

一种提高钢丝强度和塑性的新方法

■ 清华大学深圳研究生院新材料所 唐国翌 丁飞

[摘要] 本文采用了自行设计的电脉冲拉丝设备。研究了电脉冲处理对加工硬化钢丝组织和性能的影响。为了进行对比,采用相同电流密度的直流电对同一试样进行处理。结果表明,在最优的电脉冲处理参数条件下,有利于增大材料再结晶的形核速率并且降低晶粒的长大速率,同时,钢丝中出现了大量微米亚微米尺度的超细晶粒。因此,与冷拉钢丝相比,处理后钢丝延伸率显著提高的同时强度降低较少,即获得了最优的机械性能。

[关键词] 电脉冲 拉丝 再结晶 超细晶粒 机械性能

A New Method of Improving Strength and Plasticity of Steel Wire

(Advanced Materials Institute, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055 Tang
Guoyi, Ding Fei)

Abstract: Specially designed wire-drawing equipment with electropulse generator was introduced in this study. The influences of electropulses processing on the microstructure and properties of the hardened steel wire were investigated. Samples treated by direct current under the same current density of electropulses processing were carried out for contrast analysis. The results show that the optimized parameters of electropulses processing will be facilitated to increase in nucleation rate and slow down the growth rate of recrystallized grains, consequently, massive superfine grains of micro and sub-micro scale could be found in the steel wire. Thereby, the elongation was significantly enhanced with a relatively small strength reduction in comparison with as-received cold-drawing steel wires, which indicated the obtaining of outstanding mechanical properties.

Key words: multiple electropulses; wire-drawing; recrystallization; superfine grain; mechanical properties.

1 引言

传统钢丝中强度和塑性是一对矛盾,如果得到高强度,塑性就会降低;而有时为了得到好的塑性,就必须牺牲强度。适当的高强度和适中的高塑性的结合,可使材料和构件获得非常高的断裂功,从而极大地提高工程构件的性能和寿命。如何用简单的工艺使钢丝在获得高强度的同时保持好的塑性,是工程界非常关注的问题。目前钢丝加工硬化后一般需通过退火技术来提高塑性,然而这种处理方法存在一些不足,比如强度急剧降低,增加了加工工序以及较低的生产效率。

高能电脉冲处理在材料加工中越来越得到人们的重视。与传统工艺相比,电脉冲处理使得材料晶粒显著的细化,性能得到提高。电脉冲技术已经广泛应用与很多领域,如电致塑性,材料加工,再结晶,裂纹和缺陷的修复,细化晶粒,以及在生物、环保、医药领域^[1-15]。

本文采用电脉冲对加工硬化的钢丝进行处理。对钢丝的显微组织和机械性能进行了分析。结果表明,本文版权归新三思集团公司及作者本人所有,转载必究。

经过电脉冲处理，钢丝中出现了超细晶粒，同时获得了优异的机械性能。此外，对其机理进行了探讨。

2 实验过程

选取含碳量为 0.14 wt% 的低碳钢丝作为研究对象。直径为 1.60mm 的原始退火态钢丝经过冷拉变形后其直径变为 0.36mm，变形量约为 96%。对冷拉后的钢丝在自行设计的电脉冲拉丝设备上电脉冲处理，如图 1 所示。实验中，大部分钢丝浸入润滑油中，目的是冷却和保护材料表面。在间距为 160mm 的电极间施加电脉冲。实验中，通过改变电压来选取最优参数。均方根电流值以及峰值电流可以通过示波器采集获得。电脉冲频率为 100Hz，拉丝速度为 3m/min，脉宽为 60 μs。此外，为了排除热效应，采用相同均方根电流密度的直流电对同一批试样进行处理，并对两者的显微组织和机械性能进行了对比。力学实验在深圳新三思公司的 CMT5105 拉伸机上进行。采用 BX51 光学显微镜和 S-4300 扫描电子显微镜对显微组织进行了分析。

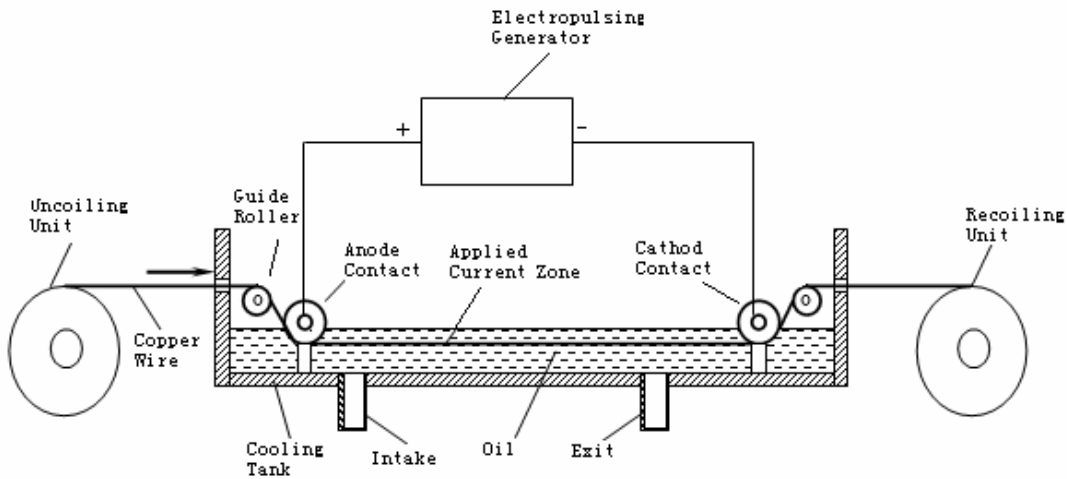


图 1 电脉冲处理设备示意图

3 实验结果

原始退火态低碳钢丝的显微组织如图 2 所示。可以看到，钢丝中晶粒分布比较均匀，但是与电脉冲处理后的组织比较，其晶粒尺寸较大。图 3 为该钢丝经过冷拉变形后的显微组织，其中很难辨别出晶粒边界，几乎全部是冷拉变形后伸长的纤维状晶粒。

经过电脉冲处理后的显微组织如图 4。一系列试样的实验参数以及等轴拉伸实验结果见表 1。对冷拉硬化后的钢丝，采用不同的参数进行电脉冲处理，纤维组织不同程度上逐步转变为再结晶状态。在变形储能高的地方，能够为再结晶提供驱动力，出现了再结晶晶粒（图 4a）。当电压增加到 120V 的时候，尽管大部分已经发生了再结晶，但是仍然存在着纤维状组织（图 4b）。当电压增加到 130V 的时候，基本发生了完全再结晶（图 4c）。当电压继续增加到 140V 的时候，晶粒急剧长大（图 4d）。大量微米亚微米尺度的超细晶粒出现在试样 5 中，图 5 为试样 5 的 SEM 显微照片。这些细小的再结晶晶粒使得材料在强度降低

较小的同时，延伸率显著提高。试样 5 的机械性能数值见表 1，试样 5 具有高的抗拉强度和优越的延伸率。实验结果显示，经过电脉冲处理后，钢丝可以获得优异的机械性能。同一试样，在相同的均方根电流密度（144 A/mm²）条件下，用直流电处理后进行对比，再结晶晶粒分布很不均匀，晶粒尺寸很大（图 6）。此外，与电脉冲处理相比试样的机械性能也有很大的不同。

表 1 钢丝的实验条件以及不同参数下的力学性能

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	
处理状态	冷拉	不同电压下进行电脉冲处理 (Voltage V)					直流电处理 (A/mm ²)	
		100	110	120	130	140	144	
抗拉强度 (MPa)	690	635	615	600	585	535	510	
延伸率 (%)	<1	1.5	4.5	8.5	16	6	6	

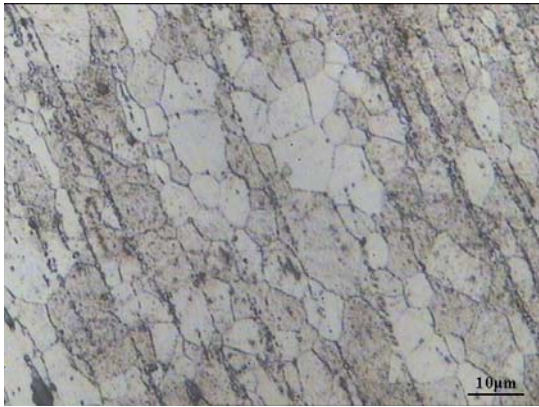
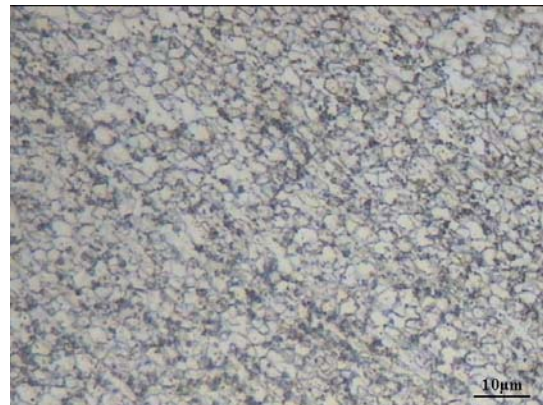
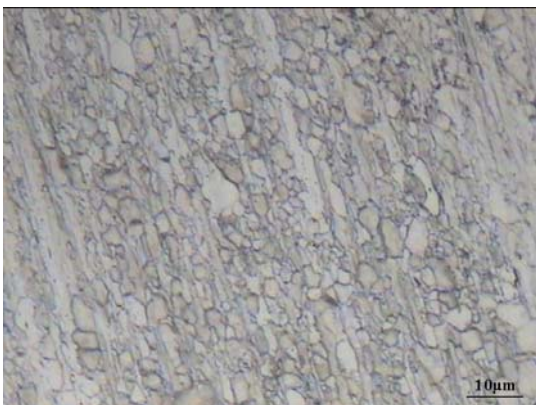


图 2 钢丝原始退火态的显微组织图



3 钢丝加工硬化态的显微组织



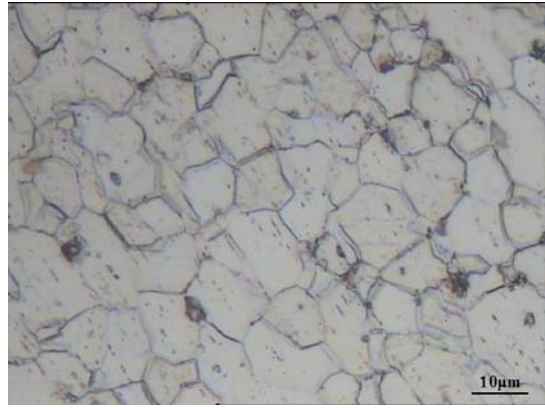
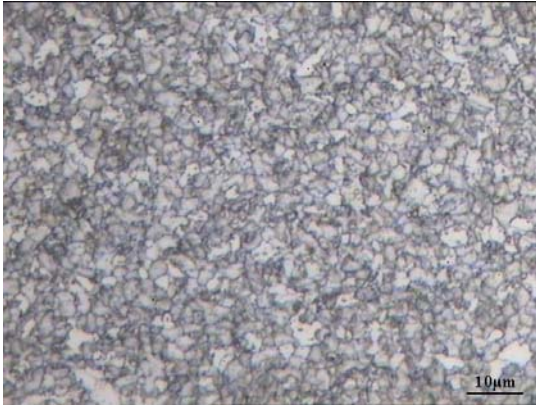


图 4 钢丝在不同电脉冲处理参数下的显微组织 a) 试样 3, b) 试样 4, c) 试样 5, d) 试样 6

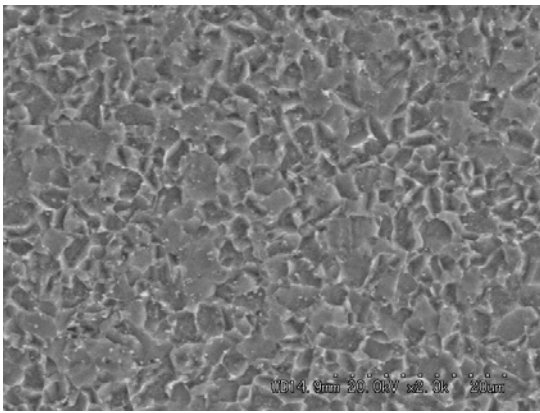


图 5 试样 5 的 SEM 显微组织



图 6 直流电处理钢丝的显微组织

4 讨论

结果表明，在最优参数条件下对钢丝施加电脉冲处理，可以加速再结晶进程即提高形核速率，降低长大速率。大量的微米亚微米尺度的晶粒出现在组织中。同时，材料仍然具有较高的抗拉强度，也就是说材料获得了优异的综合机械性能。

材料在再结晶过程中，形核主要集中在变形带以及晶界处，再结晶形核的动力来自于材料在冷变形过程中储存的能量。再结晶核心主要是基体中未发生畸变的部分^[16]，它们使得六角界面与变形基体分隔，变形基体消失后，再结晶结束。实验发现当温度高于钢丝再结晶临界温度时，电脉冲促进了材料再结晶过程，使得形核速率大大加快，同时降低了晶核的长大速率^[17]。

由于材料的冷拉加工变形量很大，达到 96%，所以材料形成的缺陷密度非常高，包括点缺陷密度，位错密度等。在电脉冲处理过程中，由于电脉冲的作用非常快，所以材料在再结晶形核、长大阶段依然保留着大量的点缺陷。不仅如此，材料在电脉冲的作用下，还可以激发出新的点缺陷。由于材料在电脉冲处理过程中，没有形变，所以材料的位错活动主要以攀移为主。位错的攀移过程主要是由原子的扩散来完成的。所以点缺陷的浓度以及扩散速率等都影响到材料内位错的攀移，从而影响到材料的再结晶过程，电脉冲的作用就是能够促进位错的攀移进程，使得位错向亚晶界聚集，促进形核，降低了晶粒长大速率。由于电脉冲处理的时间很短，并且加速了形核，因而使得再结晶晶粒来不及长大。与常规处理相比，材料在电脉冲条件下发生再结晶的温度要明显的降低，因此认为，电脉冲处理对材料再结晶过程有影响的除了焦耳热效

应，还有非热效应^[18]。

H. Conrad's^[19-20] 发现，施加的峰值电流密度越大，非热效应越明显。从微观角度考虑，点缺陷密度越大以及原子扩散越强，使得位错的攀移越容易发生。这可以归结为热效应与非热效应的耦合作用。一般来说，电脉冲的峰值电流密度要远高于直流电的电流密度。所以在相同均方根电流密度的情况下，电脉冲处理条件下形核速率大于直流电处理。直流电处理后的再结晶晶粒非常大。

5 结论

(1) 对冷拉硬化的钢丝施加电脉冲处理，出现了焦耳热效应和非热效应。由于焦耳热效应和非热效应的耦合作用，增加了原子振动的能量，促进了位错的攀移。这有利于亚晶的转动，促进了再结晶进程。

(2) 电脉冲处理加速了再结晶形核抑止了晶粒长大，使得钢丝中出现了大量微米亚微米尺度的超细晶粒。这些超细晶粒有利于同时提高钢丝强度和延伸率。

(3) 与传统处理方法以及直流电处理相比，电脉冲处理以后材料获得了更加优异的综合机械性能。

参考文献:

- [1] S. Murphy: *J.Inst.Metal*, 100,1972,225.
- [2] Guoyi TANG, Mingxin ZHENG, Yonghua ZHU: *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 84, 268.
- [3] Conrad H, Sprecher A F, CAO WD: *JOM*, 1990, 9, 28.
- [4] Paul SH, Thomas K: *Rep. Pro. Phys*, 1989, 52.
- [5] Conrad H, Karam N, Mannan S: *ScrM etall*, 1984, 18 (3), 275.
- [6] H.Conrad and A.F.Sprecher: F.R.N.Nabarro(Ed.), *Dislocation in Solids*, Elsevier Science, New York, 1989, 43,497.
- [7] Karel Feyearts: *Wire J.*, 1996, Nov, 68.
- [8] Yizhou Zhou, Jingdong Guo, Ming Gao, Guanghu He: *Materials Letters* 58, 2004, 1732.
- [9] Yang D, Conrad H: *Intermetallics*, 2001, 9, 943.
- [10] Lloyd JR: *J. Phys D:applphys*, 1999,32, R109.
- [11] Mishra RS, Mukherjee AK: *Mater Sci Eng*, 2000, 287A, 178.
- [12] Suhong XIAO, Jingdong GUO, Shiding WU: *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(2), 161.
- [13] Mishchuk NA: *Colloid J*, 1997, 59, 195.
- [14] Gongqing TENG, Yue sheng CHAO, Chunhui XIE: *Acta Metallurgica Sinica*, 1996, 32(11), 1204.
- [15] Mizubayashi H, Hao T, TanimotoH: *J. Non-cryst Solids*, 2002, 312, 581
- [16] Conrad H: *Mater Sci Eng*, 2000, 287A, 205.
- [17] H.Conrad, Z.Guo and A.F.Sprecher: *Scripta metall*, 1990, 24, 359.
- [18] A.F.Sprecher, S.L. Mamnan and H.Conrad: *Acta. Metall*, 1986, 34, 1145.
- [19] Schaffer, Saxena, Antolovich, Sanders, Warner: *The science and design of engineering material*, 2nd edn, Higher Education Press, China, 2003, 548-570.
- [20] Adi. R.Bulsara and L. Gammaitoni: *Physics Today*, 1996, 39, 39.