

双真空熔炼GC-4钢真空油淬工艺研究

刘忠秋 鄢善道 李文玉 饶 励

摘 要

本文研究了双真空熔炼GC-4钢真空油淬温度与组织和性能的关系,在870~970°C范围内进行真空油淬并低温回火,均可获得较好的综合机械性能,提高淬火温度可提高 K_{Ic} 值。原工艺规范规定的淬火温度对真空淬火是适用的。

一、引 言

GC-4钢是一种中碳低合金超高强度钢,属Cr-Mn-Si-Mo-V系。它通常在等温淬火与低温回火状态使用,其抗拉强度级别为1765~1961MPa,常用作飞机起落架、机翼大梁等重要受力构件。

长期以来,这种钢在热处理生产中存在两个主要问题:一个是冲击韧性偏低问题,当钢的含碳量偏上限(0.40~0.42%)时,冲击韧性值往往达不到技术条件的要求;另一个是氢脆问题。为改善GC-4钢的冲击韧性曾做了多方面的努力,近几年来,采用先进的真空感应加真空自耗的双真空冶炼工艺方法,由于冶金质量的进一步提高,GC-4钢的断裂韧性有明显的提高,裂纹扩展速率也有所下降,但冲击韧性与周期疲劳性能并没有得到改善^[1]。为了彻底解决冲击韧性偏低的问题,以提高零件的使用寿命,我们制订了超高强度钢真空热处理工艺研究计划。本工作是其中的一部分,重点研究真空油淬温度与组织以及与机械性能的关系,探讨真空油淬代替普通等温淬火或真空等温淬火的可能性。

二、试验条件与方法

1. 试验用料

试验用料:抚钢生产的双真空GC-4钢
钢棒尺寸: $\phi 60 \times 60 \text{ mm}$
钢的化学成分列于表1。

2. 试样制备与热处理

本试验共用五个淬火温度:870、890、920、940、970°C。淬火后于260°C回火4小时空冷。每个淬火温度各做三个拉伸、三个冲击、五个断裂韧性及一个金相试样。所有试样的机械加工均按试样图纸的要求,由试样坯料直接加工成最终形状、尺寸与精度,机械加工中间不进行热处理。

真空热处理工艺参数的选择:

(1) 真空度的选择

根据真空度与光亮度关系的试验结果(另文发表),GC-4钢在 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3}$ 托的真空度下进行热处理,均可获得光亮的表面,没有氧化脱碳现象,与一般资料报道的结果相同。因此,本试验真空度定为 5×10^{-2} 托左右。

(2) 淬火压强的选择

在真空淬火的条件下,不同的真空淬火油

表 1 双真空熔炼GC-4钢的化学成分

化 学 元 素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
含 量 , %	0.39	0.80	1.36	0.006	0.014	1.25	0.25	0.51	0.09	0.01	0.024

注:化学试样取自 $\phi 20 \text{ mm}$ 钢棒。

具有不同的临界淬火压强。所谓临界淬火压强是指在该压强下淬火时零件可获得在大气条件下淬火所得到的硬度。本试验所用真空淬火油为大连石化七厂生产的 ZZ-1 真空 淬火油。临界淬火压强试验结果表明：ZZ-1 真空淬火油在 $1 \times 10^{-1} \sim 760$ 托的压强范围内的淬火冷却能力与大气条件下的淬火冷却能力相当。因此,为防止试样转入中间室时发生氧化脱碳,淬火前对中间室充入高 纯氮气,将液面压强充到560托。

(3)试样加热保温时间的选择

真空加热 方式与普通空气 加热方式不一样,主要靠辐射加热,对流加热作用微弱,因此,真空炉中零件的 加热速度比普通空气炉的要慢,有资料报道要慢5~6倍。根据我们在小型多用途真空炉上进行的加热系数试验结果(另文发表),本试验加热保温时间定为 1 小时(试样直径或厚度最大为10mm)。

试样的真空淬火加热是在小型多用途立式真空炉内进行的。

三、试验结果与讨论

1.机械性能试验结果

室温拉伸、冲击及断裂韧性试验结果见表2与图1。

2.金相分析与断口扫描结果

用光学金 相显微镜与 电子金相显微镜观察,并拍照了金相显微组织。

三种温度真空淬火并回火的显微组织为板

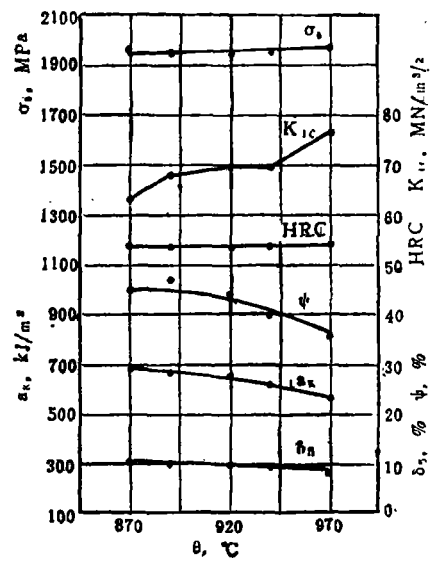


图 1 室温机械性能与淬火温度的关系

条马氏体+少量下贝氏体+少量残余奥氏体(图2)。板条(位错)马氏体成束状排列,它们的方位基本上一致,各板条晶之间以小角度晶界分开。这是与片状(李晶)马氏体多方向排列、板条晶之间以大角度晶界分开是不相同的。由图2可以看出,随着奥氏体化温度的增加,马氏体板条的宽度增加。下贝氏体铁素体片则呈零乱多向分布,它们分布在奥氏体晶界近旁或板条马氏体群之间,其上碳化物颗粒与铁素体主轴成55~60°夹角。观察到少量呈薄膜状存在于马氏体板条晶周围的残余奥氏体,但不如以前在920℃空气炉加热、190℃等温淬火、260℃回火的样品所观察到的薄膜状残余奥氏体那样清晰。

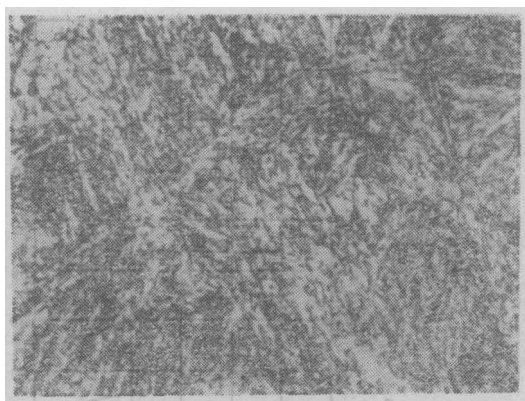
920℃真空与普通油淬状态的显微组织亦为马氏体+少量下贝氏体+少量残余奥氏体。它与回火马氏体的颜色不同,回火时,由于马氏体分解析出碳化物,因而马氏体易受腐蚀而呈黑色。

X 光衍射测量残余奥氏体的结果如下:

表 2 室温机械性能试验结果

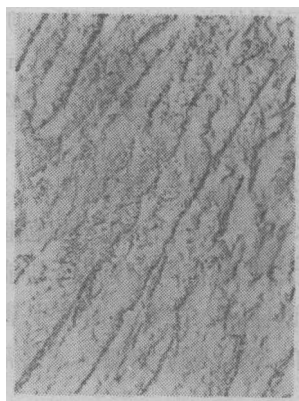
加热炉类别	淬火温度 $\theta, ^\circ\text{C}$	σ_b	δ_5	ψ	a_k	K_{Ic}	HRC
		MPa	%	%	kJ/m ²	MN/m ^{3/2}	
真空炉	870	1968.3	10.3	45.3	683.3	63.3	54.0
	890	1949.3	10.2	47.3	670.0	68.2	53.9
	920	1949.3	10.0	44.3	653.3	70.2	53.9
	940	1960.7	9.6	40.3	613.3	68.9	54.0
	970	1967.7	8.4	36.3	563.3	76.5	54.0
空气炉	920	1978.3	9.5	34.0	626.7	—	—

a

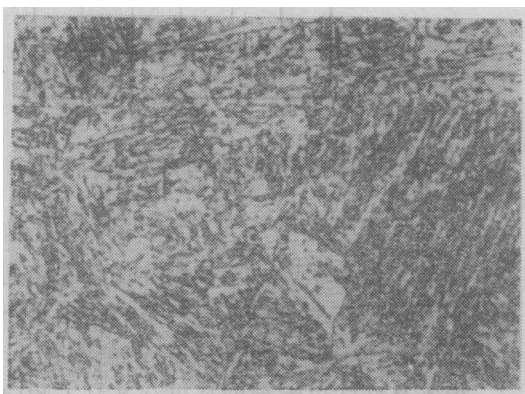


890°C 真空油淬

e



b

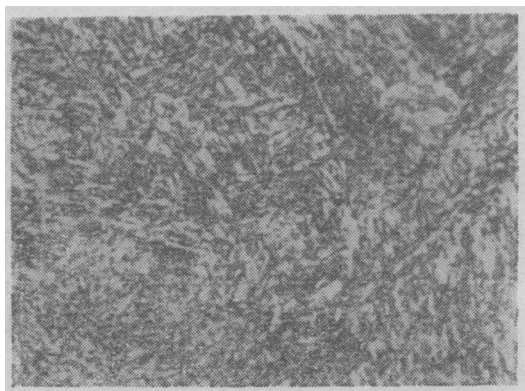


920°C 真空油淬

f

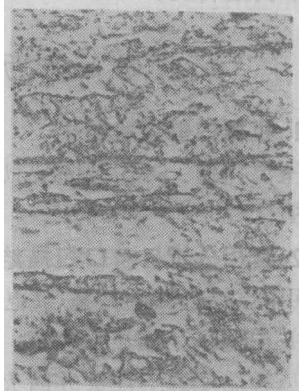


c

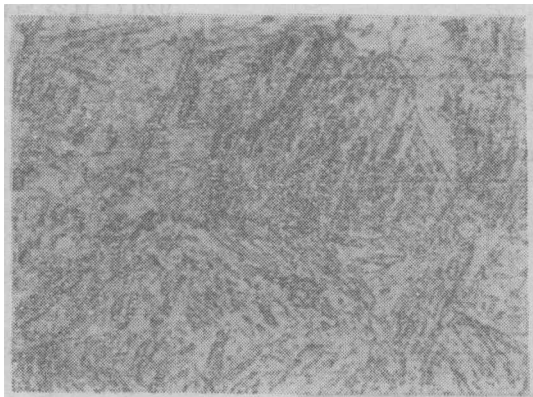


940°C 真空油淬

g



d



920°C 真空油淬
(未回火)

h





920°C普通油淬
图2 真空油淬与普通油淬金相照片
a、b、c、d、i为光学照片 830×
e、f、g、h为电镜照片 10000×

920°C真空与普通油淬状态的残余奥氏体量约为4~5%；五种温度真空淬火并回火的约为3~5%。说明淬火后回火残余奥氏体分解较少，残余奥氏体的热稳定性较好。

三种温度真空淬火并回火的断裂韧性断口在扫描电镜上进行了观察与拍照，结果说明：断口形貌为韧窝+少量准解理，见图3。

3. 试验结果的讨论

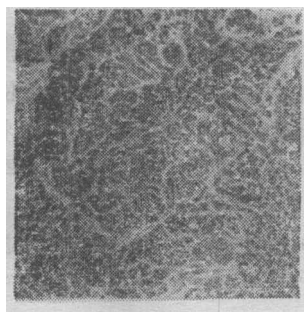
(1)真空淬火温度与室温机械性能的关系
室温机械性能试验结果（见表2与图1）说明：

1) 在所研究的五种淬火温度范围内，随淬火温度的增加， σ_s 基本保持不变， δ_5 的变化也不大，仅970°C淬火的略有下降； ψ 则从940°C

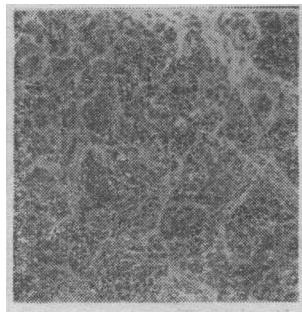
淬火开始下降，970°C淬火与870°C淬火的相比，约下降20%，下降较为明显一些； a_K 略有变化，呈缓慢下降趋势，由870°C淬火升至970°C淬火， a_K 仅下降120kJ/m²。

马氏体的强度主要取决于钢的含碳量，因此，虽然淬火温度不同，奥氏体中固溶的碳量不一样，但那种差别是不大的，不足以导致马氏体的强度发生明显变化。所以，五种淬火温度的 σ_s 基本相同，而钢的韧性指标却与钢淬火加热时的晶粒度与淬火（或回火）马氏体板条的宽度关系密切。晶粒越细，板条晶越窄，钢的韧性就越好。由于随着淬火温度的提高，奥氏体晶粒有长大趋势，特别是超过930°C以后，长大趋势更明显，而GC-4钢由于含锰量较高，存在过热敏感性，往往形成粗晶。光学金相与电子金相照片说明：随淬火温度的增加，马氏体针变得稍粗大，马氏体板条晶的宽度增加，因此韧性指标在不同程度上有所降低。

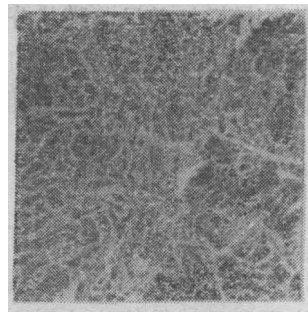
2) 三种淬火温度的常规机械性能均能满足GC-4钢油淬的技术条件（ $\sigma_s=1863\sim 2059$ MPa； $\delta_5\geq 8\%$ ； $\psi\geq 35\%$ ； $a_K\geq 490$ kJ/m²）。其中870、890、920°C三个淬火温度的综合机械性能较好，940°C与970°C两个淬火温度的综合机械性能较差，940°C以下四个温度淬火的综合机械性能均优于920°C普通油淬的（见表2）。并且，在 σ_s 较高的情况下与920°C加热、190°C等温淬火、260°C回火普通热处理的综合机械性能相当（ $\sigma_s=1918.2$ MPa； $\delta_5=10.3\%$ ；



a. 890°C



b. 920°C



c. 940°C

图3 不同淬火温度下断裂韧性试样断口扫描照片

750×

$\psi=41.3\%$; $a_K=656.9\text{kJ/m}^2$)。由此说明真空热处理在不降低 σ_s 的条件下,在改善双真空G C-4钢的韧塑性方面是有效果的。这是因为:这五种淬火温度下的显微组织是强韧性配合较好的板条马氏体+少量下贝氏体的复合组织。

(2)真空淬火温度与断裂韧性(K_{Ic})的关系

断裂韧性试验结果说明(见表2与图1), K_{Ic} 值随淬火温度的升高基本上呈上升趋势,曲线上有一拐点(淬火温度为 940°C)。在拐点以前 K_{Ic} 值上升较慢,其后较快。 K_{Ic} 值与 a_K 一样是一种韧性指标,但是二者并不总是呈一致的关系,本试验所得到的断裂韧性 K_{Ic} 与 a_K 的关系见图4。

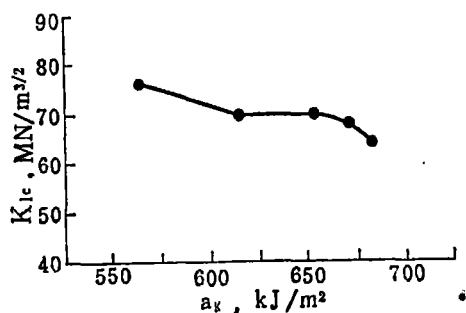


图4 五种淬火温度真空油淬的 K_{Ic} 与 a_K 的关系

图4表明,随着 a_K 值的增加, K_{Ic} 值逐渐降低,中间有一段保持水平,以 970°C 淬火的 K_{Ic} 值最高。大量研究工作表明,提高奥氏体化温度就能提高钢的 K_{Ic} 值。因为提高奥氏体化温度,促进晶粒长大、第二相质点溶解、残余奥氏体数量增加并呈薄膜状分布在马氏体板条晶周围以及孪晶亚结构的增加,都有利于阻止裂纹扩展。众所周知, a_K 值随晶粒的粗化而降低。

四、结 论

综合上述试验结果可得出如下结论:

1.在所研究的五个温度范围内,真空淬火的常规机械性能均达到G C-4钢油淬的技术要求。由于真空淬火无氧化脱碳的问题,而且考

虑到断裂韧性(K_{Ic}),选择较高淬火温度是适宜的。因此,原工艺采用的淬火温度(920°C)对真空油淬仍然是适用的。

2.在 940°C 以下真空油淬的综合机械性能均优于 920°C 普通油淬的综合机械性能,并与 920°C 加热、 190°C 等温淬火、 260°C 回火状态的综合机械性能相近,说明G C-4钢采用真空油淬是可行的,可考虑取代普通等温淬火工艺。

3.五种温度真空淬火并回火后均获得板条马氏体+少量下贝氏体的混合组织,具有较好的强韧配合。

4.在所研究的淬火温度范围内,断裂韧性 K_{Ic} 值受晶粒粗细和残余奥氏体形态的控制,可通过改变淬火温度得到高的 K_{Ic} 值。

参 考 资 料

- [1] 刘忠秋,双真空熔炼G C-4钢试制总结,621所,1982.6.
- [2] 冷松,王广生,张连荣等,双真空G C-4钢热处理工艺研究,621所.
- [3] Harvey V Pellegrinij and Prichard, Vacuum Heat Treatment of Large Steel Aerospace Parts, Feb.1982, P37~39.



高温用途的结构陶瓷

该陶瓷材料由整个的成形体组成,它是一个芯体,包括陶瓷纤维、陶瓷纱或陶瓷织物和陶瓷粉末体。适用的陶瓷纤维是碳、SiC、BN;适用的粉末是硅、氧化铝或玻璃,由陶瓷纤维制成的陶瓷纤维、陶瓷纱或陶瓷织物,缠绕在带有可膨胀的任选截面形状(圆形、椭圆形、多边形、矩形等)的筒体上。紧接着将筒体的截面部分加以膨胀,以便使纤维产生拉力。随后将此芯体涂上陶瓷粉末,再通过烧结、结晶等使芯体和粉末形成一个整体。将筒体的形状收缩到原来的形状,即可将陶瓷体从筒体取下。于是陶瓷体上即产生压缩应力。

用途和优点:此种陶瓷材料没有因材料脆性造成的缺陷。通过外力使之弯曲也不致破坏,裂纹的产生亦被抑制。该材料具有高的耐热震性,在高温大气气氛中承受弯曲力有耐久性。(胡少卿编译)