

Cr26MoWVTiRE 合金铸铁溜槽衬板的开发与应用

李固成

(驻马店市永诚耐磨材料有限公司 463000)

摘要: 针对钢铁企业高炉布料溜槽衬板所处的恶劣作业环境, 研究开发出具有一定耐高温、耐腐蚀性的 Cr26MoWVTiRE 高铬合金铸铁材料, 经 1020℃-1050℃ 淬火 + 320℃-520℃ 回火, 使材料宏观硬度达到一个较高级别, HRC60-62, $aK > 5J/cm^2$ 。特别是 Mo、W 合金和 V、Ti 等强碳化物元素的复合加入, 提高了溜槽衬板的硬韧性、红硬性和高耐磨性, 经实际应用其使用寿命超过 18 个月, 与镶铸(嵌)硬质合金溜槽衬板相比, 具有生产工艺简单, 成本低, 性价比高等特点。有一定积极推广应用价值。

关键词: 溜槽衬板, 高铬铸铁, 耐高温, 高抗磨性。

Cr26MoWVTiRE development and application of cast alloy iron chute lining plate

Li Gucheng

(Zhumadian Yongcheng wear-resistant materials Co., Ltd. 463000)

Abstract: Aiming at the bad working environment and distributing chute for iron and steel enterprises furnace liner at, Research and development of Cr26MoWVTiRE high chromium alloy cast iron material of high temperature resistance, corrosion resistance, After 1020 °C -1050 °C quenching + 320 °C -520 °C tempering, the material hardness reached a higher level, HRC60-62, $aK, 5J/cm^2$. Especially the composite by adding Mo, W alloy and V, Ti and other strong carbide elements, To improve the toughness, chute lining board red hardness and high wear resistance, Through the practical application of the service life of more than 18 months, With cast-in (block) hard alloy chute lining board compared, Has the advantages of simple production process, low cost, high performance-cost ratio. There are certain positive value of popularization and application.

Keywords: chute lining board, high chromium cast iron, high temperature resistance, high abrasion resistance.

1. 引言

我国钢铁工业自上世纪 70 年代高炉炉顶装置由料钟式改为无料钟式结构以来, 矿石由对大小料钟的磨损变为一系列输料衬板的磨

损。随着冶金装备技术的发展，当代大中型高炉冶炼强度不断提高，2000m³ 以上大型高炉每日通过炉顶设备装入炉内的原燃料高达 2 万吨左右，其中以耐磨损强的烧结矿(HV800 左右)和焦炭为主，对设备造成了极大的冲刷和磨损，尤以布料溜槽衬板为甚。布料溜槽衬板的工作位置是在高炉炉膛内的顶部，工作环境非常恶劣，需要承受高硬度带尖角的矿石大落差冲击磨损以及高温炉气腐蚀(一般正常工作温度 200-320℃，异常热冲击时可以达到 500-700℃)，因此，衬板应具有耐磨损、耐冲击、耐高温及耐腐蚀等综合性能，更应具有高度的可靠性和长寿命。一直以来，材料科学工作者和企业生产技术人员，围绕提高溜槽衬板耐磨性和抗冲击能力等方面，开展了一系列实用技术研究，取得了积极成效⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾：一是从铸造工艺技术上发展有砂型整体铸造成型和消失模铸造高铬溜槽衬板及双金属高铬/碳钢复合铸造等；二是研究对于不同高炉工况条件下，对溜槽衬板磨损严重的部位进行实验性改造，开发出堆焊硬质合金法、钎焊镶嵌硬质合金法、套装硬质合金法和镶铸硬质合金法等；三是从耐磨材料选材上，研究开发了系列高铬铸铁材料如 Cr15Mo2Cu1、Cr17Mo、Cr20Mo2Cu1、Cr25Ni2MoV、Cr26MoNi、Cr26Ni2 等。但是，从整体看，无论从铸造工艺技术或是耐磨材料制备技术，仍然没有解决好在高(中)温条件下的耐磨性问题。堆焊、钎焊、镶嵌、镶铸硬质合金等耐磨损复合工艺技术尽管使溜槽衬板的使用寿命相对提高到 24 个月及以上，但制备工艺复杂，成本高，规模化生产受到一定限制，性价比优势不明显。高铬铸铁整体铸造成型工艺简单，成本低，适合规模化生产，但材料

品种繁杂，品质良莠不齐，耐磨不一，一般使用寿命在 4-10 个月，最长的是原上海梅山冶金公司 Cr20Mo2Cu1 高炉溜槽衬板使用 14 个月⁽⁷⁾；武汉钢铁公司通过将原布料溜槽的本体结构优化设计及衬板由堆焊改为整体铸造并改进成分配方后，大大提高衬板的高温红硬性，使溜槽衬板使用寿命提高到 18 个月⁽⁸⁾。时至今日，对高铬铸铁在高炉溜槽衬板上的研究与应用，仍然显得十分迫切和重要。

2. Cr26MoWVTiRE 溜槽衬板的试验研究

过去，高铬铸铁衬板应用于水泥工业球磨机上，无论是中小型球磨机或是大型和特大型球磨机，一般连续使用寿命在 6-8 年(一仓)，是高锰钢衬板的 4 倍以上，表现出强硬耐磨性。值得指出的是 Cr26MoRE 高铬铸铁用于我国最大水泥球磨机 $\Phi 5.4\text{m} \times 15.5\text{m}$ 一仓衬板和磨头板，在平均球径 $\Phi 80\text{mm}$ 的钢球冲击下，连续使用寿命超过 8 年以上，完全替代进口产品，达到国际先进水平⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。同时，高铬铸铁用于渣浆泵过流部件、建材机械制砖机的绞刀头和破碎机锤头(板锤)、火电厂风扇磨煤机衬瓦和打击板等，也都表现出优异耐磨性，受到市场青睐。2010 年，我们又承接了河北某钢铁公司高炉布料溜槽衬板的生产合同，鉴于此前高铬铸铁产品大量成功应用基础上，拟研究开发新型 Cr26MoWVTiRE 钢铁高炉溜槽衬板，以满足高铬铸铁在高(中)温服役条件下的高耐磨性需要。

2.1 试验条件与方法：Cr26MoWVTiRE 溜槽衬板化学成分设计见表 1。水玻璃砂型加 CO₂ 硬化法造型工艺。采用 1000 kg 中频电炉熔炼，熔炉内依次加入 2/3 废钢、1/3 高(低)碳铬铁、1/3 废钢、2/3 高(低)

碳铬铁、钼铁、钨铁、废铜。炉前进行成分分析，调整 Cr、C 平衡后，加入高碳锰铁、脱氧铝、钒铁、钛铁，出铁液前约 1-3min 加入 1#稀土硅铁进行一次变质处理，用测温仪测温 1520-1560℃出铁液。包内加入重稀土(Y)进行二次变质处理，变质温度 1480-1500℃。镇静后浇注整体溜槽衬板(见图 1)，浇注温度 1350-1400℃，并同箱浇注附铸 Y 型试块一个。铸件经 8h 后开箱，清理打磨，检查表面无铸造缺陷后装入 220KW 台车箱式电炉热处理，回火在 90KW 台车箱式回火炉中进行。热处理工艺 980-1050℃淬火 + 280-520℃回火。用线切割机在 Y 型试块上提取 10×10×55 mm 无缺口试样 3 根，在同一试样上用 JB-300B 半自动冲击试验机上分别测试冲击韧性 ak 值，在同一试样上制取金相样品，经粗磨、细磨、抛光、清洗，用 4%硝酸酒精浸蚀约 5-10s，再清洗、吹干后，在 XSP-4XC 型三目金相显微镜下观察金相组织。用便携式洛氏硬度计在铸件本体上检测硬度 HRC 值。



图 1: R340×长 590×高 290 mm，壁厚 40-90 mm溜槽衬板产品

Figure 1: R340 x 590 x 290 mm, thickness 40-90 mm chute lining board products

2.2 化学成分的设计(见表 1)：在高铬白口铸铁中，C 与 Cr 结合形成合金碳化物，其形成的合金碳化物是材料抗磨主体。C 决定碳化物数量，Cr 决定碳化物类型。随 C 量增加，碳化物数量增加；在含 C

量一定情况下，随 Cr 量增加，共晶碳化物类型将由 $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ 转变； M_3C 的显微硬度(HV) 800–1200， M_7C_3 的显微硬度(HV) 1300–1800， $M_{23}C_6$ 的显微硬度(HV) 1140 左右，显然， M_7C_3 型共晶碳化物最耐磨。根据 F.Maratray 的回归方程：碳化物(K%) = $12.33 \times (C\%) + 0.55 \times (Cr\%) - 15.2\%$ (此式中的百分数为质量百分数) 可知，当 $C > 3.2\%$ 时，由于共晶碳化物含量增加，冲击韧性降低，材料易脆断开裂，造成早期失效；当 $C \leq 2.6\%$ 时，将会降低材料中的抗磨骨架—碳化物的数量，最终将会影响材料的抗磨性能。高炉所用炉料中硬度较高的是块(铁) 矿石，一般其显微硬度(HV) > 760 ，结合磨料磨损机理，即当 $H_m : H_a \geq 0.8$ 时 (H_m 材料硬度， H_a 物料硬度) 材料系统耐磨性好，所以，溜槽衬板的宏观硬度应该在 HRC58 以上才耐磨。因此，选择 $2.6\% - 3.2\% C$ ， $24\% - 28\% Cr$ ，控制 $Cr/C \approx 8 - 9$ 。这时，碳化物(K%) $\approx 30\% - 34\%$ 之间，耐磨性好；材料基体铬含量 $Cr\% > 13\%$ (基体 $Cr\% = 1.95 \times Cr/C - 2.47$) 抗高温氧化性能和耐腐蚀性能好(见表 4)。

Si、Mn 为常规元素，在高铬铸铁中主要起脱氧除气作用，同时强化基体。Si 含量过高，影响淬透性，但 Si 提高 Ms 点。Mn 提高淬透性，但降低 Ms 点；Mn 含量过高，在高温奥氏体化时易使晶粒组织粗大，且基体 Ar 增加，影响耐磨性的提高。所以，控制 $Si \leq 1.2\%$ 、 $Mn 0.5\% - 1.0\%$ 。

Mo 在耐磨铸铁中一部分形成合金碳化物，提高耐磨性；一部分进入基体，提高淬透性。细化晶粒，抑制珠光体组织出现，提高高温组

织稳定性。Mo 属贵金属元素，考虑成本因素，结合铸件的壁厚、形状、大小及服役的工况条件和使用要求，选择 Mo0.9%-1.2%为宜。

W 与 Mo 作用基本相同，但 W 淬硬性和红硬性效果优于 Mo，特别是在较高温度下(约 800℃左右)性能不变。W 加入量过大时，易脆断、掉渣，有早期失效的危险。W 属贵金属元素，加入量较大时，企业生产成本增加。选择 W0.6%-0.9%为宜。

Cu 属奥氏体稳定元素，强化基体，提高淬透性。Cu 与 Mo 联合使用淬透性效果更好。Cu 与 Ni 作用基本相同，提高抗腐蚀性。少量加入时可替代 Ni。但 Cu 在奥氏体中溶解度有限，一般控制在 $Cu \leq 1.2\%$ 。

V、Ti 均是强碳化物形成元素，且细化晶粒，净化晶界，改善碳化物的形态、大小、数量与分布，提高材料综合性能效果十分明显。V 抗高温氧化性能不如 W、Mo 等，所以，铸件在 800℃左右服役时，一般控制 $V \leq 0.5\%$ 。Ti 溶于固溶体时提高淬透性，形成碳化物时降低淬透性，延迟回火温度，可在较高温度下回火。Ti 在钢铁耐磨材料中属微合金化元素，当 $Ti \geq 0.3$ 时将会恶化材料性能。因此，控制 $V0.3\%-0.5\%$ ， $Ti0.04\%-0.15\%$ 。

轻稀土(RE)和重稀土(Y)复合加入，更有利于脱氧、除气、去夹杂，细化共晶碳化物晶粒，净化晶界，改善碳化物的形态、大小、数量与分布，提高材料综合性能特别是冲击韧性效果十分明显。重稀土(Y)孕育变质效果优于轻稀土(RE)。因此，选择 $RE0.04\%-0.08\%$ ， $RE(Y)0.02\%-0.04\%$ 。

S、P 为有害元素，一般从原材料采购过程中严格控制。

表 1 Cr26MoWVTiRE 溜槽衬板化学成分(质量分数 %)

Table 1 Cr26MoWVTiRE chute lining board of chemical composition (mass fraction, %)

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Cu	V	Ti	RE	S	P
含量	2.6-3.2	≤1.2	0.5-1.0	24.0-28.0	0.9-1.2	0.6-0.9	≤1.2	0.3-0.5	0.04-0.15	0.04-0.08	≤0.06	≤0.06

2.3 热处理工艺试验(见表 2)：

铸件及附铸 Y 型试块经清理打磨后，装入热处理炉中进行热处理工艺试验。Cr26MoWVTiRE 材料合金元素多，铸造应力大，为防止铸件在热处理过程中开裂，在低温区 650℃以下控制 0.8-1.0℃/min 的升温速度，650℃/2h 保温后可随炉自由升温至 980℃-1050℃/5h。快速出炉，散开铸件，强制吹风冷至约 400℃停风，空冷，至室温装炉回火。回火温度及保温时间控制在 280℃-520℃/6h, 出炉散开自然冷却。具体热处理工艺与主要力学性能的关系见表 2。

表 2 热处理工艺试验及主要力学性能

Table 2 heat treatment process and the main mechanical properties test

热处理淬火、回火温度	硬度 HRC			冲击韧性
	铸态	淬火态	淬火 + 回火态	aK: J/cm ²
980-1020℃ + 320℃ 二次回火 + 480℃ 980-1020℃ + 480℃	58 57 59 58	58 60 59 58	58 60 59 58 60 60 61 63 62 57 59 56 58	5.7 6.5 5.2
1020-1040℃ + 400℃ 二次回火 + 520℃ 1020-1040℃ + 280℃ 二次回火 + 520℃ 1020-1040℃ + 520℃		59 58 60 60	57 58 58 59 60 61 62 61 63 62 56 57 56 58 58 62 61 62 63 62 59 60 60 58	6 6 5.7
1030-1050℃ + 350℃ 二次回火 + 480℃ 1030-1050℃ + 480℃ 二次回火 + 520℃ 1030-1050℃ + 450℃		60 59 59 60	56 57 58 56 58 60 60 59 61 59 61 62 61 61 60 61 60 62 60 62 61 60 60 61 62	6 6 6

2.4 金相组织：金相组织观察分析表明试样的淬火、回火组织为(见图 2-3)：回火马氏体 + 共晶碳化物(M_7C_3) + 二次碳化物 + 少量残余奥氏体。

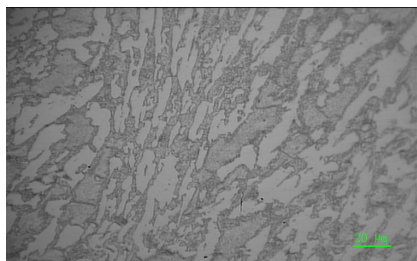


图 2 试样 1030-1050℃ + 450℃金相 ×400

Fig. 2 specimens of 1030-1050 °C + 450 °C metallographic ×400

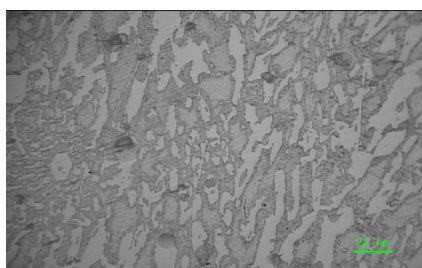


图 3 试样 450℃二次回火金相 ×400

Figure 3 specimens tempered at 450°C secondary metallurgical × 400

2.5 试验结果与分析：试样的化学分析检验采用进口美国 ARL3460/MA 直读光谱金属分析仪(见表 3), 结果显示与初始设计成分基本相符。结合铸件热处理后的主要力学性能检测，优化的化学成分范围见表 5。

在本试验条件下，热处理淬火温度 980℃-1050℃时，硬度(HRC)增加缓慢，在 HRC58 左右徘徊，这是因为在化学成分一定范围内，Cr、Mo、W、Cu 含量多，奥氏体稳定性好，马氏体转变缓慢；同时，随淬火温度升高，基体富余的 Cr 与 C 结合形成二次碳化物 $M_{23}C_6$ ，使基体的 Cr 和 C 含量降低，影响硬度的提高。淬火温度低时，二次碳化物析出量少，基体的 Cr 和 C 含量多，奥氏体量大，形成的残余奥氏

体量多,也同样影响硬度的提高。随回火温度的升高,硬度增加明显,特别是增设二次回火工艺后,最高硬度达到 $HRC \geq 63$. 这说明在淬火时,基体合金含量高,奥氏体稳定性好,淬火马氏体转变不完全,当第一次回火时基体由淬火马氏体向回火马氏体转变;当第二次回火时,组织中残有的部分奥氏体在中、高温回火下又转变成了部分马氏体,所以硬度提高。通过二次回火金相组织观察分析,共晶碳化物晶粒进一步细化,且分布更加均匀,对提高耐磨性十分有利。冲击韧性在 $280-450^{\circ}\text{C}$ 之间回火时变化不大,且稳定性好。因此,在本试验条件下,合适的热处理工艺是: $1020-1050^{\circ}\text{C}$ 淬火 + $320-520^{\circ}\text{C}$ 回火。硬度 $HRC60-62$, 冲击韧性 $aK > 5\text{J}/\text{cm}^2$. 有条件或有特殊要求时,可增加二次中、高温 $450-520^{\circ}\text{C}$ 回火, $HRC \geq 63$, 但应考虑企业生产周期长、能源消耗大、生产成本增加等不利因素的影响。

本试验条件下, Mo、W 合金和强碳化物形成元素 V、Ti 合金的复合使用,能够大大提高碳化物的高温稳定性和红硬性,而碳化物的高温稳定性和材料基体的硬韧性配合,是溜槽衬板在低应力冲击磨损和高温磨损工矿条件下获得应有的高磨损抗力的有效保证。

本试验条件下, Cr26MoWVTiRE 与 GB/T8263-2010《抗磨白口铸铁件》^⑮中 Cr26MoNi 材料相比, Ni 无限溶于奥氏体,提高电极电位,具有较强耐热耐腐蚀性,但 Ni 不形成碳化物,热硬性及耐磨性不如 W。且强碳化物元素 V、Ti 多元合金化的加入,使 Cr26MoWVTiRE 性能更优于含 Ni 的 Cr26Mo 材料。文献^⑯研究报道了高炉衬板用 Cr26MoNiCu 高铬铸铁材料,经 $1000^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$, 风冷 + $260^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 热处理

后，宏观硬度 HRC59.5, 冲击韧度 $aK=8.0J/cm^2$ 。该材料仅靠 Cr、Mo 合金碳化物增加耐磨性，显然不如 Cr26MoWVTiRE 中的 Cr、Mo、W、V、Ti 多元合金碳化物更具有优良的综合性能。因此，Cr26MoWVTiRE 拥有的超强硬韧性和红硬性，应用于生产制备钢铁高炉溜槽衬板是较合适的一种新型抗磨材料。

表 3 化学成分试验结果检测(质量分数 %)

Table 3 chemical composition of test (mass fraction,%)

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Cu	Ni	V	Ti	S	P
含量	2.77	0.69	0.63	25.5	1.12	0.98	1.1	0.32	0.6	0.082	0.02	0.024
	2.78	0.66	0.52	26.2	1.01	0.85	1.06	0.20	0.59	0.085	0.026	0.022
	2.68	0.62	0.58	25.2	1.13	0.82	0.87	0.15	0.45	0.055	0.042	0.021
	2.95	0.58	0.63	26.0	1.08	0.75	0.99	0.39	0.45	0.063	0.033	0.025
注：Ni 元素为废钢料带入。												

表 4. Cr26MoWVTiRE 试验中的基体含 Cr 量等参考指标

Table 4 Cr26MoWVTiRE tests in the Cr content etc.

试验成分中 C 含量	Cr/C \approx	共晶碳化物(K%) \approx	基体含 Cr%量 \approx
2.77	9.2	32.9	15.4
2.78	9.4	33.4	15.8
2.68	9.4	31.6	15.8
2.95	8.8	35.4	14.6

表 5. 优化的 Cr26MoWVTiRE 溜槽衬板化学成分(质量分数 %)

Table 5. Cr26MoWVTiRE chute optimized cleading chemical composition (mass fraction,%)

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Cu	V	Ti	RE	S	P
含量	2.65-	0.5-	0.5-	24.0-	0.9-	0.6-	0.9-	0.3-	0.06-	0.04-	\leq	\leq
	3.0	0.8	0.8	28.0	1.2	0.9	1.2	0.5	0.15	0.12	0.06	0.06

3. 工业应用

2011 年初，将该套溜槽衬板安装应用于河北某钢铁公司 450m³ 容积高炉布料器上，一个休风期停炉检查发现，该套溜槽衬板仍在使用 6 个月左右，表现出较高抗磨性。与镶铸(嵌)硬质合金溜槽衬板相

比，具有生产工艺简单，成本低，性价比高等特点，经济效益十分明显(见表 6)。

表 6. Cr26MoWVTiRE 高铬铸铁与镶铸硬质合金溜槽衬板效能比较
Table6 Cr26MoWVTiRE high chromium cast iron and cast-Carbide chute liner performance

溜槽衬板	单位: kg/套	单价: 元/kg	金额: 元/套	使用寿命(月)
Cr26MoWVTiRE	562	28	15800	18-20
镶铸硬质合金	562	129	72500	36
说明: 镶铸硬质合金制造成本是含 Cr26MoWVTiRE 高铬铸铁的 4.5 倍, 而使用寿命仅是 2 倍左右, 采用含 Cr26MoWVTiRE 高铬铸铁经济效益十分明显。				

4. 结语

4.1 本研究开发的新型 Cr26MoWVTiRE 钢铁高炉溜槽衬板，其化学成分为(质量分数 %)：C2.65-3.0，Si0.5-0.8，Mn 0.5-0.8，Cr 24.0-28.0，Mo 0.9-1.2，W0.6-0.9，Cu 0.9-1.2，V 0.3-0.5，Ti 0.06-0.15，RE 0.04-0.12，S≤0.06，P≤0.06。热处理工艺 1020-1050℃淬火 + 320-520℃回火。硬度 HRC60-62，冲击韧性 $a_K > 5J/cm^2$ 。允许 450-520℃二次回火，二次回火 HRC≥63。金相组织：回火马氏体 + 共晶碳化物(M_7C_3) + 二次碳化物 + 少量残余奥氏体。

4.2 本研究开发的新型 Cr26MoWVTiRE 钢铁高炉溜槽衬板，其化学成分中 Mo、W 合金和 V、Ti 等强碳化物形成元素的复合使用，提高了碳化物的高温稳定性和红硬性，使溜槽衬板在高温作业环境下，表现出较高抗磨性。实际使用寿命超过 18 个月，与镶铸(嵌)硬质合金溜槽衬板相比，具有生产工艺简单，成本低，性价比高等特点。具有积极推广应用价值。

参考文献

- (1)张建民. 无料钟炉顶布料溜槽使用寿命研究[J]. 华东冶金学院学报, 1999(1): 84-86.
- (2)张建, 苏维, 冯魁彦, 等. 高炉无料钟炉顶耐磨衬板技术研究[C]. 第七届中国钢铁年会论文集, 北京, 2009: 321-325.
- (3)聂松辉, 刘宏昭, 邱爱红, 等. 高炉布料溜槽抗磨损技术研究[J]. 钢铁, 2007(7): 10-14.
- (4)高晓松, 高晓柏. 长寿命布料溜槽的研制[J]. 中国设备工程, 2005(4): 31-32.
- (5)杨勇勤, 陈启超. 消失模铸造高炉溜槽衬板[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(12): 952-953.
- (6)刘越, 杨程坤, 朱丽娟. 高炉溜槽衬板研究和应用现状[J]. 铸造, 2009(6): 558-561.
- (7)魏安柏. 影响高铬溜槽衬板使用寿命的若干因素[J]. 炼铁, 1993(1): 35-37.
- (8)周火青. 武钢 1 号高炉新型布料溜槽使用寿命 18 个月[J]. 炼铁, 2010(4): 31
- (9)李固成, 庄立明, 承明泽. 大型磨机高铬铸铁沟槽衬板的研制与应用[J]. 水泥工程, 2001(6): 27-28.
- (10)李固成, 庄立明, 承明泽. 特大型磨机高铬铸铁衬板的研制与应用[J]. 水泥工程, 2003(2): 82-83.
- (11)李固成, 屈青山, 韩书臣. 高铬铸铁衬板在特大型球磨机上的国产化应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2008(1): 32-34.
- (12)李固成, 李永刚. $\phi 5.4\text{m}$ 特大型水泥磨机超高铬铸铁磨头板的研制与应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2010(3): 29-31.
- (13)李固成. 高铬合金衬板在水泥工业中的应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2008(6): 9-11.
- (14)李固成, 韩书臣, 宋芳. 无钨镍高铬合金铸铁耐磨衬板的研制与应用[J]. 铸造, 2008(4): 394-397.
- (15)GB/T8263-2010《抗磨白口铸铁件》国家标准[S].
- (16)朱丽娟, 杨程坤, 刘越, 等. 高炉衬板用 Cr26 高铬铸铁热处理工艺研究[J]. 铸造, 2010(3): 307-311.

作者简介: 李固成 (1962-) 男, 河南泌阳县人, 总工程师, 主要从事耐磨衬板的研制和生产工作。通讯地址: 河南省驻马店市乐山路 160 号 邮编 463000. 联系电话 13803967153; E-mail: lgc258369@sohu.com