

# 时效温度对Cr-Co-Ni型超高强度钢组织性能影响

张志祥

上海人本集团轴承技术研发有限公司 上海 201411

**摘要:** 本文通过对Cr-Co-Ni型超高强度钢进行不同温度的时效试验,研究了时效温度对Cr-Co-Ni型超高强度钢试样组织和硬度的影响,从而获得高的抗拉强度。试验结果表明:Cr-Co-Ni型超高强度钢淬火处理后的基体组织为板条马氏体和少量的残余奥氏体和细小铁素体,经过时效处理的组织为时效具有马氏体相位的索氏体和微量的残余奥氏体以及富含Co、Mo和Cr的第二相强化物,二次强化反应与析出细小弥散的针状合金碳化物 $M_2C$ 有关,随着时效的温度升高,析出相颗粒增多,同时也不断长大,密集分布于马氏体组织上,但随之而来的奥氏体逆向逐渐增多,所以有效的控制纳米级 $M_2C$ 合金碳化物的沉淀和奥氏体含量的逆向增长是提高该材料强韧性的关键。

**关键词:** Cr-Co-Ni超高强度钢; 逆转奥氏体

## 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。Cr-Co-Ni型超高强度钢是一类新型超高强度钢,在同一强度级别下,Cr-Co-Ni超高强钢具有无可比拟的韧性和疲劳寿命。

Cr-Co-Ni超高强度钢的二次硬化现象已经成为最主要的强韧化机理。二次硬化型超高强度钢的强韧化主要是通过原材料组分及热处理中的固溶、深冷和时效处理等工艺达到其强韧化的。其作用为:(1)通过不同的热处理获得高密度位错的板条马氏体,Co可以抑制位错马氏体的回复,同时加入Ni提高韧性;(2)加入合金元素形成碳化物Mo、Cr和Co碳化物作为弥散强化相可以提高钢的硬度、提高强度、韧性以及优化显微组织,此外,含碳量低,抑制粗大碳化物 $Fe_3C$ 、 $M_6C$ 和 $M_{23}C_6$ 的出现提高了钢的韧性;(3)通过固溶、热加工和不同的热处理获得细小弥散的晶粒,提高微孔聚集形核抗力,达到提高韧性的目的;(4)利用奥氏体晶的细小弥散来提高韧性(主要是指残余奥氏体和逆转奥氏体),而且钢的韧性主要取决于两者的稳定性、尺寸及数量。

## 1 试验目标

Cr-Co-Ni超高强度钢,顾名思义要求抗拉强度须大于1900MPa,但由于产品与轴承相关,轴承在机械领域为精密元件的使用环境仍然需要准备一定的耐磨性和必要的尺寸稳定性,因此硬度要求50~54HRC,残余奥氏体含量 $\leq 5\%$ 。

## 2 材料主要成分分析

Cr-Co-Ni型超高强钢采用VAR+VIM冶炼的特种冶炼方法。标准要求钢材以退火状态交货,退火钢材的布氏硬度为 $\leq HB400$ ;便于机加工。主要元素为高镍,高钴,高铬合金成分。因为该超高强度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。Cr-Co-Ni型超高强度钢中大量存在Co的一次碳化物,该碳化物为MC、 $M_6C$ 等,这些碳化物在860℃左右,才能溶解20%左右,其余残留在基体上。Cr-Co-Ni型超高强度钢中的主要合金元素对钢材性质的影响:Cr: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,少许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,但在高温时,会形成 $Mo_2O_3$ 氧化透气;Co:提高钢的耐磨性的重要元素,有效抑制位错组织的回复能力,Ni主要抑制晶间腐蚀,减少晶界偏析,从而提高钢的致密度与韧性,降低裂纹萌生趋向。

## 3 热处理工艺

保温时间Cr-Co-Ni型超高强度钢热处理中的关键环节,须采用多段加热的方式,零件在600~800℃之间奥氏体化,奥氏体化的最佳时间取决于零件的截面积及装载量。理想情况下,保温时间应该尽可能短,能够满足硬度要求条件即可,以减小晶粒的尺寸,如热处理变形较大可采用分级淬火,该保温工艺降低内应力及减小零件心部和表面温差、预防发生变形或者萌生裂纹,接下来的马氏体转变,零件须采用空冷方式冷却至室温后,进行时效或者深冷处理,否则导致形变和裂纹萌生的倾向

性提高, 热处理工艺表1所示:

表1 Cr-Co-Ni型超高强度钢时效热处理工艺

编号	试样	工艺	淬火介质
0#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	退火态	/
1#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	885°C*1h固溶	油
2#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	885°C*1h固溶→400°C*3h*3次	油
3#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	885°C*1h固溶→450°C*3h*3次	油
4#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	885°C*1h固溶→480°C*3h*3次	油
5#	Cr-Co-Ni型超高强度钢	885°C*1h固溶→500°C*3h*3次	油

材料样块根据热处理工艺分别编号为1#、2#、3#、4#、5#; 热处理工艺: 加热到750°C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°C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、硬度、残奥、晶粒度等分析。

#### 4 结果与分析

4.1 不同时效处理温度对Cr-Co-Ni型超高强度钢材料组织的影响

Cr-Co-Ni型超高强度钢热处理前原始试样的碳化物形态, 渗碳体为主, 成条状, 它的形成原因是, 在过冷奥氏体中转变分解的渗碳体在晶界析出, 为减少碳化物对钢材性能的影响, 在钢材出厂前或锻造后, 必须添加高温扩散退火及球化退火工序, 提高材料性能。Cr-Co-Ni型超高强度钢的固溶硬化处理的目的是硬化作用, 组织充分转化为马氏体及少量的残余奥氏体, 强化固溶体, 为后续时效过程析出强化相做充分的准备。通过OM与SEM分析如下: 0#, 为球化退火组织, 细小均匀分布的球粒

珠光体组成; 1#, 细小均匀分布的马氏体+残余奥氏体+少量的渗碳体组成; 2#, 细小均匀分布的马氏体+残余奥氏体+少量的渗碳体组成; 3#, 细小均匀分布的马氏体+少量的索氏体+残余奥氏体+少量的渗碳体组成; 4#, 少量分布的马氏体+少量的索氏体+残余奥氏体+少量的渗碳体组成; 5#, 极少量分布的马氏体+大量的索氏体+奥氏体+少量的渗碳体组成。因此该材料在400°C、450°C、480°C和500°C不同温度时效处理4h后的微观组织, 其主要组织为半条马氏体, 随着时效温度的升高, 淬火马氏体逐渐减少, 时效马氏体逐渐增多, 第二相析出物颗粒增多, 在480°C时效时, 有极细小的第二相析出物颗粒均匀的在基体中, 这些相是过饱和的Co在位错线和马氏体基体析出的与基体共格的纳米级 $\epsilon$ 碳化物相<sup>[1]</sup>。随着时效温度的升高, 基体与析出相的相位关系发生改变, 析出相颗粒数量逐渐增多。

#### 4.2 硬度分析

Cr-Co-Ni型超高强度钢为含Cr、Co较高的工具钢, 也称为二次硬化钢, 根据要求淬火后硬度 $\geq 55\text{HRC}$ , 如表2。

表2 不同时效温度对硬度的影响

分类	硬度实测值					
	0#	1#	2#	3#	4#	5#
Cr-Co-Ni型超高强钢	36.5	55.7	54.2	51.4	49.2	47.7
	36.5	55.8	54.2	51.1	49.8	47.8
	36.0	56.1	54.5	51.3	49.5	48.0

#### 4.3 不同时效温度对残余奥氏体含量的影响

残余奥氏体<sup>[2]</sup>, 是淬火后显微组织的主要组成部分, 它主要由过冷奥氏体未充分转变, 残留在材料内部, 此组织是不稳定相, 含量过多, 在某种环境工况下, 会发生转变, 导致材料体积或尺寸精度丧失。

残余奥氏体含量会随淬火温度的升高而增加。

逆转奥氏体: 主要是随着时效温度升高, 奥氏体微量出现的, 是由于Co与Ni相互交错与C结合, 结合后的区域Ac1发生向下偏移, 部分区域开始奥氏体形核, 在马氏

体夹角之间形成纳米级奥氏体, 对产品降低裂纹风险是有好处的, 可以抑制裂纹的萌生扩展, 肉眼极难识别, 可借助设备, 与淬火组织中的残余奥氏体相比, 逆转奥氏体是随时效温度升高, 逆转奥氏体从纳米细小状逐渐增多, 最后完全奥氏体化后呈现块状, 质量分数快速增加, 钢的韧性增加, 强度与硬度迅速下降; 余奥氏体和逆转奥氏体在某种界限中极难区分, 目前仅在这种超高强度钢出现, 虽然逆转奥氏体相对稳定, 形变诱发相变倾向性小, 但奥氏体是不稳定组织, 仍然需要; 480°C时效时,

Ni、Co和C在奥氏体中的固溶度相对较高，合金诱发相变马氏体的转变温度 $M_s$ 和 $M_f$ 降低，从而阻止转变的发生。

采用X射线衍射仪(X-350A)测定奥氏体含量<sup>[3]</sup>(残余奥氏体和逆转奥氏体含量)，400℃奥氏体含量达到最低值，3%左右，当时效450℃奥氏体含量升至6.7%，说明奥氏体在400℃~450℃开始逆转，逆转奥氏体产生促使所谓的残奥升高，当时效温度达到500℃时，奥氏体含量已超过10%的含量。

无论是哪一种奥氏体，再精密工件中均需要严格控制含量，因此时效温度设置为400℃最佳。

#### 4.4 机械性能的分析

超高强度钢，顾名思义抗拉强度或屈服强度相对较高，并伴有优良的综合性能，在服役过程中不易断裂，不易发生塑性变形，拥有高强度材料刚性，同时具备塑性材料的韧性，在拉伸过程中存在明显的颈缩。通过2#

样品工艺对材料机械性能测试发现抗拉强度为1910MPa，屈服强度1714MPa；冲击功4J，延伸率18%，收缩率10%

#### 4.5 物相分析

XRD衍射是通过X射线照射到晶体上发生衍射，所产生的谱图，通过图谱曲线对应的角度，辨识晶面指数，XRD特别适用于晶态物质的物相分析，晶态物质组成元素或基团如不相同或其结构有差异，它们的衍射谱图在衍射峰数目、角度位置、相对强度次序以及衍射峰的形状上就显现出差异。因此，通过样品的X射线衍射图与已知的晶态物质的X射线衍射谱图的对比分析便可以完成样品物相组成和结构的定性鉴定；通过对样品衍射强度数据的分析计算，可以完成样品物相组成的定量分析，400℃时效后物相分析可以看出，主要以 $\alpha$ 相为主，少量的 $\gamma$ 相，保持高强硬性的组织主要还是以马氏体分解析出第二相组织所引起。(如图1所示)

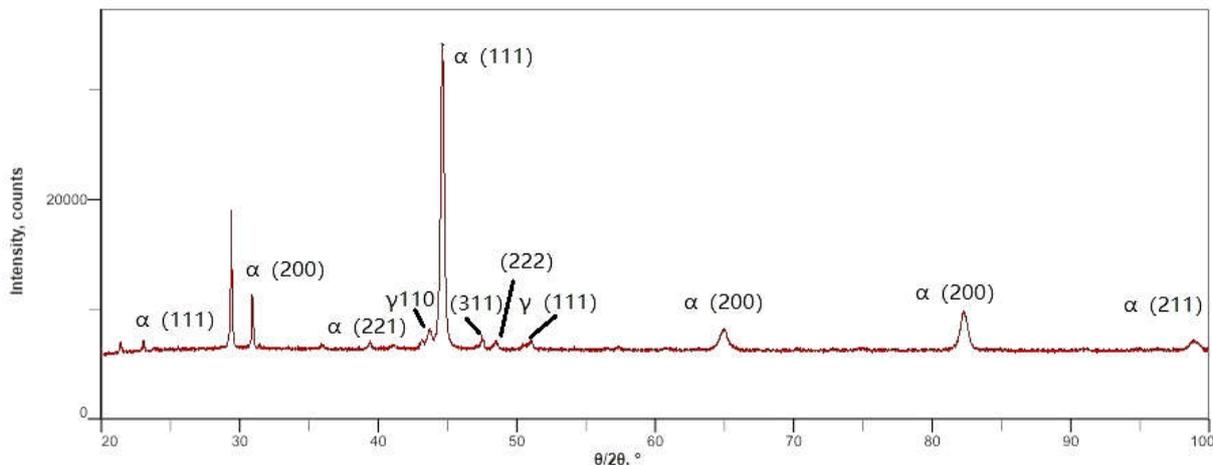


图1

#### 分析与结论

Cr-Co-Ni型超高强钢，材料强度较高，在高温情况下抗拉强度高达1900MPa以上且硬度不低于50HRC，材料具备足够的韧性以及高的强屈比。提升该超高强钢强硬性的组织主要为马氏体组织析出的第二相Cr-Co合金，Ni改善析出物对晶界的聚集，而严格控制奥氏体含量是保证尺寸稳定性的关键，残余奥氏体400℃以下低于3%，450℃逐渐升高，证明400℃~450℃之间开始出现逆转奥氏体，且含量随时效温度的升高而增加，说明该材料AC1线偏低。淬火硬度与400℃回火后硬度相近，但对着温度的

升高逆转奥氏体增加，硬度存在明显降低，保证硬度、强度最高的情况下，目前时效温度取400℃为最佳温度。

#### 参考文献

- [1]杨光华,轴承钢中残留奥氏体含量与热处理的关系[J] 金属加工(热加工),2014(09):69
- [2]柴泽,GCr15 轴承钢残余奥氏体定量测试标样制备方法及其关键技术研究[D],机械科学研究总院,2014
- [3]王洪刚,GCr15轴承钢的接触疲劳寿命影响因素[J],黑龙江冶金,2009,29(04);1-3+6