

紧固件线材棒料在 风电高强螺栓中的应用



工艺和材料作为机械制造的基础，对于产品的质量和性能起着关键的作用。随着大陆汽车、装备制造振兴规划的推进，对机械基础件的要求逐步提高，也为紧固件线材棒料提出了更高的要求。以螺栓为例，特别是风力发电设备用高强度螺栓，作为主机、叶片、塔架和齿轮箱的连接件，与主机一起承担着基本性能、构件基本功能的各项要求。

文/顾青丽、张先鸣

风电紧固件在技术上有一系列特点：高强度、高精度等级；服务条件严酷，它将随主机一起常年经受酷暑严寒和极端温差的影响，承受高温、低温的侵蚀；功率高，最高达到3兆瓦级；速差大、震动、腐蚀、重载等；除受到轴向预紧拉伸载荷的作用外，还会在工作中受到附加的拉伸交变载荷、横向剪切交变载荷或由此复合而成的弯曲载荷的作用，有时还受到冲击载荷；附加的横向交变载荷会引起螺栓的松动，轴向交变载荷会引起螺栓的疲劳断裂。而在环境介质的作用下，轴向拉伸载荷会引起螺栓的延迟断裂，以及高温条件下引起螺栓的蠕变等。

一、风电高强螺栓技术要求

在降低成本的同时，紧固件的使用者提出了大幅度减轻重量、较高的强度，以便抵抗拉长、拉断、滑扣和磨损；可靠的韧度以减少对偏斜、缺口应力集中和表面质量的敏感性。在潮湿的大气或腐蚀气氛环境下工作的螺栓，要求其有足够低的延迟断裂敏感性，以及良好的冷敏性。

目前，风电高强度螺栓大部分选择10.9级，少量为8.8级。10.9级高强度螺栓，其硬度取值32~39HRC，抗拉强度 $R_m > 1040\text{MPa}$ ，断后伸长率为9%，断后收缩率为48%，低温冲击功 $A_{kv} (-40^\circ\text{C})$

$> 27\text{J}$ 。因此，大多数都采用合金结构钢制造，经过调质处理。风电高强螺栓的用途正在逐步扩大，随著风电设备的高性能化和材料应用应力提高，主机尺寸减小，齿轮箱的轻量化，对螺栓提出了更高的设计应力和轻量化的要求，而最有效的措施是提高螺栓用钢的使用强度。

二、风电高强螺栓用钢

目前，风力发电设备技术大多数从欧洲引进，按高强度紧固件标准，风电用高强螺栓用钢比较复杂，多采用32CrB4、37CrMo4、42CrMo4、50Cr4V、SCM440等，现中国内外风电使用的中碳合金钢牌号一览表，见表1。

表1 风电用高强螺栓材料中国内外牌号一览表

性能	规格	牌号	标准号	备注
10.9级	<M36	32CrB4、30MnB4、 32CrB4、36CrB4	EN10263-4	欧盟牌号
	<M42	30CrNiMo8、 34CrNiMo6、42CrMo4	EN10250-3	
	<M24	SCM435、SCM440	JISG4105	日本牌号
	<M20	4135、4130、4135H、 4140H	SAEJ404、 SAEJ1268	美国牌号
10.9S级	<M24	20MnTiB、ML20MnTiB	GB/T 3077、GB/T 6478	中国牌号
	<M30	35VB、10B33	GB/T 1231	
10.9级	<M24	ML35CrMo、30CrMnSiA	GB/T 6478、GB/T 3077	中国牌号
	<M36	42CrMoA	GB/T3077	
		B7	ASTM A193 (借用)	
<M48	40CrNiMoA、34CrNi3Mo	GB/T 3077		

三、高强螺栓强化机制

风电设备中的高强螺栓大多数为中碳合金钢，不仅要求具有较高的强度，同时还要具有足够的韧度和塑性。实践证明，螺栓经调质热处理後可具有较高的强度，足够的韧度和良好的抗疲劳性能。如果淬火时未能全部淬成马氏体而得到一些非马氏体组织，螺栓的强度、韧度和疲劳性能均会有所降低，尤其当铁素体沿晶界呈网状分布时，其影响程度更为严重。为此，对高强螺栓调质淬火时要求整个截面90%以上获得马氏体。

中碳合金钢中所包含主加合金元素有Cr、Ni、Mn、Mo等。它们所起的主要作用是增加中碳合金钢的淬透性，并且使淬火保证得到马氏体 and 高温回火时有足够的回火稳定性，回火後回火索氏体组织得到强化。实际上，这些元素大多溶於铁素体中，使铁素体得到强化。中碳合金钢中这类元素的含量都保证使铁素体得到强化而不明显降低其韧度，甚至有的还能同时提高其冲击韧度。

其除如Mo、V、B等合金元素，它们在中碳合金钢中的含量一般很少，特别是B的含量极微，而显著地增加淬透性。

淬透深度不仅与钢材成分有关，而且也受螺栓截面大小、加热温度、冷却介质、冷却方法等影响，诸多影响因素在制定热处理工艺时必须加以注意。

四、热处理工艺制定

风电高强度螺栓用中碳合金钢（化学成分见表2）。

20MnTiB、ML20MnTiB、35VB、10B33等钢，油淬临界直径不

大於 $\phi 25\text{mm}$ ，B含量明显提高淬透性，主要用於钢结构高强度螺栓、小规格风电机组10.9级高强螺栓。

35CrMo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。35CrMo钢的临界淬透直径在油中为 $\phi 25\text{mm}$ ，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，使调质後芯部的综合性能比表面差。

30CrMnSiA是国标推荐用於10.9级高强度螺栓的钢种，它有较好的综合性能，在调质状态下具有较高的强度和足够的韧度，淬透性并不高，油淬时可淬透25mm直径。

B7钢是美国紧固件标准牌号，成分近似42CrMo钢，42CrMo钢含碳量和含铬量比35CrMo钢高，可淬透性和强度随之提高，可用於大截面高强度紧固件，在油中淬透临界直径为 $\phi 42\text{mm}$ 。

40CrNiMoA钢中铬和钼是碳化物强烈形成元素，镍既能提高钢的强度，又能提高其塑性与韧度。镍在钢中不形成碳化物，只能固溶於奥氏体与铁素体，起著细化晶粒、强化铁素体、改善韧度，特别是低温韧度的作用。同时又能增大钢的淬透性，这对机械性能要求较高且均匀的大截面风电高强度螺栓特别有用。该钢在油中淬透临界直径为 $\phi 45\text{mm}$ 以上。另外该钢第二类回火脆性特别敏感，在450~550℃回火时，快冷与慢冷的冲击功值相差5~7倍，所以在高温回火时应快冷。

34CrNi3Mo钢为大截面调质用合金钢，油淬临界直径可达 $\phi 80\sim 100\text{mm}$ ，在我国合金钢材料标准中已取消该钢种，但淬透性优点，其他钢种无法比拟，市场有需求。

高强度螺栓调质淬火时需要整个截面90%以上获得马氏体组织。风电高强度螺栓直径均大於 $\phi 30\text{mm}$ ，淬火介质选用影响最大，当油淬火时不能满足机械性能要求，则必须采用水淬，原则是在不淬裂的前提下尽量采用水溶液。因为水淬有较多的优点，如有较深的淬硬层、较优的机械性能、生产成本低等。

42CrMo、40CrNiMoA钢与其他钢种相比，具有最好的冲击韧度和淬透性，当直径超过 $\phi 45\text{mm}$ 时，必须采用水溶液，以保证淬透层深度。

表2 中碳合金钢的化学成分（质量分数，w%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
20MnTiB	0.17~0.24	0.17~0.37	1.30~1.60	—	Ti 0.04~0.10	B0.0005~0.0035
35VB	0.31~0.37	0.17~0.37	0.50~0.90	—	V 0.05~0.12	B0.001~0.004
10B33	0.30~0.35	<0.40	0.70~1.20	—	—	B0.0005~0.0035
35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.4~0.70	0.80~1.20	0.15~0.25	—
42CrMo	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.20	0.15~0.25	—
30CrMnSiA	0.28~0.34	0.90~1.20	0.70~1.10	0.80~1.10	—	—
40CrNiMoA	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.60~0.90	0.15~0.25	1.25~1.75
34CrNi3Mo	0.30~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	0.70~1.10	0.25~0.40	2.75~3.25
B7	0.37~0.49	0.15~0.35	0.65~1.10	0.75~1.20	0.15~0.25	—

根据不同钢号的临界点确定加热温度（一般在850℃左右），然后淬火+高温回火，在500~600℃之间的高温回火（调质处理），使10.9级风电高强度螺栓具有良好综合机械性能。中碳合金钢的临界点温度和热处理工艺如表3。

表3 中碳合金钢热处理工艺

钢号	临界点温度/℃		热处理工艺	
	Ac1	Ac3		
20MnTiB	720	843	880~900℃油淬	390~420℃回火
35VB	740	802	860~870℃水淬	420~450℃回火
10B33	723	789	840~860℃水淬	420~450℃回火
35CrMo	755	800	850~870℃油淬	490~520℃回火
42CrMo	730	800	850~870℃油淬	520~560℃回火
30CrMnSiA	760	830	850~870℃油淬	480~510℃回火
40CrNiMoA	760	790	850~870℃油淬	530~560℃回火
34CrNi3Mo	720	790	870~890℃油淬	540~570℃回火
B7	730	800	860~880℃油淬	530~560℃回火

五、超细晶粒钢及新材料

高强螺栓属于带缺口零件，具有很高的缺口敏感性，容易在缺口集中部位处，杆与头部的过渡处或螺纹根部产生延迟断裂。

风电高强螺栓它的弱点是在自然环境下，对延迟断裂比较敏感。延迟断裂通常是在常温下伴随大的塑性变形，而且在屈服强度低得多的情况下发生的，往往不易察觉，成为危害比较大的安全隐患。

耐延迟断裂的具体措施之一是细化晶粒，为此，中国内外都在广泛地研究开发超细晶粒钢。如：日本住友金属的ADS系列，神户制钢的KNDS系列，中国钢铁研究总院的ADF钢等。大连钢厂在钢研总院的指挥下，在42CrMo钢的基础上，通过降低S、P、Si、Mn含量，添加微合金元素V、Nb，并增加Mo的含量，成功地开发出1300MPa级的高强度螺栓用钢42CrMoVNb（ADF1），其综合力学性能有较大幅度提高，在康明斯发动机上，用于12.9级缸盖螺栓，具有良好的疲劳性能，在自然环境下的延迟断裂试验情况良好，未发现断裂。制成的13.9级螺栓替代由42CrMo钢制造的10.9级螺栓安装在依维柯发动机的悬挂支架上，两次通过1.5万公里的可靠性能道路试验，突破了国际上最高只有12.9级螺栓的限制。

近年来大量采用的钢结构用紧固件，抗拉强度超过1200MPa，国外采用KDS2钢（代替SCM440钢）制造12.9级螺栓，延迟断裂有明显改善；中国采用45CrNiMoTi在1500MPa级别钢结构连接副上使用，其性能优于回火马氏体（铬钼系列钢）高强度紧固件。

目前，国外开发的还有U20Si超高强度钢（无碳化物贝氏体/马氏体复相钢）和国内开发的免退火冷锻钢棒料或简化退火线材，已经得到风电紧固件大量使用。

结论

众所周知，螺栓的破坏大部分是疲劳破坏，而螺栓又是多缺口、易于应力集中的零件，过高地要求螺栓的使用强度，即抵抗抗静拉能力提高了，而动载疲劳强度并非随着抗拉强度增加而提高。位此，热处理时将10.9级风电机组高强度螺栓抗拉强度Rm控制在1050~1130MPa，螺纹在热处理后滚丝成型，这样在螺栓的内部产生较大的残余压应力，从而减缓裂纹的形成，因而可以大大提高螺栓的疲劳强度。

风电用高强度螺栓作为机械基础件，如今世界各国都在重视强化技术，对紧固件用钢要求具有更高的强度、抗延迟破坏性能、耐腐蚀性，加工性能都提出新要求。近年来，随着中国钢铁企业的技术进步，高强度、高耐热、高成型紧固件棒材线材的大量推出，既能满足日益严格的风电用高强度螺栓机械性能的要求，也能支援风电发电机组整机与零部件的国产化。