

学习GB/T39192—2020 《高温合金件热处理》 ——兼谈高温合金螺栓热处理工艺

文/张先鸣

技术革新使材料趋于高性能化，汽车行业技术的发展同样寄予各种材料技术的发展。材料具有不同的组成和不同的性质，划为不同的分类。汽车车辆速度的提高，车体部件的轻量化，驱动系统的大功率化，制动性能和受流性能的提高，要求材料本身的开发和加工技术的进步，确保可靠性的诸多技术，整车轻量化和采用高效内燃机、涡轮增压技术、自动变速器、混合动力、电子控制技术等。其中涡轮增压技术可提高发动机比功率和比扭矩，实现发动机小型化，因此被认为是最经济更有效的节能减排技术[1]。

高温合金具有优异的高温强度、良好的抗氧化和抗热腐蚀性能、优异的蠕变性能、良好的疲劳性能和断裂韧性等综合性能，已成为航空工业和汽车车辆动力高温部件不可替代的关键材料[2]。涡轮增压器中涡轮的转速一般都在几万转以上，最高可达20万转/分钟，温度也高达900~1000℃[3]，因此连接的紧固件需采用高温合金材料制作。在生产制造增压发动机时，必须严格把关，就每一个可能出现故障的问题必须深入研究。而紧固件用高温合金热处理是通过改变工件内部的显微组织或改变工件表面的化学成分，提高韧性及抗蚀性能，消除应力与软化，提高强度。为优化显微组织所进行的热处理研究一直是合金研制及应用过程中的重要环节之一。

2020年10月11日，国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会首次批准发布了GB/T39192—2020《高温合金件热处理》，该标准由全国热处理标准化委员会组织起草，于2021年5月1日正式实施。为了便于标准的理解与实施，现对标准简要的学习并解读和对部分紧固件用高温合金的特性及热处理工艺作一简介。

一. 高温合金热处理工艺

高温合金热处理工艺是指高温合金材料在固态下，通过加热、保温和冷却的方式，以获得预期组织和性能的一种金属热加工工艺。近年来对于高温合金研究比较深入、系统的是固溶热处理和时效热处理。固溶是指高于高温合金组织内析出相的全溶温度，使合金中各种分布不均匀的析出相充分溶解至基体相中，从而实现

强化固溶体并提高韧性及抗蚀性能，消除残余应力的作用，以便继续加工成型，并为后续时效处理析出均匀分布的强化相做准备。时效是指在强化相析出的温度区间内加热并保温一定时间，使高温合金的强化相均匀地沉淀析出，碳化物等均匀分布，从而实现硬化合金和提高其强度的作用[4]。

二. 国标主要技术内容

2.1 热处理设备

2.1.1 高温合金热处理加热通常采用间接电阻炉，常用炉型有空气电阻炉、真空炉、惰性气体炉等。

2.1.2 用于固溶处理、中间退火、去应力退火及时效处理的热处理炉的有效加热区炉温均匀性要求见表1。

表1 高温合金热处理炉的温度均匀性要求		
热加工工艺类别	炉温均匀性要求	热处理炉类别
850℃及以下温度的去应力退火	+8℃	ⅢA
850℃以上温度的去应力退火	+10℃	Ⅲ
时效处理	+5℃	Ⅱ
固溶或中间退火	+10℃	Ⅲ

2.1.3 淬火冷却槽应配备测温装置，还应配备温度记录装置。冷却槽应有足够容积的淬火介质并且配备搅拌装置。使用油或聚合物淬火介质时，油或槽的温升不超过22℃，使用水淬火时，冷却槽的水温温升不超过14℃。

2.1.4 淬火油及聚合物淬火介质应符合JB/T6955或专用技术档的要求，快速淬火油使用温度在60~90℃，聚合物水溶液使用温度在25~50℃。使用前应测定其初始冷却特性，如最大冷却速度，最大冷却速度时的温度，300℃时的冷却速度，冷却至600℃、400℃和200℃的时间。采用折光仪测定淬火介质浓度，若冷却特性相对初始冷却特性的变化≥10%时，应及时调整或更换淬火油及聚合物水溶液。



2.2 热处理工艺材料

在汽车螺栓/螺柱的连接设计中,设计者不仅要充分考虑螺栓的尺寸、材料、公差等级、机械性能等,还要充分考虑螺栓的应用环境,如温度场(高/低温)、振动、冷热交替、腐蚀性等环境影响因素。排气系统由于其环境的特殊性和连接件间的密封问题,一直是各汽车厂家研发过程的设计难题。目前,常见内燃机的排气温度范围在800~1000℃,在如此高的环境温度下,高温合金能满足螺栓的耐高温性能具有的特殊要求。

国外对与航空航太领域、汽车行业有关的高温合金材料,尤其是GH4080A、GH4169合金的工艺和应用仍然是处于严格保密状态,因此其材料特性和制造工艺需要自行研究。GB/T39192—2020国标中,制造紧固件的高温合金按制备工艺主要为变形高温合金,常用的耐热紧固件高温合金技术要求及热处理工艺见表2。

表2 高温合金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 Rm/MPa	规定非比例延伸 强度Rp0.2/MPa	断后伸长率 A/%	断面收缩率 Z/%	硬度/HV
GH2132 [06Cr15Ni25 Ti2MoAlVB]	固溶温度:970~990℃水冷 或空冷;时效温度:700~ 720℃X16h空冷或缓冷	900~1150	600	15	20	287~367
GH4080A [Nimonic80A]	固溶温度:1060~1080℃ 空冷或水冷;时效温度: 840~860℃X24h+690~ 720℃X16h二次时效、空冷	1000~1300	600	12	12	320~417
GH4169 [Inconel718]	固溶温度:960~980℃空冷 或水冷;时效温度:720~ 730℃X8h+610~630℃X8h 二次时效、空冷	1270~1350	1030	12	15	415~450

2.2.1 GH2132合金

GH2132(美国牌号为A286)合金是一种铁基高温合金,又称06Cr15Ni25Ti2MoAlVB是铁基沉淀硬化型耐热不锈钢。该合金主要通过时效析出 γ' -Ni₃(Ti,Al)相进行强化,由于含有铬元素,具有较好的热稳定性、塑性及良好的耐蚀性[5];在650℃以下具有高的屈服强度、持久强度和蠕变强度,并具有良好的加工塑性和满意的焊接性能,是汽车耐热钢紧固件用量最大的材料,常被用于工作温度高于650℃的发动机耐热螺栓。

GH2132合金含有大量的奥氏体稳定化元素,如铬、镍、钼、钛等合金元素,具有高的热强度和高的热稳定性,铬、镍在钢中能提高其抗氧化性;钼能提高钢的热强性;钛是比铬更易与碳结合形成稳定碳化物的元素,从而改善钢的抗晶间腐蚀能力;还添加有Al、V、B等元素,该材料经过高温固溶处理,且长时间的时效后,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。

GH2132合金在冶炼过程中,存在炉次化学成分含量波动,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,980±10℃X1h进行固溶处理,螺栓头部采用冷锻成型,840±10℃稳定化处理,最后搓丝成型,按不同710~720℃X16h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6~8级。

2.2.2 GH4080A合金

GH4080A合金基采用固溶强化、第二相强化和晶界强化三类手段对合金进行综合强化。热处理制度为固溶处理+时效处理。基本热处理制度为固溶处理+时效处理。

固溶处理温度:1060℃~1080℃X8h,空冷, GH4080A镍合金基体的过饱和度增加;二次时效,空冷处理。第一次时效840~860℃X24h,奥氏体晶界会同时析出大量大小不同的 γ' 相,平均直径分别为0.25μm和0.04μm,导致硬度显著提高,第二次690~720℃X16h时效,起到补充时效硬化的作用,基体上弥散析出大量的 γ' 强化相,平均晶粒尺寸约为127μm,硬度为355~380HV[6]。合金在固溶组织的基础上经时效处理,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 γ' 相也长大成球形质点。研究表明,抗拉强度随着拉拔减面率的增加而增加,时效处理后,抗拉强度大幅度提高,二次时效后晶粒度对GH4080A合金的疲劳强度影响明显,晶粒度不仅影响试样的疲劳寿命;还影响试样的疲劳强度,晶粒度越细小,单位体能内晶界数量越多,对裂纹萌生的阻碍作用越明显。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。



2.2.3 GH4169合金

GH4169 (国外牌号 Inconel718) 是一种沉淀强化型镍基 (Ni-Cr-Fe) 高温合金, 因其出色的高温力学性能、优异的抗氧化、耐腐蚀耐磨损能力以及良好的焊接性而被广泛应用于航空航太、汽车内燃发动机等领域, GH4169 合金成分复杂, 含有 Mo、Al、Ti、Nb 等多种合金元素, 其强度主要受固溶强化和析出相强化机理影响。合金中的 Ti、Al 元素主要形成辅助强化相 γ' (Ni₃Al, Ti) 相 (面心立方结构, L12 型), 而 Nb 元素则是形成主要沉淀强化相 γ'' (Ni₃Nb) (体心四方结构, DO22) 的重要强化元素。但 γ'' (Ni₃Nb) 是亚稳相, 在 700℃ 以上很容易转化为同素异构的 δ -Ni₃Nb 相 (正交结构, DOa 型), 而 γ' 和 γ'' 相一般通过二次时效热处理过程析出[7]。

采用真空热处理炉对 GH4169 进行热处理。热处理制度为: 升温 4h 至 980℃, 保温 1h, 随炉冷却。随后接二次时效热处理 (730℃ 保温 8h, 随炉冷却 2h 至 620℃ 保温 8h, 随炉冷却)。

而经过固溶加二次时效热处理后, 合金材料晶界有 δ 相, 有利于消除缺口敏感性, 产品按该方案进行热处理, 性能稳定且满足要求, 在析出相 γ' 和 γ'' 的沉淀强化作用下, 抗拉强度为 1270~1340MPa, 同时横向和纵向试棒的屈服强度为 1030~1070MPa, 均达到了技术标准, 说明经热处理后其性能变得更加均匀。在强度提升的同时其断后伸长率仍 $\geq 12\%$, 若热处理之后在晶界有部分片状 δ 相沉淀, 这可能会降低强度和断后伸长率, 因为 δ 相会消耗一定的强化相元素 Nb。在热处理时选择更快的冷却速度以减少 δ 相析出可能获得更理想的性能。但适量的 δ 相可以细化晶粒, 改善合金的缺口敏感性和高温性能。因此, 有必要根据实际应用的需要, 选择合适的热处理工艺, 使其具有理想的组织和性能。

2.3 工艺程序控制要点

2.3.1 紧固件装炉前应进行清洗, 加工余量 $\leq 0.3\text{mm}$ 或无加工余量的紧固件进行真空或惰性气体热处理时, 表面应保持干燥清洁, 入炉前无指印、标识印迹及其他污染痕迹。工件表面无裂纹、螺纹无折迭、划痕等缺陷, 尖角应进行倒圆或倒角。

2.3.2 装炉时相邻工件之间应有足够的间隙, 特别是采用迭装时, 应保证炉气能够在其内外表面流动畅通, 均匀加热及冷却。

2.3.3 对于尺寸较大、形状复杂的紧固件, 固溶处理加热时推荐采用预热或分段加热方式, 固溶温度在 1000℃ 时, 一般为采用两段或两段以上的分段加热; 工件应在低温段温度以下入炉。

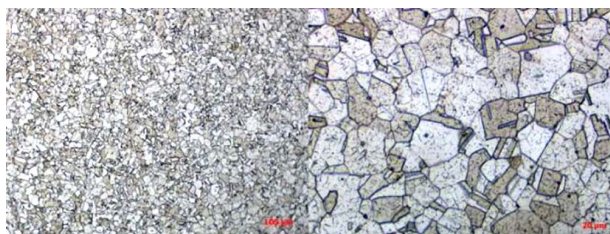
2.3.4 采用真空热处理时, 真空工作压强一般不大于 0.133pa。采用油冷、聚合物水溶液、水冷、风冷或气冷时, 工件应冷却至 200℃ 以下时才允许出槽, 停止风冷或停止气冷。

2.3.5 经真空或惰性气氛热处理后的工件表面允许出现轻微的淡黄色氧化。工件表面不应存在裂纹等缺陷。热处理后若出现力学性能不合格, 允许重复热处理一次, 补充时效不列入重复热处理。

三. 金相检验及高温持久性能

一般细小的晶粒度可有效提高高温合金的室温抗拉强度, 研究了固溶处理温度对合金晶粒度的影响认为, 控制固溶温度很有必要, 固溶工艺下限温度处理合金晶粒度可达 8 级, 上限温度处理合金晶粒度减小至 6 级, 技术要求晶粒度为 6~8 级。

根据合金类型和热处理工艺的不同, GH2132 合金为奥氏体+MC 弥散碳化物 (图 1); GH4080A 合金为 γ' 相+ M₂₃C₆ 碳化物 (图 2); GH4169 合金为 δ 相+ γ' + γ'' 相+ Ni₃AlTi 碳化物 (图 3)。

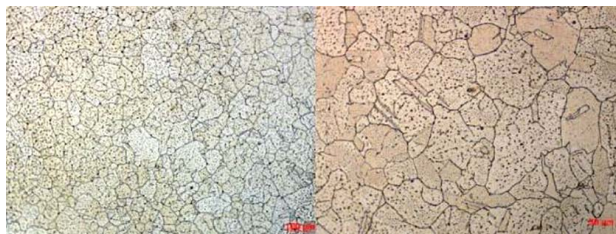


200X

500X

GH2132合金

图1 固溶+时效处理, 王水腐蚀



100X

200X

GH4080A合金

图2 固溶+时效处理, 王水腐蚀

高温合金制造紧固件前，合金材料验证或热处理工艺试验时，必须进行高温拉伸试验和高温持久试验。对于汽车耐热钢紧固件的国产化需求，T/CSAE136-2020《汽车高温连接紧固件技术条件》团体标准内容包括了紧固件用高温合金材料的相关技术要求，见表3。根据GB/T2039—2012《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》对GH2132合金在650以385MPa的应力进行高温持久试验，试验100h后试样断裂，检测结果见表4。

表3 高温合金高温力学性能													
牌号	热处理	强度/min	温度/℃										
			150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
GH2132	固溶+时效	Rm	/	/	/	/	/	720	710	700	690	670	/
		Rp0.2	570	560	550	540	530	520	510	490	460	430	380
GH4080A	固溶+时效	Rm	950	900	900	900	900	900	900	890	880	850	/
		Rp0.2	577	568	564	560	550	540	530	520	510	500	480

表4 GH2132高温合金高温持久试验结果						
编号	温度/℃	应力/MPa	持续时间/(h:min)	抗拉强度Rm/MPa	断后伸长率A/%	结果
1	650	385	100：14	632	16	合格
2	650	385	100：14	692	18	合格
3	650	385	100：14	722	20	合格
4	650	385	100：15	704	19	合格



100X 200X
GH4169合金
图3 固溶+时效处理，王水腐蚀

四. 结束语

科技创新对紧固件来说，不仅是发展问题，更是生存问题。面对与日俱增的环保和能源压力，内燃发动机节能减排是大势所趋，坚持问题导向和需求引领，针对高温合金紧固件需求量会越来越多，应根据实际的使用场合选择合适类型高温合金，并采用合理的热处理方法与工艺参数，为市场提供了种类更多、规格更全、品质更优的各类耐热紧固件，以期对推动汽车耐热紧固件制造及材料生产全产业链的建立具有重要意义。

参考文献

[1] 钱鹏,陆恒昌,袁峰.汽车用耐热紧固件团标的制定及A286合金螺栓的研制[J].上海金属, 2020 (6) : 15-19+26.

[2] 伍赛特.汽车节能减排技术研究及展望[J].应用能源技术,2019 (7) : 29-33.

[3] 石秀勇,吴淑霞,王亚飞. “小T大作” —燃油车节能减排技术趋势[J].汽车与配件,2019 (11) : 76-77.

[4] 崔令江,林熙原,朱强等.高温合金热处理工艺研究进展[J].材料导报A,2016 (7) : 106-110.

[5] 代礼斌,王东哲,莫燕等.时效工艺对GH2132高温合金组织和性能的影响[J], 金属热处理,2017 (8) :142~146.

[6] 赵萍丽,张先鸣.GH4080A镍合金紧固件加工及热处理[J], 摩托车技术, 2020 (11) :50~53.

[7] 薄鑫涛,郭海洋,袁凤松.实用热处理手册[M], 上海:上海科学技术出版社,2014.

