

# 高强度螺栓用ML25B钢的热处理工艺

■ 付平安, 罗艳冰, 张先鸣

**摘要:** ML25B是GB/T 6478—2015《冷锻和冷挤压用钢》新标准中的一个新牌号, 探讨了ML25B碳硼钢的热处理淬火方法以及进行的热处理工艺试验。

**关键词:** 碳硼钢; 淬火; 热处理工艺

### 一、问题的提出

GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》规定, 螺栓用钢材是碳素钢和为增加强度、淬透性而添加铬、钼、镍、锰等合金元素的合金钢, 以及耐蚀为主的不锈钢等。此外, 还有添加微量硼使淬透性大幅度提高的碳硼钢。而钢材的淬透性越好, 调质后的屈强比也越大, 屈强比的增大意味着能更好地发挥钢材的潜力, 这对于满足产品规定的抗拉强度和屈强比的高强度螺栓, 就更有实际意义。

高强度螺栓调质用合金钢与相同含碳量的碳素钢相比, 往往在相同强度下具有较高的塑性、韧性; 或在相同的塑性下具有较高的强度; 或强度、塑性、韧性都较高, 且耐热、耐500℃以下高温环境服役。因为在调质状态下, 合金元素除固溶强化铁素体外, 更主要的是提高了钢的回火稳定性, 在相同温度回火后, 合金钢的碳化物比较弥散, 从而使钢的强度较高。如果回火到与碳

钢相同的硬度、强度时, 合金钢的回火温度应较高, 从而应力消除较彻底。

近10年来, 市场上大力开发了节约合金元素的低碳高强度冷锻硼钢, 其成分设计的基本原则是降低含碳量、改善冷锻钢的冷变形能力, 加入0.0008%~0.0035%的硼, 以弥补因降碳而造成了强度和淬透性的损失。冷锻硼钢热轧线材可以直接拉拔和冷锻加工, 不需要预先球化退火处理, 节约了螺栓的制造成本。ML25B是GB/T 6478—2015《冷锻和冷挤压用钢》新标准中的一个新牌号, 用于制造8.8、9.8级D≤16mm螺栓和8、10级D≤24mm螺母。

下面简述ML25B碳硼钢的热处理淬火方法以及进行的热处理工艺试验, 供参考。

### 二、试验材料与方法

从冷水江钢铁有限责任公司购进的冷锻钢ML25B盘条, 考虑到化学成分的影响, 根据GB/T 6478—2015标准中选择对碳、硅、锰、硼等元素优化控制, 用直读式光谱仪对样件进行化学成分分析, 如表1所示。

(1) 碳: 碳是影响钢材冷塑性变形的最主要元素。含碳量越高, 钢的强度越高, 而塑性越低。钢中含碳量对于钢材的冷锻性能是影响最大的, 在生产实际中, 含碳量大于0.28%时, 要求钢在拉拔前要进行球化退火。含碳量过低对淬透性也有重要影响。为此, 含碳量控制在0.25%~0.28%, 尽量不考虑退火工艺处理。

(2) 硅: Si对冷锻性能的

表1 ML25B钢的化学成分(质量分数) (%)

| 化学成分 | C          | Si        | Mn        | P≤    | S≤    | B             | Alt≥  |
|------|------------|-----------|-----------|-------|-------|---------------|-------|
| 标准值  | 0.23~0.28  | 0.10~0.30 | 0.60~0.90 | 0.035 | 0.035 | 0.0008~0.0035 | 0.020 |
| 内控值  | 0.25~0.28  | ≤0.15     | 0.70~0.90 | 0.025 | 0.025 | 0.0008~0.0035 | 0.020 |
| 实测值  | 0.26~0.275 | 0.10~0.15 | 0.75~0.85 | 0.02  | 0.015 | 0.0010~0.0025 | 0.020 |

影响仅次于碳,硅是钢在冶炼时脱氧剂的残余物。当钢中含硅量超过0.1%时,抗拉强度提高,但影响冷加工性能。因此,主张控制冷锻钢硅含量 $\leq 0.15\%$ 。

(3) 锰: Mn能提高钢的淬透性,使得钢的抗拉强度和抗弯强度有所提高,塑性有所降低,对于钢的冷塑性变形是不利的。ML25B钢的含锰量,不宜超过0.9%,热处理水淬易开裂,锰按标准要求的下限0.75%~0.90%控制。

(4) 硼: B能显著提高钢的淬透性,但同时又会导致钢材脆性增加。B含量最大值为0.0035%,硼与钢中氧、氮有很强的亲和力,一旦与它们结合生成氧化硼或氮化硼时,硼的作用就消失,即只有酸溶硼才能使钢的淬透性增加,控制为0.0010%~0.0025%。

试验加热采用连续式网带炉生产线,依据现场实际生产产品GB/T5782-M16 $\times$ 100高强度8.8级六角头螺栓制定热处理温度,选取4组加热温度,分别为:830℃、860℃、880℃和900℃。每组试样加热保温时间按网带加热炉运转速度为85min,加热后用2.5%~3% PAG水溶液冷却,水温控制在30~32℃,回火温度分别为410℃、420℃和430℃,保温时间按网带加热炉运转速度为90min。

回火后试样加工成10mm $\times$ 10mm $\times$ 55mm标准冲击试样,冲击试验按照GB/T229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,设备为数显冲击试验机。硬度检测使用洛氏硬度

计,显微组织检验使用倒置式金相显微镜及图像采集系统。

### 三、试验结果与分析

#### 1. 不同加热温度对组织及性能的影响

ML25B属于低碳合金冷锻钢。8.8级高强度螺栓之所以选择用ML25B,是出于对螺栓淬透性及服役条件的考虑。含碳量在0.32%~0.38%之间的ML35、SWRCH35K冷锻钢,对于M16以上螺栓热处理往往存在淬不透,心部未溶铁素体增多,在服役过程造成早期失效的问题。

ML25B钢中的含锰量,考虑热处理用水淬易开裂,锰含量按0.75%~0.85%控制,虽然含量不高,但锰属于扩大奥氏体相区元素,使 $A_{c3}$ 点下移,使钢在较低温度加热,即可完全奥氏体化,如在830℃加热淬火显微组织中已基本看不到铁素体组织,见图1;860℃加热淬火显微组织为淬火马氏体+少量先共析铁素体组织,见图2;880℃加热淬火显微组织为淬火马氏体+先共析铁素体组织,见图3;900℃加热淬火显微组织为粗大淬火马氏体+网状铁素体组织,见图4。

钢中加入微量硼,能弥补因降碳而造成的强度和淬透性的损失,改善钢的冷变形能力。硼在钢中的主要作用是提高淬透性,硼提高淬透性的机制是硼在奥氏体晶界的偏聚,降低了奥氏体晶界能,从而使奥氏体稳定,铁素体新相在晶界处形核困难。只有固溶在钢中,自由硼(或称有效硼)才对提高淬透性有益,微

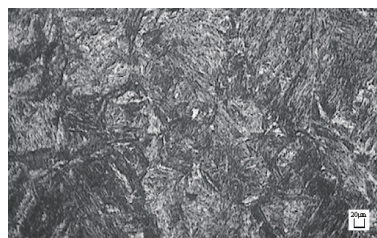


图1 830℃加热淬火显微组织



图2 860℃加热淬火显微组织



图3 880℃加热淬火显微组织

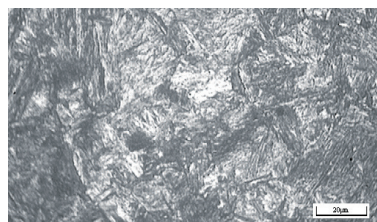


图4 900℃加热淬火显微组织

量硼( $\geq 0.0007\%$ )就可使冷锻钢调质的性能明显提高,使用少量硼代替合金元素生产螺栓用的ML25B钢,能够降低成本。硼含量控制大于0.0010%,可使淬透性达到最大。

表2所示为ML25B钢淬火加中温回火的力学性能检测结果。从表3所列4组试验结果来看,回火后力学性能基本在标准范围,只有830℃淬火所得冲击吸收能量偏低(低于标准值27J),860℃和900℃淬火所得冲击吸收

能量数据比较分散, 880℃淬火为理想的淬火加热温度。

从淬火显微组织表明, 若ML25B钢采用铝脱氧时, 铝和硼钢中残留的Ti将对钢的奥氏体晶粒度产生影响, 同时起细化晶粒的作用。钢中的铝质量分数控制在0.02%~0.05%; 残留Ti质量分数在 $\geq 0.03\%$ 时, 淬透性效果最佳。

## 2. 不同热处理回火温度下的冲击吸收能量

按GB/T 3098.1—2010, 螺栓冲击吸收能量在-20℃进行, 检测取平均值, 表3所示为ML25B钢淬火加中温回火的冲击吸收能量与硬度。从表3来看, 430℃回火, 冲击吸收能量值最高, 也符合标准对8.8级螺栓的最低回火温度425℃的要求。

## 3. ML25B钢的工艺特性及对性能的影响

(1) 冷成形性 由于在ML25B钢中的硼对固溶、沉淀和冷加工硬化增强很小, 因而很适宜于冷挤压、冷锻和温锻, 典型车辆车轮的轮胎螺栓, 此类异形件可在多工位冷锻机上加工。

(2) 抗淬裂性 淬火开裂可以由单一或多种因素而引起。然而, 对于高强度螺栓来说, 淬裂倾向是 $M_s$ 点温度的逆向函数, 与碳和其他合金元素相比, 硼有独特的性能, 它可增大淬透性而不使 $M_s$ 点有明显降低。因此, 对螺栓异形件的锐边、螺栓孔等对淬裂敏感处, 用ML25B钢制造要可靠得多。

(3) 切削加工性 ML25B

钢的切削加工性与含碳量相近或经调质的ML25、ML35、SWRCH35K钢相似。对于9.8级的异形件螺栓的机加工生产证实了这一点, 硼对切削加工性的影响被认为是不考虑的。

(4) 焊接性 ML25B钢是很容易焊接的, 热处理调质后也一样, 通常不用预热和后热, 当然最好是低氢处理工艺, 热影响区的硬度则略低于低合金钢。但是, 恰当地设计螺栓焊接组合件, 可以防止对性能的很多有害作用。

## 四、结语

(1) ML25B钢高强度螺栓适宜的淬火温度为875~885℃, 淬火后硬度大于44HRC。

(2) ML25B钢调质后在410

~430℃回火, 其力学性能均可满足8.8级螺栓的技术要求, 从高强度螺栓综合力学性能考虑, 回火温度以430℃为佳; 但对9.8级螺栓, 不能满足标准中的最低回火温度425℃的要求。

(3) ML25B钢为了避免淬火开裂, 对于M10以下规格的高强度螺栓可油淬, 油淬后硬度也可达44~45HRC。ML25B钢回火稳定性较差, 故可适当降低回火温度, 如调质时应提高淬火温度5℃左右, 降低回火温度5℃左右。若力学性能不达标时有出现, 主要是对热处理工艺控制不严, 特别是保温时间不足所致, 只要保证加热奥氏体化均匀, 就能保证高强度螺栓具有良好的综合力学性能, 至于淬火冷却介质温度及回火工艺等都是次要的。

表2 ML25B钢淬火加中温回火的力学性能

| 热处理工艺         | 抗拉强度/MPa | 断后伸长率(%) | 断面收缩率(%) | -20℃冲击吸收能量/J | 表面硬度HRC |
|---------------|----------|----------|----------|--------------|---------|
| 830℃淬火+410℃回火 | 900~970  | 12~14.5  | 52~58    | 25.5~50      | 26.5~32 |
| 860℃淬火+410℃回火 | 910~970  | 12~14.5  | 53~58    | 35~66        | 27~31.5 |
| 880℃淬火+420℃回火 | 900~955  | 13~15.5  | 54.5~60  | 38.5~55      | 28~31   |
| 900℃淬火+420℃回火 | 920~980  | 13~14.5  | 52.5~60  | 28.5~67      | 27.5~31 |

表3 ML25B钢回火后的冲击吸收能量与硬度 (880℃淬火)

| 热处理工艺         | 抗拉强度/MPa | -20℃冲击吸收能量/J   | -20℃冲击吸收能量平均值/J | 表面硬度HRC |
|---------------|----------|----------------|-----------------|---------|
| 880℃淬火+410℃回火 | 900~980  | 32, 28, 44     | 34.5            | 28.5~32 |
| 880℃淬火+420℃回火 | 910~970  | 42.5, 53, 48.5 | 48              | 27~31.5 |
| 880℃淬火+430℃回火 | 880~955  | 53, 68, 42.5   | 54.5            | 26~30   |

作者简介: 付平安、罗艳冰、张先鸣, 冷水江天宝实业有限公司。

MW 20170509