

## 高强度热处理双相钢制绳线材研制

吴凡 堵永国 魏克泰 马鸣图 盛芬

(材料科学与应用化学系)

**摘要** 本文通过实验提出了一种双相钢制绳线材的热处理工艺程序,即:奥氏体化及水淬以获得全部马氏体组织→临界间加热淬火以获双相组织并回火→酸洗磷化后多道次连续冷拔至终尺寸→人工时效。按此程序生产的线材 $\sigma_b$ 可达1800MPa以上,且扭转、弯曲疲劳性能超过标准规定值。

**关键词** 线材, 双相钢

**分类号** TG156

自1968年出现了双相钢的第一个专利<sup>[1]</sup>以来,双相钢就成为人们竞相研究的课题,但是双相钢的应用研究主要集中于板材<sup>[2]</sup>。然而双相钢的高应变硬化率和优良的冷成型性<sup>[3]</sup>,有可能使之成为高强度线材(如绳用钢丝、预应力钢筋、轮胎钢丝、琴用钢丝等)的最有希望的原材料。但这方面的研究报导却很少。截至1988年1月,仅有18篇文献<sup>[4]</sup>公开发表,约占全部双相钢文献的1.8%,国际上已有几次双相钢的学术会议<sup>[5][6]</sup>。

我国至今沿用有百年历史的传统方法生产绳用钢丝。该方法被称为铅淬法或派登脱(Patent)法。所用钢大多为65号钢。其工艺程序是:将6.5mm的热轧空冷盘条经酸洗挂灰后预冷拔到中间尺寸,继之以铅淬处理并再度酸洗和磷化后连续冷拔到终尺寸。我国国标GB1176-74对制绳线材规定了四项指标<sup>[7]</sup>。

铅淬法的实质是将奥氏体化坯料迅速投入450~500℃铅浴中得到均匀的细片状索氏体。这种组织不但能满足冷拔在尺寸方面的要求,同时还能满足上述性能方面的要求。研究表明,如在显微组织中混有粗片状珠光体乃至游离铁素体或贝氏体乃至马氏体都将影响线材的拉拔性能。铅液以其它冷却介质所无法比拟的高热容使上述两类有害组织被限制在最低水平上。

但铅淬法有两个致命的弱点。其一是铅本身很贵且有污染之害;其二是将6.5mm直径坯料冷拔到最终尺寸所需的纯几何变形量远大于铅浴淬火后所能承受的冷拔变形量,故铅淬处理只能对接近终尺寸的某中间尺寸的坯料实施,而在此之前的许多道次中间为了恢复冷拔承受能力而需多次中间正火,每次正火又须伴以酸洗和挂灰,使得生产工序

十分冗长繁琐,其生产成本无法下降。

有两种途径可以避开上述缺点。一是使用微合金化珠光体钢的控制冷却<sup>[8]</sup>;二是利用双相钢生产线材<sup>[9]</sup>。双相钢按生产方式可分控轧控冷双相钢和热处理双相钢两类。前者具有综合优越性。考虑到多种条件的限制,本文首先研究了热处理双相钢。

## 1 研究方法

研究用料的化学成分如表1所示。 $A_{c3}$ ,  $A_{c1}$ 和 $M_s$ 分别为880℃, 710℃和365℃。大多数样品的原始状态是冷拔态;少量样品具有常化态。所有样品都用盐浴加热,用冷水冷却。冷拔道次间不需任何热处理;每道次冷拔量按截面缩比为20%。

图1示意地给出了可能的工艺程序。每一方框中的参量变化以及方框间的匹配都将

表1 合金成分(重量%)

元 素	含 量
C	0.092
Si	0.727
Mn	1.76
P	0.016
S	0.020
N	36ppm

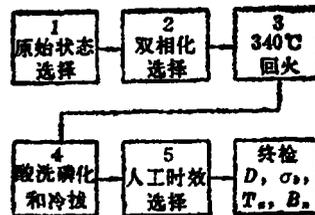


图1 可能的工艺程序  
包括方案 1) 1→2→3→4→5;  
2) 1→2→4→5; 3) 1→2→3→4;  
4) 1→2→4

影响终检结果。方框4中的冷拔变形量用塑性真应变 $\epsilon_p = 2\ln D_i/D_f$ 表示,它是影响 $\sigma_b$ 、 $T_n$ 和 $B_n$ 的重要因素。方框1中有四种状态,除前述的冷拔态和常化态外,各自再追加一道全马化成为共四种。方框2中取若干不同温度。方框3中的回火只取低于但接近于 $M_s$ 点的340℃。方框5在很宽温度内选择。这意味着研究工作将面临一系列庞杂的表格数据和曲线。幸而,现已知道,对于生产合格线材,只有包括图1中所有步骤的方案才是可取的。故以下的叙述可集中于图1中方案1)的优化组合中。

$\sigma_b$ 、 $T_n$ 和 $B_n$ 用专用线材试验机测定;真应力真应变用岛津试验机测定,载荷位移曲线后再计算转换;马氏体体积分数 $f_M$ 用截线法测定,部分样品的结果可用图像自动分析仪予以测定。

## 2 结果与讨论

$f_M$ 与临界区5分钟等时加热温度的关系如图2所示。可知760℃可得到约30%的马氏体;820时 $f_M$ 达50%。从相图知, $f_M$ 的增加伴有马氏体自身碳含量 $C_M$ 的下降,见图2中的虚线所示。或许 $C_M$ 的下降在一定程度上抵消 $f_M$ 的增加致使的强度增加。但实验结果却是否定的。图3给出了 $\sigma_b$ 和 $\sigma_{0.2}$ 对 $f_M$ 的依赖关系。这说明,淬火马氏体作为硬相不参于塑性变形。

真应力 $\sigma_i$ 和塑性真应变 $\epsilon_p$ 的关系由图4所示。它们包括5分钟等时变温加热和740℃等温变时加热。研究表明,流变应力和初始加工硬化率均随温度升高而增大,且在不长

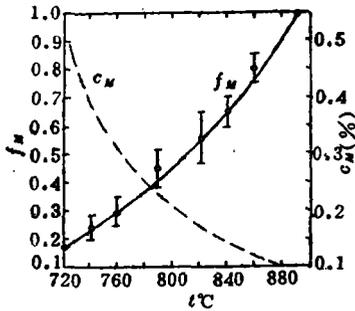


图2 临界加热温度对 $f_M$ 和 $C_M$ 的影响

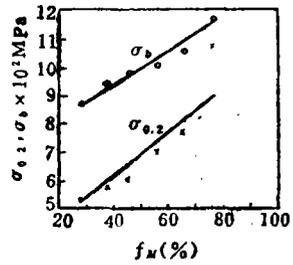


图3  $\sigma_{0.2}, \sigma_b$ 对 $f_M$ 的依赖关系

时间内也随保温时间的增加而增加。

300℃的回火大约使流变应力降低150~200Mpa，单轴拉伸的总延伸率也有所增加(图5)。回火与否的双相钢延性的差异在冷拔实验中表现更明显。未回火双相钢08Mn2Si的冷拔最大真应变可达3.01，而340℃回火，其它条件均一样的回火双相钢的真应变可达4.2，这还不是最大值(本研究未继续拔下去)。O·R·Jardim及合作者[10]曾

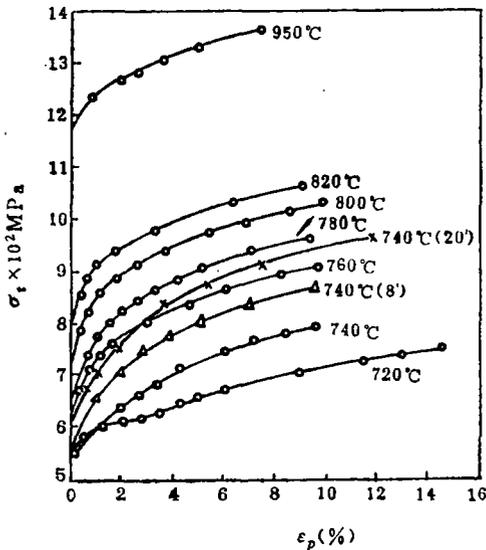


图4  $\sigma_i \sim \epsilon_p$ 关系

○—5分钟等时加热，△，×—加热时间写入括号中

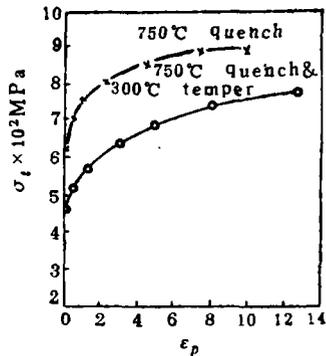


图5 300℃回火对淬火双相钢流变应力的影响

研究过淬火以及淬回火热处理双相钢的变形及断裂行为。他们发现，变形的淬火双相钢在两相界面上存在显微裂纹；马氏体对塑性变形的影响仅在均匀延伸能力耗尽而出现颈缩时才可察觉到[11]。而回火的双相钢，其马氏体从变形的初期就对变形有所影响。然而淬火双相钢回火的必要性不仅于此。作者通过实验还发现，预先的回火改善了冷拔双相钢应力释放后的扭转性能，条件是应力释放的人工时效温度不能高于回火温度。但是，如果冷拔前预先未回火，则拔后时效反而会引起脆性。这一实验结果由图6所示。图中 $\Delta T_n$ 是由显微裂纹所致，然而图中的 $\Delta T_n'$ 显然无法用显微裂纹解释。未回火钢冷拔后时效脆化的实质还有待进一步研究。

回火双相钢冷拔并时效(340°C)后的抗拉强度与冷拔塑性真应变的关系如图7示。根据不同热加工方式,可分为三种情况(原始状态均为冷拔态):

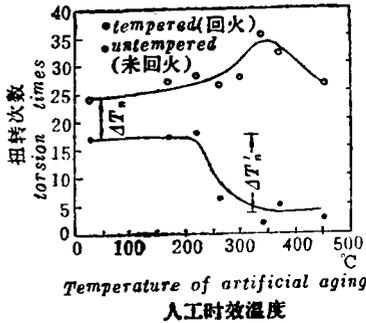


图6 扭转次数与应力释放时效温度的关系

○—预先回过火, ●—未回火直接冷拔

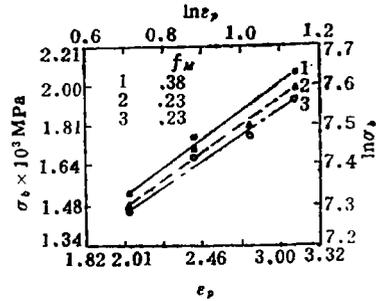


图7  $\ln\sigma_b, \ln\varepsilon_p$  之间的关系

- (1) 1000°C 加热水淬 + 780°C 加热水淬 + 340°C 回火 + 冷拔 + 340°C 时效, 回归方程  $\sigma_b = 944e_p^{0.69}$ ;
- (2) 745°C 加热水淬 + 340°C 回火 + 冷拔 + 340°C 时效,  $\sigma_b = 916e_p^{0.68}$ ;
- (3) 1000°C 加热水淬 + 745°C 加热水淬 + 340°C 回火 + 冷拔 + 340°C 时效;  $\sigma_b = 963e_p^{0.6}$ .

很明显, 应力释放之后的应力应变关系仍很好地服从 Hollomon 方程, 说明应力释放并未导致强度损失。同时还可知,  $f_M$  的增加使  $\sigma_b$  增加; 对于原始冷拔态样品, 双重淬火没有显出过大的优越性。不过对于原始正火态样品, 必须双重淬火。

如果比较一下不同马氏体体积分数的回火双相钢冷拔后时效与否的样品的  $T_n$  和  $B_n$ , 将是一件有趣的事情(表2)。由表2中数据可知, 对于  $f_M = 23\%$  者, 时效前后  $T_n, B_n$  的

表2 时效与否对不同  $f_M$  的双相钢  $T_n, B_n$  的影响

$f_M(\%)$	未 时 效		时 效 (340°C)	
	$T_n$	$B_n$	$T_n$	$B_n$
23	25	9	35	13
38	25	14	26	14

(注):  $\varepsilon_p = 3.12$

变化较大, 而对  $f_M = 38\%$  者, 这一变化很小。由于所有样品事先都经历了回火, 故马氏体的碳含量  $C_M$  相差无几, 唯一不同的是铁素体的多少。由这个实验结果可推断, 赋予双相钢线材以优良扭转弯曲性能的乃是时效后的铁素体相。该相越多, 扭弯性能越好。建议08Mn2Si钢的铁素体应控制在不低于70%的水平上。

最后必须指出: 本文研究了现成的焊条用钢08Mn2Si用于制造高强度双相钢线材的可能性及其程序。如已看到的那样, 通过适当工艺程序和参数配合, 可以得到性

能优异的制绳高强度线材。然而，在钢中不含微合金化元素（如钒）时，冷拔形成的铁素体位错未必被钉扎固锁的情况下，所获性能是否能长期稳定不变是一个值得研究的问题。从这一观点出发，具有热力学稳态组织的微合金珠光体钢可能具有优越性<sup>[8]</sup>。从长远观点，双相钢钢种微合金化，并进一步降低钢中碳含量，以便在不变的双相比下获得碳量更低的马氏体应是今后进一步研究的方向<sup>[9]</sup>。

### 3 结 论

根据双相钢制绳线材热处理工艺程序的实验研究，得出如下结论和展望：

1 热处理双相钢08Mn2Si用于制绳线材的基本工艺程序是：双相化 淬火→340℃回火→酸洗磷化并冷拔→应力释放人工时效。若原始状态为正火态，尚需在双相化前全马化；但对深度冷拔的原始态，这一工序可以免去。通过适当工艺程序，08Mn2Si 钢线材强度可超过1800MPa，且其 $T_n$ 、 $B_n$ 能满足标准中对应直径所规定的指标。

2 淬火双相钢未经回火冷拔并时效将引起脆性。冷拔前的340℃回火可为应变时效脆化消除其机制；时效温度一般应低于回火温度。

3 08Mn2Si 钢中的铁素体相体积分数不应低于70%。时效铁素体是扭转弯曲的主要支撑者。

4 从长远观点，双相钢应微合金化并进一步降低钢中碳含量。

作者感谢湖南省科委对本项目的关注和财政资助。

### 参 考 文 献

- [1] Mcfarland W H, Patent U S. No3378630, 1968
- [2] 马鸣图, 吴宝榕. 双相钢—物理和力学冶金, 冶金工业出版社, 1988
- [3] Hutchingson W B. Proceedings of the Int. Conf. on Developments in the Drawing of Metals. 11—13, May, 1983; 185~191
- [4] Dialog Information Service From 1968 to Jan. 1988
- [5] Kot R A and Morris J W. Jr. Structure and Properties of Dual Phase Steels, eds. TMS/AIME, New York, 1979
- [6] Kot R A and Bramfitt B L. Fundamentals of Dual Phase Steels, eds. TMS/AIME, New York, 1981
- [7] Stephenson A et al. The same to 3 and P219-227
- [8] Cordon B W et al. *ibid.* P228~234
- [9] Nakagawa A H et al. Metall. Trans, May, 1985; 16A
- [10] Jardim O R et al. Metallography, May, 1984; 17(2)
- [11] Chawla K K et al. J. Mater. Sci. Lett. 1983; 29:4

# Development of Heat Treating Dual Phase Roping Steel Wire with High Strength

Wu Fan Du Yongguo Wei Ketai Ma Mingtu Sheng Fen

(Department of Materials Science and Applied Chemistry)

## Abstract

Based on the experiments, the heat treating technology process for the dual phase roping steel wire is suggested as follows, austenization and water quenching for full martensite structure—→critical annealing and quenching for dual phase structure followed by tempering—→after acid pickling and phosphorisation, continuous cold drawing multisteps until expected end dimension of the wire—→artificial aging for stress relief.

According to the production process, the tensile strength of the wire may be achieved over 1800 MPa while the anti-torsion and bending fatigue properties can exceed the value stipulated in the National Standard.

Key words, wire, dual phase steel