

文章编号:1673-9981(2010)01-0019-04

# 冷拔钢丝残余应力的研究综述

张文超, 陈文琳

(合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**综述了近年来对冷拔钢丝残余应力的研究状况,阐述了残余应力的形成机理及对冷拔钢丝性能的影响,并重点介绍了衍射法和有限元法在计算冷拔钢丝残余应力中的应用。

**关键词:**冷拔钢丝; 残余应力; 形成机理; X射线衍射; 有限元模拟

**中图分类号:** TG356.4      **文献标识码:** A

冷拔后的钢丝不但强度提高而且仍保持一定的塑性和韧性。将高碳珠光体钢进行拉拔加工强化而得到的高碳钢丝(钢琴钢丝),在大批量生产的钢种中,是强度最高的材料<sup>[1]</sup>。冷拔钢丝凭借其优异的性能广泛用于煤炭、矿山、冶金、机械、建筑、交通等领域,在工业生产中占有很重要的地位。

随着制造工艺的技术进步,冷拔钢丝在高强度化方面取得了很大的进展。20世纪70年代,轮胎钢帘线的强度约为2800 MPa,通过控制线材中的夹杂物及减少中心偏析,到80年代,钢帘线的强度提高到了3400 MPa。2006年,强度为4000 MPa的钢帘线已实现工业化生产,目前,正在开发4500~5000 MPa级的轮胎钢帘线<sup>[3]</sup>。

钢丝在冷拉拔的过程中会发生不均匀的变形,在材料的内部产生了附加应力,并以残余应力的形式存在于钢丝中。残余应力及其分布状态对钢丝的性能和产品尺寸的稳定性影响较大。冷拔钢丝在实际应用中出现的应力腐蚀及疲劳断裂、抗力下降等,均与其残余应力有关。

保持平衡的应力,它是由材料发生不均匀弹塑性变形所产生的。钢丝拉拔时在模孔中的变形通常是不均匀的,因此,冷拔钢丝会产生残余拉应力和残余压应力,且二者在钢丝内部保持平衡。

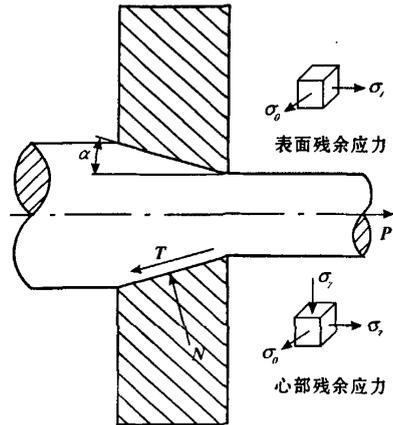


图1 冷拔钢丝残余应力状态

Fig. 1 Residual stress state of cold-drawn wire

## 1 冷拔钢丝残余应力的形成机理

根据冷拔时残余应力的性质不同,残余应力可分为拉应力和压应力。残余应力是在无任何工作载荷作用的情况下存在于构件内部且在整个构件内部

钢丝的受力分析及应力状态如图1所示,钢丝在拉力 $P$ 和模孔壁反作用力 $N$ 的共同作用下产生了塑性变形,钢丝的直径减小并沿轴向伸长。由钢丝和模具的相对运动而产生的外摩擦力 $T$ ,其方向与钢丝的运动方向相反,并在钢丝与模具接触面的切

收稿日期:2009-03-30

作者简介:张文超(1983—),男,河南驻马店人,硕士研究生。

线方向上. 拉拔时  $P$  和  $N$  均作用于变形金属的每个质点上, 而  $T$  主要作用在与模具接触的变形金属的表面, 因此, 越靠近中心轴线, 外摩擦力的影响越弱, 甚至为零.

由于摩擦力  $T$  的影响是从表层至中心逐渐减弱的, 所以在钢丝横截面上相邻的两层金属中, 内层金属轴向的流动速度总比外层的快, 又由于受模孔角度  $\alpha$  的影响, 表层金属进入变形区时会产生弯曲变形, 且越靠近外层, 弯曲变形越大, 使表层金属的变形流动的过程比内层的要长, 即在同一变形速度下, 表层金属的流动落后于内层. 从而在表层产生拉应力, 弹性失效后, 在拉出模具后钢丝表面受残余拉应力的作用. 由于钢丝是一个整体, 拉拔时其内外层是同时通过模孔的, 因而在心部会产生与表层平衡的残余压应力<sup>[4]</sup>. 由图 1 可见, 拉拔后钢丝的心部在轴向、径向及周向均存在残余压应力, 而钢丝的表面在轴向和周向均存在残余拉应力, 径向的残余拉应力为零.

## 2 研究冷拔钢丝残余应力的方法

对钢丝残余应力的研究主要是对其在横截面上由表层至中心分布状况的研究. 测量钢丝残余应力的方法有机械释放测量法和非破坏性无损物理测量法两种. 机械释放测量法是将具有残余应力的部件从构件中分离或切割出来使应力释放, 测量其应变的变化求出残余应力. 主要包括钻孔法、盲孔法、取条法、切槽法和剥层法等. 非破坏性无损测量法, 包括 X 射线衍射法、中子衍射法、磁性法、超声波法和电子散斑干涉法等<sup>[5]</sup>. 常用的钢丝残余应力测试方法主要有钻孔法、切槽法及衍射法等, 而将有限元模拟法与物理实测相结合是研究钢丝残余应力分布的新方法.

### 2.1 衍射法

衍射法主要包括 X 射线衍射法、中子衍射法和同步衍射法. 其中 X 射线衍射法的应用最广泛, 其优点是可以测量出应力的绝对值. 用 X 射线衍射法测量应力的基本原理是, 一定的应力状态所引起的材料的晶格应变与材料的宏观应变是一致的. 由 X 射线对晶体晶格的衍射所发生的干涉, 可求出晶格的晶面间距, 即晶格应变. 宏观应变可根据材料的弹性力学求得, 因此, 由晶格应变可推知材料的宏观应

力. 图 2 为采用 X 射线衍射法测量钢丝残余应力的坐标系,  $N_{hkl}$  是衍射晶面法线,  $\psi$  是衍射晶面法线与钢丝径向之间的夹角;  $\varphi$  为所测量的应力与轴向之间的夹角.  $X, Y, Z$  分别为钢丝的轴向, 周向和径向. 利用 X 射线测量晶面间距的变化, 根据式 (1) 可计算出某一方向的应力<sup>[6]</sup>.

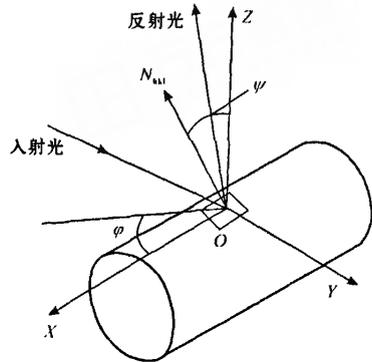


图 2 钢丝 X 射线衍射的参考坐标系

Fig. 2 Reference coordinate system of X-ray diffraction

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)d_0} \times \frac{\partial d_{\varphi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (1)$$

式(1)中  $E$  为材料的弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $d_{\varphi}$  为  $(hkl)$  晶面有弹性应变时的晶面间距;  $d_0$  为无应力状态下的晶面间距.

由于 X 射线的穿透深度极浅, 无法测定钢丝从心部到表面的残余应力变化, 因而不能分析残余应力的变化对钢丝性能的影响. 为了测定随钢丝径向深度而变化的应力梯度, Willems 等人采用化学腐蚀工艺对高碳钢钢丝沿径向进行逐层剥蚀, 再利用 X 射线衍射法测量钢丝从表面到心部的残余应力, 得到钢丝残余应力沿轴向、径向及周向的分布曲线<sup>[7]</sup>. F. Yang 等人利用逐层剥蚀技术快速测量了钢丝中铁素体相的残余应力在周向、轴向和径向的分布状态及规律. 测量结果表明, 周向的残余应力分布特征是从表面到心部呈一定的梯度变化, 由拉应力过渡到压应力; 轴向的残余应力随钢丝径向深度的分布特征与周向的分布规律相似, 即心部为压应力状态, 表面为拉应力状态, 但数值比周向应力大. 由于钢丝心部受压应力作用, 又由于边界条件及应力平衡的限制, 靠近表面的径向应力逐渐减小至零<sup>[8]</sup>.

## 2.2 有限元法

随着计算机和数值分析技术的发展,利用弹塑性有限元方法计算钢丝冷拔时产生的残余应力取得了丰富的成果.对冷拔钢丝进行有限元数值模拟时,应选取合适的模型及正确的边界条件来建立有限元模型. Henrik 对冷拔钢丝进行了有限元模拟,结合各向同性的塑性变形材料假设,模拟了钢丝在冷拉拔过程中工作带对残余应力的影响,以不同压缩率、模角、定径区形状的正交实验的结果,分析了不同几何形状定径区的冷拔钢丝残余应力.图3为100Cr6钢丝在拉拔速度为1 m/s、道次压缩率 $r=4\%$ 、模具工作锥角 $2\alpha=14^\circ$ 的条件下,在模具的定径区形状分别为圆柱体、 $0.5^\circ$ 及 $1^\circ$ 的圆锥体的钢丝的残余应力<sup>[9]</sup>.由图3可见,不同形状的定径区钢丝轴向的残余应力是不同的.定径区为圆柱体时,残余应力从心部的 $-400$  MPa上升到 $600$  MPa以上.定径区为圆锥体时,随着锥度的增大,越接近钢丝的表面,残余应力值下降得越快.当定径区为 $1^\circ$ 的圆锥体时,残余应力从峰值 $300$  MPa降低到约 $-300$  MPa.由此可见,圆柱形的工作带会造成较大的轴向残余拉应力,而带有一定锥度的工作带则会降低拉应力甚至呈压应力. Atienza 等人<sup>[10]</sup>对冷拔钢丝进行有限元模拟时,还考虑了拉拔前材料已存在一定的晶体择优取向,即织构.建立各向异性的材料模型,选择 Hill 宏观唯象模型,另外, He 等人<sup>[11]</sup>结合取向分布函数,建立了包含织构参数的钢丝拉拔过程有限元模型. X 射线衍射测量结果表明,冷拔钢丝残余应力有限元模拟结果与实际值更为接近.

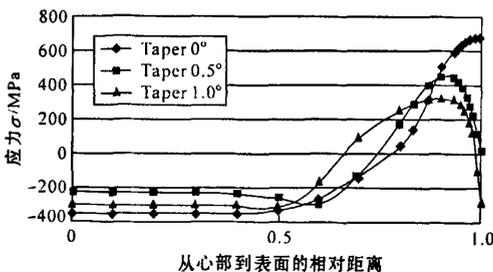


图3 不同锥度工作带下钢丝的轴向残余应力

Fig.3 Axial residual stress of different taper working zone

有限元法作为一种数值分析方法,将钢丝拉拔过程中连续变化的力学问题转换为离散的应力模型来反映冷拔钢丝残余应力变化的趋势.数值模拟要

与试验研究结合起来.若对材料变形行为的描述准确,则模拟的精度较高,可为实现冷拔钢丝残余应力的预测和控制提供理论基础.同样,以模拟结果为依据,可优化生产过程中的工艺参数,保证钢丝的成品质量.

## 3 残余应力对冷拔钢丝性能的影响

影响钢丝性能的因素有钢的化学成分、内部夹杂、冶炼工艺、热处理后的力学性能与金相显微组织、拉拔时的升温、润滑、冷却条件、拉拔速度、总压缩率和各道次压缩率的分配以及钢丝的表面状况等,钢丝经冷拉拔后出现残余应力已被大量的理论计算和实验测量所证实<sup>[7-14]</sup>.残余应力会使钢丝在横截面上的机械性能不均匀,当钢丝受到外力作用时,外力与残余应力相互作用,使钢丝局部呈现塑性变形,截面内应力重新分配;当外力作用去除后,整个钢丝由于内部残余应力的作用将发生形变,从而引起产品尺寸及形状的变化.残余应力的状态及其分布规律同样影响钢丝的使用性能<sup>[12]</sup>.冷拔钢丝的应力松弛行为与其冷拔后表面残余拉应力的值密切相关, Atienza 等人证明,当表面残余拉应力为 $240$  MPa时,200 h后,应力松弛的幅度为 $(10.6 \pm 0.2)$  MPa,当拉应力为 $210$  MPa时,应力松弛幅度 $(9.6 \pm 0.2)$  MPa,当拉应力为 $146$  MPa时,应力松弛幅度为 $(7.3 \pm 0.2)$  MPa.由此可见,拉应力的数值越大,其对应的应力松弛幅度就越大<sup>[13]</sup>.残余拉应力还会使钢丝的屈服强度降低,但对钢丝的抗拉强度几乎没影响,所以表面残余拉应力的值越大, $\sigma_{0.2}/\sigma_{max}$ 的比值就越小<sup>[14]</sup>.同时,由于残余应力的存在,增大了钢丝的氢致断裂(HAC)和应力腐蚀开裂(SCC)及疲劳失效的倾向<sup>[15-17]</sup>.

冷拔钢丝存在残余应力会对钢丝机械性能尤其是使用性能产生不利影响,通过增加一道低面收缩率(1%)的拉拔形变、形变热处理及表面处理等工艺<sup>[12-15,18]</sup>,可使钢丝表面的残余拉应力和应力的分布梯度均相应地减小,同时保持钢丝原有的强度不变,减少残余应力对钢丝的危害,稳定钢丝的性能.

## 4 结语

对冷拔钢丝残余应力的研究是目前高强度钢丝研究领域的一个重要课题,将实验测量和数值模拟

相结合,把测量中影响残余应力的因素作为模型参数用于有限元模拟中,通过归纳比较,建立正确的有限元模型.分析冷拔钢丝残余应力的形成机理,实现对残余应力的准确测量,为控制冷拔钢丝的残余应力提供理论依据,指导生产,优化工艺参数,保证钢丝的力学性能和使用性能.

#### 参考文献:

- [1] 董剑,王冰,宋新香.高碳高强度钢丝的最近进展[J].国外金属热处理,2000,21(3):3-5.
- [2] 张红田.中低碳钢丝拉拔断裂影响因素分析及研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.
- [3] 肖英龙.提高轮胎钢帘线的强度[J].金属制品,2007,33(5):49-52.
- [4] 何吉林.钢丝生产[M].北京:兵器工业出版社,2001:111-114.
- [5] 林丽华,陈立功,顾明元.球面压痕测残余应力试验方法研究[J].机械强度,1998,20(4):303-306,316.
- [6] 丘利,胡玉和.X射线衍射技术及设备[M].北京:冶金工业出版社,2003:233-241.
- [7] WILLEMSE P F, NAUGHTON B P, VERBRAAKA C A. X-ray residual stress measurements on cold-drawn steel wire[J]. Materials Science and Engineering, 1982, 56:25.
- [8] YANG F, JIANG J Q, FANG F Y, et al. Rapid determination of residual stress profiles in ferrite phase of cold-drawn wire by XRD and layer removal technique[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 486:455.
- [9] ÖVERSTAM H. The influence of bearing geometry on the residual stress state in cold drawn wire, analysed by the FEM[J]. Materials Processing Technology, 2006, 171:446.
- [10] ATIENZA J M, RUIZ-HERVIAS J, MARTINEZ-PEREZ M L, et al. Residual stresses in cold drawn pearlitic rods[J]. Scripta Materialia, 2005, 52:1223.
- [11] HE S, VAN-BAEL A, LI S Y, et al. Residual stress determination in cold drawn steel wire by FEM simulation and X-ray diffraction[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 346:101.
- [12] ELICES M. Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires[J]. Materials Science, 2004, 39:3889.
- [13] ATIENZA J M, ELICES M. Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires [J]. Materials and Structures, 2004, 37:301.
- [14] ATIENZA J M, ELICES M. Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires[J]. Materials and Structures, 2003, 36:548.
- [15] TORIBIO J, OVEJERO E. Failure analysis of cold drawn prestressing steel wires subjected to stress corrosion cracking [J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12:654.
- [16] ELICES M, RUIZ J, ATIENZA J M. Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement of cold drawn wires [J]. Materials and Structures, 2004, 37:305.
- [17] TORIBIO J, VALIENTE A. Failure analysis of cold drawn eutectoid steel wires for prestressed concrete [J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13:301.
- [18] RUIZ-HERVIAS J, ATIENZA J M, ELICES M, et al. Optimisation of post-drawing treatments by means of neutron diffraction [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480:439.

## Review on the residual stress of cold-drawn steel wire

ZHANG Wen-chao, CHEN Wen-lin

(School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper summarized the research progress on residual stress of the cold-drawn steel wire in recent years, and explained how the mechanism of residual stress of the cold-drawn steel wire influenced the properties of cold-drawn steel wires. Emphasis was placed on introducing the application of the diffraction method and the finite element simulation method in calculating residual stress.

**Key words:** cold-drawn steel wire; residual stress; mechanism of production; X-ray diffraction; finite element simulation