控制高铝钢45CrAlMo中Al_2O_3夹杂的工艺实践

赵智刚 顾文涛 张 龙 马 群 冯桂萍 刘金鑫 李 刚 李飞扬
（抚顺特殊钢股份有限公司技术中心，抚顺 113001）

摘 要 45CrAlMo钢（/%：0.40～0.50C，≤0.60Mn，0.15～0.45Si，1.30～1.70Cr，0.15～0.30Mo，0.85～1.20Al）的生产工艺流程为60 t EAF-LF-VD-氩气保护浇铸2.1 t锭-锻成120 mm×120 mm材。分析了电弧炉冶炼和LF精炼过程脱氧，VD脱气、浇铸过程的工艺参数对钢中氧含量和Al_2O_3夹杂的影响。通过将LF终点S含量从≤0.015%降至0.008%，喂铝线改成加铝锭、VD真空度从100 Pa降至67 Pa，加CaSi改成不进行Ca处理，浇铸温度从1 585～1 595 ℃降至1 570～1 580 ℃等工艺措施，消除了低倍点状夹杂，B类和D类夹杂分别从1.5级降至0.5级，探伤合格率从67%提高到98%，成材率由55%提高到68%。

关键词 45CrAlMo高铝钢 Al_2O_3夹杂 脱氧 合金化

Process Practice to Control Al_2O_3 Inclusions in High Aluminium Steel 45CrAlMo

Zhao Zhigang, Gu Wentao, Zhang Long, Ma Qun, Feng Guiping, Liu Jinxin, Li Gang and Li Feiyang
(Technical Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The production process flowsheet of steel 45CrAlMo (/%: 0.40～0.50C, ≤0.60Mn, 0.15～0.45Si, 1.30～1.70Cr, 0.15～0.30Mo, 0.85～1.20Al) is 60 t EAF-LF-VD-argon shielding casting 2.1 t ingot-forged to 120 mm×120 mm products. The effect of parameters of deoxidation in EAF steelmaking and LF refining process, VD degassing and continuous casting process on oxygen content and Al_2O_3 inclusions in steel has been analyzed. With the process measures including decreasing S content in liquid at end LF from original ≤0.015% to 0.008%, modifying feeding aluminium wire to adding aluminium ingot, decreasing VD vacuum from 100 Pa to 67 Pa, modifying adding CaSi to non calcium treatment and decreasing casting temperature of liquid from original 1 585～1 595 ℃ to 1 570～1 580 ℃, the macro inclusions are eliminated, the B series and D series inclusions in steel decrease respectively from rating 1.5 to rating 0.5, the ratio of nondestructive-testing qualified steel increases from 67% to 98% and the yield of products increases from 55% to 68%.

Material Index High Aluminium Steel 45CrAlMo, Al_2O_3 Inclusions, Deoxidation, Alloying

普通高铝钢的酸溶铝质量分数达到0.5%以上，其特有的性能在实际应用中覆盖范围很广。普通高铝钢经过热处理和精加工后具有很高的表面硬度、耐磨性及疲劳强度和良好的耐腐蚀性，主要应用于机械制造、航空工业及军工等行业，市场需求较大[1]。普通高铝钢经化学热处理渗氮后钢的氮化层中形成氮化铝[AlN]，依靠AlN的弥散硬化作用可以提高钢材的表面硬度和强度。这种材料通常用来制造有特殊要求的零部件，例如齿轮、高压阀门、阀体、蜗杆、磨床主轴等。本文研究的45CrAlMo钢作为一种普通高铝钢经过调质、氮化处理获得较高的强度、表面硬度及高耐磨性，制成船用柴油发动机零部件中某个阀体而广泛应用于造船行业。

高铝钢的冶炼过程中铝既作为主要的脱氧剂，也是其主要合金化元素之一，其脱氧产物氧化铝（Al_2O_3）是影响钢洁净度、进而形成氧化铝夹杂的主要因素。脱氧产物（Al_2O_3）形成的链状夹杂对钢材的性能，特别是冷加工和疲劳性能影响较大[2]。抚顺特殊钢股份有限公司（抚顺特钢）目前生产高铝钢的工艺流程为：UHP + LF + VD + 模注 + 锻造。钢液经超高功率电弧炉初炼，即采用氧化法冶炼，偏心底无渣出钢，后经LF精炼，VD真空脱气处理，模铸钢锭后锻造成材。冶炼工艺未改进前，因氧化铝夹杂导致钢材探伤合格率和成材率分别为67%和55%。本文通过对45CrAlMo钢冶炼工艺进行优化来提高钢的洁净度，控制氧化铝夹杂，从而改善钢材探伤质量，提高钢材成材率。

1 氧化铝夹杂产生机制

在镇静钢冶炼过程中，用于预脱氧的铝是常见的脱氧剂，它是强脱氧元素。氧化物主要是由钢中的氧和脱氧剂作用而产生，它们由于来不及在钢液中排出而留于钢中形成氧化物夹杂，因此高铝钢钢液中较高的氧含量是产生氧化铝夹杂的必要条件。同理，降低钢中氧含量可以减少大颗粒氧化物夹杂

出现的可能性。氧化铝熔点2 050 ℃，密度 3.96 g/cm^3，其熔点很高，在普通钢液中不易熔化，而是作为氧化铝夹杂物颗粒存在，大量的夹杂物颗粒聚集进而形成链状夹杂。

氧化铝夹杂物与钢液之间存在一定的界面张力，这是本身固有的特性之一。真空下的氧化铝夹杂物表面张力 $\sigma_{夹\text{-}气}$ 约为 0.9 N/m，钢液的表面张力 $\sigma_{钢\text{-}气}$ 约为 1.72 N/m，在同样条件下钢液与氧化铝夹杂物的界面张力 $\sigma_{钢\text{-}夹}$ 约为 2.3 N/m。氧化铝夹杂物与钢液间的润湿角计算公式为：

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{钢\text{-}气} - \sigma_{钢\text{-}夹}}{\sigma_{夹\text{-}气}} \tag{1}$$

根据公式(1)可以推算出氧化铝夹杂物与钢液间的润湿角 $\theta = 130.1°$，即润湿角 θ 大于 90°，说明钢液不能润湿氧化铝夹杂物。根据润湿角计算公式也可以推断出润湿角 θ 越大，钢液对非金属夹杂物的润湿越差，两者间的界面张力 $\sigma_{钢\text{-}夹}$ 就越大，有利于钢中细小的非金属夹杂物的聚合、长大与上浮。所以氧化铝夹杂物在钢液中易于上浮，但是实际钢材中却往往有大量的氧化铝夹杂存在。结合目前炼钢生产分析，主要是因为炼钢过程后期加铝调整合金成分，其中一部分铝仍然发挥着脱氧作用而产生的氧化铝夹杂物没有来得及从钢液中分离出来，聚集成链状夹杂，最终影响钢材内部质量。按照以上理论推断，氧化铝夹杂物在钢液中是易于上浮的，但对 Al 元素含量较高的高铝钢而言，在保证成品化学成分中 Al 含量合格的前提下，冶炼过程前期脱氧效果和后期夹杂物上浮去除及防止钢液二次氧化显得极为重要。

2 冶炼工艺优化控制

抚顺特钢公司生产的 45CrAlMo 钢属典型的高铝钢类，其成分含有质量分数约为 1.0% 的铝(表 1)，非金属夹杂物要求见表 2。该钢生产工艺流程：60 t UHP(超高功率电弧炉)→60 t LF 精炼→VD 真空脱气→氩气保护浇铸 2.1 t 钢锭→1 000 t 精锻机锻制成材(规格 120 mm × 120 mm)→检验。抚顺特钢根据理论基础，结合实际炼钢情况，通过优化冶炼工艺来控制氧化铝夹杂。

表 1 45CrAlMo 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 45CrAlMo /%

C	Mn	Si	Cr	Mo	Al
0.40 ~ 0.50	≤ 0.60	0.15 ~ 0.45	1.30 ~ 1.70	0.15 ~ 0.30	0.85 ~ 1.20

表 2 45CrAlMo 钢的非金属夹杂物要求/级

Table 2 Requirement of nonmetallic inclusions in steel 45CrAlMo /rating

A		B		C		D	
细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0

2.1 电弧炉冶炼

电弧炉冶炼时电弧暴露在熔池面上并降低输入功率后向熔池吹入氧气，以加速废钢的熔化。炉内料将近全部熔化而被炉渣覆盖时，此时炉内是氧化性气氛。从定氧仪测得的数据统计可知，电弧炉钢液中的溶解氧含量通常在 $800 \times 10^{-6} \sim 1\,300 \times 10^{-6}$[3-4]。

根据钢液中碳与氧的平衡关系和钢液温度与氧的平衡关系可知，在一定的温度下，钢液中碳含量越低，与之平衡的氧含量越高，或者说钢液中氧的平衡浓度与碳的平衡浓度成反比关系。而在一定的碳含量下，钢液中氧的平衡浓度和钢液温度成正比。45CrAlMo 钢冶炼时钢液温度较高，一般电弧炉出钢温度 $T \geq 1\,650$ ℃，此时钢中溶解氧达到峰值。因此可以采用控制钢液温度和电弧炉终点碳含量等方式来控制氧含量。综合比较后采用适当提高终点碳含量的工艺更为合理。实际生产中，电弧炉冶炼在出钢前 2 ~ 3 min，向熔池中喷吹碳粉，提高终点碳含量 [C] ≥0.010%，控制炉渣中的(FeO)，达到最大程度去除钢液中溶解氧含量的目的。所以，电弧炉预脱氧工艺优化控制：出钢前喷吹 200 ~ 300 kg 碳粉，出钢时加入 800 ~ 900 kg 白灰、200 ~ 250 kg 萤石、60 ~ 90 kg 铝锭进行钢渣混冲，提高预脱氧效果。

2.2 LF 精炼

钢液中除了有极微量的气体氧外，氧主要是以(FeO)的形式存在。因此脱氧反映的机理就是应用与氧的亲和力比铁大的元素把铁从(FeO)中还原出来，使生成的脱氧产物比较稳定且能迅速排出。目前大量科学实验已经验证，在一定温度下(例如 1 600 ℃)常见的脱氧剂中，铝的脱氧能力最强，也是目前炼钢比较经济适用的脱氧剂。电弧炉无渣出钢后，经脱氧合金化，钢液中的溶解氧含量大幅度下降，同时氧化铝夹杂物大量增加[5]。所以，LF 精炼过程脱氧控制要点有：LF 精炼炉内加入一定量铝线，使钢液中保持一定量的酸溶铝，从而进行不断的沉淀脱氧，把钢中溶解氧迅速降下来，加快精炼进程。在部分元素如锰、钼合金化期间，渣料变白后每隔 10 ~ 15 min 加入 10 ~ 20 kg 铝粒进行扩散脱氧，

使用铝粒快速将渣中的(FeO)、(MnO)等氧化物还原,提高精炼渣的还原性。同时补加一定量的精白灰(CaO),降低渣中 SiO_2、Al_2O_3 等氧化物的活度,从而进一步提高钢中硅、铝元素的脱氧能力。

针对45CrAlMo 高铝钢而言,铝不仅是炼钢中的脱氧剂,也是该钢主要合金成分之一。因此,铝的合金化也是 LF 精炼过程控制要点之一。该类钢以前生产是通过 LF 精炼之后 VD 过程喂线的方式调铝成分,需要大量喂入铝线,喂线过程降低钢液温度,且在液面反应剧烈,液面渣料极易卷入钢液中导致夹杂。通过优化工艺,LF 精炼进行一次扒渣处理,其前后渣料组成和碱度见表 3。由表 3 可以看出,扒渣后渣料中(Al_2O_3)含量升高,(FeO)含量降低,可推断出钢液中氧含量呈下降趋势;并且扒渣后(SiO_2)含量降低,(CaO)含量升高,炉渣碱度升高,即扒渣后新渣的吸附能力更强,去除钢液中夹杂物能力更强。

所以铝的合金化控制要点为:LF 精炼主要元素合金化后进行一次扒渣处理,扒渣后再加入铝锭合金化,同时选用优质萤石造渣,造渣速度快效果明显。待铝锭全熔后补加渣料精白灰,渣量能稳弧操作即可。这样在 LF 精炼过程实现铝的合金化后,为后期 VD 处理做好充分准备,避免了 VD 过程铝合金化后二次生成的夹杂物不能充分排除而产生夹杂现象。

铝既作为强脱氧剂,又是脱硫的促进剂和稳定剂,没有低的氧含量是不能顺利地大幅度脱硫的[6]。也就是说,钢中的氧质量分数越低,钢中硫的质量分数也越低,脱氧速度快,脱硫速度也越快。目前由于无在线全氧质量分数检测手段,所以在实际冶炼过程中是通过 LF 精炼过程终点硫的监测来从侧面反应钢液脱氧程度。

2.3　VD 脱气

真空吹氩精炼就是在真空处理的同时向钢液内进行吹氩的一种炉外精炼方法,简称 VD 法。高铝钢在冶炼过程中进行 VD 处理是十分必要的。VD 过程能进一步去除钢液中的气体,同时钢液在真空处理中长时间的搅拌,使钢中夹杂物有充分聚集、长大、上浮的机会,也能进一步提高钢的洁净度。有相关文献表明,当真空度达到 67 Pa 时,钢液在真空下保持时间 15 ~ 18 min 即可顺利完成脱气任务。目前 45CrAlMo 钢在 VD 过程控制要点为:采用极限真空度 ≤67 Pa保持15 min的方式处理。另外,在真空状态下氩气流量的大小对钢液中的气体质量分数也是有影响的。通过试验数据分析,得出图 1 所示的趋势对应关系。从图 1 中可以看出,随着氩气流量的增大,钢液中的氧的质量分数不断降低,但是达到300 L/min以上时氧的质量分数降低缓慢,同时氩气流量过大会造成炉渣喷溅,因此将氩气流量控制在(200 ~ 300)L/min 为宜。

表 3　LF 精炼扒渣前后还原渣组成和碱度

Table 3　Ingredient and basicity of reducing slag for LF refining before and after slagging-off

LF 精炼	还原渣组成/%							碱度 (R)
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	MnO	TiO_2	
扒渣前	21.34	15.29	52.58	7.84	0.75	0.11	0.25	2.46
扒渣后	12.40	18.21	59.74	5.39	0.55	0.11	0.21	4.82

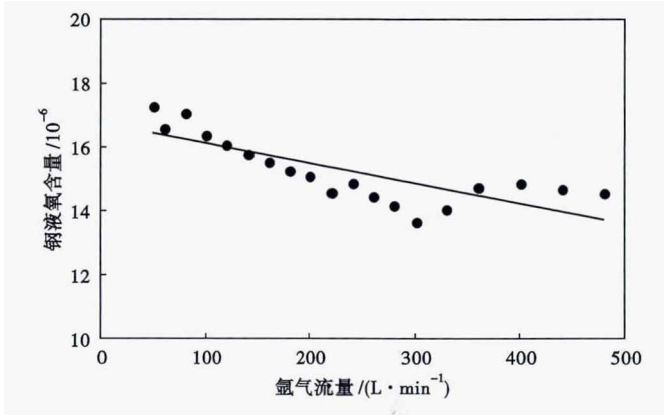

图 1　VD 过程中氩气流量对钢液中氧含量的影响

Fig. 1　Effect of argon flow rate on oxygen content in liquid during VD process

在铝镇静钢中,经过 LF 精炼脱氧操作,钢中的自由氧将到最低,但是钢液中氧化铝夹杂物急剧增加,虽然经过真空处理后可以降低夹杂物水平,但是在真空处理过程中钢液的沸腾使部分炉渣或反应生成的脱氧、脱硫产物滞留在钢液中,因此通过浇铸前软吹操作排出钢中的夹杂物,净化钢液也是完全必要的。大颗粒的氧化铝夹杂物会在充分的上浮时间内,在氩气外力的作用下上浮排出钢液。目前45CrAlMo 钢吹氩软吹时间控制在 25 min,强度以渣面波动但不裸漏钢液为宜。

在浇铸含铝钢时为防止氧化铝夹杂物堵塞水口,通常在浇铸前的 VD 过程都采用钢液钙处理工艺,要求钙铝比控制在 0.09 ~ 0.14,目的是形成 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 或成分与其接近的低熔点钙铝酸盐。如文献[7]中建议生产高铝钢(铝质量分数 0.32% ~ 0.39%)时,钢中钙含量应该控制在 0.004 0% ~0.008 5%,但是钢中如此高的钙含量很难达到。而45CrAlMo 钢中铝的含量远高于传统的含铝钢,要将钙铝比控制在0.09 ~0.14就更难,同

时合金化后喂钙线会造成钢液大翻腾，增加了钢液的二次氧化。因此，45CrAlMo 钢在实际冶炼 VD 过程中不喂钙线。该钢采用模铸浇铸，不同于连铸多炉浇铸，只要在前期控制好脱氧及氧化铝夹杂物的去除，后期控制好浇铸温度及防止钢液二次氧化，是可以不发生水口堵塞情况的。

2.4 浇铸过程控制

高铝钢冶炼过程中产生的氧化铝夹杂物（Al_2O_3）熔点2 050 ℃，因其不但熔点高且体积大，随着钢液中氧化铝夹杂物含量的增加，两相接触面积越大，内摩擦力也就越大，致使钢液流动性变差，增加了钢液的黏度。另外，温度对钢液的黏度也有一定的影响，文献[8]表明随着温度的升高，钢液黏度降低，即流动性变好，黏度 η 与温度 T 的关系式为：

$$\eta = Ae^{E/RT} \tag{2}$$

式中：A- 常数；E- 液体黏性流动活化能；R- 气体常数，$R = 8.314$ J/(mol · K)；T- 热力学温度/K。

由关系式(2)中可知，温度 T 越高，黏度 η 越小。这是由于温度升高，钢液密度降低，原子间距增大，原子穿过比较容易，因此流动性也就增大了。但是在实际冶炼过程中，如果钢液温度过高，则吸气就越严重，导致钢液中气体含量大大的增加，并且对耐火材料的侵蚀也越严重，进而污染钢液。所以，不能全靠升温来改善钢液的流动性，而只能适当的提高温度。

浇铸温度是影响钢锭质量的重要因素之一，根据以上理论，适当的提高钢液温度有利于钢锭的浇铸。浇铸温度可以根据公式(3)来确定。

$$T_C = T_1 + \Delta T \tag{3}$$

式中：T_C- 浇铸温度；T_1- 钢种的液相线温度；ΔT- 钢液的过热度。

通过生产试验可以得出 ΔT 控制在 70 ~ 90 ℃为宜，其中已包含了从出钢到浇铸台的钢液温度损失。因此从实际操作来看，T_C 严格意义上应为最终出钢温度。

在通常浇铸条件下，开始浇铸时钢液伴随着空气经中注管→汤道→钢锭模而上浮的全过程是一个二次氧化的过程，二次氧化会产生铁尖晶石（FeO · Al_2O_3）夹杂物以致污染钢液及造成浇铸絮流。因此钢液在浇铸前往钢锭模及中注管中充入氩气排出空气，同时在浇铸的钢包底部水口处也安装氩气保护罩，氩气保护浇铸能有效防止钢液的二次氧化。

45CrAlMo 钢的液相线温度理论计算约为1 490 ℃。根据生产试验可以确定浇铸过程控制要点有：实际控制浇铸温度在1 570 ~ 1 580 ℃，全程氩气保护浇铸，防止钢液二次氧化产生铁尖晶石夹杂物。在浇铸前彻底清理干净钢锭模内壁，以及在浇铸过程中可采用吊渣的方式并做好发热剂的及时铺盖，对提高钢锭内部及表面质量也是十分必要的。

3 优化前后冶炼过程参数对比和优化后的控制效果

高铝钢 45CrAlMo 冶炼工艺优化前后参数对比见表4。

通过上述炼钢优化工艺参数和过程控制要点的实施，冶炼模铸 2.1 t 钢锭锻制规格 120 mm × 120 mm 成材后取样进行理化检验，以及探伤和成材率分析如下。

(1)低倍检验。冶炼工艺优化前、后 45CrAlMo 钢锻制成材低倍检验照片和级别分别见图 2 和表 5。由图 2 可以看出，工艺优化前低倍检验有夹杂现

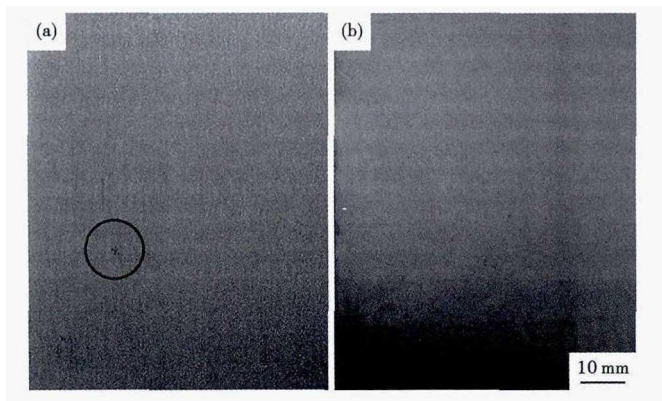

图 2 工艺优化前(a)后(b)45CrAlMo 钢 120 mm × 120 mm 锻材的低倍组织

Fig. 2 Macrostructure of 120 mm × 120 mm forged product of steel 45CrAlMo before (a) and after (b) process improvement

表 4 45CrAlMo 钢冶炼过程优化前后的工艺参数

Table 4 Process parameters of steel 45CrAlMo in steelmaking process before and after improvement

冶炼过程	优化前	优化后
电弧炉预脱氧	出钢前不喷碳粉	出钢前喷碳粉 200 ~ 300 kg
LF 精炼终点 S/%	≤0.015	≤0.008
LF 精炼脱氧剂	白渣后一次加入铝粒 40 ~ 60 kg	白渣后每隔 15 min 加入铝粒 10 ~ 20 kg
铝合金化	喂铝线3 000 ~ 3 300 m/炉	加铝锭 660 ~ 720 kg/炉
VD 脱气	极限真空 100 Pa 保持 20 min	极限真空 67 Pa 保持 15 min
软吹时间/min	15	25
钙处理	CaSi 线加入 60 m/炉	不进行钙处理
浇铸温度/℃	1 585 ~ 1 595	1 570 ~ 1 580

象(图中圆圈标记),扫描电镜分析夹杂成分主要为氧化铝,工艺优化后低倍检验未发现夹杂物。

通过与常规方法炼钢生产的 45CrAlMo 钢相比较,工艺优化后生产的钢材非金属夹杂物检验情况有所改善。其中 B 类条状氧化物和 D 类球状氧化物的级别明显降低,B 类和 D 类夹杂物由 1.5 级降至 0.5 级,工艺优化控制后未发现有大颗粒的氧化铝夹杂物。工艺优化控制前后 45CrAlMo 钢的非金属夹杂物水平对比见表 6。

冶炼工艺优化后,钢材的探伤合格率有了明显提升,相应的钢材成材率也有很大提高。通过大量的生产试验,冶炼工艺优化前后钢材的实际探伤合格率由 67% 提高到 98%,没有发现夹杂现象。同时,钢材的成材率也提高了 13 个百分点,创造了可观的效益。图 3 为工艺优化前后钢材探伤合格率和钢材成材率的对比图。

表 5　工艺优化前后 45CrAlMo 钢的低倍级别/级

Table 5　Rating of macrostructure of steel 45CrAlMo before and after process improvement /rating

工艺	一般疏松	中心疏松	锭型偏析	其它
优化前	1.0	0	0	点状夹杂
优化后	0.5	0	0	无

表 6　工艺优化前后 45CrAlMo 钢 120 mm × 120 mm 锻材非金属夹杂物级别

Table 6　Rating of nonmetallic inclusions in 120 mm × 120 mm forged products of steel 45CrAlMo before and after process improvement

工艺	A		B		C		D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
标准要求	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0
优化前	1.5	0	1.5	0	0	0	1.5	0
优化后	1.0	0	0.5	0	0	0	0.5	0

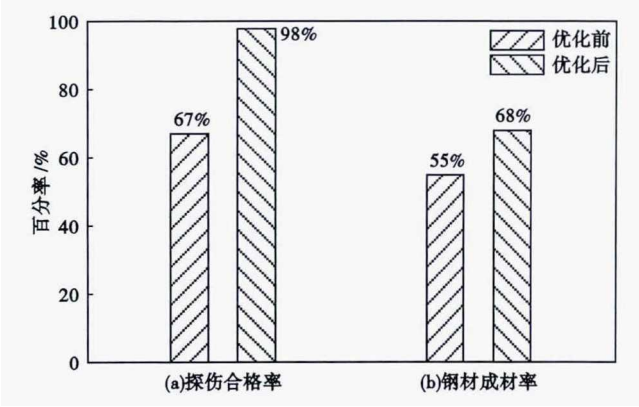

图 3　工艺优化前后 45CrAlMo 钢 120 mm × 120 mm 锻材探伤合格率(a)和成材率(b)

Fig. 3　Nondestructive testing qualified rate (a) and yield of products (b) of 120 mm × 120 mm forged products of steel 45CrAlMo before and after process improvement

4　结论

(1)45CrAlMo 钢电弧炉冶炼出钢前 2 ~ 3 min 向熔池中喷吹碳粉,控制终点[C]≥0.010%。

(2)LF 精炼采用铝线和铝粒进行沉淀脱氧和扩散脱氧。在 LF 精炼过程进行铝锭合金化,而非后期 VD 过程喂铝线合金化。

(3)VD 过程不喂钙线。真空脱气时氩气流量控制在 200 ~ 300 L/min为宜。

(4)浇铸温度控制在1 570 ~ 1 580 ℃,全程氩气保护浇铸,防止二次氧化。

(5)通过冶炼工艺优化控制,45CrAlMo 钢金相检验夹杂物级别明显降低,未发现 Al_2O_3 夹杂。同时钢材探伤合格率由 67% 提高到 98%,钢材成材率由 55% 提高到 68%,效果显著。

参考文献

[1] 刘　侠. 国内 38CrMoAl 高铝钢现况及开发建议[J]. 冶金管理, 2008,21(9):22-24.

[2] 韩乃川,杨素波,文永才. 炼钢脱氧工艺现状及改进攀钢脱氧工艺的建议[J]. 钢铁钒钛,2000,21(4):34-39.

[3] 三本木贡冶. 炼钢技术[M]. 王舒黎,译. 北京:冶金工业出版社, 1980:159.

[4] 赵　沛. 炉外精炼及铁水预处理实用技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:49.

[5] 姜祖赓,陈再枝. 模具钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1988:163-164.

[6] 陈家祥. 钢铁冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2013:117-118.

[7] 孙彦辉,王小松,许中波. 高铝钢钙处理工艺热力学研究[J]. 北京科技大学学报,2011,33(1):121-125.

[8] 邱绍岐,祝桂华. 电炉炼钢原理及工艺[M]. 北京:化学工业出版社,2015:21-23.

赵智刚(1983-),男,工程师,2007 年内蒙古工业大学(本科)毕业,特殊钢产品和工艺研发。

E-mail:zzg2007@163.com

收稿日期:2017-12-20