

M48-M64以上 高强度螺栓 调质处理及质量控制

文/ 冯琴



风电作为世界上非常清洁和环保的主要能源之一，是世界各国为应对世界生态环境恶化，应对地球变暖而重点发展的能源。中国风电产业「十二五」将进入一个持续健康发展时期。从目前来看，大力发展3~5MW大功率的风电机组是重中之重，制造的难点之一也在于M48以上高强度螺栓调质处理，而在其材料选用的是B7（42CrMo）钢，一方面缺少国家标准支撑；另一方面设计规范按EN DIN标准要求也近乎苛刻。

众所周知，高强度紧固件的机械性能试验结果是重点考核的产品质量指标，也是涉及风电安全的重要指标。对调质处理的工艺及过程的有效控制对于B7（42CrMo）钢的机械性能起到至关重要的作用。因此，对调质处理过程进行详细阐述以及指出热处理过程的质量控制要点是十分必要的。

一 热处理过程阐述

1、调质热处理定义

调质处理即淬火加高温回火，以获得回火索氏体组织，其中渗碳体呈颗粒状均匀分布。这种热处理称为调质热处理，主要用于中碳结构钢与低、中碳合金钢，以期获得良好综合机械性能。**10.9级或以上级螺栓调质热处理的回火温度应选在500℃以上。**

2、调质处理目的

M48以上风电高强度螺栓大部分选择10.9级，少量 12.9级。参照ISO898-1：2009、GB/T3098.1-2010标准，10.9级高强度螺栓，其硬度值33~39HRC，抗拉强度 $R_m \geq 1040\text{MPa}$ ，断后伸长率 $A \geq 9\%$ ，断面收缩率 $Z \geq 48\%$ ，低温冲击吸收能量（-40~-45℃） $KV_2 \geq 27\text{J}$ 。**在低温零下40℃，冲击吸收能量必须保证大于27J，这是风电机组服役寿期的最重要性能指标**，在材料确定的前提下，必须选择最佳热处理方案，以获得强度和韧性，达到均衡且满足要求的结果。

与正火加回火热处理过程相比，B7（42CrMo）钢经调质处理后，在硬度相同的条件下，它的屈服强度、韧性和塑性会明显地提高，晶粒将会得到进一步细化。因晶粒越细小，位错源到晶界的距离就越小，发生位元错的数量就越少，也就越不易激发相邻位错源开动，滑移不易转到另一晶粒，使得韧性大大提高；同时，晶粒越细小，晶内与晶界变形差异越小，变形越均匀，应力集中小，不易开裂；单位面积晶粒多，有利于变形取向增多，晶界多曲折，对裂纹扩展有抑制作用。通过调质处理可以获得较为细小的晶粒和较好芯部组织，**风电用B7（42CrMo）钢晶粒度一般可达6级以上，并能获得较好的回火索氏体，对改善碳化物的析出和分布有良好效果。**

3、调质处理工艺制定

为获得良好机械性能结果，制定一份尽量合理的调质处理工艺显得尤其重要。试验在连续式网带炉生产线加热炉上进行，该加热炉采用六区加热，炉顶部分分别装有6只热电偶，对每一区段分别测温，碳势主要是通过炉体中部的氧探头来测量并控制整个炉膛的碳势分布。保护气氛渗剂为甲醇和甲苯，高纯度甲醇作为载气，高纯度甲苯裂解作为富化气，碳势设定为0.38~0.45%。炉顶装有强力回圈风机4只，确保炉内温度和保护气氛均匀；淬火温度、碳势气氛、网带速度、淬火液温度、搅拌电机频率等主要技术参数均采用电脑控制，在电脑显示幕上能全面显示各系统实际运行状态。

淬火介质的冷却能力越大，淬硬层越深。淬火冷却介质选用UCON E聚合物淬火液。使用较高浓度（12±1%）PAG水溶液，用于处理B7（42CrMoA）钢或42CrMo4、SCM435（ML35CrMoA）、40CrNiMoA等中碳合金钢。淬火液使用温度一般控制在20~45℃之间。理论上根据Fe-Fe₃C相图以及相变原理和GB/T3098.1的要求，可初步设计热处理工艺，而B7（42CrMoA）钢制定热处理工艺所采用的重要依据为42CrMoA钢CCT图。

为保证工件加热后获得约90%马氏体组织，应确保工件芯部与表面温度达到均匀，以尽量减少应力集中，能够获得较好的高温奥氏体化状态，尤其是屈服比最佳点，加热温度在钢的奥氏体化温度AC₃以上30~50℃，应根据使用的淬火介质选择淬火保温时间。高强度螺栓热处理工艺参数见表1所示。

为了避免因高、中温区冷速不足或冷速不均，而产生大面积软点、畸变和开裂，对大尺寸紧固件（52mm以上大截面螺栓）要实施高压喷射和剧烈搅拌，最大限度地进行高、中温区段的热交换。42CrMoA钢含碳量和含铬量比35CrMoA钢高，可淬透性和强度随之提高，可用于大截面高强度紧固件，在油中淬透临界直径 ϕ 42mm。

B7钢成分近似42CrMoA钢，B7钢的含钼量内控在0.18~0.20%范围内，比普通的42CrMoA钢的含钼量多了0.02~0.03%左右。含锰量在0.65~1.1%范围内，一般B7的含锰量均在0.80~1.0%范围，比普通的42CrMoA含锰量增加0.10~0.20%；锰能提高材料强度、提高淬透性，但单一锰含量超过0.80%

表1 高强度紧固件热处理工艺参数

零件及规格	材料牌号	淬火温度/±5℃						保温时间
		一区	二区	三区	四区	五区	六区	
M48*330	SCM435	850	860	860	860	850	850	210
M52*280	42CrMoA	860	870	870	870	860	860	210
M56*335	42CrMo4	840	850	850	850	850	850	210
M64*350	40CrNiMoA	840	850	850	850	840	840	240
M56*420	B7	850	860	860	860	860	860	240

零件及规格	淬火液回火温度/±10℃						保温时间	出炉冷却	回火硬度	紧固件等级
	浓度/%	温度/℃	一区	二区	三区	四区				
M48*330	11.5	30-45	510	520	520	520	240	水冷	34.5-36.5	10.9级螺栓
M52*280	12	30-45	530	540	540	540	240	水冷	35-37	10.9级螺栓
M56*335	12	30-45	520	530	530	530	240	水冷	35-37	10.9级螺栓
M64*350	12	30-45	530	540	540	540	270	水冷	35-37	10.9级螺栓
M56*420	12	30-45	530	540	540	540	270	水冷	34-36.5	10.9级螺栓

时,会增加材料开裂倾向。钼、锰两种元素同时增加,能克服单一元素的缺点,且材料中的合金元素会相互取长补短,可增加材料综合机械性能。**经过实践证明,B7材料各项力学性能要明显优于42CrMoA,尤其是在低温冲击试验中,冲击吸收能量合格率明显高于42CrMoA**,这就是钼和锰的增加对材料性能提高的作用体现。另外,该钢第二类回火脆性特别敏感,在500~600℃回火时,快冷与慢冷的冲击吸收能量值相差5~7倍,所以在高温回火时应快冷。另外,工艺人员应根据工件的形状规定工件在加热过程中的方位(如平放、横放或斜放等),并根据工件的大小设计一些辅助垫块,减少加热对工件的变形影响。

4、工艺执行

当完整的调质处理工艺制定后,能否严格地贯彻执行将直接决定能否达到预期的热处理效果。这就要求操作人员及质量控制人员,在执行工艺过程中严格遵守质量保证体系及热处理规范的要求,确保工艺执行的准确性。

二 核对头部标记及检验表面质量

风电高强度螺栓产品的头部标记是非常重要的环节,执行热处理工艺之前需要认真核对工件上的钢印标记,包括性能等级、制造厂标、螺栓批次号等,以免将工件弄混,使能够追溯到该批螺栓的原材料炉号、热处理批次及生产发货批次。

对表面质量需要仔细检查,以避免热处理过程中因应力集中而导致淬火开裂的缺陷存在,还可根据所获得的性能试验资料结果进行比对,为后续工艺的优化提供有力的技术支撑。

三 装炉

一般情况下,防止变形,应按热处理工艺要求将工件尽量平放、横放,对过长的工件呈45°斜放,并按一定的方位来摆放;另对需加辅助的垫块也要有相应的要求。

四 执行工艺及淬火

淬火的加热保温过程应根据网带炉的运行速度调整。淬火前应检查淬火水循环系统、提升系统、水温等。淬火水槽的水循环系统运行的有效性是十分关键的,因为其直接决定了工件的冷却速率,在出炉淬火时,从网带炉到水槽的时间在2S内完成,应尽量缩短控制好提升速度,工件出水温度最好在约100℃,以减少热应力和组织应力。在此过程中应对水温和工件进行详细记录。

五 回火及冷却

在回火过程中,应根据网带炉状态及时准确的进行调整,以便保证工件各个部位之保温温度尽快达到一致,共同进入保温过程。对中碳合金钢高温回火,该类钢第二类回火脆性特别敏感,在500~600℃回火时,快冷与慢冷的冲击吸收能量值相差5~7倍,回火结束后一般采用水冷。

六 记录

在整个调质处理过程中,需记录很多相关的工艺参数及要求,大体为工件的装炉方位、淬火加热保温温度、淬火加热保温时间、工件出炉时间、水温变化、工件出炉温度、回火保温温度、回火保温时间等。电脑内的记录应保存备查,它最能体现热处理过程中温度随时间变化的证据,为保证其追溯性,每天在热处理完成后应及时将记录进行整理或列印保留。

七 质量控制要点

调质处理过程中,螺栓内部组织和性能的变化无法即时监测,这是调质处理质量控制难度大的原因之一。以螺栓在炉内加热为例,人们只能测量和控制炉膛的温度,只能从炉温的变化去推测螺栓内部温度场和组织的变化,作为制订加热规程和炉温控制的依据。至少淬火操作,目

前还没有一种传感技术手段可以即时反映冷却过程中温度场与组织变化的资讯，所以有人将淬火冷却喻为“黑洞”，意指人们对其知之甚少，而有待挖掘的潜力巨大。仅仅依靠调质处理後的检验，事实上并不能严格把住调质处理的质量关。潜伏的隐患常常在产品投入使用才暴露，甚至可能导致重大事故。

M48以上高强度螺栓调质处理质量控制要点如下：

- 1. 认真对热处理工艺进行编制、审核、批准**，确保热处理工艺在满足标准、设计规范的基础上尽量优化，保证达到性能指标要求，并保证其可执行性。质量控制人员可以根据实际情况及用户要求，对工艺的合理性提出建议。
- 2. 装炉前应认真核对螺栓头部标记**，保证被处理工件的资讯准确无误和热处理後不丢失以及可办认。
- 3. 装炉时应保证螺栓平整、平放与横放**，对过长的工件呈45°斜放，尽量从装炉环节上减少工件变形；在工艺或用户有要求时，应准确记录装炉方式。
- 4. 淬火加热过程严格控制，碳势要准确无误**，记录每一批螺栓淬火出炉的时间，在出水後应检测工件表面硬度，除SCM435钢大於50HRC外，其余应大於53HRC。淬火後的显微组织为细针状马氏体，按JB/T9211-2008《中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级》评定，淬火马氏体 1~4级符合标准要求；表面与芯部淬火硬度均匀度不大於3HRC。
- 5. 减少淬火变形和淬火开裂的可能性，最好的办法是凭冷却特性来控制浓度**。使用PAG淬火液的目的，是把它作为水的添加剂，并加入水中来调节其冷却特性。因此，热处理生产中要求控制的也应当是淬火液的冷却特性。实践证明：一是凭经验从螺栓的淬火效果来调整浓度；二是用冷却特性仪来控制浓度。
- 6. 凭经验调整浓度的做法是对螺栓的淬火态硬度作记录，做成图表，以用来观察同类螺栓的硬度变化趋势**。当发现螺栓的淬火硬度连续偏高到一定程度时，及时采取升高浓度等办法来降低实际的冷却速度，就可防止出现淬火开裂。而当发现螺栓的硬度连续一段时间偏低或硬度高低不均，以及有较大变形时，可考虑降低淬火液浓度来增大冷却速度。经验法需要经验和严格的管理，适合由工程技术人员来做。
- 7. 用冷却特性仪来控制浓度**，购买一台KHR-02携带型冷却介质性能检测仪，具体做法是定期测量淬火液的冷却特性，主要凭其300℃冷速来确定溶液的有效浓度，再用折光仪按比例来控制浓度。
- 8. 回火时，操作人员应准确掌握各区炉温变化**，并及时进行调节，保证有效的保温时间，以便使螺栓各个部位组织转变均匀。回火後冷却应按照工艺要求（一般为水冷）执行。

八 後语

目前中国的风电事业正处于快速而稳定的发展阶段，而国外的大多数厂家对中国在大功率风电机组技术方面还是有所封锁，尤其在风电机组零部件虽然也购买了一些专用技术，但还是应立足自主创新。调质处理作为风电机组高强度螺栓重要环节，其实施过程的执行质量将直接决定装配质量的好坏。在一定条件下，原材料质量的优劣将影响风电高强度螺栓生产工艺参数的选择，并直接影响风电用高强度紧固件综合力学性能和使用安全。

高强度螺栓在应用中遇到的早期失效，大规格螺栓头部与杆部处断裂，连接处R倒角公差精度是制造时的关键之一。螺纹处拉长或断裂，不仅有原材料非金属夹杂物的原因，还有使用中超拧和在调质处理中加热保温不足，显微组织中存在未溶铁素体现象，芯部与表面组织、硬度差别的影响。这将是今后需要重点研究的工艺课题。希望通过本文的论述，能使中国国内有关工程技术人员对风电机组高强度螺栓，更加明确调质处理过程的操作和检查的要点，使相关制造企业对高强度螺栓的调质过程及质量控制执行过程有更加准确的理解和掌握。 □