



## MT级钢帘线用盘条均匀性关键技术及应用

高永彬, 李麦麦, 郭洛方, 代芳音, 姜军, 袁相坤, 张文涛  
(青岛特殊钢铁有限公司线材研究所, 青岛 266409)

**摘要:**通过增加碳含量及Cr合金化的方式提高帘线钢的强度,设计了MT级钢帘线用盘条C97D2-E的化学成分;采用Scheil-Gulliver凝固微观偏析理论建立新凝固传热模型,指导C97D2-E的连铸工艺,解决了连铸坯中心偏析、疏松和内裂等缺陷,优化后半成品的碳偏析指数可控制在1.05以内;采用特殊设计的风口喷嘴配合斯太尔摩风机的“佳灵”装置,进行风冷工艺优化,优化后盘条索氏体片层间距明显减小,索氏体片更加平直,索氏体片层间距控制在89 nm,珠光体团晶粒度更加均匀细小,珠光体团大小控制在20 μm;成品钢丝抗拉强度达到4 089 MPa,扭转过程中无分层,捻制5 000 m无断丝,可满足2×0.30MT规格钢帘线的要求。

**关键词:**MT级钢帘线用盘条;轻压下;偏析;珠光体团;索氏体片层间距

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2022-00227 **中图分类号:**TF711

## Key Technology and Application of Wire Rod Uniformity for MT Grade Steel Cord

Gao Yongbin, Li Maimai, Guo Luofang, Dai Fangyin, Jiang Jun, Yuan Xiangkun, Zhang Wentao  
(Institute of Wire and Rod Research, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266409, China)

**Abstract:** The chemical composition of C97D2-E wire rod for MT grade steel cord was designed by increasing carbon content and Cr alloying to improve the strength of cord steel. A new solidification heat transfer model was established by using Scheil-Gulliver solidification micro-segregation theory to guide C97D2-E continuous casting process, and the defects of central segregation, porosity and internal crack of continuous casting slab were solved. After optimization, the carbon segregation index of semi-finished product can be controlled within 1.05. The air-cooling process was optimized by using specially designed tuyere nozzle and “optiflex” device of Stelmor, after air-cooling process optimization, the spacing between the layers of wire rod sorbite was obviously reduced, and the sorbite plate was more straight, the lamellar space of the rod was controlled at 89 nm, the particle size of the pearlite was more uniform and smaller, and the size of the pearlite was controlled at 20 μm; the tensile strength of finished steel wire reached 4 089 MPa, there was no delamination during torsion and no broken wire during laying to 5 000 m, which can meet the requirements of 2×0.30 MT steel cord.

**Key Words:** Wire Rod for MT Grade Steel Cord; Soft Reduction; Segregation; Pearlite Nodule; Soretite Lamellar Spacing

为响应国家“双碳”战略目标以及顺应汽车轻量化发展趋势,汽车轮胎用钢帘线向着高强度、更细规格等先进技术方向发展<sup>[1-2]</sup>。钢帘线的强度等级由高强度(HT)向超高强度(ST)、特高强度(UT)逐步迈进。近年来,国际知名轮胎企业对钢帘线的强度等级提出了更高的标准要求,极高强(MT)钢帘线是行业中提出的更高强度级别的钢帘线<sup>[3]</sup>。直径0.3 mm帘线单丝,依据《ISO17832—2018子午线轮胎用钢帘线国际标准》,UT级别的钢帘线单丝的抗拉强度应满足(3 500±150) MPa。对于MT级钢帘线,国际标准无明确要求,按照行业规则应符合“MT级钢帘线的单丝抗拉强度(4 700-2 000D) MPa”的要求,即钢帘线单丝的抗拉强度应达到(4 100±150) MPa。

目前国内钢铁企业可以稳定生产高强(HT)、超高强(ST)级的钢帘线用盘条,个别企业可批量供应特高强度(UT)级钢帘线盘条,基本满足了轮胎产业的需求。由于MT级钢帘线的碳含量高(0.97%)、大应变量( $\epsilon \approx 3.0 \sim 4.0$ )等特点,对盘条的夹杂物、碳偏析、组织均匀性要求更高。目前,MT级钢帘线用盘条基本全部依赖进口,国内帘线钢的冶炼水平难以实现极高强度钢帘线用钢的质量要求<sup>[4]</sup>,国内关于极高强钢帘线用盘条的生产研究鲜有报道。目前国内帘线钢夹杂物的控制水平已经达到国际先进水平,97级帘线的夹杂物控制难度不大。但对于“一火材”冶炼97级高碳钢盘条,在保证材料均匀性方面存在巨大挑战,因此,青岛特钢成立专门的项

目攻关组,开展 MT 级钢帘线用盘条均匀性关键技术研究及应用,以满足极高强度钢帘线钢丝的制造要求。

### 1 材料成分设计

钢帘线成品钢丝抗拉强度与其化学成分和组织息息相关。在帘线钢的成分设计方面,增加帘线钢强度的重要途径是提高碳含量或者合金化。碳含量高的钢丝热处理后可获得高的抗拉强度,在后续的拉拔中也具有高的加工硬化率;Cr 合金化是提高钢帘线强度的另一个重要途径,相关研究表明添加 Cr 可以实现线材的高强度以及高塑性<sup>[5-8]</sup>,Cr 元素的加入降低了奥氏体中碳的扩散速度,使整个 C 曲线右移,从而推迟珠光体转变,使得珠光体转变在更低的温度下发生,转变温度越低,索氏体的片层间距越细小,索氏体化率越高。同时添加 Cr 含量可抑制拉拔过程中渗碳体的溶解,从而改善钢丝的扭转分层<sup>[6]</sup>。

MT 级钢帘线的单丝抗拉强度等级应以(4 700-2 000D)MPa 要求设计,其中 D 为单丝直径(mm)。故此,0.30 mm 单丝抗拉强度需要达到 4 100 MPa,钢丝强度满足要求的同时要保证优异的扭转性能。影响扭转性能的因素有很多,包括镀铜丝的组织性能、拉拔工艺、渗碳体的溶解等。拉拔工艺方面,当总应变超过一定临界值时,单丝进行扭转测试时发生分层。前期采用 C82D2Cr 生产 2×0.30UT 级别钢帘线,1.94 mm 的镀铜丝拉拔到 0.30 mm 的单丝,单丝抗拉强度仅达到 3 850 MPa,无法满足 MT 级钢帘线要求。为获得 4 100 MPa 的单丝强度,根据屠林科夫公式及 UT 级帘线钢的生产实践,热处理后镀铜丝直径设定在 2.0 mm 左右,则镀铜丝的目标抗拉强度应满足≥1 400 MPa。采用增加碳含量及 Cr 合金化的方式提高帘线钢的强度,设计了 C97D2-E 钢帘线用盘条的化学成分,其化学成分见表 1。

表 1 C97D2-E 钢帘线用盘条的化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
标准	0.95 ~ 1.01	0.15 ~ 0.35	0.20 ~ 0.50	≤0.025	≤0.020	≤0.50
实测	0.98	0.21	0.25	0.010	0.009	0.34

### 2 生产工艺流程及均匀性检验评价方法

青岛特钢采用 180 mm×240 mm 连铸坯生产 MT

级钢帘线用盘条的生产工艺流程。

KR 铁水脱硫→100 吨转炉冶炼→100 吨 LF 精炼炉精炼→六机六流弧形连铸机浇注(坯型 180 mm×240 mm、中间包等离子加热、结晶器电磁搅拌、末端电磁搅拌、轻压下)→步进式加热炉加热→除鳞→无扭高速线材轧机轧制→斯太尔摩控制冷却→盘条(φ5.5 mm)。

MT 级钢帘线用盘条的均匀性通过低倍组织、碳偏析、索氏体组织和力学性能进行对比评价分析,试验检验方法为。

(1)低倍组织:铸坯和半成品样,在横截面锯切厚度为 10 mm 的试样,通过铣床加工,采用 1:1 的盐酸溶液在 40 °C 下侵蚀,对比低倍组织。

(2)碳偏析:半成品样,在横截面锯切厚度为 10 mm 的试样,通过铣床加工,采用钻头取屑样,进行碳偏析指数的测定,对比碳偏析。

(3)力学性能:检验自然时效(15 天)后盘条的力学性能,拉伸速率 50 mm/min。

(4)索氏体组织:采用体积分数 3% 的硝酸酒精腐蚀,利用金相显微镜和电镜观察盘条的显微组织,并测量索氏体片层间距和珠光体团的大小。

### 3 均匀性关键技术

#### 3.1 铸坯的均匀化控制

随着帘线钢碳含量的不断提高,钢的碳偏析控制难度增大,且本钢种成分设计添加了 Cr 元素,加剧了成分偏析的严重性<sup>[9]</sup>。为有效降低极高强度钢帘线用盘条中碳及合金元素的偏析,降低断丝率,提高铸坯均匀化水平尤为重要,生产实践中普遍采用凝固末端电磁搅拌、轻压等技术解决铸坯的中心偏析和疏松等难题<sup>[9]</sup>。

传统的凝固传热理论模型大多是基于二维传热模型,结合测温或射钉试验修正,这样得到的理论模型对无合金或合金含量较低的钢种具有适用性,但对于高碳高合金钢种的凝固规律的模拟实用性较差。攻关组将 Scheil-Gulliver 凝固微观偏析理论引入到连铸轻压下偏析控制模型中<sup>[10]</sup>,并结合小矩形坯特点和高碳钢凝固规律及特性,自主创新开发设计出一套连铸机凝固传热数学模型,并结合射钉试验修正,有效指导高碳钢连铸轻压下工艺参数的优化,微观偏析模型如图 1 所示。

微观偏析控制方程为。

$$C_{L,i} = C_{0,i} [1 - (1 - 2\alpha'_i k_i) \cdot f_s]^{(k_i - 1)/(1 - 2\alpha'_i k_i)} \quad (1)$$

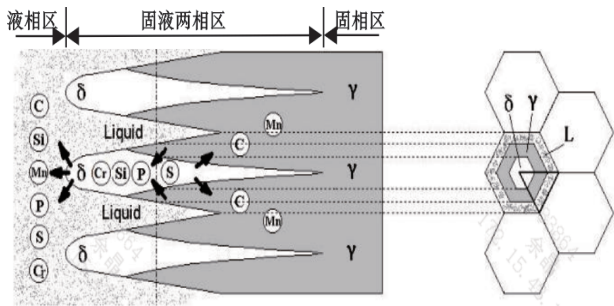


图 1 Scheil-Gulliver 微观偏析模型图

Fig. 1 Scheil-gulliver micro-segregation model diagram

式中:  $\alpha_i' = \alpha_i^+ \cdot [1 - \exp(-\frac{1}{\alpha_i^+})] - \frac{1}{2} \exp(-\frac{1}{2\alpha_i^+})$ ;  $\alpha_i^+ = \alpha_i + \alpha^c$ ;  $\alpha^c = 0.1$ ;  $\alpha_i = \frac{D_{s,i} t_f}{L^2}$ ;  $C_{L,i}$  为溶质元素  $i$  在液相中的浓度, %;  $C_{0,i}$  为溶质元素  $i$  的初始液相浓度, %;  $k_i$  为溶质元素  $i$  的平衡分配系数;  $f_s$  为固相率;  $\alpha_i$  为反扩散系数;  $\alpha_i'$  为  $\alpha_i$  的修正值;  $D_{s,i}$  为溶质元素  $i$  在固相中的扩散系数,  $m^2/s$ ;  $t_f$  为区域凝固时间,  $s$ ;  $L$  为显微偏析区的长度范围, 通常认为是二次枝晶臂间距 ( $\lambda$ ) 的一半,  $L = \lambda/2, \mu m$ 。

将每一步 Scheil-Gulliver 凝固计算结果作为新的初始值代入下一步计算程序中, 使得计算的钢种凝固规律更加接近实际情况, 从而使修正后的轻压下凝固数学模型更加接近高碳钢种的实际凝固规律, 计算结果与铸坯射钉试验数据对比如图 2 所示。图 2(a) 中为凝固末端液芯模拟示意图, 射钉位置在 9.07 m 处, 图 2(b) 为模拟计算结果和射钉结果对比, 经过修正后坯壳厚度计算值为 56.67 mm, 射钉结果坯壳厚度为 57 mm 和 56.5 mm, 修正后的轻压下凝固数学模型计算的坯壳厚度与射钉得到的坯壳厚度吻合度较好, 更加接近实际凝固规律。

MT 级钢帘线的碳含量达到 0.97%, 随着碳含量的增加, 铸坯的糊状区的长度随着碳含量的升高而增长, 后期凝固过程极容易产生偏析, 从而严重影响成品性能。依据新凝固传热模型模拟的铸坯温度场变化和连铸坯中心固相率的分布, 结合 C97D2-E 钢种凝固特性的差异。采用低过热度浇注, 配合合

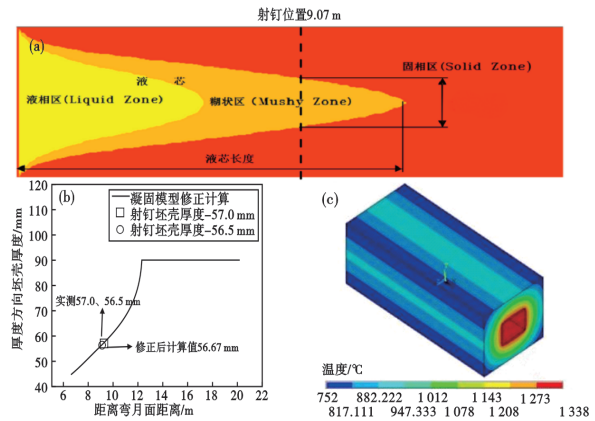


图 2 新凝固传热模型计算与射钉试验对比: (a) 凝固末端液芯模拟, (b) 计算和射钉结果对比, (c) 射钉处温度场模拟

Fig. 2 Comparaculation results of new solidification heat transfer model and nail test: (a) Simulation of liquid core at the end of solidification, (b) Comparison of calculation and nail shooting results, (c) Simulation of temperature field at nail shooting

理的二冷水、拉速、电磁搅拌、轻压下区间、总压下量以及每个拉矫辊的压下量等参数, 根据多轮正交试验确立合理的工艺参数, 优化前后的连铸工艺参数对比见表 2。

二冷制度和凝固末端电磁搅拌是减轻连铸坯中心偏析的关键技术。二冷制度会影响铸坯的温度, 从而改变凝固组织, 是获得高质量铸坯的关键, 对于中等截面的铸坯, 二冷采取强冷却有利于减小宏观偏析的形成。凝固末端电磁搅拌通过旋转的电磁场作用产生电磁力, 驱动糊状区的钢液流动, 打断生长的柱状晶, 促进溶质的重新分配, 增加等轴晶率, 从而减轻连铸坯的中心偏析。通过在连铸坯的凝固末端附近施加压力, 产生一定的压下量, 以补偿钢液凝固时的体积收缩, 避免偏析元素富集, 同时补偿连铸坯的凝固收缩以消除中心疏松。轻压下参数设置的总体依据是: (1) 固相率  $f_s$  为 0.30 ~ 0.90 的区间内实施轻压下, 减轻连铸坯的中心偏析和疏松; (2) 保证合理的总压下量和压下量分配, 减少铸坯内裂; (3) 保证轻压下条件下主机架结构稳定, 避免生产过程中压下量的偏移<sup>[11-12]</sup>。

不同轻压下工艺的连铸坯及对应的  $\phi 80$  mm 半

表 2 优化前后的连铸工艺参数对比

Table 2 Comparison of continuous casting process parameters before and after optimization

工艺	过热度/ $^{\circ}C$	二冷水	拉速/ $(m \cdot min^{-1})$	末端电磁搅拌			压下量
				电流/A	频率/Hz	搅拌方式	
优化前	15 ~ 25	强冷	1.2	380	6	交替搅拌	14
优化后	15 ~ 25	强冷	1.3	400	6	交替搅拌	13

成品酸洗低倍如图 3 所示,优化前连铸坯的中心偏析和疏松虽得到一定程度的改善,但由于压下量和压下位置等工艺参数设定不合理,导致连铸坯产生了严重的内裂,半成品 1/2 半径位置同样存在较明显缺陷。优化后的连铸坯和半成品酸洗低倍得到明显改善,无明显中心偏析、疏松和铸坯内裂等缺陷。

分别取不同工艺的半成品( $\phi 80$  mm)进行碳偏析指数对比,取样示意结果如图 4 所示,经过优化后,MT 级钢帘线用盘条的碳偏析指数可控制在 1.05 以内。

### 3.2 组织均匀性控制

为改善材料的组织均匀性获得高强度、高韧性

的盘条,青岛特钢对于风冷线进行升级改造,采用特殊设计的风口喷嘴配合斯太尔摩风机的“佳灵”装置,改善搭接点位置的风量分配,提高整体盘条的冷却效果,精细化控制搭接点和非搭接点冷却强度,获得性能均匀的索氏体化组织。

采用特殊设计的风口喷嘴配合斯太尔摩风机的“佳灵”装置,MT 级钢帘线用盘条 C97D2-E 整体冷却速度控制在  $22\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  左右。由于相变潜热的释放导致相变过程中盘条存在明显的温升,通过提高相变区风机的开启度,保证相变温升控制在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。采取优化工艺后明显的提高了盘条的组织均匀性。优化前后的组织如图 5 所示,由图 5 可知,优化前 C97D2-E 盘条存在少量的  $\text{Fe}_3\text{C}$  以及粗大的珠

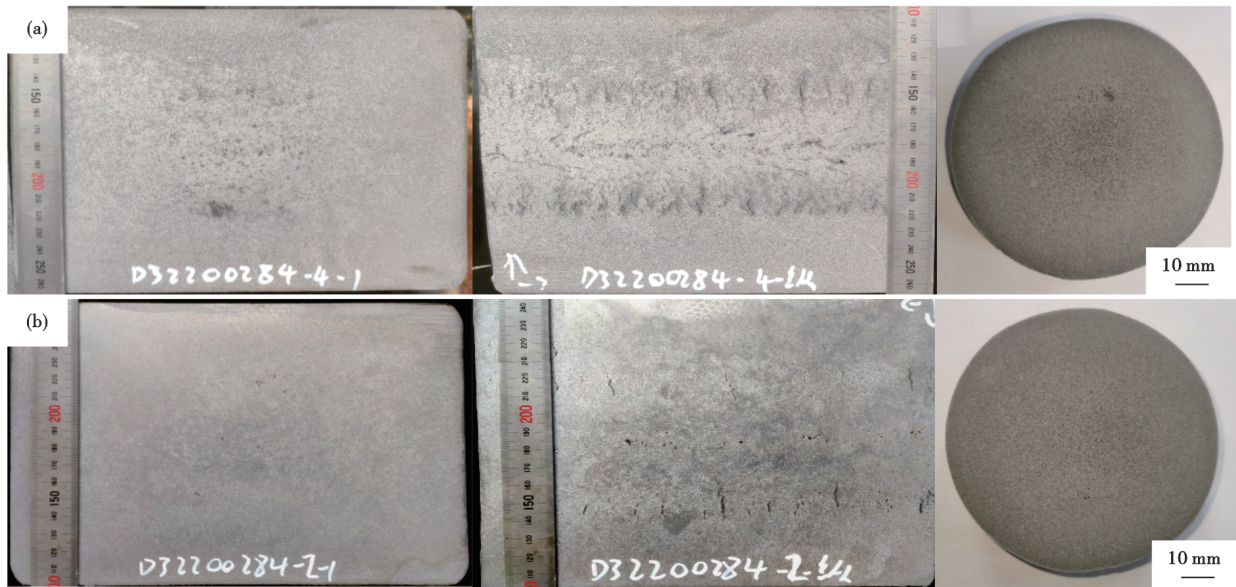


图 3 连铸坯及半成品的低倍:(a) 优化前,(b) 优化后

Fig. 3 Macrostructure of continuous casting billets and semi-finished products : (a) before optimization , (b) after optimization

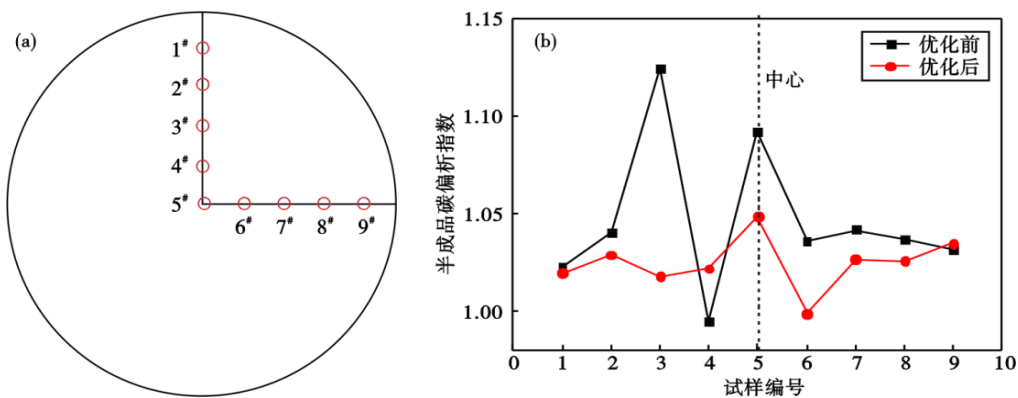


图 4  $\phi 80$  mm 半成品碳偏析指数:(a)圆钢取样示意图,(b)碳偏指数分布

Fig. 4 Carbon Segregation Index of  $\phi 80$  mm semi-finished products : (a) Sampling diagram of round steel , (b) exponential distribution of carbon bias

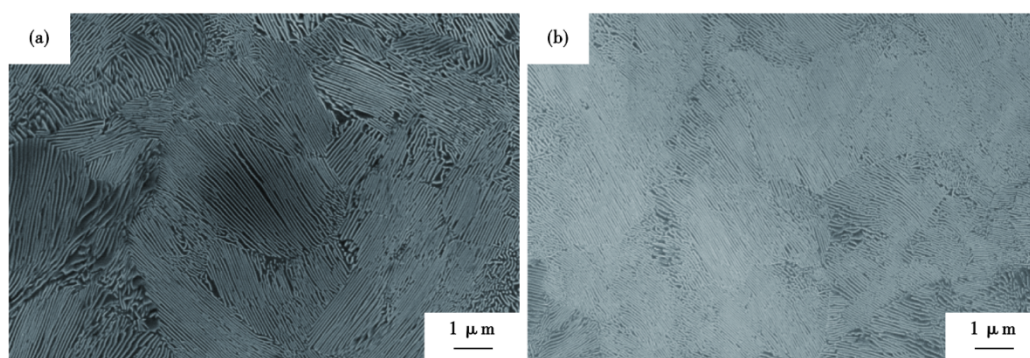


图5 盘条的显微组织对比:(a)优化前,(b)优化后

Fig. 5 Comparison of microstructure of wire rod : (a) before optimization , (b) after optimization

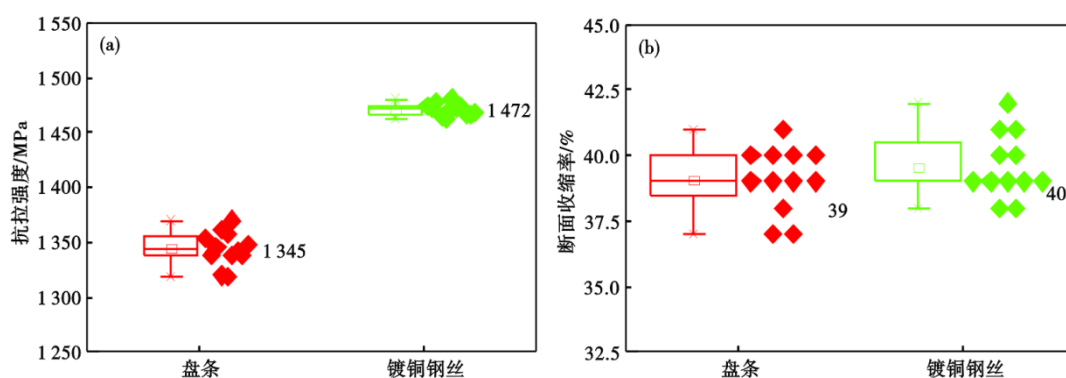


图6 钢帘线盘条和镀铜钢丝的力学性能:(a)抗拉强度,(b)断面收缩率

Fig. 6 Mechanical properties of steel cord wire rod and copper-plated steel wire : (a) tensile strength , (b) section shrinkage

表3 MT级钢帘线关键指标对比

Table 3 Comparison of key indexes of MT grade steel cord

牌号	镀铜丝规格/mm	湿拉真应变	镀铜丝抗拉强度/MPa	镀铜丝断面收缩率/%	成品钢丝抗拉强度/MPa	扭转	捻制	帘线破断力/N
C92D2-E	2.05	3.84	1 410	39.7	4 103	分层	断丝	558
C97D2-E	1.96	3.75	1 479	36.5	4 089	不分层	捻制 5 000 m	557

光体组织;优化后盘条索氏体片层间距明显减小,索氏体片更加平直,索氏体片层间距在80~110 nm,平均值为89 nm;珠光体团晶粒度更加均匀细小,珠光体团大小范围在18~25 μm,平均值为20 μm。

#### 4 生产实践和应用

钢帘线客户采用青岛特钢生产的C97D2-E盘条试验生产MT级钢帘线产品。MT级钢帘线盘条和镀铜钢丝的力学性能对比如图6所示。将MT级钢帘线用盘条C97D2-E的同圈样品和镀铜钢丝剪切成12等份,检测其力学性能。盘条的抗拉强度控制在1 345 MPa,同圈强度极差在±30 MPa,断面收缩率≥35%;镀铜丝的抗拉强度达到1 472 MPa,极差控制在±15 MPa之间,断面收缩率≥37%。

5.5 mm盘条经机械剥壳、酸洗硼化、粗中拉等工序拉拔到半成品钢丝,半成品钢丝经过热处理镀铜得到镀铜钢丝,镀铜钢丝湿拉为直径φ0.30 mm的单丝,经过捻股生产2×0.30MT钢帘线。

MT级钢帘线关键指标对比见表3。C97D2-E的半成品规格为φ1.96 mm,湿拉的真应变为3.75,MT级钢帘线成品钢丝抗拉强度达到4 089 MPa,扭转过程中无分层,捻制5 000 m无断丝,符合“MT级钢帘线的单丝强度(4 700-2 000D) MPa”的设计要求,满足2×0.30MT规格钢帘线的生产要求<sup>[3]</sup>。

#### 5 结论

(1)通过增加碳含量及Cr合金化提高帘线钢的强度的方式,设计了MT级钢帘线用盘条C97D2-E的化学成分。

(2)采用 Scheil-Gulliver 凝固微观偏析理论,建立新凝固传热模型,指导 C97D2-E 的连铸工艺,采用低过热度浇注配合合理的二冷水、拉速、电磁搅拌、轻压下区间、总压下量以及各辊的压下量等参数,成功解决了中心偏析、疏松和铸坯内裂等缺陷,优化后半成品的碳偏析指数可控制在 1.05 以内。

(3)采用特殊设计的风口喷嘴配合斯太尔摩风

机的“佳灵”装置,进行风冷工艺优化,优化后盘条索氏体片层间距明显减小,索氏体片更加平直,索氏体片层平均间距控制在 89 nm,珠光体团晶粒度更加均匀细小,珠光体团大小平均控制在 20 μm。

(4)C97D2-E成品钢丝抗拉强度达到4 089 MPa,扭转过程中无分层,捻制 5 000 m 无断丝,满足 2×0.30MT 规格钢帘线的要求。

参考文献

[1] 黄 宝,何立波,高真凤,等. 亚洲帘线钢线材生产现状及发展趋势[J]. 金属制品, 2011, 37(6): 43-47+51.

[2] 罗奕文. 高强度 ST 与 UT 钢帘线在低滚动阻力轮胎中的应用 [C]. 2012 年中国橡胶年会论文集. 北京:中国橡胶工业协会, 2012:190-192.

[3] 周志嵩,姚海东,孙 忍,等. 极高强钢帘线生产工艺探索 [J]. 金属制品, 2020, 46(2): 1-6.

[4] 张文涛,郭洛方,高永彬,等. 国内外 97 级超高强度钢帘线用盘条实物质量对比[J]. 金属制品, 2022, 48(2): 22-25.

[5] 冯运莉,陈华辉,王 成. 微 Cr 高碳钢线材的应用[J]. 金属热处理, 2005, 30(7): 28-30.

[6] 鲍如松,钱庆生,杨巍峰. 高强度胎圈钢丝新型强化方法研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 50-53.

[7] 李麦麦,袁相坤,高永彬,等. 铬合金化对 C82D2Cr 钢帘线盘条组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 101-104.

[8] 宋延成,张奇毅,陈海燕,等. Cr 对超高强帘线钢 LX82A 工艺和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 20-23.

[9] 柴国明,郭汉杰,陈希春. FGH96 高温合金的凝固过程及元素平衡分配系数的研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(1): 12-16.

[10] 李桂英,李麦麦. 钢帘线用钢 C82D2 盘条拉拔断丝成因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 30-34.

[11] 任培云. 大方坯连铸动态轻压下技术应用探究[J]. 冶金与材料, 2022, 42(4): 71-72+75.

[12] 李德军,李泽林,赵志刚,等. 单辊轻压下对高碳钢 SWRH72B 180 mm×180 mm 铸坯内部质量的影响[J]. 特殊钢, 2017, 38(6): 33-36.

欢迎订阅 2024 年《特殊钢》期刊

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183      定价:25.00 元/期、150.00 元/年      邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386      0510-80673212