

冷拉超/特高强度珠光体钢丝的工艺性能及强化机理

倪自飞^{1,2}, 刘 祥^{1,2}

(1.江苏兴达帘线股份有限公司, 江苏 泰州 225721; 2.江苏省结构与功能金属复合材料重点实验室, 江苏 泰州 225721)

摘要:分析高强度钢丝的强化机理及冷变形钢丝韧性下降的原因。在对超/特高强度钢丝帘线用92C, 97C和102C盘条大变形直接干式拉拔、钢丝时效处理及湿式拉拔研究的基础上, 提出了常规湿式拉拔工序后加校直器工艺, 在确保强度的基础上, 有效地控制了湿式拉拔单丝的扭转分层, 为超/特高强度钢丝帘线的开发奠定了基础。

关键词: 钢丝; 强化机理; 超/特高强度; 韧性; 拉拔; 工艺

中图分类号: TQ330.38⁺9

文献标志码: B

文章编号: 1006-8171(2019)08-0487-03

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.08.0487

随着汽车工业和高速公路的发展, 国家对超载的控制以及人们对子午线轮胎性能的认识不断提高, 国内各轮胎公司都在努力开发和生产高性能、低成本轮胎。众所周知, 汽车行驶过程中能量会被各种阻力所消耗, 其中约20%的能量被轮胎滚动阻力所消耗。自2012年年底开始执行的EC 661/2009和EC1 222/2009两项欧盟标签法对轮胎滚动阻力、湿路面抓着力和道路通过噪声提出明确要求, 由此进一步提高了对钢丝帘线质量的要求^[1]。通过采用超/特高强度钢丝帘线, 可在确保轮胎强度下减小钢丝帘线和胶料的用量, 实现减小轮胎的自身质量, 从而降低轮胎的滚动阻力, 达到节省油耗并减少二氧化碳排放的目的^[2-3]。

目前国内外对于中碳及碳质量分数为0.008左右的冷拉拔钢丝的研究很多, 但对于碳质量分数达到0.009 2(92C), 0.009 7(97C)和0.010 2(102C)的超/特高强度钢丝的研究不多。

本工作研究高碳超/特高强度钢丝拉拔过程中的工艺性能及强化机理, 为开发新一代超/特高强度钢丝帘线奠定理论基础。

1 超/特高强度钢丝强化机理

超/特高强度钢丝的工业化生产过程较复杂,

影响钢丝组织和性能的因素也很多。提高钢丝强度主要有以下途径。

(1) 增大拉拔时的总压缩率。从理论上讲, 只要增大钢丝冷拔时的总压缩率, 就可以得到高强度的钢丝, 但在实际操作中会受到多种因素的制约, 难度很大。例如钢丝被冷拔到一定程度之后, 断丝率就会很高, 使生产无法正常进行, 未断钢丝的塑性和韧性也会逐渐下降, 引发捻制时钢丝出现断丝^[4-7]。

(2) 增大碳含量。碳含量较大的过共析钢丝具有的层片状珠光体组织既具有较高的加工硬化率, 拉拔变形后可获得更高的强度, 同时具有良好的塑性, 在大变形量的拉拔过程中不易断裂。目前我公司已开发从碳质量分数为0.007 2(72C)和0.008 2(82C)的普通强度亚共析钢丝和高强共析钢丝提升到碳质量分数为0.009 2(92C), 0.009 7(97C)和0.010 2(102C)的超/特高强度过共析钢丝。

对于超/特高强度过共析钢丝, 其强化机理有很多, 如细晶强化、弥散强化、过剩相强化和固溶强化等^[8-10]。

(1) 细晶强化。当应变变量较小时, 珠光体钢丝屈服强度(σ_y)与晶粒直径(d)的关系满足Hall-Petch关系:

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

式中, σ_0 和 K 是与材料有关的常数。在晶粒细化阶段, 细化晶粒可使晶界增加, 位错运动受阻, 缠结形成位错胞, 且渗碳体片层的弯曲也会阻碍位错

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140584)

作者简介: 倪自飞(1980—), 男, 江苏盐城人, 江苏兴达帘线股份有限公司高级工程师, 博士, 从事钢丝帘线的研究与开发工作。

E-mail: jsnzf@163.com

运动,材料的抗拉强度随着位错密度的增大而迅速提高,但由于晶粒细化,晶粒间易协调变形,使得塑性降低较小。

(2)位错强化。应变量大时,位错产生大量堆积,应力集中较为明显,会切断渗碳体片层,从而使渗碳体发生断裂,同时位错密度也将减小,但此时伴随着纳米晶的出现。随着应变量的增大,渗碳体发生溶解,纳米晶的数量增大,这种非晶态和弥散分布的渗碳体颗粒对位错运动产生阻碍作用,从而提高钢丝强度。因此抗拉强度不会随着位错密度的减小而降低。

(3)残余应力强化。由于铁素体相和渗碳体相具有不同的晶体结构和弹性模量,在两相共同变形过程中,将产生一定的残余应力,从而阻碍位错运动,使材料得以强化。

(4)间隙固溶强化。渗碳体溶解之后,由于拉拔过程中温升的作用,碳原子将扩散溶入铁素体间隙中,对钢丝产生间隙固溶强化作用。

大应变珠光体钢丝变形过程中产生的高强度并不是上述几种强化机制的简单叠加,而是相互协同作用的结果。当应变量大到一定程度时,铁素体和渗碳体都已基本转向拉拔方向。当材料拉拔过程中共同发生塑性变形时,由于铁素体和渗碳体力学性能不同,渗碳体极易发生颈缩而断裂,断裂的渗碳体将不均匀地分布在铁素体基体中,使铁素体得以强化。随着应变量的增大,逐渐被强化的铁素体和渗碳体的力学性能接近,最终两相材料可共同均匀地发生变形。

2 超/特高强度钢丝韧性下降原因分析

超/特高强度钢丝不仅在工业应用上很重要,而且也是对钢丝极限强度的追求。超/特高强度钢丝的韧性十分重要。若韧性低,在捻制变形初期就会产生被称为分层的沿拉丝方向的纵裂,冷拔大变形高强度钢丝的扭转分层已经成为制约高碳钢丝高强度化的最大障碍。只有查明阻碍超/特高强度钢丝韧性下降的机制,才能确立控制技术。

大量试验研究^[4,11-12]表明,无论是干式拉拔的大直径钢丝、湿式拉拔的小直径钢丝或时效处理钢丝,只要钢丝铁素体中的最高碳质量分数超过0.002 2,钢丝就会发生扭转分层现象,而使铁素

体相中碳浓度提高的碳原子主要来自分解的渗碳体。因此,可以认为如果渗碳体分解且超过一定临界量,则冷拔珠光体钢丝就易发生扭转分层,可见渗碳体分解对降低钢丝的韧性起着重要的作用。

在此根据渗碳体分解的不均匀性,分析渗碳体分解与扭转性能的关系。渗碳体分解产生的碳偏析存在于位错中并对位错产生粘着作用,冷拔珠光体钢丝的抗拉强度因碳的位错粘着而强化,因此不均匀渗碳体的分解意味着致使微观强度的不均匀性增加。而且,随着拉拔变形量的增大,珠光体层间距的分布幅度扩大,这也加剧了微观强度的不均匀性。强度不均匀性增加后的钢丝,由于在扭转试验中扭转变形难以传播,容易集中在局部,因此可以认为,在强度低的区域内,即渗碳体分解少的区域,扭转变形集中会发生开裂。

3 超/特高强度钢丝帘线用钢丝的韧性改善工艺

高等级92C,97C和102C盘条的化学成分如表1所示。

表1 不同等级盘条中各化学成分质量分数

盘条	组分质量分数×10 ²				
	碳	硅	锰	磷	硫
92C	0.918	0.21	0.40	0.014	0.010
97C	0.935	0.19	0.32	0.015	0.010
102C	1.026	0.19	0.31	0.015	0.011

冷拔大变形高强度钢丝的扭转分层已经成为制约高碳钢丝高强度化的最大障碍。扭转试验断口主要有两种形状,第1种为平直断口[见图1(a)],对于剪切强度低于拉伸强度的韧性材料,断裂是在最大剪切应力方向上,即试样从最外层沿横截面发生剪断产生平直断口,断口平滑且垂直于线材轴线(或稍微倾斜)。而对于拉伸强度低于剪切强度的脆性材料,其断裂是由试样的最外层沿与轴线约成45°倾角的螺旋形曲面发生拉断而产生的,形成螺旋断口,即分层断口[见图1(b)]。无论断口呈什么形貌,分层断口试样外表面全长或大部分长度上都有螺旋形裂纹。

湿式拉拔工艺中,主要考虑总压缩率与部分压缩率的配合问题。在总压缩率一定的情况下,部分压缩率和拉拔道次对湿拉单丝强度及其韧性和塑性的影响十分显著,要在满足高抗拉强度的情况下,确保湿拉单丝不分层。

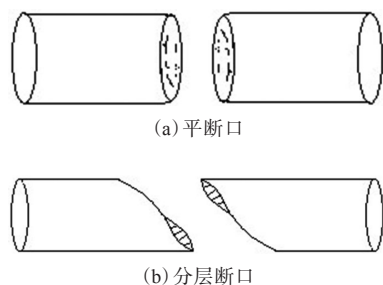


图1 扭转断面示意

校直器通过对单丝表面施加小变形,能够将单丝表面的拉应力变为压应力,明显改善单丝的扭转性能,提高扭转值,有效抑制湿拉单丝分层现象。因此在常规拉拔工艺后加校直器,可解决单丝性能不稳定问题,提高单丝的综合力学性能,保证生产的稳定性。常规工艺与常规工艺加校直器工艺的单丝性能对比见表2。

表2 不同加工工艺单丝性能对比

项 目	92C	97C	102C
直径/mm	0.35	0.33	0.27
常规工艺			
抗拉强度/MPa	3 629	3 568	3 740
扭转/次	47	49	47
是否分层	不稳定	不稳定	不稳定
加校直器工艺			
抗拉强度/MPa	3 556	3 556	3 652
扭转/次	55	58	58
是否分层	否	否	否

由表2可以看出,加校直器后,单丝的扭转有很大提高,即韧性得到有效改善,同时很好地抑制了扭转分层现象,但抗拉强度略有下降。

4 结语

超/特高强度钢丝帘线在轮胎中的应用不仅能够减小钢丝帘线用量,同时能够降低胶料的消耗量,从而降低轮胎的滚动阻力,为低滚动阻力绿色轮胎的设计创造了更广阔的空间。在常规湿式

拉拔工序后加校直器工艺能显著改善超/特高强度钢丝湿拉单丝扭转性能,有效控制湿式拉拔单丝的扭转分层,突破了钢丝帘线单丝因强度进一步提高而导致的扭转分层的瓶颈,为超/特高强度钢丝帘线的开发奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘晓芳, 隋海涛, 丁宁, 等. 0.25+6+12×0.225ST钢丝帘线在全钢载重子午线轮胎胎体中的应用[J]. 轮胎工业, 2018, 38(2): 102-104.
- [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[A]. 中国橡胶年会. 青岛: 2012: 190-192.
- [4] Toshimi Tarui, Naoki Maruyama, Jun Takahashi, et al. Microstructure Control and Strengthening of High-carbon Steel Wires[R]. Nippon Steel Techniacal Report, 2005: 56-61.
- [5] Hitoshi Tashiro, Seiki Nishida, Toshimi Tarui, et al. Ultra High Tensile Strength Steel Cord[R]. Nippon Steel Techniacal Report, 1999: 38-43.
- [6] Michael Zelin. Microstructure Evolution in Pearlitic Steels During Wire Drawing[J]. Acta Materialia, 2002, 50(17): 4431-4447.
- [7] Yasuhiro Oki, Nobuhiko Ibaraki, Kenji Ochiai. Microstructure Influence on Ultra High Tensile Steel Cord Fliament Delamination[J]. Kobelco Technology Review, 2002, 25(8): 35-38.
- [8] 宋洪武, 陈岩, 程明, 等. 异种金属层状复合材料累积叠轧工艺的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 10(25): 10-14.
- [9] 陈剑锋, 武高辉, 孙东立, 等. 金属复合材料的强化机制[J]. 航空材料学报, 2002(2): 49-52.
- [10] Furukawa M, Horita Z, Zhilyaev A P, et al. Developing Ultra-fine-grained Microstructure Through the Use of Severe Plastical Deformation[J]. Material Science Forum, 2003, 426/423: 2631-2636.
- [11] Hono K, Ohnuma M, Murayama M. Cementite Decomposition in Heavily Drawn Pearlite Steel Wire[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(6): 977-983.
- [12] Ohsaki S, Hono K, Hidaka H, et al. Characterization of Nanocrystalline Ferrite produced by Mechanical Milling of Pearlitic Steel[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(1): 271-276.

收稿日期: 2019-04-03

欢迎在《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》杂志上刊登广告