

多次调质对 42CrMo 钢螺栓组织和力学性能的影响

文 / 张先鸣

由於风电机组、海洋平台、船用机械和钢网架螺栓的使用环境比较恶劣，常常在较低的温度下（零下 40℃）使用，同时又承受著非常大的载荷，对材料的低温冲击性能提出一定的要求。当晶界总表面积增加时，晶界上杂质偏析的浓度将可能降低。由於晶粒尺寸与晶界总表面积成反比，故细化晶粒可提高材料的低温冲击韧性。调质热处理的主要目的是调整组织、减少碳化物、获得索氏体或索氏体组织和均匀分布的颗粒状碳化物组织，从而提高综合性能。文献资料表明，多次调质可以得到微细的等轴晶粒；然而，材料的多次热处理有可能引起晶界的氧化，影响材料的力学性能。为此，对风电机组、海洋平台、船用机械和钢网架螺栓常用材料 42CrMo 钢进行多次调质热处理工艺研究，对组织和力学性能的影响进行总结，以供同行参考。

1. 试验材料和方法

试验采用 42CrMo 钢试样，规格为 M42*390 螺栓，共生产 200 件，打钢印进行标记。调质处理采用连续式网带炉生产线，热处理工艺参数见表 1。

试样分别组号为 1、2、3 号，编号每组取 5 件。对 1、2、3 号试样分别进行 1 次调质、2 次调质和 3 次调质，每次调质工艺相同。将调质後的试样按照 GB/T228.1-2010《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温拉伸试验方法》进行拉伸试验；按照 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行低温冲击试验。

2. 试验结果与讨论

2.1 试验结果

图 1~3 系经不同次数调质後 42CrMo 钢的显微组织，腐蚀剂为 4% 硝酸酒精。经不同次数调质後 42CrMo 钢的组织组成及力学性能试验结果见表 2。

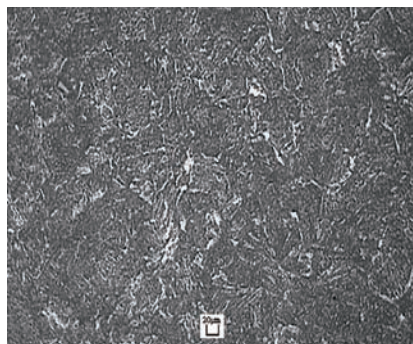


图 1、第一次调质后 42CrMo 钢的显微组织

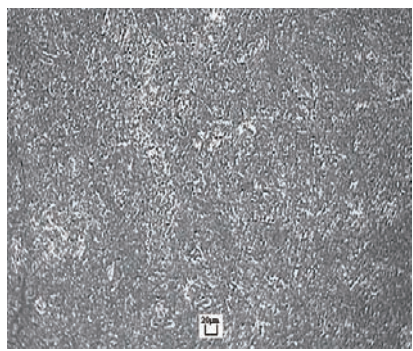


图 2、第二次调质后 42CrMo 钢的显微组织

表 1、高强度螺栓热处理工艺参数

零件及规格	材料牌号	淬火温度 / ±5℃						保温时间 / min	淬火液	
		一区	二区	三区	四区	五区	六区		浓度 / %	温度 / °C
M42*390	42CrMo	820	880	880	880	880	870	165	12	40-50
M45*150	40CrNiMo	820	870	870	870	870	860	180	12	40-50

表 1 续、高强度螺栓热处理工艺参数

零件及规格	材料牌号	回火温度 / ±10℃				保温时间 / min	回火硬度 / HRC	螺栓等级
		一区	二区	三区	四区			
M42*390	42CrMo	530	540	540	540	180	34.5-37	10.9S 级
M45*150	40CrNiMo	520	530	530	530	180	35-37	10.9 级

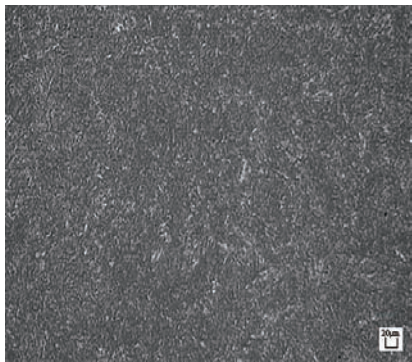


图 3、第三次调质后 42CrMo 钢的显微组织

2.2 讨论

试验结果表明，42CrMo 钢经二次调质后，不仅低温冲击值有明显提高，而且屈服强度和抗拉强度也显著提高。经三次调质、经四次调质后，其低温冲击、屈服强度和抗拉强度物明显变化。说明经二次调质对低温冲击值有明显效果，再调质，则作用不明显。

从金相组织可以看出，试样经第一次调质后，组织为回火索氏体 + 残余奥氏体，晶粒度为 7.0 级，存在团絮状碳化物和未溶铁素体。经第二次调质后，残余奥氏体明显减少，晶粒度级别提高至 7.5 级，没有出现团絮状碳化物，取而代之的是颗粒状碳化物。当进行第三次时，几乎见不到残余奥氏体，晶粒进一步细化，碳化物仍然保持颗粒状形式存在，晶粒度级别提高至 8 级。

回火索氏体是铁素体与粒状渗碳体的混合物。回火索氏体使钢的脆性降低，冲击性能提高。析出的细小颗粒状碳化物，作为第二相质点，可以阻碍晶界的迁移长大，所以，随著调质的次数增加，晶粒细化。此外，淬火的冷却过程存在形核和核心长大的过程。淬火冷却时间受到控制，新的晶粒没有长大到原始晶粒尺寸时，重新进行加热后冷却，再一次进行形核和核心长大，在原始晶粒中形成多个细小的晶粒，晶粒得到细化。

钢的冲击韧性与晶粒大小有关，韧脆转变温度 $T=K-Ind-1/3$ ，因此，细化晶粒可以提高钢的冲击韧性。

从屈服强度和抗拉强度来看，经过第二次调质，42CrMo 钢的屈服强度和抗拉强度明显提高，这可能与晶粒得到细化有直接关系。塑性变形过程中，由外加切应力直接引起滑移的晶粒只占少数，多数晶粒的塑性变形是由前面晶粒中的位错塞积群的应力集中所引起的，只有所有晶粒都进行了塑性变形，才会引起塑性变形的宏观效果，它的作用效果与晶粒尺寸有关。由此可见，通过细化晶粒，可以提高屈服强度和抗拉强度。

3. 结论

42CrMo 钢经二次调质后，低温冲击性能明显提高，屈服和抗拉强度也明显提高。经三次调质后，低温冲击、屈服和抗拉强度与第二次调质相比，变化不明显。

42CrMo 钢经二次调质后，显微组织中残余奥氏体减少，碳化物从团絮状变成颗粒状，晶粒得到细化。42CrMo 钢经三次调质后残余奥氏体基本消失，晶粒进一步细化。

42CrMo 钢中的铬和钼具有提高钢的淬透性和钢的强度的作用，同时具有增加钢回火稳定性和消除回火脆性的作用，在油中淬透临界直径约为 42mm。尺寸较大时，芯部不能完全淬透，而在晶界上析出铁素体和贝氏体等非马氏体组织，使调质后芯部的综合性能比表面差。为此，对 M42 以上螺栓必须采用水溶液淬火介质，原则是在不淬裂的前提下尽量采用水淬。因为水淬有较多的优点，有较深的淬透层、有较高的淬硬层、较优的机械性能、生产成本低等。

参考文献

- [1] 钟盛钢, 张先鸣. 风电用与钢结构用高强度紧固件的差异 J. 金属制品, 2009 (5): 62-65.
- [2] 张先鸣. 碳钢和合金钢高强度螺栓用材料探讨 J. 金属制品, 2012 (1): 62-65.
- [3] 刘云旭. 金属热处理原理 M. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [4] 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.
- [5] 胡光立, 谢希文. 钢的热处理 M. 西安: 西安工业大学出版社, 1993.
- [6] 张树松, 全爱莲. 钢的强韧化机理与技术途径 M. 北京: 兵器工业出版社, 1995.

表 2、调质后 42CrMo 钢的组织组成及力学性能测试结果

调质次数	显微组织	拉伸试验				-40°C 低温冲击值 KV ₂ /J	硬度 HRC
		ReL/MPa	Rm/MPa	A/%	Z/%		
1	回火索氏体 + 残余奥氏体 + 团絮状碳化物 + 未溶铁素体	940	1130	13.5	48	30.5	36.5
2	回火索氏体 + 残余奥氏体 + 颗粒状碳化物	953	1108	15.5	50	58.5	36.0
3	回火索氏体 + 颗粒状碳化物	988	1112	16.0	51	60.0	35.5