

# 汽车高温连接紧固件材料及热处理工艺

文/赵萍丽、张先鸣

地球上的资源和能源越来越紧缺，轻量化、节能化、安全环保将是未来装备、汽车车辆、机车车辆发展方向。为此，在机械部件组装不可或缺的螺纹连接上，也提出了轻量化的要求，势必追求更高设计应力，更加合理的紧固技术。为了减少高强度紧固件氢脆断裂的危险，而采用不锈钢耐热钢制造发动机螺栓，是使用最有效的措施之一。

## 1、高温连接紧固件应用特点

高温连接紧固件一般应用于汽车高温工作服役区域，如排气歧管连接缸盖，涡轮增压器连接排气歧管，三元催化器连接增压器，排气管连接三元催化器等。该区域服役的零部件及总成承担着汽车驱动动力的能量产生与转变、动能输出、燃料输送和高温排放气体的高速流动及回圈。

具备高温连接要求的紧固件基体材料本身需具备一定的高温性能，如较高的高温力学性能、组织稳定性和防腐性能。紧固件及其表面处理涂层均需要满足装配服役性能和可拆卸要求或售后市场维修要求。

## 2、汽车紧固件用耐热钢技术条件

### 2.1 汽车紧固件用耐热钢牌号化学成分

汽车耐热紧固件用含镍、含铬的耐热材料或一般合金耐热钢牌号和化学成分见下页表1。

### 2.2 汽车高温连接紧固件技术条件

高温连接紧固件室温性能见表2。

表2 高温连接紧固件室温性能

材料类别	牌号	典型的热处理制度	螺栓抗拉强度/MPa	硬度/HV
沉淀硬化型不锈钢	ML06Cr15Ni25Ti2MoAlVB (GH2132)	+AT+P	900-1150	287-367
铁素体型不锈钢	ML04Cr11Nb	+A	≤485	180-285
合金结构钢	ML41CrMoV	+QT	850-1000	272-320
合金结构钢	ML21CrMoV	+QT	700-850	225-272
马氏体型不锈钢	14Cr17Ni2 (1Cr17Ni2)	+QT	861-1034	253-304
镍合金	NiCr20TiAl	+AT+P	1000-1300	320-417

注：

- 1) 14Cr17Ni2相当于JIS G 4303 SUS431，NiCr20TiAl相当于ASTM B637 UNS 07080。
- 2) +AT: 固溶。  
+P: 时效硬化。  
+QT: 淬火并回火。  
+A: 退火。



表1 汽车紧固件用耐热钢牌號化學成分和使用溫度

牌号	ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV	ML04Cr11Nb	ML41CrMoV	ML21CrMoV	14Cr17Ni2	NiCr20TiAl	
化学成分 (品质分 数W,%)	C	0.03-0.08	≤0.06	0.36-0.44	0.17-0.25	0.11-0.17	0.04-0.10
	Si	1.00-2.00	0.06-0.75	0.15-0.35	≤0.40	≤0.80	≤1.00
	Mn	1.00-2.00	0.40-0.75	0.45-0.75	0.40-0.50	≤0.80	≤1.00
	P	≤0.025	≤0.025	≤0.035	≤0.025	≤0.035	≤0.020
	S	≤0.015	≤0.025	≤0.040	≤0.030	≤0.035	≤0.015
	Ni	24.00-27.00	≤0.50	/	≤0.60	1.5-2.5	余量
	Cr	13.50-16.00	10.50-11.70	0.80-1.15	1.20-1.50	16.00-18.00	18.00-21.00
	Mo	1.00-1.50	/	0.50-0.65	0.55-0.80	/	CO:≤2.00
	V	0.10--0.50	/	0.25-0.35	0.25-0.35	/	Fe:≤1.50
其它	Ti:1.90-2.35 Al:≤0.35 B:0.003-0.010	Nb:10XC-0.75	Al:≤0.03	/	/	Ti:1.80-2.70 Al:1.00-1.80 B:≤0.008	
使用溫度 /°C	持续溫度	650	500	550	550	500	650
	最高溫度	650	650	550	550	600	800
应用举例	排气歧管、增压器、催化器	排气歧管、增压器、催化器	排气歧管	排气歧管	排气歧管	增压器、催化器	

2.3 高温连接紧固件热处理工艺

高温连接紧固件尽管有大量的含镍、含铬的耐热材料牌号选择,但是还必须通过正确的热处理手段,才能更好地发挥耐热钢的功能。可以说,热处理生产是提高高温连接紧固件品质和使用可靠性的重要保证。高温连接紧固件技术要求及热处理工艺见表3。

表3 高温连接紧固件技术要求及热处理工艺

牌号	热处理工艺	螺栓抗拉强度/ MPa	硬度/HV
ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV	固溶溫度:970-990°C水冷 或空冷;时效溫度:700- 720°C空冷或缓冷	900-1150	287-367
ML04Cr11Nb	退火溫度:730-750°C空冷 或缓冷	≤485	180-285
ML41CrMoV	淬火溫度:880-910°C油 冷;回火溫度:670-710°C	850-1000	272-320
ML21CrMoV	淬火溫度:900-930°C油 冷;回火溫度:680-720°C	700-850	225-272
14Cr17Ni2	淬火溫度:950-980°C水 或油冷;回火溫度:650- 700°C	861-1034	253-304
NiCr20TiAl	固溶溫度:1050-1090°C空 冷或水冷;时效溫度:690- 700°C空冷或(840-860°C+ 690-720°C二次时效)	1000-1300	320-417

ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV是沉淀硬化型耐热不锈钢,又称为高温合金。在GB/T14992中高温合金牌号为GH2132,相当于美国ASTM A959标准中的660钢和日本JISG4311标准中的SUS660钢。ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV钢可作为耐热钢使用,这是由于奥氏体的再结晶温度高,铁和其它元素的原子在其中的扩散系数小,故其强化稳定性比铁素体高用于工作温度高于650°C的发动机耐热螺栓。

ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV钢含有大量的奥氏体稳定化元素,如铬、镍、钼、钛等合金元素。铬、镍在奥氏体型耐热钢中,能提高其抗氧化性;钼能提高奥氏体型钢的热强性;钛是比铬更易与碳结合形成稳定碳化物的元素,钛含量1.90%可以使大部分的碳存在于钛的碳化物之中,从而改善钢的抗晶间腐蚀能

力。合金添加中有Al、V、B等元素,这种材料经过高温处理,并进行长时间的时效后,在组织中析出一种弥散的金属化合物,从而使该材料的抗拉强度提高。

ML06Cr15Ni25Ti2MoAlBV钢在冶炼过程中,每一炉次存在化学成分含量波动,合金元素偏析、杂质数量、种类、大小、形状以及热变形工艺等因素的影响。在与生产条件一致的实际现场,970±10°CX1h进行固溶处理,螺栓头部采用冷镦成型,840±10°C稳定化处理,最后搓丝成型,按不同700-720°C时效制度进行热处理,试验检测可以满足发动机螺栓其技术要求为室温抗拉强度≥900MPa,;硬度27~35HRC,晶粒度≥5级,载入480MPa,保持23h不断。

ML04Cr11Nb铁素体型不锈钢典型的热处理工艺以退火为主,需严格控制加热温度或降低镦锻温度在750°C以下。

耐热合金结构钢是指具有较好的热稳定性和热强性的钢,ML41CrMoV和ML21CrMoV钢,在高温下具有较高的强度,是发动机上重要螺栓材料,工作时承受较高的机械负荷和热负荷。采用真空炉氮气保护加热,淬火+高温回火(调质热处理),淬火温度分别为880-910°C和900-930°C油冷;回火温度分别为:670-710°C和680-720°C,加热必须满足奥氏体均匀化,以达到高强度螺栓的技术要求。

14Cr17Ni2(1Cr17Ni2)钢是一种用途广泛的马氏体+铁素体型不锈钢。在



Cr17型不锈钢的基础上添加了1.5%~2.5%镍。该钢具有良好的耐蚀性和较高的力学性能，热处理工艺的变化将极大程度上影响14Cr17Ni2钢的综合力学性能。

14Cr17Ni2钢在成型后须通过热处理以获得优异的综合性能。在调质状态下，材料的显微组织中主要有 $\delta$ 铁素体、残余奥氏体、马氏体及碳化铬析出相，这些相的形态、分布和比例决定了钢的力学性能。一般情况下，马氏体相和少量碳化铬析出相共同作用达到强化材料的效果，而过多的 $\delta$ 铁素体相和碳化铬析出相将降低材料的塑性和韧性。因此，热处理工艺的选择依据是提高马氏体相含量、抑制 $\delta$ 铁素体相的形成、控制碳化铬析出含量以及尽可能地细化马氏体组织。

14Cr17Ni2钢淬火温度为960~990℃，回火应避免脆性区475~550℃。淬火后的正常组织是马氏体+ $\delta$ 铁素体，当淬火温度过高时，会诱发钢中 $\delta$ 铁素体与残余奥氏体含量增加，降低冲击韧性值；当降低淬火温度，奥氏体化不完全，淬火后组织内残留大量奥氏体，影响抗拉强度和硬度。而对于大规格直径螺栓最佳热处理工艺，淬火温度为1040℃；560℃回火的组织为回火索氏体和少量淬火马氏体，在相邻晶粒之间均匀分布着少量块状 $\delta$ 铁素体，含量小于10%、呈分散分布，抗拉强度值约为1190 MPa，冲击功大于49J。而在600℃回火后碳化铬含量会显着降低，其抗拉强度也会随之下降，对于10.9级高强度螺栓回火温度应选择在580~610℃。

回火保温时间的延长有利于碳化物的析出和马氏体相回火索氏体的转变，使材料组织更加均匀化，综合力学性能得到改善，在调质前进行高温回火预处理无法消除和改变 $\delta$ 铁素体，但通过调质改变组织形态可以提高冲击韧性。若在高温下重复回火会降低14Cr17Ni2钢冲击韧性，这与组织中晶界上Cr、Fe碳化物和合金元素(Si、Mn等)的析出有关，必须尽量避免。

NiCr20TiAl (GH4080A) 镍合金须采用固溶强化、第二相强化和晶界强化三类手段对合金进行综合强化<sup>[8]</sup>。基本热处理制度为固溶处理+时效处理；固溶处理可使强化相 $\gamma'$ 相和碳化物固溶，获得最佳的持久蠕变强度；时效处理可以有有效的析出沉淀相，类型、数量与尺寸和所要求的强度、塑性、韧性的配合。固溶处理：1070℃-1090℃X8h,空冷；时效处理温度：690~700℃X16h,或(840~860℃X24h+ 690~720℃X16h二次时效),空冷处理。合金在固溶组织的基础上经700℃±5℃,16h,晶界上的M7C3继续转变为M23C6碳化物，所以在晶界上沉淀出叫连续的M23C6碳化物，晶内的 $\gamma'$ 相也长大成球形质点。研究表明，晶粒度对NiCr20TiAl镍合金的疲劳强度影响明显，表面细晶组织可以提高疲劳裂纹的萌生抗力，内部的粗晶组织有利于提高疲劳裂纹的扩展抗力。晶粒度不仅影响试样的疲劳寿命；也影响试样的疲劳强度，晶粒度越小，单位体内晶界数量越多，对裂纹萌生的阻碍作用越明显。

## 2.4 高温连接紧固件热处理金相组织

采用沉淀硬化型或铁素体型不锈钢材料的紧固件，经固溶加时效处理后，组织由基体组织和析出相组成。采用耐热合金钢材料的紧固件，经调质处理后，基体组织为回火索氏体。

根据材料类型和热处理工艺的不同，ML06Cr15Ni25Ti2MoAlVB钢的为奥氏体+MC弥散碳化物(图1)；ML04Cr11Nb钢为铁素体+NbC碳化物(图2)；ML41CrMoV和ML21CrMoV钢为回火索氏体+马氏体+少量铁素体(图3、图4)；14Cr17Ni2钢为回火索氏体+颗粒状碳化物+少量块状铁素体(图5)；NiCr20TiAl镍合金为 $\gamma'$ 相+M23C6碳化物(图6)。

