Cu-Cr-Nb合金铸铁。铸铁化学成分范围如表3所示。

表3 灰铸铁铁液成分控制范围
Tab. 3 Control range of composition of gray cast iron and molten iron $w_B/\%$

材料	C	Si	Cu	Cr	Mo	Nb
Cu-Cr-Mo合金	3.1~3.4	1.8~2.2	0.4~0.8	0.2~0.4	0.2~0.4	-
Cu-Cr-Nb合金	3.1~3.4	1.8~2.2	0.4~0.8	0.2~0.4	-	0.1~0.2

为满足铸铁性能,出铁前需进行炉前处理。以往钼铁合金化生产中,合金材料(电解铜、铬铁和钼铁)和硅钡孕育剂直接加入浇包。由于钼铁的固液相线温度分别为1 580 ℃和1 630 ℃^[10],鉴于钼的高熔点特性,改为出铁前向炉内加入钼铁颗粒以提高其吸收率,浇包内加入电解铜、铬铁和硅钡孕育剂。出铁温度控制在1 530 ℃以上。出铁后,扒渣,取样分析。使用现有浇包工艺,浇注灰铸铁缸盖和附铸试棒,温度控制在1 380~1 420 ℃。通过两次浇注试验,对比钼、钼元素对灰铸铁显微组织及性能的影响,并检测附铸试块和本体试块金相组织及力学性能。

3 试验结果与分析

3.1 附铸试块分析

两种合金铸铁附铸试块的检测结果见表4,力学性能和金相组织均符合笔者工厂HT300附铸试棒相关要求,其中抗拉强度≥300 MPa,硬度HBW200~250。Cu-Cr-Mo合金铸铁抗拉强度和硬度分别为333 MPa和HBW226。相比于Cu-Cr-Mo合金铸铁,Cu-Cr-Nb合金

表4 附铸试块成分、金相及力学性能
Tab. 4 Composition, metallographic and mechanical properties of the attached casting test block

材料	化学成分 (质量分数%)				金相组织		力学性能	
	Cu	Cr	Mo	Nb	石墨	基体	抗拉强度/MPa	硬度 (HBW)
Cu-Cr-Mo合金	0.65	0.32	0.30	-	石墨 A 型, 片长 4 级	珠光体 98%	333	226
Cu-Cr-Nb合金	0.66	0.31	-	0.16	石墨 A 型, 片长 4 级	珠光体 98%	355	243

铸铁的抗拉强度和硬度分别提高6.6%和7.5%，达到355 MPa和HBW243。这是因为铁液凝固时，铌和钼通过固溶强化和弥散强化有效提升灰铸铁强度，但铌的弥散强化和晶界净化作用更为显著，强化效果更为突出。同时两者均可提升铸铁中渗碳体硬度，此外，铌还具备提高莱氏体和珠光体硬度的特性^[3]。

灰铸铁中的石墨形态和珠光体含量对其性能有重要影响，图1和图2为Cu-Cr-Mo合金铸铁和 Cu-Cr-Nb合金铸铁附铸试块的石墨形态和基体组织。经过对比，二者均存在90%以上的片状石墨，均匀分布且无方向性，属于典型的A型石墨。经过硝酸酒精腐蚀后，二者基体组织均为珠光体+铁素体，珠光体含量未见明显区

别，高倍下存在明显的碳化物相。

对低倍下两种合金铸铁20张随机视场金相照片石墨尺寸统计分析，结果如图3所示。与Cu-Cr-Mo合金铸铁相比，Cu-Cr-Nb合金铸铁的微型石墨（<30 μm）和小型石墨（30~60 μm）的比例分别从24.0%和31.4%增加到26.2%和36.3%，中型石墨（60~120 μm）、大型石墨（120~180 μm）和巨型石墨（>180 μm）的占比分别从29.1%、8.4%和7.1%下降至28.9%、7.2%和1.4%，其中小型石墨（30~60 μm）占比增幅较大，巨型石墨（>180 μm）占比降幅较大。结果表明，铌元素细化石墨片的作用优于钼元素，石墨细化有助于提高材料力学性能。

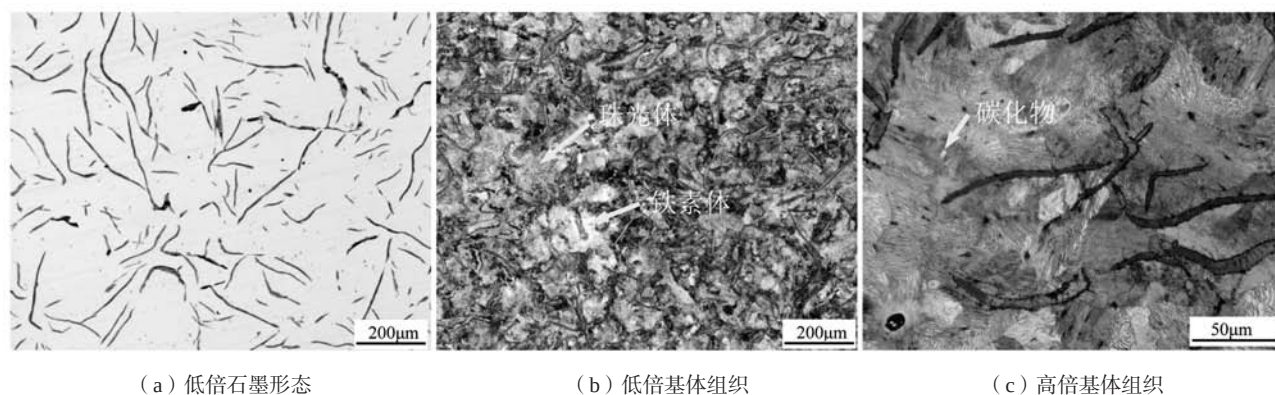


图1 Cu-Cr-Mo合金铸铁附铸试块石墨形态和基体组织

Fig. 1 Graphite morphology and matrix microstructures of the Cu-Cr-Mo alloy cast iron attached test block

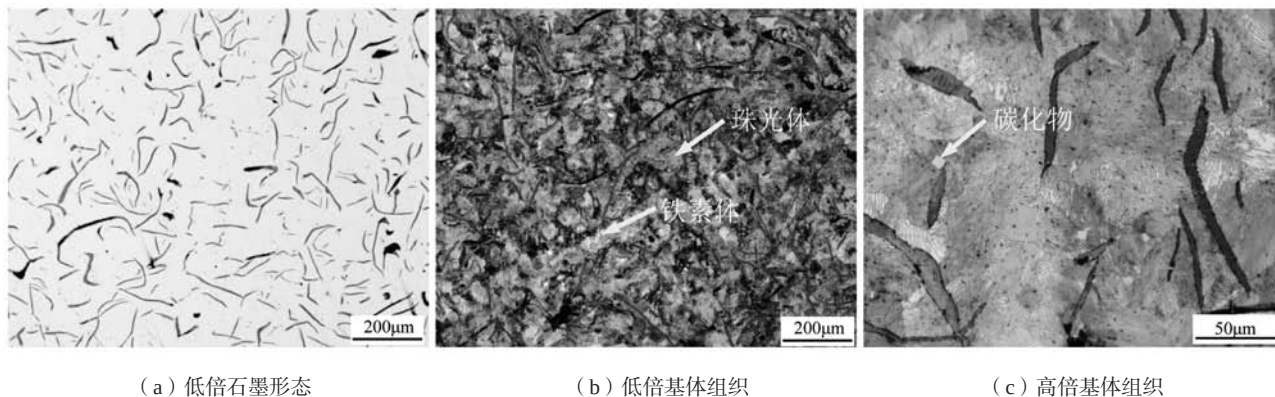


图2 Cu-Cr-Nb合金铸铁附铸试块石墨形态和基体组织

Fig. 2 Graphite morphology and matrix microstructures of the Cu-Cr-Nb alloy cast iron attached test block

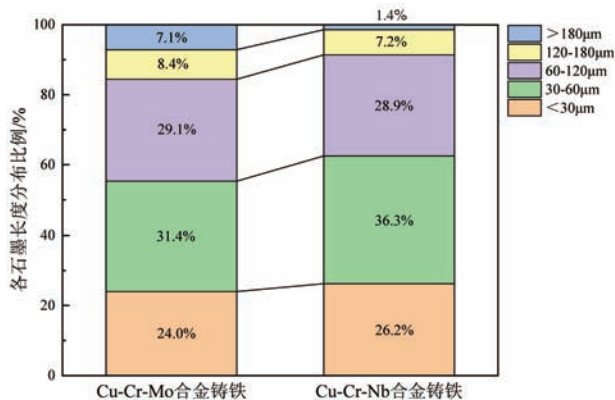


图3 不同合金铸铁的石墨类型分布比例
Fig. 3 Distribution ratio of the graphite types in different alloy cast irons

3.2 本体试块分析

取缸盖本体试样，金相及性能取样位置见图4，检测结果见表5。由表5知，Cu-Cr-Nb合金铸铁缸盖本体



图4 本体取样位置
Fig. 4 Test sampling location of the cylinder head casting

抗拉强度和硬度分别为302 MPa和HBW220，Cu-Cr-Mo合金铸铁缸盖本体抗拉强度和硬度分别为278 MPa和HBW217，均符合HT300牌号相关要求。

当前笔者工厂要求HT300本体试块力学性能：抗拉强度≥260 MPa，硬度HBW200~250。

表5 本体试块成分、金相及力学性能
Tab. 5 Composition, metallographic and mechanical properties of the cylinder head casting

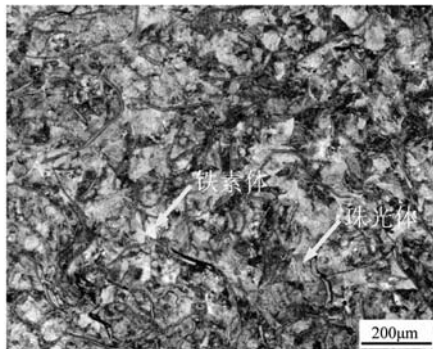
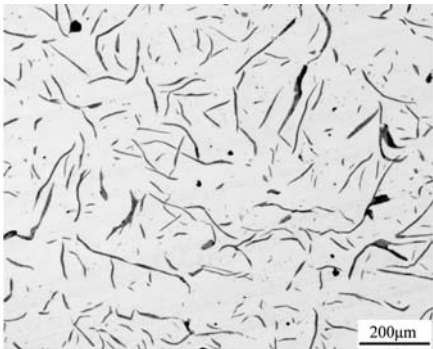
材料	化学成分（质量分数%）				金相组织		力学性能	
	Cu	Cr	Mo	Nb	石墨	基体	抗拉强度/MPa	硬度（HBW）
Cu-Cr-Mo合金	0.63	0.26	0.30	-	石墨A型，片长4级	珠光体98%	278	217
Cu-Cr-Nb合金	0.61	0.25	-	0.15	石墨A型，片长4级	珠光体98%	302	220

图5和图6为两种合金铸铁本体试块金相组织对比，二者均为A型石墨，片长4级，珠光体含量大于98%，基体组织为细片状珠光体，金相组织均符合要求。

3.3 加工性能分析

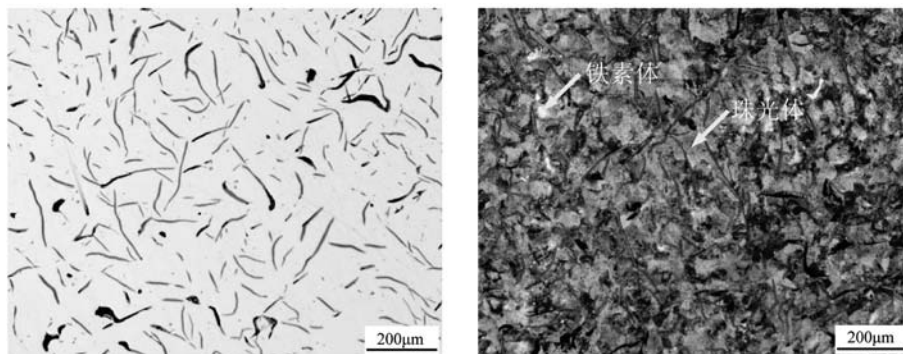
材料的加工性主要受切屑情况、刀具磨损情况和加工表面质量等因素影响。两种合金铸铁缸盖在加工

过程中使用相同的切削参数和刀具，加工过程中排屑情况如图7所示。经过试验发现，二者加工声音与排屑情况无明显差异，加工节拍无明显变化。铣面时，Cu-Cr-Nb缸盖毛坯比Cu-Cr-Mo缸盖毛坯略硬，这是由于铌加入后形成铌的碳氮化物，这些质点硬度高、熔点高，均匀分布在基体中，但这可能加快加工刀具的磨损。



(a) 石墨形态 (b) 基体组织

图5 Cu-Cr-Mo合金铸铁本体试块石墨形态和基体组织
Fig. 5 Graphite morphology and matrix microstructure of the Cu-Cr-Mo alloy cast iron cylinder head

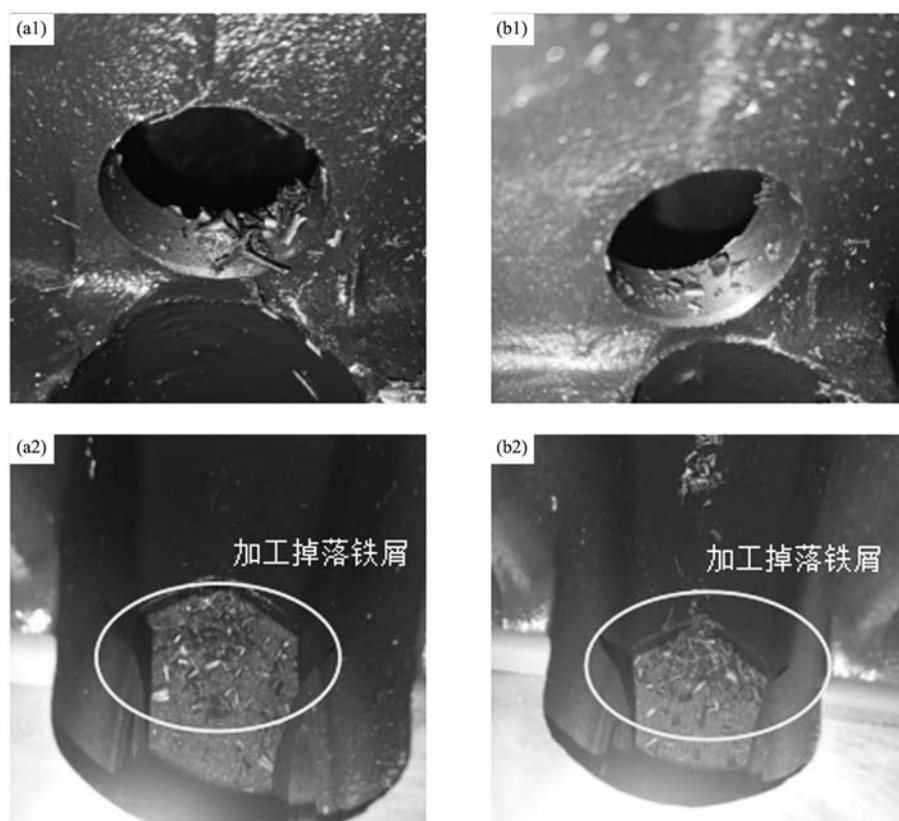


(a) 石墨形态

(b) 基体组织

图6 Cu-Cr-Nb合金铸铁本体试块石墨形态和基体组织

Fig. 6 Graphite morphology and matrix microstructure of the Cu-Cr-Nb alloy cast iron cylinder head



(a) Cu-Cr-Mo合金铸铁

(b) Cu-Cr-Nb合金铸铁

图7 加工排屑情况对比

Fig. 7 Comparison of chip removal during machining

3.4 缸盖解剖分析

随机选取一台Cu-Cr-Nb合金缸盖进行解剖,如图8所示。剖面未发现缩松、气孔、裂纹和夹杂等缺陷,切取部位的清洁度、残砂和钢丸残留等情况均符合要求,各部位壁厚测量数据符合要求。

4 合金成本对比

根据最新的合金市场价格动态,将原有Cu-Cr-Mo合金铸铁成分优化升级为Cu-Cr-Nb合金铸铁成分,每吨铁液预计节约合金成本300余元(铌铁和钼铁价格相当,主要为加入量差价),降低了生产成本,为企业带来显著的经济效益。

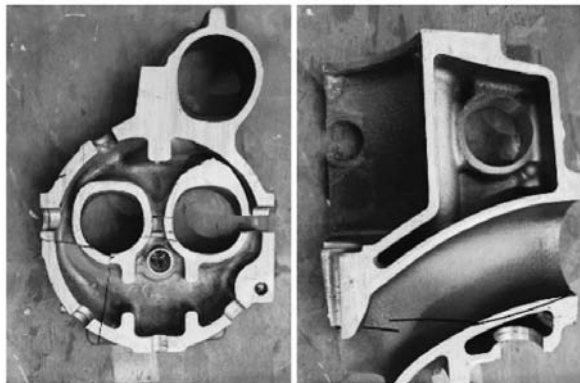


图8 解剖的Cu-Cr-Nb合金铸铁缸盖
Fig. 8 Dissected Cu-Cr-Nb alloy cast iron cylinder head

5 结论

(1) 在性能检测方面, 两种合金铸铁均满足我厂HT300牌号附铸试棒及本体性能要求, Cu-Cr-Mo合金工艺抗拉强度略低于Cu-Cr-Nb合金工艺, 两种合金铸铁组织均为A型石墨, 片长4级, 珠光体含量大于98%, 但铌元素细化石墨片的作用优于钼元素。

(2) 在相同切削条件下, 两种合金铸铁加工声音与排屑情况无明显差异, 加工节拍无明显变化, Cu-Cr-Nb合金铸铁缸盖可能导致加工刀具磨损更快。

(3) 从材料性能以及成本上考虑, Cu-Cr-Nb合金铸铁可以代替Cu-Cr-Mo合金铸铁成为高性价比发动机缸盖的材料。

参考文献:

- [1] 孙冬, 张凌峰, 熊毅, 等. 钼铌微合金化灰铸铁材料的研制及其性能研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (6): 572-576.
- [2] 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.
- [3] 李少南. 铌对灰铸铁性能的影响 [J]. 铸造, 1990 (11): 13-17, 45.
- [4] 李少南. 铌对灰铸铁机械性能的影响 [J]. 铸造技术, 1999 (4): 43-45.
- [5] 周柱华. 铌微合金化对铸铁制动鼓显微组织及高温强度的影响 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
- [6] 冯晨辉. 高碳低硅含铌灰铸铁在制动盘中的应用 [D]. 山东: 山东大学, 2016.
- [7] 周文彬, 征灯科, 华勤, 等. 制动盘用高碳当量灰铸铁的铌合金化 [J]. 铸造, 2010, 59 (3): 98-101.
- [8] 殷作虎. 硫对灰铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2004, 53 (10): 45-49.
- [9] 梁义田, 刘真, 袁森. 合金元素在铸铁中的应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992: 71-78.
- [10] HARDY Mohrbacher. 铌在铸铁中的应用及其作用情况介绍 [J]. 现代铸铁, 2011 (2): 28-33.

Application of Niobium in Engine Cylinder Head

XU Jing-feng¹, LIANG Ya-ru¹, LÜ Qing-ke¹, QI Peng-chao¹, DONG Zhi-peng¹, LI Xiao-yan², PENG Guang-tao²
(1. Weichai Heavy Machinery Co., Ltd., Weifang 261001, Shandong, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China)

Abstract:

To meet the increasingly strict emission standards for diesel engines and reduce the production cost of cylinder heads, the study replaced Cu-Cr-Mo alloy cast iron with Cu-Cr-Nb alloy cast iron. The experiments demonstrated that under the same control ranges for basic elements and other alloying elements, replacing Mo content (0.2%-0.4%) with Nb content (0.1%-0.2%) resulted in qualified castings with satisfactory microstructure and properties, thereby achieving the goal of cost reduction.

Key words:

gray cast iron; microalloying; microstructure; mechanical properties