

高强度耐热钢 40CrMoV 盘条的开发和生产实践

李永超^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

摘要 邢钢采用 80 t 顶底复吹转炉-LF-RH-325 mm × 280 mm 大方坯连铸流程生产 40CrMoV 钢(/ % : 0.36 ~ 0.44C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.45 ~ 0.70Mn, ≤ 0.025P, ≤ 0.025S, 0.80 ~ 1.15Cr, 0.50 ~ 0.65Mo, 0.25 ~ 0.35V) Φ18 mm 热轧盘条。结果表明, 通过控制 BOF 终点碳 0.08% ~ 0.12%, 出钢温度 1 640 ~ 1 660 °C, 出钢加脱氧剂和合金, LF 渣系为 CaO-SiO₂-Al₂O₃, 精炼后白渣碱度 4 ~ 8, T(FeO + MnO) ≤ 1.0%, RH 真空度 ≤ 100 Pa, 处理时间 ≥ 20 min, 喂钙线, 并采用连铸结晶器电磁搅拌和控冷控轧等工艺措施, 该钢盘条平均 T[O] 为 10 × 10⁻⁶, 平均 N 含量 33 × 10⁻⁶, 抗拉强度 1 200 ~ 1 250 MPa, 断面收缩率 59% ~ 62%, 非金属夹杂级别 A0.5 和 D1.0, 低倍组织级别均为 1.0 级, 各项性能指标较好满足了客户的需求。

关键词 80 t BOF-LF-RH-CC 流程 40CrMoV 高强度耐热钢 盘条 生产工艺

Development and Production Practice of High Strength and Heat Resistance Steel 40CrMoV Coil

Li Yongchao^{1,2}

(1 Technical Center, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;
2 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The Φ18 mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV (/ % : 0.36 ~ 0.44C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.45 ~ 0.70Mn, ≤ 0.025P, ≤ 0.025S, 0.80 ~ 1.15Cr, 0.50 ~ 0.65Mo, 0.25 ~ 0.35V) is produced by 80 t top and bottom combined blowing converter-LF-RH-325 mm × 280 mm bloom casting flowsheet at Xingtai Steel. Results show that with the process measures including controlling BOF end carbon 0.08% ~ 0.12%, tapping liquid temperature 1 640 ~ 1 660 °C, adding deoxidation agent and alloys during tapping, LF slag series CaO-SiO₂-Al₂O₃, finished refining white slag basicity 4 ~ 8 and T(FeO + MnO) ≤ 1.0%, RH vacuum ≤ 100 Pa, treated time for ≥ 20 min, feeding calcium wire, casting mold electromagnetic stirring and controlling rolling and cooling, the average T[O] in coil of steel is 10 × 10⁻⁶, average N content is 33 × 10⁻⁶, tensile strength of steel 1 200 ~ 1 250 MPa, reduction of area 59% ~ 62%, rating of nonmetallic inclusions A0.5 and D1.0, rating of each macrostructure 1.0, and each performance index all meets the requirement of user.

Material Index 80 t BOF-LF-RH-CC Flowsheet, 40CrMoV, High Strength and Heat Resistance Steel, Coil, Production Process

40CrMoV 钢属于中碳珠光体耐热钢, 主要用于生产汽车涡轮机用螺栓、汽轮机转子等, 要求在 500 ~ 600 °C 工作环境下具有高强度和良好热强性, 同时还要求具有良好的冷加工和抗氧化性能^[1], 对钢材的质量要求非常苛刻。国内通过大方坯流程生产线材的厂家相对较少, 为满足高端客户需求, 拓展高端市场, 开发高附加值钢种, 邢钢采用 80 t 顶底复吹转炉-LF-RH 双精炼-大方坯连铸工艺流程进行了 40CrMoV 冷锻钢盘条的工业实践。

1 化学成分及工艺路线

1.1 成分控制

40CrMoV 冷锻钢化学成分要求如表 1, 执行 GB/T20410-2006 标准。

Cr 是耐热钢抗高温氧化的主要合金元素之一, 在高温氧化一定时间后, 在氧化表面形成一层稳定

表 1 40CrMoV 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel 40CrMoV / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0.36 ~ 0.44	0.15 ~ 0.35	0.45 ~ 0.70	≤ 0.025	≤ 0.025	0.80 ~ 1.15	0.50 ~ 0.65	0.25 ~ 0.35	≤ 0.30	≤ 0.25

的 Cr₂O₃, 紧紧包裹在氧化层表面, 显著提高钢的高温抗氧化性, 随着铬含量增加, 氧化膜稳定性提高, 氧化膜的致密性和厚度也增加, 从而进一步提高钢的抗氧化性和耐热钢的工作温度。在低合金耐热钢化学成分中的 Cr 含量保证在 1% 左右就能明显提高钢的抗蠕变性能, 从而提高钢的热强性^[2], 因此 Cr 含量应控制在 0.95% ~ 1.05%。

Mo 是难溶合金元素, 能抑制铁的扩散和其他元素的扩散速度, 由于 Mo 的原子半径比 α-Fe 原子半径大, 当 Mo 溶解在 α 固溶体中时, 固溶体发生晶格

畸变,同时增加晶格原子键引力,并且提高 α 铁素体的再结晶温度^[3]。从质量和成本综合考虑,Mo 含量按照中限控制。

钢中添加合金元素 V 时,V 元素与 C 元素形成稳定的碳化物,促使 Mo 更有效地溶入固溶体中,有利于提高钢的热强性,一般 V 含量按照中限控制。

1.2 工艺流程

40CrMoV 钢生产工艺流程为:高炉铁水→铁水预脱硫→80 t 顶底复吹转炉→80 t LF-80 t RH 双精炼→325 mm × 280 mm 大方坯连铸→钢坯检验→大方坯加热→开坯(160mm × 160mm 初轧坯)→检验→步进梁式加热炉加热→高压水除鳞→控制轧制→控制冷却。

2 质量控制

2.1 转炉冶炼

采用 80 t 顶底复吹转炉进行冶炼,总装入量为 75 ~ 82 t,采用铁水预处理 + 优质废钢的原料结构,减少钢水中夹杂物的来源,提高冶炼质量;在吹炼过程中,制定合理的氧枪操作制度,保证终点碳准确控制在 0.08% ~ 0.12%,以避免钢水过氧化,实现碳含量-温度(1 640 ~ 1 660 ℃)协调出钢。出钢过程中加入脱氧造渣剂,出钢至 1/3 时依次加入硅铁合金-高碳锰铁-高碳铬铁-钒铁-精炼合成渣-小块石灰;出钢完毕在加入部分脱氧造渣剂至钢包顶渣,出钢过程采用滑板挡渣 + 在线下渣检测系统,避免出钢下渣;出钢时全程吹氩以保证出钢过程精炼渣料的快速熔化。

2.2 LF-RH 双联精炼

通过采用 LF 白渣精炼,实现钢水的脱硫、脱氧。钢水到站后,分批加入精炼渣和还原剂,快速造渣,保证白渣精炼时间 ≥ 15 min。造白渣选用 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系,控制精炼后白渣碱度 $R = 4 \sim 8$, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$,以保证脱硫和吸附夹杂效果,精炼后炉渣成分见表 2。整个精炼过程采用分阶段氩气控制操作制度,即精炼前期控制在中等强度搅拌以促进精炼渣料熔化;精炼中期采用高强度搅拌,促进脱硫并非金属夹杂的去除;精炼后期采用

表 2 LF 精炼终渣主要组分和碱度

Table 2 Main ingredient of LF refining end slag and basicity

组分/%						碱度
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	R
55 ~ 61	8 ~ 12	18 ~ 22	0.4 ~ 0.8	0.08 ~ 0.15	3 ~ 5	4 ~ 8

低强度搅拌,促进氧化铝夹杂的上浮。

RH 工序主要目的为脱气和去夹杂。生产过程保证真空度在 ≤ 100 Pa,纯脱气时间不低于 20 min。真空结束后喂入钙线进行非金属夹杂物变性处理,喂钙线时将底吹气量调整为软吹气量(60 ~ 80 L/min),避免钢水翻腾裸露;保证软吹时间 ≥ 15 min,以促进大尺寸夹杂物的有效上浮。

2.3 连铸

钢包到中间包之间采用保护套管 + 氩封,中间包覆盖剂 + 吹氩保护,中间包钢液深度稳定在 400 mm 以上,严禁低于 350 mm 浇注。钢水过热度严格控制在 15 ~ 30 ℃。中间包到结晶器采用浸入式水口保护浇注,结晶器电磁搅拌为 400 A,2.4 Hz,采用结晶器液面自动控制,液面波动稳定控制在 ± 3 mm 以内。铸坯的总氧含量平均为 10×10^{-6} ,氮含量平均为 33×10^{-6} 。

此外,铸坯的表面质量对最终产品有重要影响,裂纹是影响铸坯质量的主要原因之一。在高温连铸过程中,如果铸坯所受应力超过了其在较高温度的断裂强度或断裂极限应变,裂纹就会形成,这与铸坯的高温性能有直接关系。因此,研究铸坯在凝固过程中的高温塑性是控制铸坯裂纹和改善铸坯质量的基础^[4]。

由于 40CrMoV 钢中含有较多合金元素,为避免凝固冷却时铸坯表面产生裂纹,制定合适的二冷制度和矫直温度,进行了 40CrMoV 钢的高温热塑性试验。

通过图 1 可以看出,在 950 ~ 1 250 ℃,断面收缩率均在 75% 以上,最高达到了 85%,但当温度低于 950 ℃ 后,断面收缩率开始下降,出现了低谷区,在 900 ℃ 时最低为 70.8%。在此温度附近,钢的

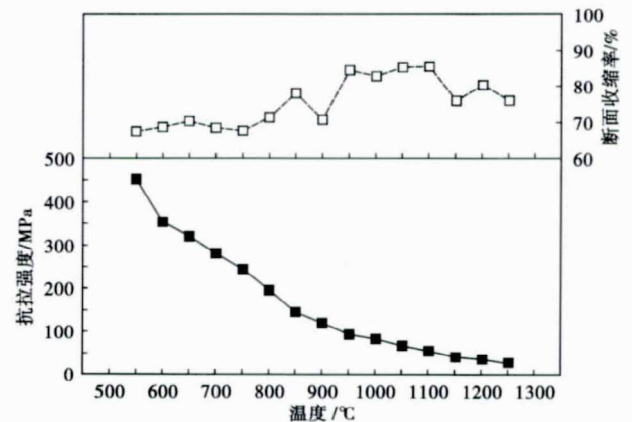


图 1 40CrMoV 钢连铸坯的热塑性曲线

Fig. 1 Hot plasticity curves of casting bloom of steel 40CrMoV

抗拉强度低,塑性差。所以,铸坯矫直温度应避免此塑性低谷区。因此,二次冷却采用弱冷配水,比水量控制在 0.5 kg/L,矫直前角部温度进行测定,实测为 910 ~ 935 °C,保证了角部温度在 900 °C 以上。

2.4 轧制

采用步进梁式加热炉加热至奥氏体化温度,加热温度控制在 1 100 ~ 1 180 °C,加热温度的设定既要考虑合金元素充分固溶又要避免加热温度太高造成铸坯表面脱碳严重。

由于该钢含有较高的 Cr、Mo 等强碳化物形成元素,会提高钢的淬透性能,易产生贝氏体和马氏体等淬火态组织,造成其抗拉强度升高,出现盘条脆断或拉拔断裂的风险升高。在兼顾设备能力前提下,轧制温度尽可能降低,以增大奥氏体非再结晶区变形量,使 γ 相充分变形积累大量位错,增加晶格畸变能,降低过冷奥氏体稳定性。同时低温变形可使 CCT 曲线左移,在后续的相变过程会促进铁素体和珠光体转变^[5]。由于奥氏体过度变形,积累的应变能在转变成珠光体的过程中不能充分释放,因此富碳的珠光体仍有较大畸变能,处于不稳定状态。根据能量趋低原理,在下游用户进行的球化退火过程中,渗碳体片会析出、溶断并聚集,转变为粒状珠光体^[6]。这种组织硬度低,有利于下游用户的拉拔和冷镦。

因此,开轧温度控制在 980 ~ 1 050 °C,轧件进精轧机温度为 850 ~ 900 °C,吐丝温度为 800 ~ 850 °C;斯太尔摩辊道采用延迟冷却方式,冷却时,斯太尔摩冷却线风机全部关闭,保温罩关闭,冷却速度约 0.3 ~ 0.5 °C/s,保温时间 10 ~ 20 min,以促进相变充分进行和组织均匀分布,保证盘条具有良好的冷镦性能。

3 试制结果

3.1 成分控制

表 3 为试验盘条的实际成分,各项成分均达到表 1 的成分设计要求。

3.2 金相组织

冷镦钢盘条的金相组织对其力学性能和冷镦性能具有重要影响。根据 GB/T13298-2015 金相显微组织检验方法和 GB/T13299-1991 钢的显微组织评

表 3 40CrMoV 钢 $\Phi 18$ mm 盘条的分析成分 / %
Table 3 Analysis of $\Phi 18$ mm coil of steel 40CrMoV / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0.40	0.19	0.51	0.005	0.013	0.99	0.57	0.27	0.01	0.01

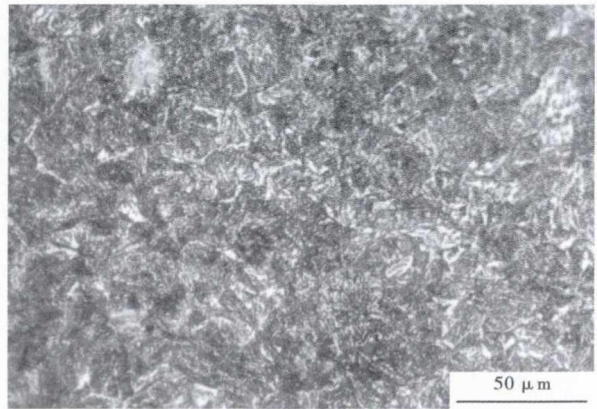


图 2 40CrMoV 钢 $\Phi 18$ mm 热轧盘条的组织形貌
Fig. 2 Structure morphology of $\Phi 18$ mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV

定方法,检测了 40CrMoV 冷镦钢盘条的金相组织(如图 1 所示)。从图 2 中可以看出,40CrMoV 热轧盘条组织主要为贝氏体,少量马氏体。由于该钢含有较多的合金元素,通过低温轧制和延迟缓慢冷却仍无法避免贝氏体和马氏体的出现。

3.3 力学性能

为避免在冷镦时引起裂纹,要求线材具有较高的断面收缩率,一般要求低碳钢线材的断面收缩率应 $\geq 60\%$,中碳及低合金钢的断面收缩率不低于 50%^[7]。因此对 40CrMoV 钢的力学性能进行检测,见表 4。结果表明,盘条抗拉强度为 1 200 ~ 1 250 MPa,断面收缩率和伸长率均较高,综合力学性能良好。

3.4 非金属夹杂物

钢中非金属夹杂物对于冷镦性能有不利影响,因此需尽量降低。按照 GB/T10561-2005 对实物进行评级,非金属夹杂物主要为 A 类硫化物和 D 类近球型的脆性钙铝酸盐夹杂(见图 3),但尺寸较小,主要在 8 μm 以下,评级结果满足客户要求(表 5)。

表 4 40CrMoV 钢 $\Phi 18$ mm 热轧盘条的力学性能
Table 4 Mechanical properties of $\Phi 18$ mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV

抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	断后伸长率/%
1 200 ~ 1 250	59 ~ 62	17.5 ~ 19.5

表 5 40CrMoV 钢 $\Phi 18$ mm 热轧盘条的非金属夹杂物 / 级
Table 5 Nonmetallic inclusions in $\Phi 18$ mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV / rating

项目	A 类		B 类		C 类		D 类		DS 类
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
标准	≤ 2.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 1.5
实测	0.5	0	0	0	0	0	1.0	0	0

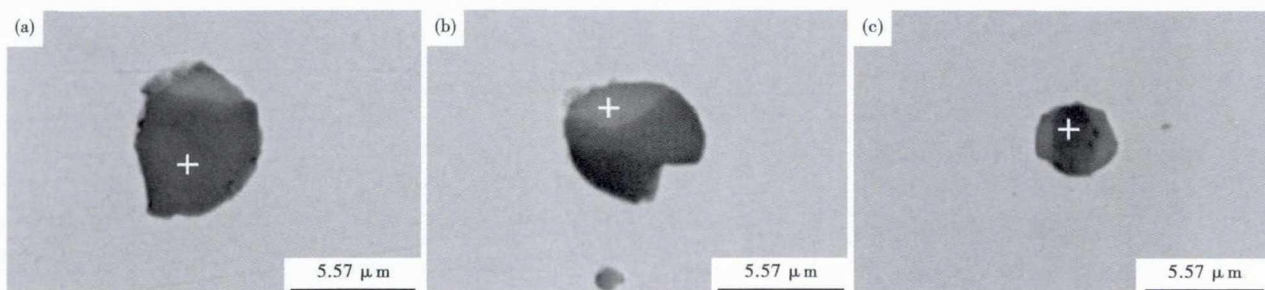


图 3 40CrMoV 钢 Φ18 mm 热轧盘条中典型钙铝酸盐夹杂形貌

Fig. 3 Morphology of inclusions of typical calcium aluminate in Φ18 mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV

表 6 40CrMoV 钢 Φ18 mm 热轧盘条的低倍组织/级

Table 6 Macrostructure of Φ18 mm hot-rolled coil of steel 40CrMoV /rating

项目	一般疏松	中心疏松	方形偏析
客户要求	≤2.5	≤2.5	≤2.5
实物检测	1.0	1.0	1.0

3.5 冷顶锻性能

冷顶锻是检验冷锻钢冷锻性能的主要方法。根据 GB/T6478-2015, 对盘条进行逐包取样检测, 盘条 1/2 冷锻检测全部合格, 表明该材料具有很好的冷加工性能。

3.6 铸坯低倍组织

良好的低倍组织能够保证其对钢材的力学性能和使用寿命无显著影响, 具有较好的横向塑性和韧性, 有利于下游用户的深加工。经实物检测, 一般疏松、中心疏松和方形偏析均为 1.0 级, 满足客户要求 (表 6)。

4 结论

(1) 根据客户需求, 通过化学成分和工艺参数的设计, 采用 80 t 顶底复吹转炉-LF-RH-325 mm × 280 mm 大方坯连铸流程生产出高强耐热钢 40CrMoV 盘条。

(2) 通过高温热塑性试验, 明确了 900 °C 温度为 40CrMoV 钢的塑性最低点, 二次冷却应采用弱冷配水, 要求出拉矫机铸坯角部温度在 900 °C 以上, 以保证铸坯表面质量。

(3) 铸坯采用合适加热温度, 避免钢坯脱碳严重; 开轧温度控制在 980 ~ 1 050 °C, 轧件进精轧机

温度为 850 ~ 900 °C, 吐丝温度为 800 ~ 850 °C; 斯太尔摩辊道采用延迟冷却方式, 冷却时, 斯太尔摩冷却线风机全部关闭, 保温罩关闭, 冷却速度在 0.3 ~ 0.5 °C/s, 保温时间 10 ~ 20 min, 以促进相变充分进行和组织均匀分布, 保证盘条具有良好的冷锻性能。

(4) 实物检验表明, 盘条平均 T[O] 为 10×10^{-6} , 平均 N 含量为 33×10^{-6} , 抗拉强度达到 1 200 ~ 1 250 MPa, 断面收缩率达到 59% ~ 62%, 非金属夹杂级别为 A0.5 和 D1.0, 低倍组织级别均为 1.0 级, 各项性能指标较好满足了客户的需求。

参考文献

- [1] 杨瑞成, 郑丽平, 王 晖, 等. 珠光体耐热钢高温时效后集体力学性能的变化[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(6): 40-44.
- [2] 王刘利. 铝对抗磨耐热钢组织及性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2011: 7-10.
- [3] 冯路路, 张学峰. 耐热钢 12Cr1MoV 的生产工艺研究[J]. 宽厚板, 2015, 21(3): 8-10.
- [4] 杨 玉, 陈 昕, 金纪勇, 等. 中规范铸坯高温力学性能的研究[J]. 上海金属, 2013, 35(3): 20-23.
- [5] 岛英雄, 家口浩, 下津佐正贵. 制御冷却による線材の高品質化[J]. 神戸製鋼技報, 2000, 50(1): 29-32.
- [6] 段贵生. SCM435 合金冷锻钢盘条控轧控冷工艺[J]. 特殊钢, 2008, 29(1): 45-47.
- [7] 惠卫军, 翁宇庆, 董 瀚, 等. 高强度紧固件用钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 12-14.

李永超 (1985-), 男, 硕士 (2012 年北京科技大学), 工程师, 2009 年河北理工大学毕业, 冷锻钢的开发和工艺控制。

E-mail: liyongchao1220@163.com

收稿日期: 2018-09-12