

## ML45Mn2 冷镦钢盘条的研究与开发

周国子, 李为龙

(湖南华菱湘潭钢铁有限公司技术质量部, 湘潭 411101)

**摘要** 120 t 转炉-LF-VD-350 mm × 430 mm 铸坯-150 mm × 150 mm 轧坯-轧制流程生产的 ML45Mn2 钢 Φ16 mm 和 Φ18 mm 盘条采用的主要工艺为: 碱度 1.5 ~ 2.0 精炼渣, 52 t 中间包, 电磁搅拌, 轻重压下, 开轧温度 1 010 ~ 1 070 °C, 精轧温度 820 ~ 850 °C, 卷曲温度 780 ~ 820 °C, 冷速 0.15 ~ 0.4 °C/s 等工艺。检验结果显示, ML45Mn2 钢盘条热轧态平均抗拉强度 797 MPa, 平均断面收缩率 50.3%, 1/4 冷镦合格, 金相组织为珠光体 + 铁素体, 断面平均硬度值为 92.5HRB, 带状组织 1.5 ~ 2.5 级, 满足技术要求。

**关键词** 冷镦钢 ML45Mn2 控轧控冷

## Research and Development on ML45Mn2 Cold Heading Steel Wire Rod

ZHOU Guozi, LI Weilong

(Technical Quality Department, Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co Ltd, Xiangtan 411101)

**Abstract** The main process technology of 120 t BOF-LF-VD-350 mm × 430 mm cast bloom-150 mm × 150 mm rolled billet flow sheet produced ML45Mn2 steel Φ16 mm and Φ18 mm wire rod is using refining slag with basicity of 1.5 ~ 2.0, 52 ton tundish, electromagnetic stirring, light and heavy reducing, initial rolling at 1 010 ~ 1 070 °C, finishing rolling at 820 ~ 850 °C, coiling at 780 ~ 820 °C, and cooling rate 0.15 ~ 0.4 °C/s. The test results show that of ML45Mn2 steel hot rolled wire rod, the average tensile strength is 797 MPa, the average reduction of area is 50.3%, 1/4 of the cold heading is qualified, the metallurgical structure is pearlite + ferrite, the average section hardness value is 92.5HRB, the band structure is 1.5 ~ 2.5 to meet the technical requirements.

**Material Index** Cold Heading Steel, ML45Mn2, Control Rolling and Control Cooling

ML45Mn2 为中碳调质冷镦钢, 用于制造各种机械轴类产品、异型件或紧固件产品。由于其采用冷镦加工成型, 冷镦过程存在变形量大、变形速度快等特点<sup>[1]</sup>, 对材料的表面质量和纯净度有极高要求。根据用户使用特点, 湘钢结合自身的工艺及装备技术条件, 通过研究与试验, 成功开发出不同规格的 ML45Mn2 钢线材盘条。

### 1 ML45Mn2 钢热轧盘条的技术要求

#### 1.1 化学成分

ML45Mn2 钢成分源自 GB/T 3077-2015 中的 45Mn2 钢, 采用铝脱氧冶炼工艺。牌号前增加“ML”表示用途为冷镦或冷挤压, 化学成分要求如表 1 所示。

#### 1.2 钢的表面质量

ML45Mn2 钢盘条用于冷镦成型工艺生产汽车

用传动轴、螺杆、螺母等产品, 对材料的表面质量要求很高。GB/T 6478-2015 规定, 钢材表面不应有裂纹、结疤、夹杂、耳子和折叠等缺陷。ML45Mn2 钢由于采用铝深脱氧, 易出现钢液因钢水脱氧产物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂导致水口堵塞的情况, 在试制该钢时需要防止水口堵塞。

#### 1.3 非金属夹杂物

ML45Mn2 钢非金属夹杂物要求级别见表 2, 钢中的夹杂物特别是 B 类(氧化铝类)和 D 类(球状氧化物类)是造成冷镦开裂和早期疲劳破坏的主要原因之一<sup>[2]</sup>。因此, 应严格控制钢中的夹杂物、全氧、N、S、P 等杂质元素的含量, 特别是结晶器卷渣形成的大型夹杂物。

#### 1.4 脱碳

盘条脱碳会降低零件表面硬度和疲劳性能, ML45Mn2 钢要求总脱碳层深度 1.0% D 以内(D 为盘条的公称直径)。

表 1 ML45Mn2 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical component of ML45Mn2 steel/%

C	Si	Mn	P	S	Al	O	N
0.45 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80	≤0.025	≤0.025	0.010 ~ 0.030	≤0.002 0	≤0.006 5

注: 钢中残余 Ni、Cr、Cu 均 ≤0.20%, Mo 含量 ≤0.10%。

表2 ML45Mn2钢非金属夹杂物级别要求/级

Table 2 Requirement for rating of non-metallic inclusions in ML45Mn2 steel/rating

A		B		C		D		D <sub>s</sub>
粗	系	粗	系	粗	系	粗	系	
≤1.5	≤2.0	≤1.5	≤2.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤2.0	≤2.0

表3 热轧ML45Mn2钢力学性能要求

Table 3 Requirement for mechanical properties of hot rolling ML45Mn2 steel

R <sub>m</sub> /MPa	R <sub>el</sub> /MPa	A/%	Z/%
≤850	≤510	≥16	≥38

### 1.5 冷镦性能

盘条应至少进行1/2冷顶锻试验,冷顶锻前的试样高度为试样直径的2倍,试验后试样侧面上不得有任何裂纹和折叠。

### 1.6 力学性能、硬度及组织

盘条热轧态力学性能应满足表3要求。盘条热轧态断面硬度值应小于98HRB。盘条热轧态金相组织应为珠光体+铁素体,晶粒度6级以上,不得有魏氏组织、混晶等影响使用的组织。带状组织≤2.5级。

## 2 钢种开发的重点与难点及其相应措施

ML45Mn2钢由于主要用作汽车的传动轴,因此,材料的洁净度、强度要求高而且须具有良好的组织性能。

针对洁净度要求高所采用的措施:转炉钢水采用铝强脱氧;精炼进行真空处理并延长软吹时间;连铸控制保护渣的黏度、连铸拉速及结晶器液面保持稳定性避免卷渣。

针对强度要求高,对钢种成分C和Mn含量按中上限设计;采用快速加热、低温出钢,尽量降低加热炉内的残氧量控制脱碳层;轧制过程控轧控冷。

针对此钢种易出现钢液因钢水脱氧产物Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂导致水口堵塞的情况,在试制该钢时采取控制转炉过氧化、精炼快速造白渣、连铸整体水口全程保护浇注工艺。

该钢种为典型的中碳高锰钢,铸坯容易产生表面裂纹,这也是ML45Mn2钢生产过程中的难点<sup>[3]</sup>。采用二火开坯表面探伤修磨工艺保证表面质量。

## 3 关键生产工艺

湘钢ML45Mn2钢盘条采用二火成材工艺,生产工艺流程为:转炉冶炼(120 t)→LF精炼(120 t)→VD脱气(120 t)→五机五流大矩形坯连铸(350 mm×430 mm)→铸坯缓冷(≥48 h)→开坯轧

制(150 mm×150 mm)→铸坯表面抛丸→磁粉探伤→轧制坯修磨(每个面修磨深度1.0~1.5 mm)→步进梁式加热炉→高压水除鳞→大盘卷控轧控冷轧制(Φ5.5~30.0 mm)。

### 3.1 转炉炼钢

转炉入炉铁水要求S≤0.030%,P≤0.030%,废钢比控制在10%~12%,总装入量控制在130~135 t,废钢全部采用自产废钢,从源头上控制钢中残余Ni、Cr、Cu含量<sup>[3]</sup>。

转炉终点目标:终点C≥0.06%,P≤0.012%,出钢温度≥1600℃;补吹次数不大于2次,确保C-T协调出钢。出钢过程全程底吹氩。冶炼转炉采用滑板挡渣出钢,出钢过程1/3时往钢包中先加入铝铁预脱氧<sup>[4]</sup>,再依次加入SiMn合金和高碳MnFe合金及低氮石墨增碳剂,最后加入300 kg固体预熔合成渣,利用出钢过程钢水的冲击力使钢渣充分接触从而更好地脱氧脱硫为LF精炼创造条件。

### 3.2 精炼

为了保证精炼效果,精炼渣须具有高碱度、流动性好、吸附夹杂能力强等特点<sup>[5]</sup>。采用白渣工艺,选用CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元渣系控制白渣碱度(R)=1.5~2.0,终渣(FeO+MnO)≤1.0%,精炼渣系成分如表4。钢水须在LF通电时间≥20 min,总吹氩时间≥40 min,快速成白渣脱氧,从而保证钢水的可浇性。按钢种成分目标值微调成分,确保出站成分满足内控要求,精炼完毕后喂纯Ca线90~150 m进行钙化处理。

钢水进VD炉立即开启全程吹氩,为了获得良好的精炼脱气效果,工作真空度一般设定为67 Pa,保持时间≥10 min。破真空后禁止再进行调合金、喂铝线操作<sup>[6]</sup>。破真空后软吹时间≥15 min。上台温度确保中间包钢水过热度开浇炉≤35℃,连浇炉≤30℃。

### 3.3 连铸

连铸采用大容量52 t中间包浇注,采用恒拉速0.7 m/min,二冷比水量0.16 L/kg,使用整体水口,水口浸入深度80~85 mm。采用电磁搅拌技术,结晶器电磁搅拌参数为:电流200 A,频率2.5 Hz;末端电磁搅拌参数为:电流400 A,频率8.0 Hz。结晶器采用中碳钢专用保护渣,结晶器水量2920 L/min。连铸凝固末端采用轻压下、重压下等技术改善铸坯内部质量<sup>[7]</sup>。

为减少针孔、气孔的产生,对过程N含量进行监控,3炉铸坯成品N含量分别为39×10<sup>-6</sup>、33×10<sup>-6</sup>、

表 4 ML45Mn2 钢精炼渣系成分和碱度  
Table 4 Composition and basicity of refining slag for ML45Mn2 steel

炉号	渣的成分/%					三元碱度(R)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	(FeO + MnO)	
21107554	58.32	9.61	25.43	6.31	0.64	1.58
21107555	56.47	8.54	26.84	5.82	0.76	1.62
21107557	58.49	8.13	25.72	6.14	0.83	1.73
目标含量	50~60	8~12	25~32	5~10	≤1	1.5~2.0

表 5 ML45Mn2 钢精炼和连铸工艺参数  
Table 5 Refining and cast process parameters of ML45Mn2 steel

炉号	LF					VD			连铸	
	在站时间/min	石灰/kg	预熔渣/kg	送电时间/min	喂钙线/m	保真空/min	软吹/min	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	过热度/℃	可浇性
21107554	107	500	112	37	99	12	31	0.7	32~35	良好
21107555	111	503	117	30	98	14	16	0.7	20~28	良好
21107557	102	502	112	33	100	15	16	0.7	19~27	良好

32 × 10<sup>-6</sup>。在线测结晶器保护渣、中间包覆盖剂、碳化稻壳水分,分别为 0.13%、0.11%、1.35%。钢坯入坑缓冷 ≥ 48 h。各工艺参数控制情况如表 5 所示。

### 3.4 轧制

350 mm × 430 mm × 6 000 mm 矩形坯经缓冷后在大棒线开坯轧制成 150 mm × 150 mm × 12 000 mm 轧制坯,开坯温度(1 120 ± 30)℃,采用 Φ800 两辊可逆式轧机及 8 机架高刚度短应力线连轧机组轧制,成品按照 YB/T001-1991《初轧坯尺寸、外形、重量及允许偏差》、YB/T004-1991《初轧坯和钢坯技术条件》进行验收。为确保钢坯质量零缺陷,验收合格的轧制坯需进行全修磨处理,修磨深度每个面不小于 1.0 mm。

经过表面处理的轧制坯进入大盘卷轧线轧制不同规格的成品盘条。钢坯经过加热,采用多道次连续无扭轧制,通过控制轧制和控制冷却获得理想的组织和性能。轧线采用高刚度短应力线轧机、张力自适应控制、减定径技术、围盘/活套无张力轧制确保轧件的尺寸精度。

ML45Mn2 钢在大盘卷步进梁式加热炉加热时间 150 min 以内,开轧温度(1 040 ± 30)℃,经过高压水除鳞后进入连轧机组进行控制轧制和控制冷却。

为获得理想的组织和性能,研究了该材料在不同温度和冷却速度下的相变产物。利用 JMatPro 材料属性模拟软件对 ML45Mn2 钢的 CCT 曲线进行模拟计算,结果如图 1 所示。A<sub>1</sub> = 715.3℃, A<sub>3</sub> = 753.2℃,冷却速度 3.0℃/s 以下获得组分不同的 F + P(铁素体 + 珠光体)组织,冷却速度达到 3.0℃/s 时的组织为 77.89% P + 15.45% B + 6.66% F,硬度值为 25.6HRC,抗拉强度为 871.4 MPa,屈服强度为 627.2 MPa。冷却速度达到 7℃/s 时开始有 M(马

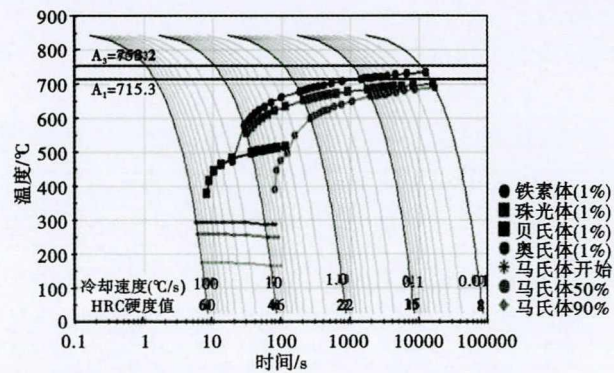


图 1 ML45Mn2 钢连续冷却转变温度(CCT)曲线图  
Fig. 1 CCT (continuous cooling transformation) curve of ML45Mn2 steel

氏体)形成。为提高材料塑性,降低硬度以减少模具损耗,该钢种需采用控制轧制和缓慢冷却工艺,避免产生魏氏组织和贝氏体组织<sup>[8]</sup>。

大盘卷轧线为一条高速线材与大盘卷复合产线,高速线材轧制规格为 Φ6.0 ~ 17.0 mm,由 RSB 减定径机组出成品;盘卷线轧规格范围在 Φ18.0 ~ 46.0 mm,由 KOCKS 机组出成品。

试制 Φ16 mm 盘条在大盘卷高线轧制,控制进减定径温度 820℃,吐丝温度 780℃,散卷在 LCC 辊道采用延迟冷却工艺,平均冷速 0.3 ~ 0.4℃/s。

试制 Φ28 mm 盘条在大盘卷盘卷线轧制,控制进 KOCKS 温度 850℃,卷曲温度 820℃,卷曲后盘卷采用带保温罩的步进梁式冷却运输机缓慢冷却,平均冷速 0.15 ~ 0.2℃/s。

### 4 试制结果

ML45Mn2 钢 3 炉化学成分分析结果见表 6。

截取开坯后铸坯(150 mm × 150 mm × 200 mm)表面热酸洗未发现裂纹及折叠等缺陷;盘条(Φ16 mm ×

表6 ML45Mn2钢分析成分/%  
Table 6 Analysis of ML45Mn2 steel/%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Al	O	N
21107554	0.48	0.26	1.48	0.011	0.002	0.018	0.00098	0.0050
21107555	0.47	0.27	1.50	0.014	0.001	0.019	0.00064	0.0053
21107557	0.47	0.26	1.49	0.013	0.001	0.017	0.00059	0.0050

表7 ML45Mn2钢盘条热轧态力学性能和断面硬度值

Table 7 Mechanical properties and section hardness value of ML45Mn2 steel hot rolled wire rod

规格/mm	序号	Rm/MPa	Rel/MPa	A/%	Z/%	边缘区域1HRB值	中心区域HRB值	边缘区域2HRB值
16	1	783	454	19.8	52.7	94.0	94.3	94.4
	2	789	462	22.5	52.3	94.9	94.9	94.4
28	1	800	478	21.5	48.5	90.6	91.5	91.1
	2	816	482	20.5	47.5	89.8	85.6	94.4

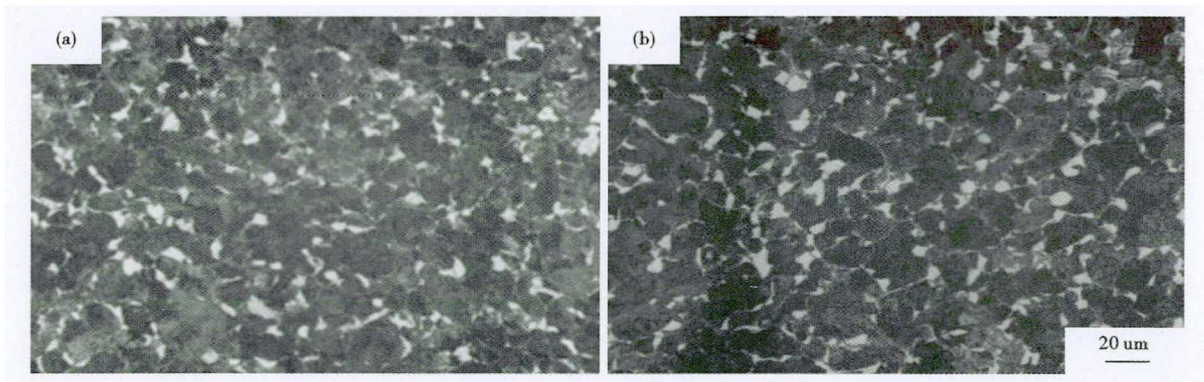


图2 ML45Mn2钢金相组织:Φ16 mm (a)和Φ28 mm (b)棒材

Fig.2 Microstructure of ML45Mn2 steel: round bar of (a) Φ16 mm and (b) Φ28 mm

3支)表面热酸洗未发现麻点、裂纹、划伤、结疤、夹杂、耳子和折叠等缺陷,整体表面质量正常。

ML45Mn2钢不同规格盘条热轧态力学性能和断面硬度值见表7,该钢盘条热轧态1/3及1/4冷镦检验合格。

Φ16 mm ML45Mn2钢热轧态金相组织为珠光体+铁素体图2(a),带状组织2.0~2.5级,脱碳层深度0.15 mm,无全脱碳,夹杂物 $B_{\text{细}}$  0.5级, $D_{\text{细}}$  1级。

Φ28 mm ML45Mn2热轧态金相组织为珠光体+铁素体图2(b),带状组织1.5~2.0级,脱碳层深度0.15 mm,无全脱碳。夹杂物 $D_{\text{细}}$  1.0级, $D_s$  0.5级。

## 5 结论

(1)湘钢ML45Mn2钢盘条采用二火成材工艺,工艺流程如下:120 t转炉冶炼+LF精炼+VD脱气+五机五流350 mm×430 mm矩形坯连铸+开坯+抛丸+探伤+修磨+大盘卷控轧控冷轧制,工艺路线是可行合理的。

(2)ML45Mn2钢盘条热轧态平均抗拉强度797 MPa,平均屈服强度469 MPa,平均断面收缩率50.3%,平均延伸率21.1%,断面平均硬度值为

92.5HRB,力学性能满足技术要求。

(3)ML45Mn2钢盘条化学成分、表面质量、冷镦性能,热轧态金相组织为珠光体+铁素体,带状组织1.5~2.5级,脱碳层深度0.15 mm,无全脱碳,夹杂物级别等均符合要求。

## 参考文献

- [1]王志义,王利军,陈继林,等. 齿轮传动轴用钢ML45Mn2的冷镦开裂原因分析[J]. 金属热处理,2016,41(10):198-199.
- [2]惠卫军,翁宇庆,董瀚. 高强度紧固件用钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [3]李永超,李瑞鹏,李家杨,等. 汽车发动机气门挺柱用16MnCr5冷镦钢盘条的研发与生产[J]. 特殊钢,2020,41(6):24-27.
- [4]李平凡. 圆坯连铸生产45Mn2钢的工艺实践[J]. 炼钢,2012,28(6):25-28.
- [5]张鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:514-518.
- [6]炼钢-连铸新技术800问编辑委员会. 炼钢-连铸新技术800问[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:152-160.
- [7]冶金报社编. 连续铸钢500问[M]. 北京:冶金工业出版社,1999:164-166.
- [8]张磊,赵勇桃,霍文霞. 冷却速率对45Mn2钢魏氏组织的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(12):228-231.

周国子(1976-),男,工程硕士(2013年北京科技大学),高级工程师,2002年安徽工业大学(本科)毕业,冷镦用钢、生产技术研发。E-mail:zhougz9801@sina.cn

收稿日期:2021-11-04