DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.013

合金铸铁夹送辊的制造及应用研究

程　礼[1],许嘉雄[2],安　萍[2]

(1. 武汉钢铁有限公司热轧厂,湖北 武汉 430083;2. 湖北精利机电科技有限公司,湖北 黄冈 438000)

摘　要:利用正交试验方法研究不同热处理工艺对合金铸铁夹送辊的组织及力学性能的影响,确定了最佳的热处理工艺参数,制作出高硬度高耐磨的合金铸铁夹送辊辊筒。研究表明,最佳热处理工艺为:淬火温度 870 ℃,保温时间 1 h;回火温度 220 ℃,保温时间 4 h。此时,合金的硬度达到 55.92 HRC,比铸态合金提高了 37%,抗拉强度为 502 MPa,满足夹送辊的性能要求。经过生产线实际验证,夹送辊零件适用于高强钢、低温双相钢、管线钢等所有钢材产品的卷取,平均毫米过钢量达 7.88 万吨,生产成本显著降低。

关键词:夹送辊;铸铁;热处理;硬度;抗拉强度

中图分类号:TG251　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)07-0648-05

Study on Manufacture and Application of Alloy Cast Iron Pinch Roller

CHENG Li[1], XU Jiaxiong[2], AN Ping[2]

(1. Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan 430083, China; 2. Hubei Jingli Electromechanical Technology Co., Ltd., Huanggang 438000, China)

Abstract: The influence of different heat treatment processes on the microstructure and mechanical properties of alloy cast iron pinch roller was studied by orthogonal test method, the optimum heat treatment process parameters were determined, and the alloy cast iron pinch roller with high hardness and wear resistance was manufactured. The results show that the optimum heat treatment processes are: quenching temperature 870 ℃, heat preservation time 1 h; tempering temperature 220 ℃, holding time 4 h. At this time, the hardness of the alloy reach 55.92 HRC, 37% higher than that of the as-cast alloy, and the tensile strength is 502 MPa, satisfying the performance requirements of the pinch and feed roller. The production line has verified that the parts of the pinch roller are suitable for the rolling of high strength steel, low temperature duplex steel, pipeline steel and other steel products, with an average steel volume of 78 800 tons and a significantly reduced production cost.

Key words: pinch roll; cast iron; heat treatment; hardness; tensile strength

夹送辊是热轧生产线末端卷取机的重要组成部分,在卷取过程中与钢板直接接触,因此,夹送辊的质量及精度决定了卷取钢板的质量及成材率。夹送辊的辊筒在卷取时受到钢板的高温高压、高速冲击、剧烈磨损的组合作用下,容易产生磨损、龟裂、掉块等失效方式,严重影响钢板的质量和卷取设备的工作周期。夹送辊辊筒的抗粘钢性及耐磨性是延长其使用寿命及保证其精度的关键。目前,许多热轧带钢生产线的夹送辊一般采用碳钢或合金钢制造的辊筒,并在辊筒表面堆焊一层 5~10 mm 厚的耐热钢或硬质合金,以达到耐热、耐磨的目的[1,2]。然而,这些方法不能从根本上解决辊筒表面粘钢、耐热冲击差及工作层厚度有限等问题,且钢质辊筒容易受到钢板的冲击而受损,导致这些夹送辊一般寿命较低,需要频繁更换。因此,开发新型的夹送辊辊筒材料以延长夹送辊寿命具有重要意义。

灰铸铁具有耐磨及耐热性能好、减震能力强、铸造及加工性能好、成本低廉等诸多优势,在工程机械、汽车工业等领域得到极为广泛的应用[3-5]。但灰铸铁件也有硬度低、强度性能低等劣势,为满足实际的使用需求,经常利用微合金化以及热处理等手段来改善铸铁件性能。Filipovic 等人[6]的研究表明,将 Nb 加入铸铁中形成的 NbC 比 M_7C_3 碳化物具有更好的韧性,并且使合金表现出更为优异的耐磨性能。孙小亮等人[7]的研究也表明,Nb 的加入能够使合金的硬度明显提升。但是,随着 Nb 含量的变化,Nb 在铸铁中会以多种形式存在,如方块状的 NbC 和条块状(V 形、Y 形等)的富 Nb 相。这些相的尺寸及形态会

收稿日期:2020-05-13

作者简介:程　礼(1982-),安徽安庆人,工程师.主要从事冶金设备的管理和研究方面的工作.电话:027-87556262,E-mail:65288802@qq.com

通讯作者:安　萍(1959-),女,湖北武汉人,高级工程师.主要从事金属铸造及加工技术研究方面的工作.电话:13618668186,E-mail:ssw636@hotmail.com

对合金性能产生很大的影响，尺寸过大或过小均不利于硬质相发挥强化作用[8,9]。因此，在铸铁中引入具有优异性能的 NbC 时，应当同时对 NbC 的尺寸及分布加以控制，才能充分发挥其强化效果。

本研究在灰铸铁中引入 Nb 等合金元素，并探索该合金铸铁的合适的热处理工艺，使合金铸铁的硬度及力学性能大幅提升，达到实际使用要求。

1　试验方法

本研究以生铁、纯 Cr、纯 Ni、纯 Cu、75%Si-Fe、65%Nb-Fe、65%Mn-Fe、55%Mo-Fe 为原料，按照如表 1 的成分进行配比。配比好的原料放入感应炉中并在 1 450 ℃下熔炼；然后将熔体过热到 1 550 ℃，保温 20 min 后除去铁液表面熔渣；再降温至 1 480 ℃，加入孕育剂，最后浇入金属模具中，获得合金铸锭。从铸锭中切下 ϕ18 mm×110 mm 的圆柱试棒进行热处理工艺研究，表 2 列出了具体的工艺参数。为减少试验次数，利用正交试验的方法进行研究。

从铸锭或热处理后的试棒中切取小块试样进行打磨、抛光。利用 3vol.%硝酸–酒精溶液进行侵蚀后，在光学显微镜(DMM490C)和环境扫描电子显微镜(Quanta200-ESEM)下进行组织观察。在洛氏硬度计(威尔逊 -600MRD)上对合金材料的硬度进行测试；在材料性能试验机(SHIMADZU AG IC-100kN)上进行拉伸强度测试，拉伸速率 1 mm/min，拉伸试样尺寸如图 1。

2　结果与分析

2.1　铸态组织分析

图 2 是合金铸铁的铸态显微组织，根据石墨形态特征可以判断均属于 A 型石墨，片状石墨尺寸较小，且部分卷曲。这是因为在金属型或离心铸造条件下会增大铁液的过冷倾向，有利于形成尺寸细小的石墨。在合金拉伸变形时，尺寸较小的石墨对基体的割裂作用更小，使合金力学性能提高。

图 2(c)是合金经侵蚀后的显微组织。可以看出，合金中存在许多尺寸较小的亮色相(如图中圈出区域)，呈小粒状或小块状。为确认这些亮色相的组成，将试样置于 SEM 下进一步观察分析。

图 3 是合金铸铁在 SEM 下的显微形貌。从图 3(a)组织图中看出，除了黑色的石墨外，合金中还存在许多弥散分布的亮色相，EDS 结果显示该亮色相的成分为 C-Nb-Fe，其中 Nb 和 C 元素的含量都较高。对这些亮色相进一步放大观察(如图 3(b))，发现这些相形状规则，且多为方块状因此可以确定这些均匀分布的亮色相为 NbC[10]。NbC 是一种硬质高熔点相(熔点高达 3 500 ℃，显微硬度高达 23.5 GPa)，

表 1 合金铸铁的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of alloy cast iron

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	P	S
2.9~4.0	1.2~2.0	0.2~1. 2	0.1~0.8	0.2~1.6	0.1~0.8	0.1~1.6	<0.04	<0.015

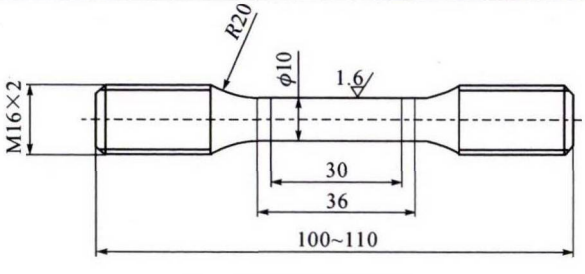
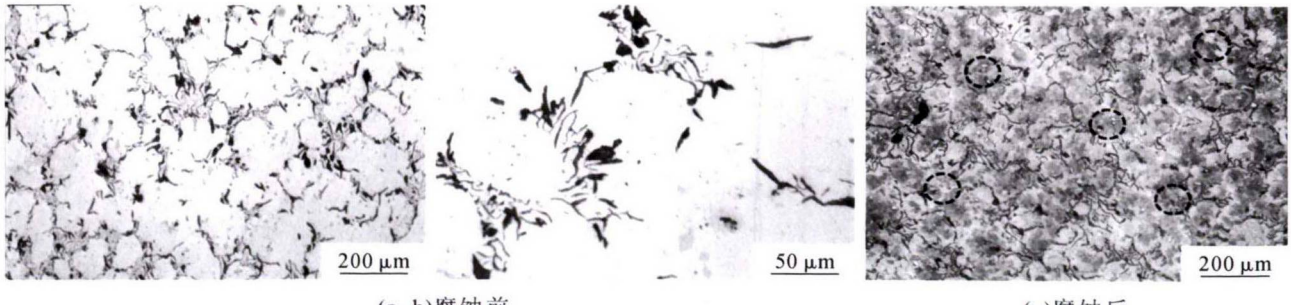


图 1 拉伸试样示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

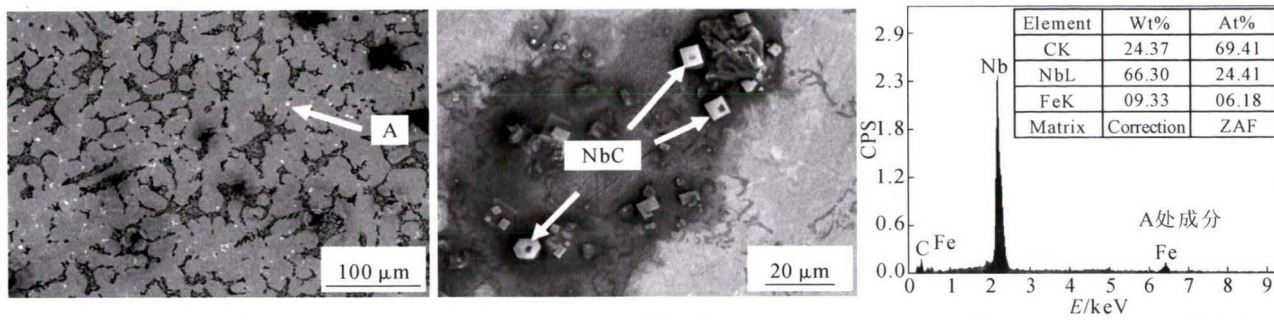
表 2 热处理工艺参数(正交实验因素水平表)
Tab.2 Heat treatment process parameters (Table of orthogonal experimental factors)

水平	因素			
	淬火温度 /℃ (A)	保温时间 /h (B)	回火温度 /℃ (C)	回火时间 /h (D)
1	870	1.0	220	2
2	885	1.5	250	4
3	900	2.0	280	6



(a~b)腐蚀前　　(c)腐蚀后

图 2 合金铸态组织
Fig.2 Microstructure of the as-cast alloy cast iron



(a)BSE形貌　(b)NbC高倍形貌　(c)图(a)中A处的EDS分析结果

图 3 合金铸铁的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of alloy cast iron

在冲击、高温等严苛环境下依然能够保持性能稳定。在较高的冷却速度下,NbC 弥散分布于基体中,使合金的强度及硬度提升。同时,尺寸细小、形状规则的 NbC 颗粒使合金在保证足够的硬度与耐磨性能的同时，也没有了合金中含 Cr 的碳化物时的那种对钢板的损伤。

2.2 热处理工艺研究

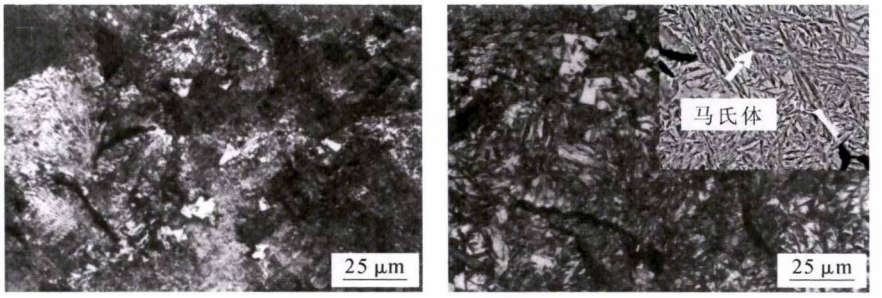
铸态灰铸铁的力学性能有限,难以满足夹送辊的性能要求,因此,需对其进行热处理,以提高合金性能。本研究采用常见的淬火+回火的热处理工艺,具体的影响因素包括淬火温度、淬火保温时间、回火温度和回火保温时间。利用正交试验的方法能够快速获得最优的热处理工艺参数。根据经验参数设计了如表 2 所示的四因素三水平正交试验表,其中,淬火温度选择 870、885、900 ℃三水平,淬火保温时间选择 1.0、1.5、2.0 h,回火温度选择 220、250、280 ℃;回火保温时间选择 2、4、6 h。表 3 列出了合金在不同工艺参数下进行热处理后的硬度和强度数据。由于夹送辊使用的特殊环境,合金材料的硬度是影响辊筒质量的关键因素，因此着重分析热处理工艺对合金硬度的影响。结果表明,各工艺参数对合金硬度的影响大小关系为:回火时间>淬火保温时间>淬火温度>回火温度。可见,回火时间对合金材料的硬度影响最大。根据正交分析结果,使合金硬度最高的热处理工艺为 A1B1C1D2,即 870 ℃×1 h+220 ℃×4 h。该方案未在设计的试验中出现,因此需要进一步验证。

图 4(a)是铸态合金的高倍显微组织,基体主要由铁素体和珠光体组成。图 4(b)是在最优方案 870 ℃×1 h+220 ℃×4 h 下对合金进行热处理后的显微组织,基体主要由马氏体和残余奥氏体组成。对合金进行热处理时，先将合金加热到奥氏体相区以获得奥

表3 正交试验结果分析

Tab. 3 Analysis of orthogonal test results

试验序号	因素水平组合	A 淬火温度 /℃	B 淬火时间 /h	C 回火温度 /℃	D 回火时间 /h	硬度 /HRC	抗拉强度 /MPa
1	A1B1C1D1	870	1.0	220	2	53.47	478
2	A1B2C2D2	870	1.5	250	4	53.10	525
3	A1B3C3D3	870	2.0	280	6	53.13	504
4	A2B1C2D3	885	1.0	250	6	52.87	417
5	A2B2C3D1	885	1.5	280	2	50.17	340
6	A2B3C1D2	885	2.0	220	4	52.23	376
7	A3B1C3D2	900	1.0	280	4	55.13	528
8	A3B2C1D3	900	1.5	220	6	53.00	499
9	A3B3C2D1	900	2.0	250	2	50.97	411
K1		159.70	161.47	158.7	154.61		
K2		155.27	156.27	156.94	160.46		
K3		159.10	156.33	158.43	159.00		
K1/3		53.23	53.82	52.9	51.54		
K2/3		51.76	52.09	52.31	53.49		
K3/3		53.03	52.11	52.81	53.00		
极差		1.47	1.73	0.59	1.95		
主次顺序		D>B>A>C					
最优组合		A1B1C1D2					



(a)铸态　　(b)热处理态(870 ℃×1 h+220 ℃×4 h)

图 4 合金显微组织

Fig.4 Microstructure of the alloy

氏体组织，随后油淬使合金迅速冷却，获得尽可能多的马氏体组织。然后低温回火，降低内应力，提高合金韧性。过高的淬火温度会导致碳化物溶解，不利于合金的耐磨性能；回火温度过高、回火时间过长会导致合金中马氏体分解，使合金硬度降低。在最佳的热处理工艺下，合金中马氏体体积分数最高，合金硬度达到 55.92 HRC(铸态合金 40.7 HRC)，比铸态提高了 37%。此时，合金的抗拉强度为 502 MPa，满足夹送辊材料的强度要求（一般要求≥380 MPa）。因此，将该工艺用作夹送辊辊筒的实际生产，并投入现场试用。

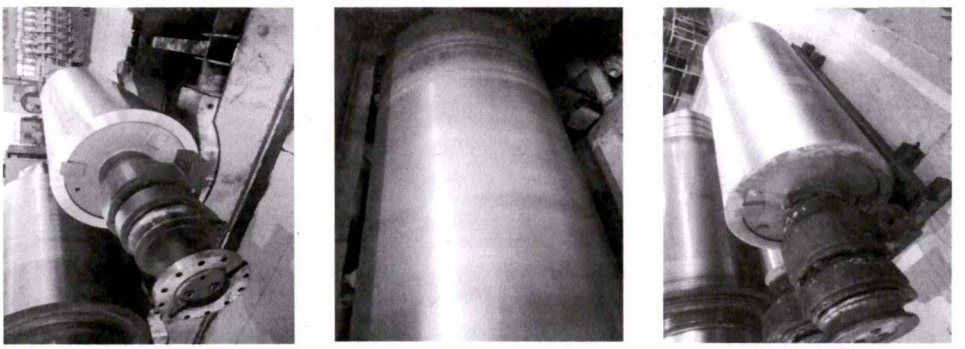
2.3　夹送辊在生产线上的应用情况

图 5 为本论文研制的夹送辊在不同使用阶段的实物图。本研究制备出的夹送辊经过实际上机使用，在机服役的 227 天内，没有一个因卷取夹送辊表面缺陷产生的批量质量问题；与国内主要夹送辊厂商相比，卷取抽卷发现夹送辊缺陷频次显著降低；同时 2018 年一季度批量卷取极限规格高强管线钢(21.5 mm×1 555 mm×80 m)也未出现因卷取夹送辊辊面异常而导致的停机故障，全周期使用过程中，生产质量稳定。详细服役履历表如表 4。

表 4 中该合金铸铁夹送辊总共上机 5 次，每次上机平均服役 45 天，平均过钢量 26.12 万 t；每次上机平均消耗 3.59 mm(平均磨削 0.42 mm)，平均毫米过钢量 7.88 t/mm，新辊平均吨钢成本0.31 元/t。

铸铁夹送辊在新辊 / 磨削后上机前（室温），实测表面硬度 52~55 HRC。实际检修跟踪测量表面硬度为 47~49 HRC(辊面温度约 45 ℃)，表面硬度存在一定程度下降。不同服役周期内表面硬度总体稳定，在使用末期表面硬度也无明显波动，全周期铸铁夹送辊使用过程中，辊面质量无明显异常。

表 5 为不同夹送辊厂家全周期内（新辊上机至磨削报废）吨钢成本的对比数据。从新辊成本上看，国内某厂堆焊辊的新辊吨钢成本与某进口铸铁辊的



(a)新辊　　(b)使用中　　(c)表面磨削后

图 5 铸铁夹送辊实物

Fig.5 Alloy cast iron pinch roller

表 4 本项目夹送辊新辊全周期部分履历表

Tab.4 Experience of new pinch roll in the whole cycle of the project

次数	上机日期	直径 /mm	下机日期	服役天数	过钢量 /t	下机最小直径 /mm	磨削后直径 /mm	磨削量 /mm	上机总消耗量 /mm	毫米过钢量 /(t/mm)	低温厚板管线钢量 /t	高温高碳钢量 /t
1	6 月 8 日	900.02	7 月 25 日	48	27.60	896.80	896.54	0.26	3.48	7.93	1 690	3 696
2	8 月 16 日	896.54	10 月 4 日	49	27.61	893.31	892.61	0.70	3.93	7.03	9 316	1 540
3	10 月 27 日	892.61	12 月 7 日	41	24.60	889.69	889.34	0.35	3.27	7.52	8 277	1 722
4	1 月 3 日	889.34	2 月 21 日	49	28.40	886.02	885.65	0.37	3.69	7.70	14 725	2 730
5	2 月 28 日	885.64	4 月 9 日	40	22.36	883.60	883.23	0.37	2.42	9.24	21 437	4 676

表5 不同夹送辊厂家全周期吨钢成本对比数据表
Tab. 5 Comparison data of cost per ton steel of different pinch roll manufacturers in full cycle

厂家	平均过钢量 /(t/mm)	工作层厚度 /mm	新辊成本 /(元/t)	修复成本 /(元/t)
某国内堆焊辊	5.770	20	0.644 3	0.221 8
某进口铸铁辊	6.803	20	0.657 9	0.207 7
本研究	7.880	20	0.308 4	0.197 6

新辊吨钢成本相近,但是某进口铸铁夹送辊解决了辊面粘钢问题,并且磨损均匀,相对国内某厂堆焊辊来说,某进口铸铁辊有优势。但是,某进口铸铁夹送辊在使用过程出,出现辊面轻微凹坑缺陷。从表中可以看出,本研究的夹送辊有明显的成本优势(吨钢成本),是3种夹送辊中成本最低的。同时,本铸铁夹送辊还解决了辊面粘肉、磨损不均匀及表面局部凹坑的问题,既降低了其它边际成本,也提高了质量稳定性和生产连续性。另外,表中的铸铁夹送辊为使用初期价格,随着夹送辊的批量供货,新辊价格低于表价格。

综上所述,全周期内合金铸铁夹送辊应用的各项指标均达到使用要求,并且表现出优异的卷钢特性。生产成本低于主流夹送辊厂商,现已成为武钢热轧厂生产车间的长期使用产品。因此,本研究具有极为重要的实用价值,对于打破技术垄断的局面具有重要意义。

3 结论

(1)含铌合金铸铁中形成了细小、弥散的NbC颗粒,分布均匀,使夹送辊辊筒在保证耐磨性能的同时减小其他超硬碳化物对钢板的损伤;

(2)合金铸铁的最佳热处理工艺为:淬火温度870 ℃,淬火时间1 h,回火温度220 ℃,回火时间4 h。在此工艺下处理时,合金的硬度达到55.92 HRC,与铸态合金相比提高了37%;

(3)本研究制备出的夹送辊辊筒材料完全达到使用要求,适用于普钢、高强钢、低温双相钢、管线钢等所有钢材产品的卷取,平均毫米过钢量达7.88万t,完全能够代替现有堆焊辊或进口夹送辊辊筒,使生产成本显著降低。

参考文献:

[1] 王清宝,粟卓新,史耀武. 夹送辊堆焊裂纹及其产生机理[J]. 焊接学报, 2010, 31(3):93-96.
[2] 吕艳春. 热轧卷取机夹送辊表面堆焊修复技术 [J]. 中国设备工程, 2016, 4:60-62.
[3] Riposan I, Chisamera M, Stan S. New developments in high quality grey cast irons[J]. China Foundry, 2014, 11(4):351-364.
[4] 王峰. 灰铸铁件的生产[J]. 现代铸铁, 2019, 39(01):22-26.
[5] Collini L , Nicoletto G, R Konená. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 488(1-2):529-539.
[6] Filipovic M , Kamberovic Z , Korac M , et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C-Nb white cast irons[J]. Materials & Design, 2013, 47:41-48.
[7] 孙小亮,朱洪波,闫永生,等. Nb对高CE灰铸铁耐磨性能的影响[J]. 现代铸铁, 2011(2):52-57.
[8] 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.
[9] 刘文莲,徐久军,姚曼. 铌铸铁缸套表面矩形硬质相的磨损行为的有限元研究[J]. 润滑与密封, 2005(5):81-83.
[10] 王海燕. 稀土对微合金钢中碳化铌溶解与析出行为的影响[D]. 北京: 北京科技大学,2017.

(上接第647页)

方法,在对复杂薄壁框架类构件重力铸造时采用雨淋式浇注系统,有利于铸件的补缩,能防止铸件产生缩孔、冷隔、夹渣以及浇不足等缺陷,同时还可以防止由于冲砂而引起的夹砂、气孔和渣孔等缺陷。

参考文献:

[1] 单忠德. 基于快速原型的金属模具制造工艺研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
[2] 徐丹. 无模铸型制造工艺和设备的研究与开发 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
[3] 刘丰,单忠德,李柳,等.大型薄壁壳体件无模铸造技术研究[J]. 铸造技术, 2013,34(10):1324-1326.
[4] Shan Z D, Liu F, Zhan L, et al. Research on Patternless Casting CNC Manufacturing Technology and Development of the Equipment[J]. Advanced Materials Research, 2010(97-101): 4036-4041.
[5] 刘丰,单忠德,冯涛,等. 汽车发动机零部件无模组装制造技术研究 //2010中国铸造活动周论文集[C]. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2010: 1-4.
[6] Zhongde Shan, Xiaoli Dong, Feng Liu. Study on manufacturing of Sand Mold by Direct Milling [C]. The 3rd Seminar of Sino-Korea Cooperation on the Advanced Manufacturing Technology. 2008: 165-169.
[7] 郑亚虹,王自东. 复杂薄壁精密铝合金铸件铸造技术进展[J]. 铸造, 2010(8): 796-799.
[8] 王猛,曾建民,黄卫东. 大型复杂薄壁铸件高品质高精度调压铸造技术[J]. 铸造技术, 2004(5): 353-358.
[9] 孙昌建,舒大禹,王元庆,等. 大型复杂薄壁铝合金铸件的真空增压铸造技术[J]. 铸造技术, 2008(2): 232-235.