

固溶处理对高温轴承钢Cr4Mo4V性能的研究

张志祥

上海人本集团轴承技术研发有限公司 上海 201411

摘要: 本文为了探索固溶温度对Cr4Mo4V高温轴承钢材料性能,并通过材料热处理工艺研究,确定淬火温度范围,通过金相组织、晶粒度、碳化物含量、残余奥氏体含量等相关技术指标,保证产品适用于高温、高载荷、高转速工况环境,为材料性能改善提供依据。

关键词: Cr4Mo4V; 淬火温度; 固溶处理

前言

现代科技飞速发展,对轴承的技术要求也越来越严格;在高速铁路、航空航天、重型机械和冶金等领域均对轴承有着严格的要求;要求轴承使用寿命长,环境适用能力强等特点。在全面实现国产化趋势下,轴承材料热处理技术也逐渐走向精细化,以应对不同工业领域。

1 适用条件及材料属性

Cr4Mo4V对应国内牌号为GCr4Mo4V或8Cr4Mo4V,该材料是轴承行业内使用极其广泛的一种高温高合金轴承钢,该轴承钢除具有一般轴承的特性外,还具有优异的红硬性、热稳定性、300℃以内极高接触疲劳强度,可长期在高温环境中的使用;是涡轮增压器、航空发动机等高Dmn值的必备材料,其工况如下:1.高转速:一般飞机发动机的转速在20000转/分钟以上,这么高的转速对材料的要求是很高的;2.耐高温:产品运行温度非常的高,轴承的运行温度也可能达到300℃,轴承材料需要能耐受高温。由于轴承运行温度很高,轴承套圈需采用耐高温且高温稳定性好的材料,Cr4Mo4V这种材料在300℃时硬度仍可达到60HRC,淬火后硬度 > 63HRC,故该高温轴承钢经常用作关键产品主轴轴承和很多耐高温轴承的使用材料;为了探索Cr4Mo4V高温轴承钢的基本属性和固溶化工艺,特做材料热处理试验,积累经验。

固溶处理是将材料所含有的碳化物进行高温溶解、获得 γ 相均匀的过饱和固溶体,俗称碳化物溶解到奥氏体内部,在淬火过程中形成马氏体,便于时效过程中再次析出颗粒细小、分布均匀的第二相组织,并且消除残余应力,从而使材料产生二次硬化效果,以稳固合金转移改善高温抗蠕变性能。固溶处理的温度范围一般在980℃~1250℃之间,主要依据碳化物相析出和溶解的情况来确定,以保证强化相析出的必要条件和细化晶粒度。

2 材料主要成分

Cr4Mo4V钢采用双真空或电渣重熔法冶炼的特种冶

炼方法,如表一,标准要求钢材以退火状态交货,退火钢材的布氏硬度为HBW197-241;

表一 钢牌号及化学成分(%)

Cr4Mo4V	C	Cr	Mo	V	Ni	Mn	Si	S	P
	0.81	4.1	4.2	1.0	0.2	0.32	0.23	0.005	0.008

元素的主要特性如下:

(1) 因为Cr4Mo4V钢是多元素高合金钢,导热性较差,因此加热时必须充分热透。根据中、高温时氧化脱碳速度截然不同的原因,所以充分预热,特别是中温充分预热是完全必要的。(2) Cr4Mo4V钢中大量存在Mo、V的一次碳化物,该碳化物类型为MoC、VC等,这些碳化物在1150℃左右,才能溶解20%左右,其余残留在基体上。3、Cr4Mo4V钢中的主要合金元素对钢材性质的影响:Cr:与氧气化合为Cr₂O₃,提高钢材的抗腐蚀和抗氧化能力,提高钢材淬透性,硬度和强度,降低钢材的塑性与韧性;Mo:增加马氏体的稳定性,提高疲劳强度及耐磨性,细化组织,减少淬火变形;V:提高钢的耐磨性的重要元素,提高钢的致密度与韧性。

3 热处理工艺方案

高温保温时间是Cr4Mo4V轴承钢热处理中的关键环节,须采用多段加热的方式,零件在1050~1120℃之间的固溶温度。奥氏体化和固溶化的最佳时间取决于零件的有效壁厚及装载量,淬火后测量样品的晶粒度。在有效的范围内保温时间越短,能够确保硬度要求的前提下,以减小晶粒的尺寸为目标。如热处理变形较大可采用分级淬火,采用缩短保温时间,和阶梯加热的保温工艺减小零件心部与表面温度差,从而达到降低热应力,组织应力、减少热处理变形和裂纹萌生。接下来的奥氏体向马氏体转变,零件须采用油冷方式快速冷却至室温后,进行深冷处理和时效处理,以确保马氏体转变率是否充分。热处理工艺按表二所示:

表二 热处理试验工艺

编号	牌号	固溶处理工艺	淬火介质
1#	Cr4Mo4V	1000℃—15min	油
2#	Cr4Mo4V	1030℃—15min	油
3#	Cr4Mo4V	1080℃—15min	油
4#	Cr4Mo4V	1120℃—15min	油
5#	Cr4Mo4V	1150℃—15min	油
6#	Cr4Mo4V	1200℃—15min	油

材料样块根据热处理工艺分别编号为1#、2#、3#、4#、5#、6#；M50热处理工艺：加热到850℃保温10分钟，以确保试样的表面与心部温度一致；再升温至高温（奥氏体温度），使试样充分奥氏体化，淬火液采用真空淬火油，使试样快速冷却至40℃以下；然后对热处理后的试样进行切割、镶嵌、磨抛等工序，通过专用的金相腐蚀剂，做金相组织、晶粒度、碳化物等分析。

4 结果与分析

4.1 碳化物分析

Cr4Mo4V钢退火时的碳化物形态是有较多块状的一次碳化物、二次碳化物存在，截圆尺寸从10微米到几十微米不等，共晶碳化物^[1]是非平衡结晶时由钢液中析出的大块碳化物，最初存在于钢锭中。它的形成原因是在钢液晶体结晶时，产生碳与合金元素的偏聚，一般存在树枝晶之间残留的残液内，碳和铬、钼、钒主要合金元素的富集程度很高，它将以共晶方式形成大块共晶碳化物，俗称一次碳化物。为减少一次碳化物对钢材性能的影响，在钢材出厂前，会添加高温扩散退火工序，并经过多次锤锻，以减少或消除共晶碳化物，提高材料综合性能，通过试验分析Cr4Mo4V钢共晶碳化物开始溶解的温度是1120℃左右，共晶碳化物主要组成为CrC、VC、Mo₂O₃；数据按表三所示。

表三 碳化物分布

类型	退火态	1#	2#	3#	4#	5#	6#
碳化物含量	7.19%	4.09%	4.43%	4.51%	4.53%	4.53%	无
面积集中分布 (95%比例)	3.5	6	6.2	7.9	7.3	7.3	无

4.2 硬度分析

硬度指标是衡量材料抵抗外界物质进入金属内部的能力，因此在保证材料金相组织合格的前提下，使硬度达到极限值，是提高材料耐磨性能重要方式。

高硬度是Cr4Mo4V钢的特质，在高温时保持着高硬度亦是Cr4Mo4V钢的最大优点，比起GCr15轴承钢是一种优质的耐高温材料，Cr4Mo4V为含Cr、Mo较高和少量钒的工具钢，也称为二次硬化型钢，根据要求淬火后硬度63HRC，按表四所示，奥氏体化温度达到1080℃时硬度

为最佳值，也就是说温度在上升，硬度会急剧下降。

表四 硬度检测 (HRC)

分类	退火态	1#	2#	3#	4#	5#
硬度	21.6	63.5	63.0	63.0	61.3	59.5
	21.0	63.5	63.0	63.0	61.5	59.5

4.3 金相组织分析

Cr4Mo4V材料原材料为退火状态，主要为球粒状珠光体组织，淬火设备一般采用真空淬火炉，可保证高温加热且无氧化，产品外观颜色均匀一致。利用金相显微镜检测，组织主要有大量的马氏体组织、少量的共晶碳化物、较多的二次碳化物和少量残余奥氏体等。

原始退火组织为球粒状珠光体+一次碳化物+铁素体；1000℃为细小马氏体+一次碳化物+二次碳化物和少量的残余奥氏体；1030℃为大量细小马氏体+一次碳化物+二次碳化物和少量的残余奥氏体；1080℃为大量针状马氏体和一次碳化物+二次碳化物和少量的残余奥氏体；1120℃为粗大针状马氏体+少量的一次碳化物+残余奥氏体；1200℃为大量的粗大针状马氏体+大量的残余奥氏体且境界明显。数据按表五所示。

表五 金相组织

原始状态	1#	2#	3#	4#	5#
球粒状珠光体	1级	1级	2级	3级	大于4级

4.4 残余奥氏体含量

残余奥氏体^[2]是淬火后必然产生的显微组织之一，该组织主要通过过冷奥氏体未充分转变而产生，残留在材料内部的亚稳定相，极易发生组织转变；含量过多时，在某种环境工况下发生转变，会导致材料体积或尺寸精度丧失。奥氏体是都具有面心立方的晶格结构(γ相)；当采用深冷处理时，均由亚稳定态转化为马氏体组织；残余奥氏体形成过程中被马氏体分割，形态各异，主要分布在马氏体间隙中。其优缺点在各行业中存在不同的定义：当残余奥氏体含量适中时，可以减少零件的热应力和组织应力，抑制裂纹萌生倾向，提高钢的抗冲击、降低脆性的能力；对于交变应力所产生的冲击应力环境下零件，钢中的残余奥氏体可以减少晶界势能，起耐冲击和提高疲劳强度能力，此时的实用价值是可观的。缺点是残余奥氏体组织硬度较低，钢中残余奥氏体含量越高，对降低钢件的硬度、强度、耐磨性能和疲劳强度的影响越大，由于该类组织为亚稳定相，在长期自然时效或剪切应力作用下将转变为马氏体组织，使产品体积膨胀或残余应力发生改变，引起工件的胀大或收缩，俗称热稳定性差。因此轴承产品精度等级较高的工件，须严格控制残余奥氏体含量与分布，因此采用深冷处理和高

温回火是使残余奥氏体全部转变为马氏体的最佳途径。Cr4Mo4V钢材奥氏体化温度达到1120℃时，其残余奥氏体含量极具增加，按表六所示。

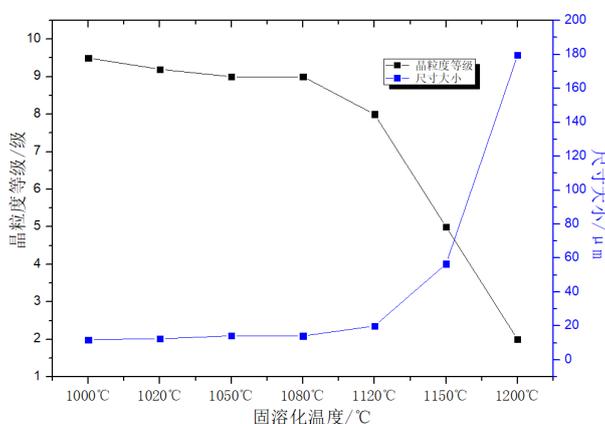
表六 残余奥氏体含量(%)

固溶温度	1000℃	1030℃	1080℃	1120℃	1200℃					
未回火	0	0	7.6	9.5	8.9	7.4	28.6	26.6	32.3	28.5

4.5 晶粒度分析

晶粒度^[3]等级是金属材料衡量好坏的重要指标之一，晶粒度等级越高晶粒尺寸越细小，一般晶粒度达到8级或更细的，视为超细化晶粒，可有效提高金属材料的综合性能指标；晶粒度的检验是可以采用ZEISS金相显微镜

通过腐蚀剂测定钢中实际晶粒度和本质晶粒度的重要手段，实际晶粒度显示是晶粒度检验工作中的难点。本次方法采用直接淬硬法。Cr4Mo4V钢与其他钢的热处理规律基本相同，从图一可以分析出随着奥氏体化温度的升高，碳化物的溶解，逐渐解除了对晶粒的禁锢，减少了钉扎作用，导致晶粒的肆意生长，因此Cr4Mo4V钢也以晶粒随温度的升高而逐渐长大，温度达到1120℃时晶粒度为8级，而1150℃为5级，从晶粒生长趋势来看该材料在1120℃为转晶粒长大转折点开始剧烈生长，同时可以反映出碳化物完全固溶温度大于等于1120℃。具体数据详见图一。



图一

5 分析与结论

目前Cr4Mo4V高温轴承钢在我国相对使用率较高，但很多技术指标还在探索和积累阶段，根据以上数据总结如下：晶粒度等级在淬火温度为1120℃时，晶粒长大趋势增加；1130℃晶粒度等级为最高，但组织偏1级接近欠热组织；1200℃淬火组织，为过热组织，晶粒度粗大，淬火硬度偏低，残奥含量超高；共晶碳化物一般在加热1120℃开始加剧溶解，当温度达到1200℃时，碳化物基本不可见；碳化物含量在淬火温度1030℃~1120℃范围内相对稳定。根据以上结论分析，Cr4Mo4V淬火温度

的范围为1030~1120℃为最佳工艺参数。

参考文献

- [1]董国强 GCr15轴承钢碳化物液析与加热温度加热时间关系研究[J].石钢科技,2007.6(30):160.
- [2]李文东 回火过程对M50钢残余奥氏体转变的影响[D]哈尔滨工业大学,2014.
- [3]陶素芬 王福明 于乔木等,奥氏体化温度及时间对EQ70钢晶粒尺寸的影响[J]材料热处理学报,2013(11):42-47.