

铬合金化对 C82D2Cr 钢帘线盘条组织和性能的影响

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

摘要:在保证 $[Mn] + [Cr]$ 含量 0.5% ~ 0.6% 前提下,将 Mn 含量由 0.50% 降低到 0.24%,Cr 含量由 0.021% 提高到 0.32%,以保证 C82D2Cr 钢淬透性,获得更高强韧性。结果表明:与 C82D2 钢 $\Phi 5.5$ mm 盘条相比,C82D2Cr 钢 $\Phi 5.5$ mm 盘条抗拉强度提高 50 MPa,断面收缩率提高 4%,索氏体片层间距降低 9.8%,珠光体团尺寸降低了 14.5%;C82D2Cr 钢不仅铁素体与渗碳体的界面处位错线明显,而且铁素体内的位错线密度增高、位错胞数量较多,可显著增加形变强化能力。经客户验证,C82D2Cr 钢盘条可以满足 $2 \times 0.30UT$ 规格钢帘线的生产要求。

关键词:铬合金化;超高强钢帘线;强韧化;珠光体团;索氏体片层间距

Effect of Chromium Alloying on Microstructure and Properties of C82D2Cr Steel Cord Wire Rod

Li Maimai, Yuan Xiangkun, Gao Yongbin, Sun Qiang, Guo Luofang, Jiang Jun
(Institute of Wire and Rod Research, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266409)

Abstract: To ensure the prerequisite of $[Mn] + [Cr]$ controlled by 0.5%-0.6%, the content of Mn is reduced from 0.50% to 0.24%, and the content of Cr is increased from 0.021% to 0.32% in order to keep hardenability and obtain higher strength and toughness of C82D2Cr steel. The results show that, compared with C82D2 steel $\Phi 5.5$ mm wire rod, the tensile strength of C82D2Cr steel $\Phi 5.5$ mm wire rod is increased by 50 MPa, the reduction of area is increased by 4%, the lamellar spacing of sorbite is decreased by 9.8%, and the size of pearlite colony is decreased by 14.5%. C82D2Cr steel not only has obvious dislocation line at the interface between ferrite and cementite, but also increases dislocation line density, and increases dislocation cells in ferrite, which can significantly increase deformation strengthening ability. The customer has verified that C82D2Cr steel rod can meet the production requirements of $2 \times 0.30UT$ steel cord.

Key Words: Chromium Alloying; Ultra High Strength Steel Cord; Strengthening and toughening; Pearlite Colony; Sorbite Lamellar Spacing

随着我国“双碳”战略目标的确立和实施,绿色低碳、节能环保成为汽车工业发展的必然趋势。更高强度的钢帘线可在满足帘布强度的情况下,减少钢帘线的用量,降低轮胎的滚动阻力,从而节省燃油,减少 CO_2 的排放。更高强度、更高疲劳寿命的钢帘线才能够满足汽车节能减排的要求,适应绿色轮胎发展方向。近年来市场上主流的钢帘线已经逐步由高强度帘线(HT)向超高强度帘线(ST)和特高强度帘线(UT)过渡^[1-4]。

钢铁材料的强化常用的方法有固溶强化、细晶强化、相变强化、沉淀析出强化和冷加工强化。而钢帘线的生产可以通过提高钢丝的初始抗拉强度和增大加工变形量,提高成品钢帘线的强度。钢丝帘线的初始抗拉强度与钢帘线盘条的化学成分以及初始组织密切相关,目前钢帘线盘条强度级别的提升主

要是依靠提高碳含量、合金化等方式。近年来关于合金化提高钢帘线的强度成为研究的热点之一^[5],相关研究表明 Cr 元素合金化高碳钢盘条可以明显改善材料组织和性能^[6-7],加 Cr 合金化能有效抑制先共析相的析出,提高索氏体化率,实现材料的高强度和韧性^[8]。降低盘条中的碳含量,增加 Cr 含量可抑制拉拔过程中渗碳体的溶解,使渗碳体的溶解量从 25% 降低至 20.7%,从而改善钢丝的扭转分层^[9]。但 Cr 合金化对钢帘线盘条组织和性能的影响以及强韧化机理研究有待进一步深入。

1 试验材料与方法

本试验在普通钢帘线盘条成分的基础上,降低 Mn 含量,适量添加 Cr 含量进行合金化。Mn 元素可以极大的降低钢的马氏体转变温度,提高钢的淬透性。Cr 元素的添加可以降低钢的临界冷却速度,提

高钢的淬透性。Cr 元素在提高淬透性方面的作用强于 Mn 元素。根据热力学计算结果,高碳钢盘条同时添加 Mn、Cr 后,材料的临界冷却速度明显偏低,淬透性偏高,斯太尔摩风冷或者水浴热处理过程极易产生马氏体等淬火组织。考虑到钢帘线中间热处理过程采用水浴热处理,对工艺的要求更加苛刻,材料的成分设计既要满足斯太尔摩风冷的要求,同时也要满足水浴热处理的要求,因此,需要控制 Mn 和 Cr 含量的总量。

本试验通过添加一定量的 Cr 同时降低 Mn 含量,既能保证材料有足够的强度,又能防止出现淬火组织。根据多次正交试验的验证,结果表明:高碳钢盘条中 [Mn] + [Cr] 的含量控制在 0.5% ~ 0.6%,材料具有最佳的转变区间。

本试验材料为 $\Phi 5.5$ mm 普通 C82D2 钢和加 Cr

帘线盘条的化学成分见表 1 所示。

钢帘线盘条的工艺流程:铁水预处理→100 t 顶底复吹转炉冶炼→100 t LF 精炼→六机六流弧形连铸机浇注(坯型 180 mm × 240 mm 电磁搅拌 + 轻压下)→加热炉加热→高压水除鳞→高速线材轧机轧制→斯太尔摩风冷。

本试验采用万能材料试验机检验时效后的盘条力学性能(抗拉强度、断面收缩率),拉伸速率 50 mm/min。试验盘条进行金相检验,采用常规金相制样,材料经过镶嵌、粗磨、细磨和抛光,采用 3% 硝酸酒精溶液腐蚀,利用金相显微镜、场发射扫描电镜、透射电子显微镜(TEM)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。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

将 C82D2 钢和 C82D2Cr 钢帘线盘条的同圈样品分别剪切成 12 等份,分别检测盘条的同圈力学性能。不同成分的钢帘线盘条的力学性能对比如图 1,与普通 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢抗拉强度提高

表 1 钢帘线盘条的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel cord wire rod/%

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr
C82D2	0.82	0.22	0.50	0.009	0.007	0.021
C82D2Cr	0.82	0.21	0.24	0.009	0.006	0.32

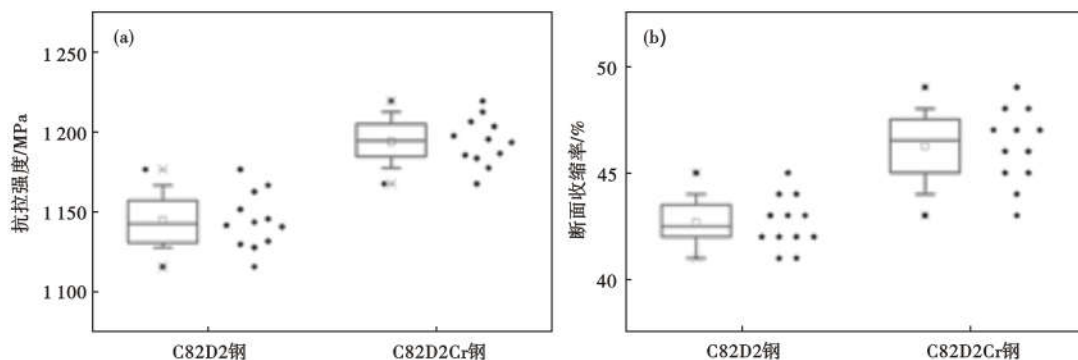


图 1 C82D2 钢和 C82D2Cr 钢 $\Phi 5.5$ mm 帘线盘条的抗拉强度(a)和断面收缩率(b)

Fig. 1 Tensile strength (a) and reduction of area (b) of C82D2 steel and C82D2Cr steel cord $\Phi 5.5$ mm wire rod

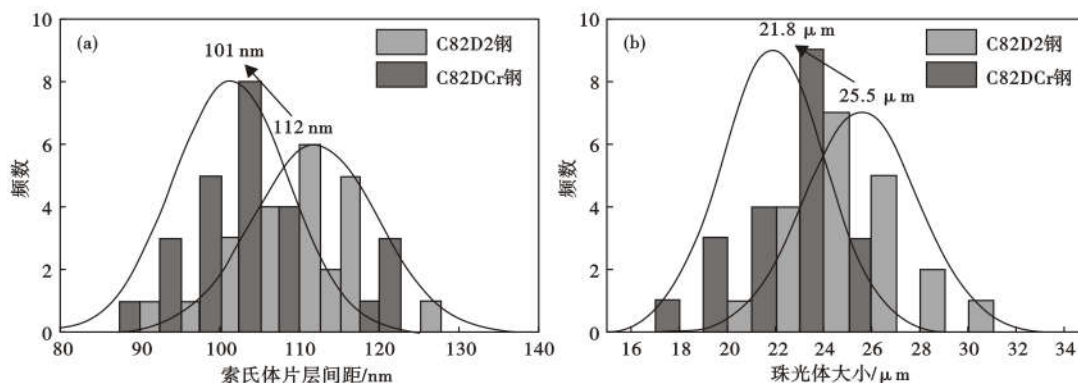


图 2 C82D2 钢和 C82D2Cr 钢 $\Phi 5.5$ mm 帘线盘条的索氏体片层间距(a)和珠光体尺寸(b)频数

Fig. 2 Frequency of sorbite lamellar spacing (a) and pearlite nodule size (b) of steel cord wire rod of C82D2 steel and C82D2Cr steel cord $\Phi 5.5$ mm

50 MPa,断面收缩率提高 4%,通过合金化后盘条的抗拉强度和断面收缩率均得到明显的提高,C82D2Cr 钢相比 C82D2 钢表现出更加优异的强韧性。

2.2 显微组织

C82D2Cr 钢与 C82D2 钢都是以索氏体为主的组织形貌,组成为索氏体 + 珠光体 + 极少量渗碳体。在盘条横截面 1/2R 的位置任选 24 个不同的视场

进行索氏体片层间距和珠光体团尺寸的测量。不同成分的钢帘线盘条的索氏体片层间距和珠光体团尺寸对比如图 2。相同的工艺下,C82D2 钢的索氏体片层间距平均 112 nm,C82D2Cr 的索氏体片层间距平均 101 nm; C82D2 钢的珠光体团尺寸平均 25.5 μm ,C82D2Cr 的珠光体团尺寸平均 21.8 μm ; 与 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢的索氏体片层间距降低 9.8%,珠光体团尺寸降低了 14.5%。

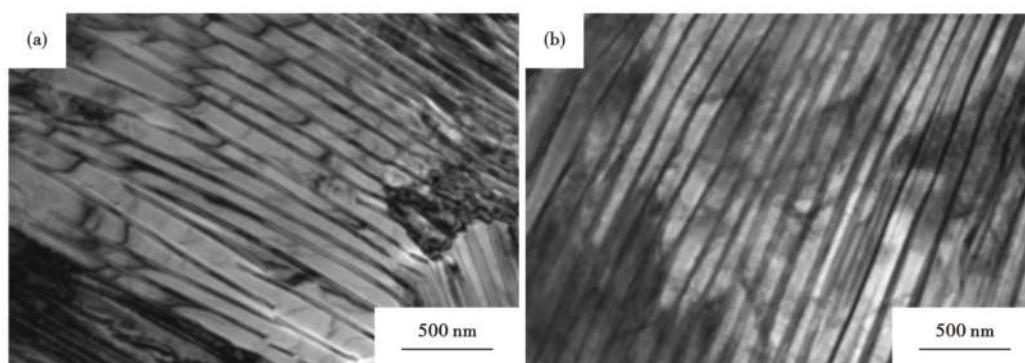


图 3 (a) C82D2 钢和(b) C82D2Cr 钢帘线盘条 TEM 显微组织形貌

Fig. 3 TEM microstructure morphology of (a) C82D2 steel and (b) C82D2Cr steel cord wire rod

两种不同成分钢帘线盘条的 TEM 显微组织形貌如图 3,可以清晰地观察到铁素体片层和渗碳体片层间隔分布的珠光体结构。C82D2 钢盘条中珠光体组织片层结构的规则性较差,渗碳体片层较短且存在明显的变形,C82D2Cr 钢盘条中片层组织则更加细小、规则、平直,且渗碳体片层长度更长。两者的显微组

织中晶界位置都可观察到少量渗碳体颗粒。相同的冷却工艺下,C82D2 钢索氏体片层间距平均为 112 nm,C82D2Cr 索氏体片层间距降低到 101 nm,C82D2Cr 钢的索氏体片层间距降低了 9.8%。由此可见铬合金化可以显著的细化晶粒和较少索氏体片层间距,提高盘条的强度和塑性,改善材料的均匀性。

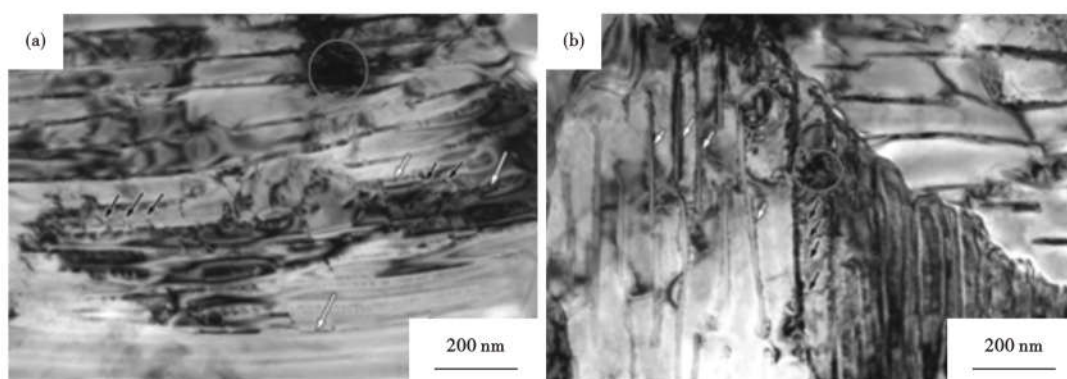


图 4 (a) C82D2 钢和(b) C82D2Cr 钢帘线盘条中位错组态

Fig. 4 Dislocations configuration in (a) C82D2 steel and (b) C82D2Cr steel cord wire rod

不同成分的钢帘线盘条中的位错组态如图 4。由热轧盘条显微组织可见,在铁素体片层内部分布着大量位错线及位错胞。位错线位于铁素体与渗碳体的界面处(白色箭头所指)以及分布于铁素体片

层内部;分布于铁素体片层内部的位错线方向与渗碳体片层方向垂直(黑色箭头);大量位错缠结形成位错胞(圆圈内)。通过两者对比可以看到:与 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢热轧盘条中不仅铁素体

与渗碳体的界面处位错线明显,而且铁素体内的位错线密度增加、位错胞数量较多。主要是由于铬元素作为强碳化物形成元素,可以降低界面处的碳原子的活度,在奥氏体转变过程中,过共析钢 Cr 元素可降低 C 元素的扩散速率。含 Cr 的渗碳体可以阻碍位错的移动,产生大量的位错线或位错胞,正是由于这些位错线和位错胞的产生,使得材料的强度明显的增加。

C82D2Cr 钢中添加的 Cr 元素大部分固溶到铁素体内,起到固溶强化的作用。少量的 Cr 元素会形成含 Cr 的碳化物颗粒,起到析出强化的作用。C82D2Cr 钢坯料在加热的过程中含 Cr 的渗碳体颗粒会阻碍奥氏体晶粒的长大,奥氏体晶粒直接影响珠光体团的大小。因此相同冷速下与 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢的珠光体团尺寸显著的减小,细晶强化既提高了材料的抗拉强度,同时也增加材料的韧性。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小,索氏体化率越高。

2.3 使用效果

客户采用 C82D2Cr 钢可用于生产更高的强度等级(UT 级)钢帘线。直径 $\Phi 5.5$ mm 的 C82D2Cr 钢盘条经过预处理、粗中拉等工序拉拔到 $\Phi 1.94$ mm 半成品钢丝,半成品钢丝经过热处理镀铜得到 $\Phi 1.94$ mm 的镀铜丝,镀铜丝湿拉为直径 $\Phi 0.30$ mm 的单丝,经过捻股生产 2×0.30 UT 钢帘线。与相同工艺下的 C82D2 钢相比,2 种牌号的钢帘线参数指标对比见表 2 所示。

与 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢的镀铜丝的抗拉

表 2 C82D2 钢和 C82D2Cr 钢帘线关键指标

Table 2 Key indexes of C82D2 steel and C82D2Cr steel cord

钢号	镀铜丝抗拉强度/MPa	镀铜丝断面收缩率/%	捻股断丝率指数/%	成品钢丝抗拉强度/MPa
C82D2	1 248	43.5	100	3 480
C82D2Cr	1 287	43.9	49	3 850

强度和断面收缩率均有提高,C82D2Cr 钢的捻制断丝率指数 49%,断丝率指数不到 C82D2 钢的一半。成品钢丝抗拉强度达到 3 850 MPa,按照《ISO17832-2018 子午线轮胎用钢帘线国际标准》,C82D2Cr 钢盘条可以满足 2×0.30 UT 规格钢帘线的生产要求^[10]。

3 结论

(1)在保证[Mn] + [Cr]含量 0.5% ~ 0.6% 前提下,将 Mn 含量由 0.50% 降低到 0.24%,Cr 含量由 0.021% 提高到 0.32%,C82D2Cr 钢保证了材料淬透性,获得了更高强韧性。

(2)与普通 C82D2 钢相比,C82D2Cr 钢抗拉强度提高 50 MPa,面缩率提高 4%,索氏体片层间距降低 9.8%,珠光体团尺寸降低了 14.5%。

(3)添加 Cr 可以显著的细化珠光体团的尺寸和减小索氏体片层间距,Cr 元素添加可以使得索氏体片层组织更加细小、规则、平直,且渗碳体片层长度更长,显著改善组织的均匀性,提高材料的强韧性。

(4)C82D2Cr 钢盘条中不仅铁素体与渗碳体的界面处位错线明显,而且铁素体内的位错线密度增高、位错胞数量较多,可显著增加形变强化能力。

参考文献

- [1] 武红彬,邱杰.超高强度钢帘线钢丝热处理工艺探索[J].金属制品,2022,48(2):16-21.
- [2] 邢献强,李居强.钢帘线用超高强度钢丝的研究进展[J].金属制品,1999,25(6):7-10.
- [3] 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.
- [4] 王梦蛟.绿色轮胎的发展及其推广应用[J].橡胶工业,2018,65(1):105-112.
- [5] 沈奎,江卓俊,于学森,等.微合金化钒钨对高碳钢组织转变影响[J].特殊钢,2019,40(4):62-65.
- [6] 周志嵩,姚海东,孙忍,等.极高强度钢帘线生产工艺探索[J].金属制品,2020,46(2):1-6.
- [7] 韦轶华,李松,白志玲,等.82B 钢的微合金化-相变控制与生产实践[J].特殊钢,2019,40(6):28-33.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 周志嵩,徐方流,李玉峰,等.钢丝帘线强度发展方向与盘条合金化[J].轮胎工业,2022(4):195-199.