

## 弹性挡圈用 C75S 碳素弹簧钢热轧盘条的研发与生产

姜 婷 汪开忠 于同仁 张晓瑞 龚梦强

(马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 马鞍山 243000)

**摘 要** 通过工艺流程:100 t 电弧炉→LF→RH→220~300 mm<sup>2</sup> 连铸方坯→150 mm×150 mm 轧坯→Φ5.5~25 mm 线材盘条,成功开发生产 C75S 弹簧钢(/%:0.72~0.74C,0.29~0.32Si,0.73~0.77Mn,0.006~0.010P,0.002~0.005S)热轧盘条,盘条 10 μm 以下的夹杂比例约 92%,索氏体含量达到 95%,铁素体和渗碳体两相交替的片层平均间距为 0.1~0.2 μm,盘条  $R_m$  为 1 022 MPa,A 为 17.5%。

**关键词** 弹性挡圈 C75S 弹簧钢 热轧盘条 球化退火

## Development and Production of C75S Carbon Spring Steel Hot-rolled Wire Coil for Elastic Retaining Ring

Jiang Ting, Wang Kaizhong, Yu Tongren, Zhang Xiaorui and Gong Mengqiang

(Technology Center, Ma'anshan Iron & Steel Co. Ltd, Ma'anshan 243000)

**Abstract** The C75S spring steel (/%:0.72~0.74C,0.29~0.32Si,0.73~0.77Mn,0.006~0.010P,0.002~0.005S) hot-rolled wire coil is successfully developed by process flow 100 t EAF→LF→RH→220~300 mm<sup>2</sup> cast square bloom→150 mm×150 mm rolled billet→Φ5.5~25 mm wire coil, in wire coil the proportion of inclusions below 10 μm is about 92%, the content of sorbite reaches 95%, and the average lameller distance between the two phases of ferrite and cementite is about 0.1~0.2 μm. Also, the wire  $R_m$  is 1 022 MPa and A is 17.5%.

**Material Index** Elastic Retaining Ring, C75S Spring Steel, Hot-Rolled Wire Rod, Spheroidizing Annealing

弹性挡圈,即弹性卡簧或卡环,属于一种紧固件,通常装在机械设备的轴槽或孔槽中,用于阻止轴上或孔上的零部件发生轴向松动。目前国内弹性挡圈制作多采用带钢直接冲压成型,但带钢由于多道次的轧制工艺,通常存在较严重的带状组织,其表面平整度具有取向性,容易造成冲压的挡圈内圈平直度较差,难以与其他零件紧密贴合;其次,带钢冲压弹性挡圈后,坯料大量残余,成材率较低,仅达到 72% 左右,严重增加加工成本。采用弹簧钢热轧盘条制作弹性挡圈具有诸多优势,如带状组织较轻,冲压的挡圈平直度好,材料利用率高,是值得推广的弹性挡圈制作方法。弹性挡圈在服役过程中需长期承受循环扭转力、冲击力和摩擦磨损,因此需要有足够的硬度和弹力,GB/T 959.1-2017《挡圈技术条件 弹性挡圈》中要求,挡圈热处理后 HRC 硬度值须达到 47~54。C75S 弹簧钢是 DIN EN10132-4《热处理用冷轧窄钢条带》牌号,是制作弹性挡圈的常用材料,目前国内该牌号主要用于带钢生产。为满足用户需求,进行了弹性挡圈用 C75S 弹簧钢热轧盘条的研发和生产。

### 1 化学成分设计

合理的成分设计是钢材获得优良性能的基础条

件,因此在 DIN EN10132-4 的成分范围内,对各元素进行优化设计。C75S 弹簧钢为过共析高碳钢,C 是钢中最主要的强化元素,随着含 C 量的提高,先共析渗碳体量比例提高,珠光体的比例则减少<sup>[1]</sup>。在力学性能方面,钢的硬度随含 C 量的提高而上升较快,强度提高缓慢,而韧性及塑性降低,降低原因是先共析渗碳体比例增多,其沿原奥氏体晶界析出并形成网状,增加了钢的脆性<sup>[2]</sup>,并恶化钢的冷加工性能。而且高碳钢的碳偏析是最主要的成分偏析,会导致线材在拉拔时断裂。因此 C 含量按标准范围的中下限控制在 0.70%~0.77%。

Mn 在高碳钢中溶于铁素体中引起固溶强化,并使热轧线材得到强度较高的细片状珠光体,从而有效提升钢的硬度和强度,而对塑性和韧性的影响较小。但 Mn 在钢中容易偏析,造成局部贫 Mn,致使过冷奥氏体稳定性下降,使得 C 曲线左移,鼻尖温度上升,易形成网状铁素体<sup>[2]</sup>。因此 Mn 含量控制在 0.65%~0.85%。

Si 是非碳化物,主要固溶于铁素体相中起到强化作用,有效提高弹簧钢的强度和抗弹减性能。但弹性挡圈对弹性的要求远低于悬架簧等其他弹簧的弹性,

表1 碳素弹簧钢C75S的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of carbon spring steel C75S/%

C	Si	Mn	P	S	Alt	T. O
0.70~0.77	0.20~0.35	0.65~0.85	≤0.015	≤0.010	≤0.007	≤0.001

所以标准中Si含量并不高,生产时按上限控制在0.20%~0.35%。此外为了减少弹簧钢中的氧化铝类脆性夹杂物,采用硅锰脱氧方式,Al含量控制≤0.007%。而由于C75S钢线材使用时需冷轧为扁带状,变形量极大,需控制钢中夹杂尤其是脆性夹杂防止冷轧断裂,故对钢中氧含量的上限进行严格控制。

基于以上依据和目前生产线的实际情况,设计了C75S弹簧钢的化学成分范围,如表1所示。

## 2 弹簧钢线材的生产工艺与组织性能控制

### 2.1 工艺路线选择

弹簧钢线材在制作弹性挡圈时,需经过拉拔、冷轧、弯圈等步骤,这对盘条的品质要求较高,需要钢具有高的纯净度、组织均匀,且具有优秀的表面质量。结合实际生产装备和产品用途,采用“两火成材”工艺路线:100 t电弧炉冶炼→LF精炼→RH真空脱气→连铸大方坯(220 mm×220 mm~300 mm×300 mm)→加热→轧制150 mm×150 mm方坯→加热→高速线材轧制Φ5.5~25 mm线材盘条。

### 2.2 炼钢工艺控制

电弧炉冶炼采用100 t超高功率交流电弧炉,钢水温度≥1 400 ℃。出钢时在钢包内加入1.5~1.8 kg/t的硅铁脱氧剂,喷发泡剂碳粉造泡沫渣,且小量多次加入石灰和萤石完成预造渣。出钢钢水P含量≤0.010%,C含量≤0.20%,出钢前进行底吹氩,吹氩流量调节以钢水不翻腾出钢包为准。采用留钢操作,严格控制下渣。

LF精炼进行脱氧和脱硫,白渣选用合适比例的CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO系渣样(CaO:55%~60%、SiO<sub>2</sub>:15%~25%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>≤15%、MgO≤4%),白渣保持时间在22 min以上;同时控制(TFe+MnO)≤1.0%,以控制夹杂塑性化。RH时通过持续进行循环脱气操作去除钢水中气体和夹杂物,控制纯脱气时间≥15 min,以保证真空处理后[H]≤1.5×10<sup>-6</sup>、[O]≤0.001 0%。

连铸配备了三段式电磁搅拌系统及大容量中间包,可有效增加微细等轴晶,减轻铸坯偏析、疏松和缩孔,改善铸坯表面质量<sup>[3]</sup>。钢包到中间包采用长水口,全程吹氩保护浇铸,中间包到结晶器采用浸入式水口保护浇铸,严格控制水口的插入深度并对弧

对中,以防止结晶器钢水卷渣及铸坯冷却不均匀。采用结晶器液面控制系统,液面波动控制≤±3 mm。连铸方坯尺寸为220 mm×220 mm~300 mm×300 mm,采用入坑方式进行≥24 h缓冷。

### 2.3 开坯和线材轧制工艺控制

将连铸坯采用开坯+连轧方式轧制150 mm×150 mm方坯。在炉温度控制在(1 200±50) ℃,残氧量≤5%,开轧除鳞水压力≥23 MPa,以保证除去全部氧化铁皮。为了保证线材表面质量,对轧制方坯进行扒皮,充分去除方坯脱碳和表面缺陷。

高速线材轧制时,方坯采用“S”型加热方式,使加热段和均热段之间有足够的温度梯度,一加热段和二加热段的温度控制在较低温度并快速通过<sup>[4]</sup>,避免高碳钢发生严重脱碳。控制均热段温度在1 000~1 100 ℃,这样既能保证充分加热又可避免奥氏体晶粒度长大及脱碳。最后,待轧保温时段适当降低均热段温度。

盘条轧制过程采用控轧+斯太尔摩快冷工艺,在中轧、预精轧和精轧位置均采用轧后穿水。控制吐丝温度在800~880 ℃,以获得细小的过冷奥氏体组织,同时为盘条在后道斯太尔摩冷却线的相变提供条件。斯太尔摩冷却线进行快冷,以便在冷却线上完成相变,并获得高的索氏体比例和尽可能少的先共析铁素体。

## 3 热轧盘条的质量和性能

### 3.1 化学成分及非金属夹杂控制

对50炉钢的生产情况进行了统计,化学成分范围见表2,C控制的最大和最小差值为0.03%、Mn 0.05%、Si 0.04%,实现成分窄范围控制,从而保证了实物质量的稳定性;此外T. O≤0.0010%、N≤0.005%、S≤0.005%、P≤0.010%、[H]≤1.5×10<sup>-6</sup>,说明钢具有高的洁净度。通过ASPEX扫描电镜对盘条纵向面夹杂物尺寸进行测量及统计,结果显示夹杂物分布弥散,其中尺寸在10 μm以下的夹杂比例约92%,尺寸在10~20 μm约占7%,尺寸在20 μm以上仅为1%,且不大于40 μm。线材盘条在加工弹性挡圈时,先经受拉拔过程的拉应力,而后经受冷轧过程的压应力,尤其是后者产生的应力极大,极易产生裂纹甚至发生断裂,这也是使用线材加工挡圈时的关键性难题。通过生产工艺控制生成弥散的小尺寸夹杂物,可充分保证盘条在拉拔和冷轧大变形时不会因夹杂问题发生开裂,且有效提高挡圈服役过程的疲劳寿命。

表 2 碳素弹簧钢 C75S 实际生产成分范围统计,50 炉/%  
Table 2 Statistics of chemical composition of carbon spring steel C75S,50 heats/%

C	Si	Mn	P	S
0.72 ~ 0.74	0.29 ~ 0.32	0.73 ~ 0.77	0.006 ~ 0.010	0.002 ~ 0.005

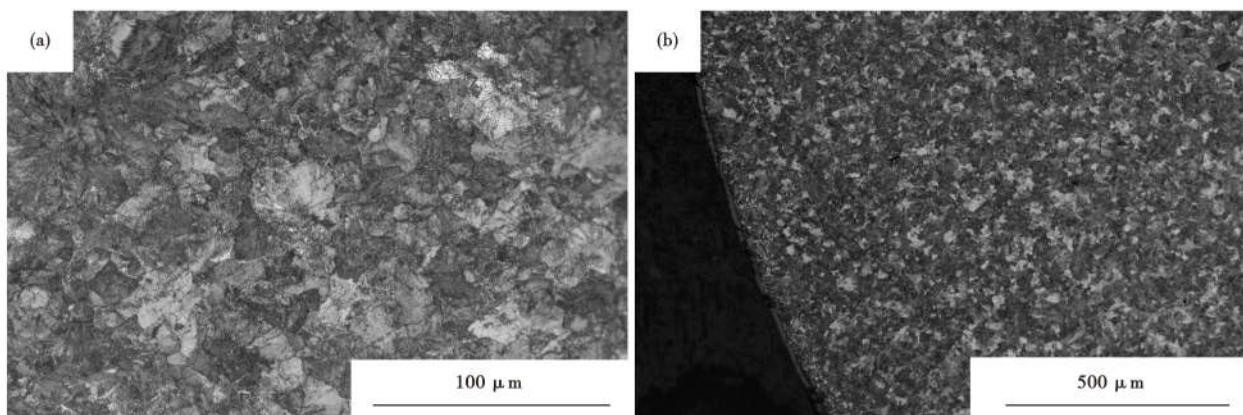


图 1 C75S 钢热轧盘条金相组织(a)及脱碳层(b)

Fig. 1 Metallographic structure (a) and decarburization layer (b) of C75S steel hot-rolled wire coil

据拉拔的方向重新取向,可防止断裂,对拉拔性能非常有利。图 1 为 C75S 钢热轧盘条的金相组织照片,单边总脱碳层 $\leq 0.06$  mm,组织为索氏体,级别为 1.0 级(索氏体含量 95%),索氏体组织由渗碳体薄片和片状铁素体交替组成,片层间距细,变形能力强,十分适合后道拉拔。图 2 为通过扫描电镜测定铁素体和渗碳体两相交替的片层间距,平均间距为  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ,细小片层组织使得线材盘条具有很大的塑性变形能力,使钢获得高的面缩率。

C75S 弹簧钢热轧盘条的力学性能平均值和同圈差统计见表 3。通过合理的成分设计和生产控制,生产的 C75S 钢强度低且具有较高的塑性,强度同圈波动较小,说明其在热轧状态下具有优良的冷

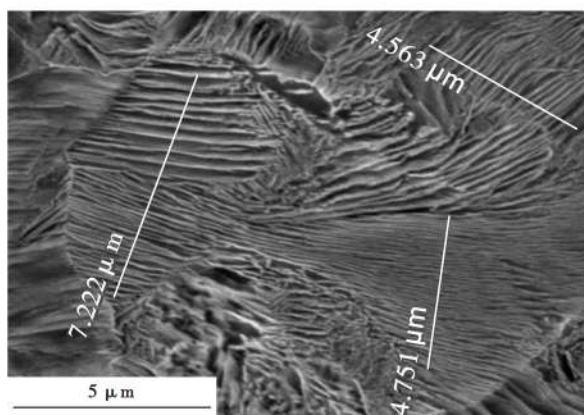


图 2 C75S 钢热轧盘条珠光体片层间距

Fig. 2 Interlayer spacing of pearlite in hot-rolled wire coil C75S steel

### 3.2 组织及力学性能

高碳钢由于先共析铁素体和珠光体的延伸能力不同,在减面率较大的拉拔过程中会导致两相间出现裂纹,所以希望得到尽量薄的片层组织,其容易根

表 3 C75S 钢热轧盘条力学性能平均值和同圈差值统计  
Table 3 Statistics of average value of mechanical properties and difference value in same circle of C75S steel hot-rolled wire coil

$R_m$ /MPa	A/%	Z/%	HV10 硬度值	强度同圈差/MPa
1022	17.5	47	305	$\leq 15$

拉性能。

## 4 应用试验

### 4.1 球化退火工艺制定

由于 C75S 弹簧钢在冷轧工序由圆形截面直接冷轧为扁形截面,变形量大,因此前道需要进行充分的球化退火,通过将钢中的珠光体球粒化,降低钢的硬度,改善冷轧变形能力;同时细粒状碳化物弥散分布于弹簧钢的铁素体基体,获得均匀组织,为后续的淬火回火调质热处理做好充分的准备<sup>[5]</sup>。球化退火的加热温度通常控制在  $A_{c1}$  以上  $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了指导用户制订 C75S 高碳弹簧钢热轧盘条的等温球化退火工艺,尤其对球化退火温度进行合理选择,对其静态连续冷却曲线进行测定。

采用 C75S 钢热轧盘条加工  $\Phi 6 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$  的圆柱试样,在 Gleeble-2000 热模拟实验机上进行热模拟实验,图 3 为得到的 C75S 钢静态 CCT 曲线,其  $A_{c3}$  温度为  $761 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_{c1}$  温度  $719 \text{ }^\circ\text{C}$ 。故应控制球化退火温度在  $739 \sim 749 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,控制等温转变温度在  $A_{r1}$  以下  $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,以加速 C 和合金元素的扩散,以未溶碳化物为核心,充分形成粒状碳化物,控

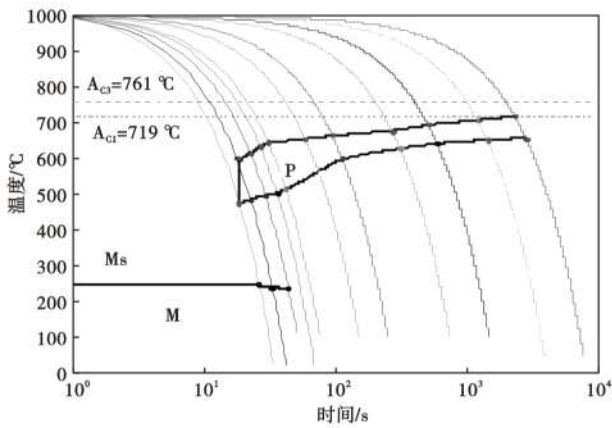


图3 C75S 钢连续冷却曲线

Fig.3 Continuous cooling curve of C75S steel

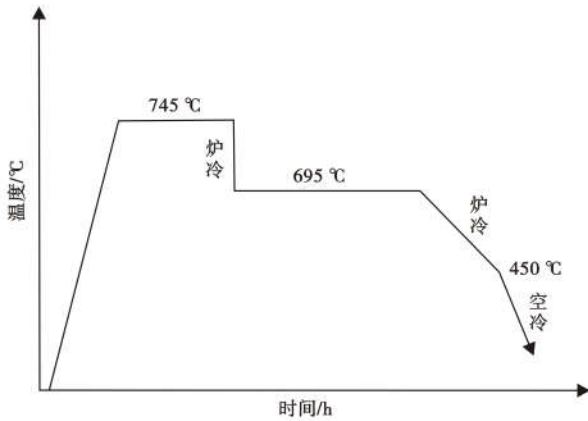


图4 C75S 钢线材等温退火工艺

Fig.4 Isothermal annealing process of C75S steel wire coil

制等温转变温度范围为 689 ~ 699 °C。

根据以上讨论,图4为用户实际制订的等温退火工艺。将拉拔后的精丝盘条加热到 745 °C 进行奥氏体化并保温一段时间,然后将炉温快速降至 695 °C 进行等温退火,待保温足够时间后随炉冷至 450 °C 左右,再出炉空冷。精丝退火组织为球粒状珠光体,冷轧工序顺利,未发生开裂现象。

#### 4.2 成品性能情况

用户采用 C75S 高强度弹簧钢热轧盘条制作弹性挡圈的加工路线为:Φ5.5 ~ 25 mm 热轧盘条→冷拉→球化退火→冷轧→弯圈→整型→调质热处理→表面处理,其中冷拉主要是为了产生索氏体组织变形,利于提高后道工序的组织球化率,减面率控制在 9% ~ 13%;调质处理采用淬火温度 880 °C、回火温度 420 °C,得到细小的回火屈氏体。采用 C75S 弹簧钢热轧盘条制作的弹性挡圈。HRC 硬度值为 49 ~ 51,承载力、折弯试验、变形试验、缝规试验、弹

性测试等各项检验均合格,材料成材率达到 90% 以上,比带钢制作材料利用率高出约 20%。可以看出,通过合理的成分设计和生产控制,生产 C75S 高强度弹簧钢线材完全可替代带钢,成为优秀的弹性挡圈制作材料。

#### 5 小结

(1)采用 100 t 电弧炉冶炼→LF 精炼→RH 真空脱气→连铸大方坯→加热→轧制 150 mm × 150 mm 方坯→加热→高速线材轧制 Φ5.5 ~ 25 mm 线材盘条,成功开发 C75S 高强度弹簧钢热轧盘条。

(2)采用 LF + RH 精炼,LF 时选用合适比例的 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 系渣样,控制 (TFe + MnO) ≤ 1.0%,RH 时控制纯脱气时间 ≥ 15min。冶炼的钢实现窄成分控制,且具有高洁净度,钢中以 ≤ 10 μm 的弥散小尺寸非金属夹杂物为主,有害气体含量极低。

(3)方坯采用“S”型加热方式,盘条轧制过程采用控轧 + 斯太尔摩快冷工艺,成品盘条索氏体含量达到 95%,珠光体片层平均间距为 0.1 ~ 0.2 μm,盘条具有低强度和高韧性,强度的同圈差 ≤ 15 MPa,具有优异的冷加工性能。

(2)根据 C75S 钢的 CCT 曲线,制定退火工艺为:精丝加热到 745 °C 进行奥氏体化,再降至 695 °C 进行等温退火。所加工的弹性挡圈各项指标均合格,材料利用率达到 90% 以上,证明高强度弹簧钢线材盘条完全可替代带钢成为优良的弹性挡圈制作材料。

#### 参考文献

- [1] 范建军. 钢丝绳原材料分析和生产新工艺的研究[D]. 西安:西安理工大学,2004:10.
- [2] 齐福利. 优质硬线轧后控冷过程中组织演变规律及力学性能研究[D]. 贵阳:贵州大学,2009:19-20.
- [3] 李永祥,章金楠. 高碳钢铸坯质量控制[J]. 连铸,2005(1):28-30.
- [4] 姜 婷,汪开忠. 免退火冷镦钢 10B21 热轧盘条的研制[J]. 轧钢,2020(6):53-56.
- [5] 赵忠魁,景财年. 金属材料学及热处理技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012:47.

姜 婷(1987-),女,工程师,2008 年北京科技大学(本科)毕业,线棒材产品开发及应用技术研究。

E-mail:729095277@qq.com

收稿日期:2020-03-20