



Cr 对超高强帘线钢 LX82A 工艺和力学性能的影响

宋廷成¹, 张奇毅¹, 陈海燕², 刘 海², 李炫均²

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214400; 2 江阴兴澄合金材料有限公司, 江阴 214400)

摘 要: 利用 JMatPro 软件、金相显微镜、扫描电镜、拉伸性能测试等方法, 研究了超高强帘线钢中 Cr 元素对 LX82A 盘条及拉拔钢丝组织和性能影响。结果表明: 82 级帘线钢通过降低 Mn 含量至 0.18%, 提高 Cr 含量至 0.35%, 钢的 C 曲线往右下移动, LX82A 盘条强度从 1 150 MPa 提高至 1 175 MPa, 帘线镀铜钢丝强度从 1 235 MPa 提高至 1 290 MPa, 成品钢丝强度提高 40 MPa, 成品钢丝强度超过 3 650 MPa。由于 Cr 的添加降低索氏体相变温度, 同时细化片层间距, 提高钢丝拉拔加工硬化能力, 通过 Cr 元素的设计应用, 提高钢丝拉拔硬化能力, 提高了超高强帘线钢的强度, 实现拉拔钢丝高强韧性要求。

关键词: LX82A 帘线钢; 索氏体; 拉拔硬化; 超高强度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00061

Effect of Cr on Process and Mechanical Properties of Ultra-high Strength Cord Steel LX82A

Song Yancheng¹, Zhang Qiyi¹, Chen Haiyan², Liu Hai², Li Xuanjun²

(1 Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin, 214400;

2 Jiangyin Xingcheng Alloy Materials Co., Ltd., Jiangyin, 214400)

Abstract: The effect of Cr element in ultra-high strength cord steel on the microstructure and properties of LX82A wire rod and drawn wire is studied by JMatPro software, metallographic microscope, scanning electron microscope and tensile properties test. The results show that: For the 82 grade cord steel, by reducing Mn content to 0.18% and increasing Cr content to 0.35%, the C curve moves down to the right, and the strength of LX82A wire rod increases from 1 150 MPa to 1 175 MPa, and the strength of copper plated cord steel wire increases from 1 235 MPa to 1 290 MPa. The strength of finished wire is increased by 40 Mpa, and the strength of finished wire exceeds 3 650 MPa. Because the addition of Cr reduces the soxlet phase transformation temperature and refine the spacing of the lamellae, it improves the steel wire drawing hardening ability. Through the design and application of Cr element, it improves the steel wire drawing hardening ability, improves the strength of ultra-high strength cord steel, to achieve the high strength and toughness requirements of drawing steel wire.

Key Words: LX82A Cord Steel; Sorbite; Drawing Steel Hardening; Ultra-high Strength

钢铁行业碳排放问题是全球共性问题, 为积极应对低碳排放尽早实现双碳目标, 通过增加外部循环废钢消耗量降低碳排放, 2021 年以来, 以米其林轮胎、贝卡尔特帘线为代表的欧洲知名轮胎钢丝制造企业对盘条供应商在降低碳排放、增加废钢消耗方面提出了短期目标, 为应对废钢中残余 Cr 的不确定导致钢丝性能波动问题, 针对 Cr 在钢中作用及对组织转变的影响进行研究。在过去的 10 年, 汽车轮胎用钢帘线经历了 2 700 MPa 普通强度到 3 250 MPa 高强度到 3 650 MPa 超高强度到 4 000 MPa 特高强度发展历程, 未来 5 年伴随着汽车新能源、轻量化的绿色发展需求, 轮胎用钢帘线将继续突破强度极限, 实现 4 800 MPa 以上巨高强度帘线的开发应用, 因此帘线产品的精细化、高强度仍然是近期需要

研究和突破的关键技术问题。基于上述帘线产品的现状和未来发展, 本文重点针对 Cr 元素对帘线钢组织性能影响以及对钢丝拉拔加工强化的作用进行研究, 推进大于 3 650 MPa 超高强度帘线钢的研发。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

Cr 元素在钢中应用较多, 在高碳硬线钢中 Cr 微合金化能够减小珠光体团尺寸和珠光体片间距, 提高索氏体比例, 提高钢丝抗拉强度和拉丝加工性能^[1]。而 Cr 过量添加容易造成钢中异常过冷组织生成。因此, 试验对比材料选用 Cr 在 0.45% 以下。

试验材料选用不同 Cr 含量的 82 级帘线钢, 化学

成分见表1。对比分析不同成分盘条钢的CCT曲线、组织、拉伸性能差异,以及后道拉拔钢丝的硬化行为。

表1 试验材料化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of test material %							
编号	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ceq
标准	0.80~0.85	0.15~0.30	0.15~0.60	≤0.4	≤0.015	≤0.015	0.88~0.97
1#	0.82	0.20	0.51	0.02	0.010	0.010	0.909
2#	0.82	0.20	0.51	0.10	0.012	0.008	0.925
3#	0.82	0.20	0.18	0.35	0.010	0.010	0.920

试验材料生产流程为100 t转炉-100 t LF炉精炼-连铸200 mm×200 mm-盘条轧制-控冷-成品Φ5.5 mm盘条-帘线厂机械除磷-粗拉拔-热处理-湿拉拔-帘线捻股。

1.2 试验方法

利用JMatPro软件模拟1#、2#、3#试验钢的CCT曲线,对比Cr含量提高对索氏体相变影响的差异性,利用拉伸试验机对比分析不同试样的抗拉强度、面缩差异,利用金相显微镜和扫描电镜分析1#~3#盘条试样以及帘线厂热处理钢丝、湿拉拔钢丝索氏体组织的差异性。同时跟踪对比1#、3#试样热处理钢丝在相同应变条件下的应力-应变关系。

盘条加热温度设定在 $(1100 \pm 15)^\circ\text{C}$,吐丝温度设定为 $(900 \pm 15)^\circ\text{C}$,盘条吐丝后经过斯太尔摩风冷线,通过控制风机风量开启度模拟索氏体等温转变,并对比1#~3#不同成分盘条时效后拉伸性能。同时试验跟踪帘线厂相同拉拔工艺、相同热处理条件下组织及性能的差异性。

2 试验结果与讨论

2.1 CCT曲线对比

利用JMatPro软件模拟1#、2#、3#试验钢不同Cr含量对钢的相变点影响,1#、2#、3#试验钢CCT曲线分别如图1~图3。钢中其他化学成分不变,Cr从0.02%提高至0.10%,C曲线往右下移动,鼻尖部位温度降低,相同相变时间、冷却速率条件下索氏体转变温度降低。Cr含量继续提高,C曲线往右下移动趋势更明显。为研究Cr含量进一步提高对钢丝相变及拉拔硬化的影响,将试验料在帘线厂采用相同的热处理、拉拔工艺生产,考虑试验料1#~3#碳当量平衡,将3#试验料Mn降低至0.18%,Cr提高至0.35%,确保1#~3#试验料碳当量Ceq均在0.90%~0.93%,其中Ceq计算公式根据经验设定为 $Ceq=(C+Mn/6+Cr/5)$

×100%。跟踪对比1#、3#试验样CCT曲线变化,Cr含量提高则C曲线往右移动,但由于Mn含量降低的影响,整体C曲线鼻尖部位相变温度降低不明显,基本保证与1#试样相同的转变温度。通过模拟不同Mn、Cr含量试验材料CCT曲线发现,帘线钢中Cr含量提高能够显著改变钢的索氏体相变,具体使CCT曲线往右下移动,索氏体相变时间延迟、相变温度降低^[2-3]。当进一步提高Cr含量,C曲线继续往右下移动,可能出现低温相变组织。通过Ceq公式计算,降低钢中Mn含量可以平衡Cr含量提高对相变点的影响。

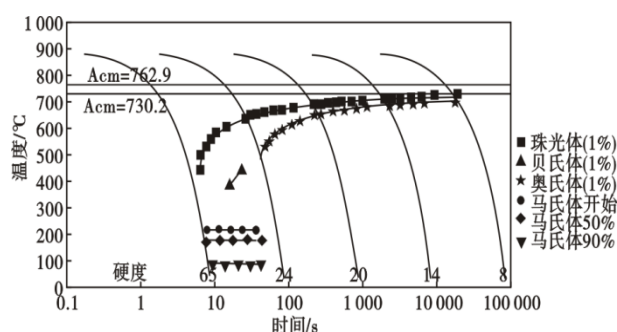


图1 1#试样 CCT曲线

Fig. 1 The CCT curve of sample 1#

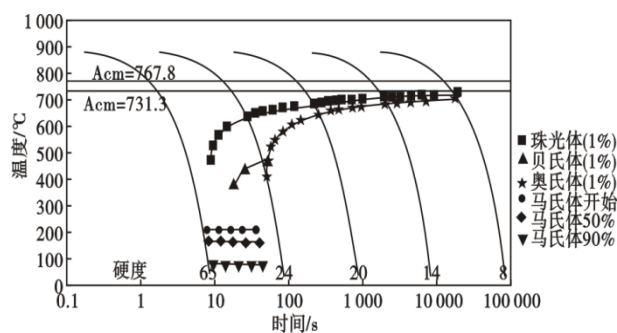


图2 2#试样 CCT曲线

Fig. 2 The CCT curve of sample 2#

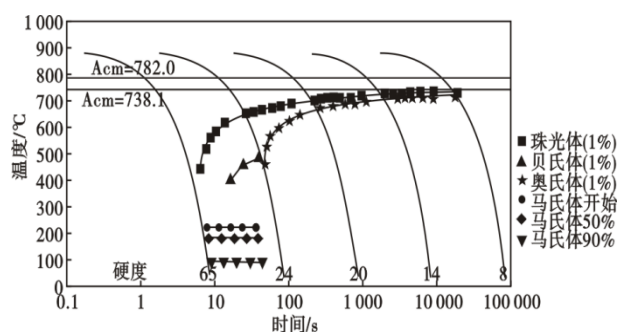


图3 3#试样 CCT曲线

Fig. 3 The CCT curve of sample 3#

2.2 盘条拉伸性能与组织

为验证钢中 Cr 提高对组织和性能的影响,将 1#、2#、3# 试验料采用相同的轧制冷却工艺轧制成 Φ 5.5 mm 盘条,具体设定轧制均热温度在 $(1100 \pm 15)^\circ\text{C}$,吐丝温度在 $(900 \pm 15)^\circ\text{C}$,盘条吐丝后经斯太尔摩风冷线冷却,通过控制风机风量开启度模拟索氏体等温转变,对时效后的试验盘条 1#、2#、3# 各取 1 圈样品,分别在盘条搭接点、中间点、及 1/2 位置处检测三个抗拉强度数据,如图 4。对比结果:尽管试验钢碳当量均控制在 0.90% ~ 0.93%,1# 盘条抗拉强度在 1150 MPa,2# 盘条随着钢中 Cr 含量的提高,抗拉强度略有提高,达到 1170 MPa,3# 在保证 C_{eq} 相同的前提下,继续提高 Cr,降低 Mn,盘条抗拉强度进一步提高至 1175 MPa。

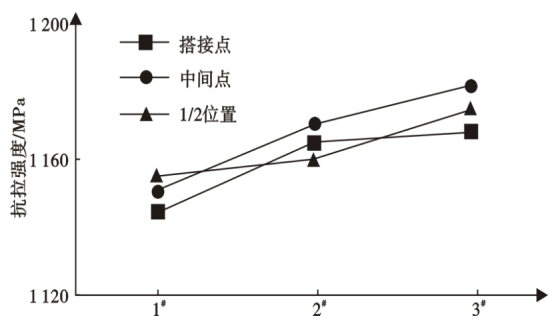


图 4 试验盘条抗拉强度对比
Fig. 4 Comparison of tensile strength of test rods

对比分析 1#、2#、3# 试验盘条的索氏体片层间距,如图 5。1# 盘条平均片层间距 $0.20 \mu\text{m}$,2# 盘条平均片层间距 $0.17 \mu\text{m}$,3# 盘条平均片层间距小于 $0.15 \mu\text{m}$,试验盘条随着 Cr 含量提高,片层间距有逐步减小趋势,这是因为 Cr 提高能够显著改变钢的 CCT 曲线,使 C 曲线往右下移动,盘条实际生产时输入相同的

冷却参数,Cr 含量高的试验盘条在线测温发现索氏体相变温度更低,而索氏体相变温度越低则片层间距越细小。对于高碳索氏体钢而言,索氏体片层间距对其抗拉强度起主要决定性作用,片层间距越小,抗拉强度越高^[4-5]。

2.3 热处理钢丝组织性能对比

将 1#、2#、3# 试验盘条在帘线厂拉拔跟踪对比热处理钢丝组织和性能。帘线厂具体加工工艺:盘条机械除鳞-粗拉拔-热处理(奥氏体化-索氏体化)-湿拉拔-帘线捻股。将 1#、2#、3# 试验盘条采用相同的工艺拉拔至中间规格,并采用相同的热处理工艺对中间规格钢丝进行索氏体化热处理后镀铜,跟踪热处理后镀铜钢丝的组织 and 抗拉强度,如图 6,1# 试验钢丝抗拉强度 1235 MPa,2# 试验钢丝抗拉强度 1280 MPa,3# 试验钢丝 1290 MPa。对比 1#、2#、3# 热处理钢丝的索氏体片层间距,如图 7,1# 钢丝索氏体片层整齐清晰,片层间距 $0.11 \mu\text{m}$,2#、3# 钢丝索氏体片层凌乱,局部珠光体团已成球化,无法清晰测量片层间距。这是因为 2#、3# 钢丝热处理过程因钢中 Cr 含量的影响,导致索氏体相变温度较低,低温相变导致渗碳体没有足够的能量驱动形成片层状珠光体,最终形成了颗粒状珠光体^[6]。

进一步验证帘线钢中 Cr 含量提高对索氏体相变影响,结合正常热处理工艺下 2#、3# 试验盘条的组织 and 抗拉强度数据,优化钢丝热处理工艺:降低钢丝冷却速率提高钢丝索氏体相变温度,最终 2#、3# 热处理钢丝抗拉强度均在正常范围,并且珠光体片层整齐,片层间距基本在 $0.09 \sim 0.13 \mu\text{m}$ 。说明 Cr 元素在索氏体相变过程中能够促进低温相变索氏体组织生成,通过降低钢丝冷却速度可以提高索氏体相变温度,得到理想的索氏体组织。

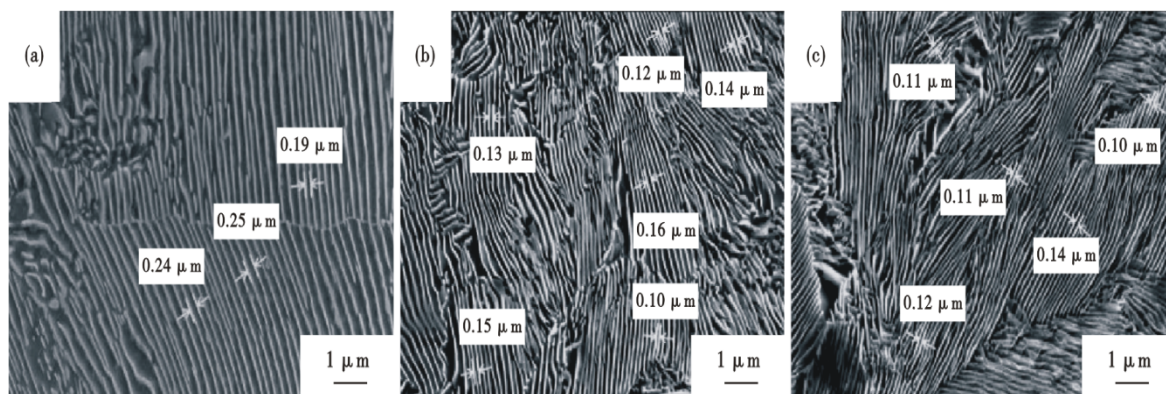


图 5 试验盘条索氏体片层间距对比:(a)1#盘条,(b)2#盘条,(c)3#盘条
Fig. 5 Comparison of sorbite lamellar spacing of test rod : (a) 1# wire rod, (b) 2# wire rod and (c) 3# wire rod

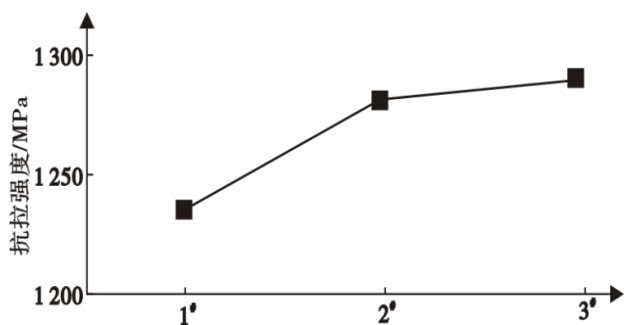


图6 镀铜钢丝抗拉强度对比

Fig. 6 Comparison of tensile strength of copper plated steel wire

2.4 拉拔硬化分析

为研究帘线钢中Cr的添加对钢丝拉拔加工硬化率的影响,将1#、3#热处理钢丝抗拉强度均控制在1250 MPa水平,采用相同的工艺拉拔,并跟踪最终湿拉单丝的抗拉强度,结果显示:相同的拉拔工艺、相同的钢丝应变条件下,3#钢丝湿拉单丝强度比1#钢丝高40 MPa,强度超过3650 MPa。继续验证Cr含量提高对加工硬化率影响,试验加大拉拔减面率提高应变变量,随着拉拔减面率加大,钢丝拉拔硬化率增高,帘线湿拉单丝强度提高。帘线钢中Cr含量提高拉拔硬化能力可以解释为:Cr的添加可以减小

珠光体片层间距,而珠光体片层间距越小,钢丝拉拔过程位错密度增加,从而使拉拔强化越显著^[7-8]。另一方面,Cr的添加可提升拉拔强化,避免钢丝承受大减面率拉拔加工使钢丝表面发热渗碳体分解,造成强度下降。

3 结论

(1)82级帘线钢通过将Mn含量从0.51%降至0.18%,Cr含量从0.02%提高至0.35%,钢的C曲线往右下移动,珠光体片层间距从0.20 μm降低至0.15 μm以下,盘条强度从1150 MPa提高至1175 MPa,Cr的添加可以降低索氏体相变温度、细化片层,提高盘条抗拉强度。

(2)提高Cr含量至0.35%,帘线镀铜钢丝的抗拉强度由1235 MPa提高至1290 MPa,镀铜钢丝的珠光体片层更细,片层间距在0.09~0.13 μm。

(3)帘线镀铜钢丝在相同抗拉强度、相同的拉拔工艺、相同的钢丝应变条件下,钢丝拉拔硬化率更高。添加了0.35%Cr的成品湿拉单丝强度比不加Cr高40 MPa,湿拉单丝强度超过3650 MPa,并且拉拔减面率越大,钢丝强度提升越显著。

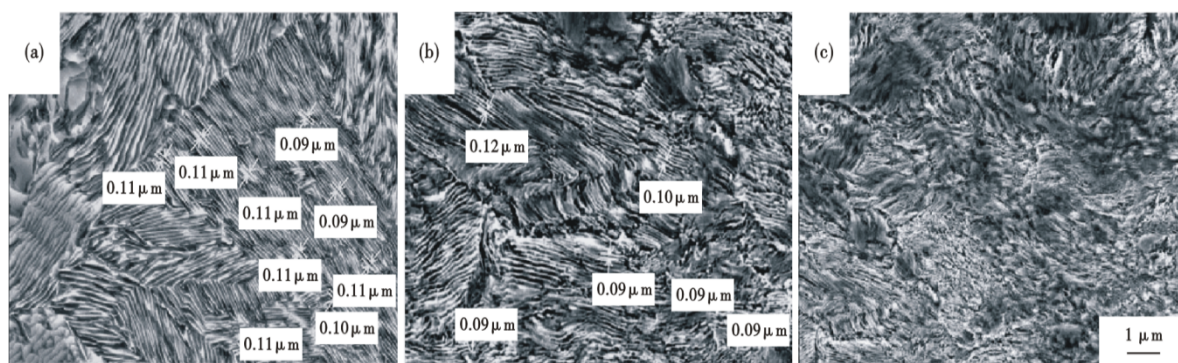


图7 试验钢丝索氏体片层间距对比:(a)1#钢丝,(b)2#钢丝,(c)3#钢丝

Fig. 7 Comparison of sorbite lamellar spacing of test wire:(a) 1# wire, (b) 2# wire, (c) 3# wire

参考文献

- [1] 余万华,高山,刘飞,等. C82DA和C92DA帘线钢的相关规律和组织对比[J]. 材料热处理学报,2014,35(11):134-138.
- [2] 赵敏,聂明芬,蔡磊. 钢丝的扭转性能分析[J]. 现代冶金,2007,35(6):10-12.
- [3] 姚利丽,周志嵩,王威,等. 超高强钢拉拔影响单丝扭转性能的相关因素[J]. 金属制品,2019,45(3):1-7.
- [4] 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.
- [5] 曹秀岭,焦小鹏,翟振华. 超高强度钢帘线的生产试制[J]. 金属制品,2010,36(5):7-10.
- [6] 贾敏,刘靖,韩静涛. 温度制度对帘线钢72A表面质量及微观组织的影响[J]. 材料热处理学报,2016,37(4):168-174.
- [7] 刘力哲,余万华,刘新鹏,等. C82DA帘线钢相变规律及动力学模型[J]. 材料热处理学报,2014,35(2):220-224.
- [8] 廖舒纶,卢立华,沈奎,等. 精轧与吐丝温度对72A帘线钢盘条组织、织构和性能的影响[J]. 特殊钢,2014,35(4):59-61.