

冷作硬化非调质钢螺栓的形变强化效应

Deformation Strengthening Effect of Microalloyed Steel for Cold Heading Bolt

蔡璐,王章忠,赵秀明,贺显聪  
(南京工程学院 材料工程学院, 南京 211167)

CAI Lu, WANG Zhang-zhong, ZHAO Xiu-ming, HE Xian-cong  
(School of Materials Science and Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

摘要: 根据形变强化非调质钢螺栓的制造工序, 对 MFT8 非调质钢原材料、冷拔和时效处理三种状态下的形变强化效应进行研究, 比较了其形变硬化指数及力学性能, 研究分析了组织对其性能的影响。结果表明: MFT8 非调质钢形变强化效应明显; 时效处理后仍具有良好的形变强化能力, 可确保螺栓在使用时的安全性; 强化后的螺栓各项力学性能指标达到 8.8 级技术要求, 研究材料能够取代调质钢制造高强度螺栓。

关键词: 形变强化; 非调质钢; 螺栓

中图分类号: TG111.7; TG142 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)04-0069-03

**Abstract:** According to manufactured procedures of the MFT8 bolt for microalloyed steel, the deformation strengthening effects for raw material, cold-drawing and aging treatment were studied, respectively. The strain hardening exponents and mechanical properties were compared, and the effects of microstructure on material properties were analyzed. The results show that deformation strengthening effect of the MFT8 bolt for microalloyed steel is obvious. It still possesses favorable deformation strengthening performance after aging treatment to insure the use safety of bolts. The standard of all kinds of mechanical properties of deformation strengthening bolt has reached 8.8 grade, therefore, the MFT8 for microalloyed steel can substitute quenched and tempered steel for manufacturing high-strengthened bolts.

**Key words:** deformation strengthening; microalloyed steel; bolt

标准件螺栓在工程及机械领域中用量大、范围广, 形变强化非调质钢制造 8.8 级高强度螺栓可省去调质处理工艺, 减少热处理工序和设备, 降低能源消耗, 缩短生产周期, 同时避免了在热处理过程中由于变形或淬火裂纹所造成的废品, 具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。

通常用形变硬化指数  $n$  表征材料的形变强化能力,  $n$  值越大, 均匀变形量越大, 冷成形性能好, 强化效果明显。非调质钢螺栓的主要生产流程为: 热轧线材→酸洗→冷拔→滚丝→时效, 原材料经冷拔后形变强化, 其力学性能如何, 能否取代调质钢制造高强度螺栓, 时效后的形变强化余量能否确保螺栓使用的安全, 需要进行实验研究。

1 实验材料和方法

MFT8 钢原材料为  $\phi 9\text{mm}$  的热轧线材, 化学成分

(质量分数/%) 为: C 0.21, Si 0.13, Mn 1.37, P 0.015, S 0.005, Nb 0.04, Al 0.047。实验材料经酸洗、表面预处理后进行冷拔强化, 减面率分别为 25% 和 30%。

在 CSS-44300 型电子万能试验机上对原材料、冷拔材、时效后的试样进行拉伸实验, 并分别在均匀变形区间任意取数点计算应变硬化指数, 按 GB/T 228—2002 标准选取 5 倍试样; 在 JSM-6360LV 型扫描电镜上观察其组织形貌。纵向线切割制取透射电镜试样, 经双喷电解减薄后在 H-800 型透射电镜(TEM)下分析微观组织。

实验方案: (1) 原材料形变强化效果研究, 评判其冷成形性能及形变强化的效果; (2) 比较两种不同减面率的冷拔材料形变强化效果, 优选其中一种进行时效处理; (3) 分析时效后螺栓产品最终的力学性能是否达到技术要求, 测试最终形变强化指数, 预测其使用时的可靠性。

2 实验结果

2.1 各种状态下材料形变强化效果及性能

8.8 级(螺栓直径  $M$  不大于 16mm)螺栓技术要求<sup>[5]</sup>: 抗拉强度大于 800MPa; 屈服强度大于 640MPa; 断后伸长率为 12%; HRC23~ 32。采用拉伸实验测试

原材料、冷拔材料的  $n$  值与性能, 两组减面率的棒料性能数据均达到要求。螺栓冷拔后墩头由于鲍辛格效应的作用, 随冷拔减面率的增加成形阻力将减小, 在 30% 时, 鲍辛格效应最大, 压缩真应力最小<sup>[6]</sup>, 由此最终优选减面率 30% 的棒料进行 300℃, 2h 时效处理, 并测试  $n$  值和性能指标, 各项性能如表 1 所示。

表 1 MFT8 钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of MFT8 steel

Material state	Strain hardening	Tensile	Yield	Yield tensile	Extensibility	Contractibility
	exponent	strength/ MPa	strength/ MPa	ratio	of area/ %	of area/ %
Raw material	0.59	747.5	625.7	0.8371	33.5	72.5
25% cold-drawing reduction	0.315	945	864.6	0.91	22.5	62.5
30% cold-drawing reduction	0.235	957.5	895.3	0.94	18.5	59.5
After aging	0.51	998.5	928	0.93	18	59

2.2 各种状态下材料的组织

采用微合金化技术, 在低碳钢中添加微量合金元素 Nb, 固溶于奥氏体中的 Nb 提高了过冷奥氏体的稳定性, 降低珠光体转变的温度, 转变的珠光体团尺寸小, 珠光体片碎化。热轧过程中随着温度的降低, 碳化物或氮化物从奥氏体中析出, 阻止奥氏体的再结晶, 随后冷却时铁素体晶核在奥氏体晶粒的变形带上形成, 最终获得非常细小的铁素体晶粒<sup>[7]</sup>。经检测原材料基体组织为碎片状珠光体+ 铁素体, 晶粒尺寸 5 $\mu$ m, 放大的铁素体晶粒中有明显的析出物(见图 1, 2)。

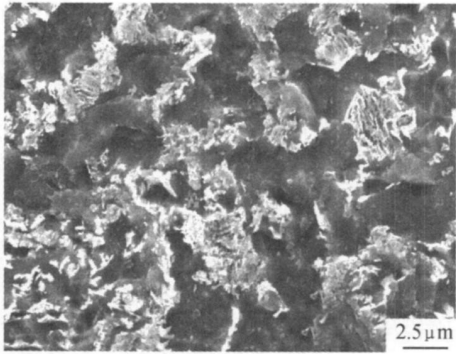


图 1 铁素体+ 碎化珠光体 SEM 图

Fig. 1 SEM image of ferrite and fragmentation pearlite

为提高材料的强度对原材料进行冷变形, 冷拔后金相组织及晶粒度变化不大, 但铁素体内部形成大量的位错, 并且位错纠缠形成了胞状亚结构, 胞壁处位错密度高于胞内, 如图 3(a) 所示。经 300℃/ 2h 时效处理后, 铁素体中的位错发生了回复现象, 生成明显的亚晶界, 如图 3(b) 所示。位错的回复及亚晶界的形成将降低位错密度, 消除内应力, 改善螺栓尺寸的稳定性。

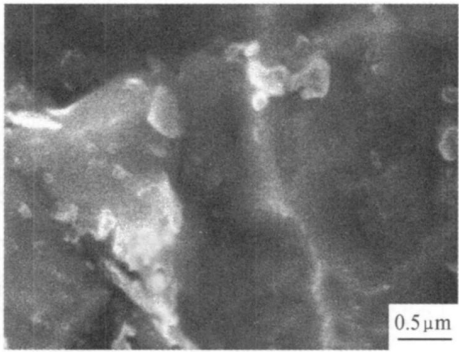


图 2 铁素体晶粒内的析出物 SEM 图

Fig. 2 SEM image of precipitations in ferrite

3 分析与讨论

在金属整个变形过程中, 当外力超过屈服强度之后, 塑性变形并不像屈服平台那样连续流变下去, 而需要不断增加外力才能继续进行。这表明金属材料有一种阻止继续塑性变形的能力, 这就是形变强化性能。应变硬化指数  $n$  反映了金属材料抵抗继续变形的能力, 是表征金属材料应变硬化行为的性能指标。在双对数坐标下真应力  $S$ - 真应变  $e$  曲线是一条直线, 因此, 可以用  $S= Ke^n$  表示, 其中  $K$  为  $e= 1$  时的真应力。极限情况下,  $n= 1$ , 表示材料为完全理想的弹性体,  $S$  与  $e$  成比例关系;  $n= 0$  时,  $S= K=$  常数, 表示材料没有应变硬化能力, 如室温下产生再结晶的软金属及已受强烈应变硬化的材料。

实验结果显示: 原材料具有较高的  $n$  值, 冷变形能力较好。随减面率的提高, 塑性变形量增大, 强化效果增加, 各项力学性能指标均达到 8.8 级螺栓技术要求。塑性变形是强化的原因, 强化是塑性变形的结果。随

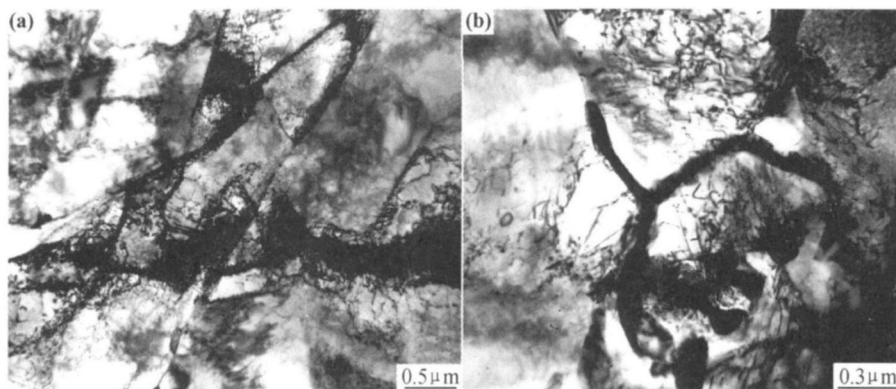


图3 时效处理前(a)后(b)铁素体中的位错密度(TEM)

Fig. 3 TEM image of dislocation density in ferrite before aging(a) and after aging(b)

变形量的增大  $n$  值下降, 材料继续强化的能力减弱。经过 30% 减面率的变形材料  $n$  值为 0.235, 这说明其仍然具有一定的抗过载失效能力。以上三种状态的拉伸断口均显示材料为韧性断裂, 这说明形变后材料强度提高, 但其仍然保持韧性状态。

金属的点阵类型和本质决定其形变强化效果<sup>[8]</sup>, 金属的滑移系、形成胞状结构的难易度、螺位错的交滑移能否顺利进行等因素对  $n$  值影响显著。原材料以下特点使其具有非常高的形变强化能力: 细小的晶粒; 容易多系交叉滑移的铁素体组织; 间隙原子碳对提高形变强化的作用; 材料中的 Nb 形成的碳化物质点; 在塑性变形过程中引起的位错增殖, 以上各种因素的综合作用使实验材料具备较好的形变强化潜力, 故测试结果显示的  $n$  值较高。

如图 3 所示, 冷拔后由于铁素体内部形成了大量的位错, 并且位错纠缠形成了胞状亚结构<sup>[9, 10]</sup>,  $n$  值与原材料相比有所下降, 剩余塑性减少。

在冷作强化的状态下使用的非调质钢螺栓, 变形组织中存在着高密度的可动位错和其他缺陷, 使其处于不稳定状态。在螺栓加载时, 这些可动位错就会攀移, 引起微小屈服, 影响其使用性能。时效处理可稳定可动位错, 同时还可使非调质螺栓具有良好的综合性能。由于时效处理刃位错可获得足够的能量产生攀移, 使滑移面上不规则的位错重新分布, 排列成墙, 形成亚晶, 所以时效后  $n$  值有所恢复, 而塑性基本保持不变, 较高的残余  $n$  值保证了螺栓在使用时抗偶然过载的能力。

## 4 结论

(1) MFT8 非调质钢具有较好的形变强化潜力, 适宜冷作强化。

(2) 形变强化后实验材料的各项力学性能指标达到 8.8 级螺栓技术要求, 可以取代调质钢。

(3) 时效处理后  $n$  值恢复升高, 确保了螺栓使用的安全性。

## 参考文献

- [1] 刘瑞宁, 王福明. 汽车用微合金化非调质钢的进展[J]. 特殊钢, 2006, 27(3): 39—41.
- [2] 董成瑞, 任海鹏, 金同哲, 等. 微合金非调质钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 3—10.
- [3] 耿文范. 非调质钢的发展现状[J]. 钢铁研究学报, 1995, 7(1): 74—76.
- [4] LIU S, LIU G, ZHONG Y. Transformation characteristics of medium carbon V-Ti-N microalloyed steel for non-quenched tempered oil well tubes[J]. Material Science and Technology, 2004, 20(2): 357—359.
- [5] 张玉庭. 热处理技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 581—589.
- [6] 马晓平, 惠卫军, 刘春明, 等. 冷作强化非调质钢冷变形过程中的鲍辛格效应[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(1): 39—43.
- [7] 胡光立, 谢希文. 钢的热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004. 384.
- [8] 金属机械性能编写组. 金属机械性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 57—58.
- [9] 黄明志, 石德珂, 金志浩. 金属力学性能[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986. 35—37.
- [10] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 262—263.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(08KJD430004)

收稿日期: 2009-01-12; 修订日期: 2010-01-22

作者简介: 蔡璐(1960—), 女, 高级工程师, 副教授, 主要从事金属材料研究及失效分析工作, 联系地址: 南京市鼓楼区仙霞路 46 号仙霞公寓 2 栋 4 单元 502 室(210024), E-mail: cailu@njit.edu.cn