

# 时效硬化工具合金 TIG 金属粉芯焊丝堆焊金属硬度和红硬性

魏琪<sup>1</sup>, 李文静<sup>1</sup>, 朱学军<sup>1</sup>, 胡强<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100022; 2. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘要:** 通过改变熔敷金属中 Co 元素的含量、焊后热处理工艺和堆焊层数, 对时效硬化工具合金 TIG 金属粉芯焊丝堆焊金属的硬度、红硬性和时效硬化机理进行了研究。研究表明: Co 元素含量和焊后热处理工艺对堆焊金属的硬度和红硬性有显著影响; 当采用 560 °C × 2.5 h 时效处理可使堆焊金属获得最佳时效效果; 随 Co 含量增加, 堆焊金属的硬度和红硬性增加, 最高硬度可达 70.2HRC, 经 650 °C 加热 6 h 后的硬度仍能保持在 60HRC 以上。

**关键词:** 时效硬化工具合金; 金属粉芯焊丝; 硬度和红硬性

**中图分类号:** TG422.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)03-49-04



魏琪

## 0 序 言

硬度和红硬性是影响合金耐磨性和抗回火软化性能的两个重要性能指标, 对零件的使用寿命有明显的影响。近些年来, 虽然堆焊材料的品种和性能得到了快速的发展, 但是堆焊金属的硬度和红硬性仍然不很理想, 在许多情况下还不能满足生产的使用要求, 特别是对刀具、超硬模具和对硬度和红硬性有特殊要求零件的堆焊修复和制造。

时效硬化工具合金 TIG 堆焊金属粉芯焊丝是一种不靠碳化物强化, 而是通过金属间化合物强化, 使堆焊金属获得典型工具钢特性的焊丝。这种焊丝焊接工艺性能优良, 焊接时不需要预热, 不易产生焊接裂纹, 尤其是堆焊金属时效处理后具有相当高的硬度和良好的红硬性<sup>[1]</sup>, 这为满足高硬度和高红硬

性堆焊层的需求, 提供了新型的焊接材料。通过改变熔敷金属中 Co 元素的含量、焊后热处理工艺和堆焊层数, 对时效硬化工具合金 TIG 金属粉芯焊丝堆焊金属的硬度、红硬性和时效硬化机理进行了研究。

## 1 焊丝合金系的特点

为了使堆焊金属获得高硬度和高红硬性, 所确定的时效硬化工具合金 TIG 堆焊金属粉芯焊丝的合金系为 Fe - W - Mo - Co - Ni - Ti。除了铁外, 在焊丝粉芯配方中加入了大量的钨、钼、钴、镍等时效强化元素, 同时把碳降低到极低的水平, 以保证在时效处理过程中形成高密度的金属间化合物, 从而使合金具有非常高的硬度和红硬性。该焊丝基础配方熔敷金属的成分范围如表 1 所示。

表 1 焊丝基础配方熔敷金属的成分范围 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of deposited metal of experimental wires

C	Co	W	Mo	Ni	Ti	Al	Fe
<0.03	0~15.91	11~19	6~7.5	5~9	0.3~0.8	0.05~0.15	bal.

## 2 Co 对堆焊金属硬度的影响

Co 是一种主要添加元素。Co 的大量加入不仅使合金在高温下获得单一的奥氏体, 淬火后获得完

全的马氏体组织, 而且 Co 本身也能形成金属间化合物, 并参与和促进其它金属间化合物的析出<sup>[2]</sup>, 对堆焊金属的硬度和红硬性有重要影响。在保证其它合金元素含量不变的情况下, 改变焊丝熔敷金属中 Co 的含量 (质量分数, %: 0, 6.09, 9.96, 12.10 和 15.91), 研究了 Co 对堆焊金属 (如不作特殊说明, 均指质单道多层焊时, 第三堆焊层金属) 硬度的

收稿日期: 2001-12-24

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (3992005)

影响(见图1)。

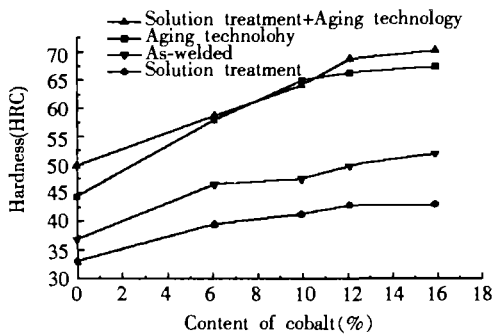


图1 Co对堆焊金属硬度的影响

Fig. 1 Effect of cobalt on hardness of surfacing metal

由图1可见,当Co含量为零时,堆焊金属也有一定的时效硬化效果,但是硬度值比较低。加入Co并随Co含量的增加,堆焊金属时效处理后的硬度大幅度提高。当Co含量为15.91%时,平均硬度达到70.2 HRC,其中最高的硬度例值为71.8 HRC。这么高的硬度在铸造合金中是极为罕见的,这说明该合金的时效硬化效果是非常显著的。

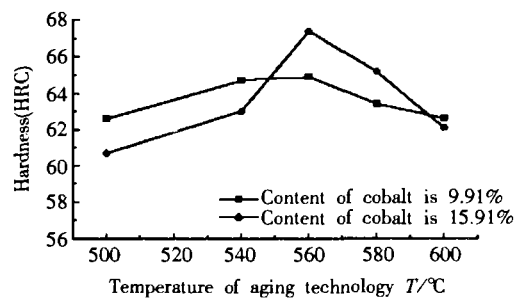
### 3 焊后热处理工艺对堆焊金属硬度的影响

堆焊层金属的硬度不仅取决于合金成分,而且还取决于焊后的热处理状态,这对于时效硬化类型合金的影响就尤为重要。正确、合理的焊后热处理工艺的采用,是使堆焊金属获得高硬度的关键。

根据堆焊层金属焊后热处理方式的不同,试样可以有四种状态:焊态(焊后自然空冷状态)、直接时效态(堆焊空冷后直接进行时效处理)、固溶态(堆焊空冷后进行固溶(淬火)处理)和固溶+时效态(堆焊空冷后,先进行固溶处理然后再进行时效处理)。

由于该焊丝的合金成分含量高,焊缝金属的冷却速度快,所以焊后堆焊金属在空冷的条件下就可以得到全部的马氏体组织。时效处理温度和时效处理时间对直接时效态堆焊金属硬度的影响见图2和图3。由图2和图3可见,时效处理温度和时间都对堆焊金属硬度有明显的影响。时效处理温度过低或时效时间过短时,金属间化合物的析出困难,时效硬化过程进行的不充分,堆焊金属硬度不高;时效处理温度过高或时效时间过长时,一是由于逆转奥氏体的数量增加,二是因为析出相长大并与基体的共格关系趋于破坏,所以硬度下降。研究结果表明,采用 $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{ h}$ 的时效处理工艺可以使堆焊金属

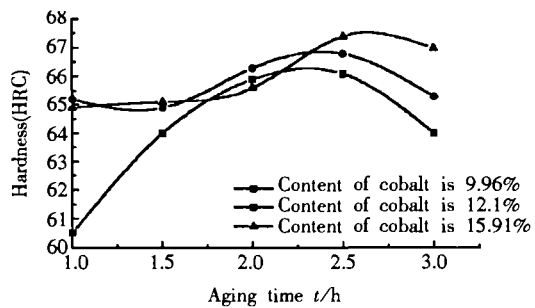
的硬度达到最大值。



Note: aging time is 2 hours

图2 时效处理温度对堆焊层金属硬度的影响

Fig. 2 Effect of aging temperature on hardness of surfacing metal

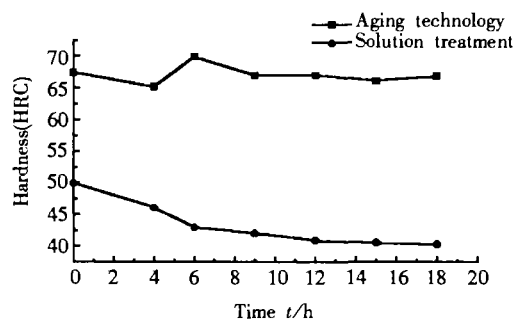


Note: aging temperature is  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$

图3 时效处理时间对堆焊层金属硬度的影响

Fig. 3 Effect of aging time on hardness of surfacing metal

堆焊后也可以对堆焊金属先固溶处理,然后再进行时效处理。焊后先进行固溶处理,可以降低焊态金属的硬度和应力,这不仅便于进行简单的机械加工,而且还能使焊缝金属时效后的组织和硬度更加均匀一致。研究中采用的固溶处理温度为 $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>,然后在水中淬火,固溶处理时间对固溶+时效态堆焊金属硬度的影响见图4。由图4可见,固溶处理时间越长,堆焊金属的硬度越低。另



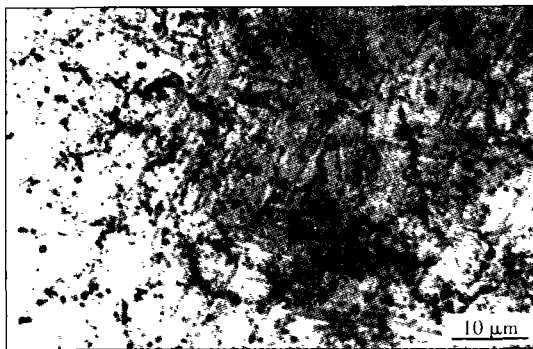
Note: content of cobalt is 15.91% and parameters of aging technology are  $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{ h}$

图4 固溶处理时间对堆焊层金属硬度的影响

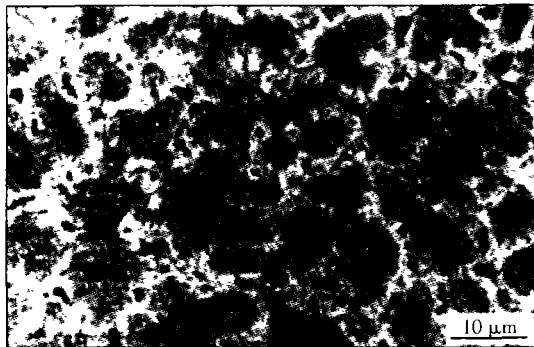
Fig. 4 Effect of solution time on hardness of surfacing metal

外,固溶处理时间的长短对堆焊金属时效处理后的硬度有一定的影响。当固溶处理时间为6 min时,时效处理后的硬度值最高。

堆焊金属在不同状态下具有不同的硬度(见图1)。固溶态的硬度最低;焊态的硬度略高;直接时效态的硬度大幅度提高,比时效处理前提高约20个HRC;固溶+时效态比直接时效态的硬度更高(这是因为固溶处理后,可以使堆焊金属的成分更加均匀,金属间化合物能更为均匀的析出所致)。图5是堆焊金属在固溶态和直接时效态的显微组织。固溶态的组织为成分均匀的马氏体。时效态的组织为金属间化合物在马氏体基体上均匀析出、弥散分布形态。另外,随Co含量的增加,堆焊金属在上述四种焊后热处理状态下的硬度都在增加。



(a) Microstructure of deposited metal after solution treatment (1 260 °C×6 min)



(b) Microstructure of deposited metal after aging technology (560 °C×2 h)

图5 Co含量为12.10%焊丝堆焊金属在固溶态(a)和直接时效态(b)的显微组织

Fig. 5 Micrograph of deposited metal with cobalt content of 12.10% after solution treatment and aging technology

#### 4 堆焊层数对堆焊金属硬度的影响

堆焊层数的多少将直接影响到堆焊金属的成分,从而影响堆焊金属的硬度。图6给出了不同堆

焊层数的堆焊金属在焊后直接进行560 °C×2.5 h时效处理后直接时效态的硬度值。

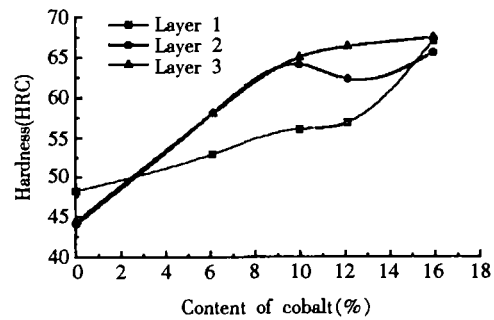


图6 堆焊层数对堆焊金属硬度影响

Fig. 6 Effect of number of surfacing layers on hardness of surfacing metal

由图6可见,由于母材对堆焊金属的稀释作用,第一堆焊层的合金成分含量达不到时效硬化工具合金成分含量的要求,所以硬度值比较低。第二层堆焊金属的合金成分含量大幅度提高,硬度也明显增加。当堆焊到第三层时,母材对堆焊金属的稀释作用已经很小,堆焊层表面可以达到时效硬化工具合金成分含量的要求,因此,时效硬化效果非常显著,硬度值也最高。由图6还可以看出,当Co含量为0时,第一堆焊层的硬度反而比第二和第三层高,其原因是堆焊层的基体材料为45号钢,含碳量较高,由于熔合比的影响,第一堆焊层含碳量增加,使其淬硬倾向增加,同时使时效硬化效果降低。

#### 5 Co含量对堆焊层金属红硬性的影响

除了硬度之外,堆焊金属的红硬性或抗回火软化性是时效硬化工具合金的又一重要性能指标。采用的红硬性的试验方法是:将时效硬化处理后的试样在650 °C炉体中加热1 h,空冷至室温并测量其硬度,然后再次在650 °C炉体加热1 h,空冷后测量第二次的硬度,如此反复进行6次。Co含量对直接时效态堆焊金属的红硬性的影响及与市售高速钢切刀的红硬性的对比结果见图7。

由图7可见,经过650 °C持续加热,时效硬化工具合金堆焊层金属硬度下降缓慢。堆焊金属中Co含量不同,硬度下降的速度也不同。Co含量越高,硬度下降得越缓慢。当Co含量为15.91时,6 h加热后堆焊金属的硬度仍然保持在60 HRC以上。而市售高速钢切刀的硬度则下降很快,6 h后硬度仅为42.8 HRC。这说明所研制焊丝的堆焊金属红硬性优良,大大优于传统高速钢。

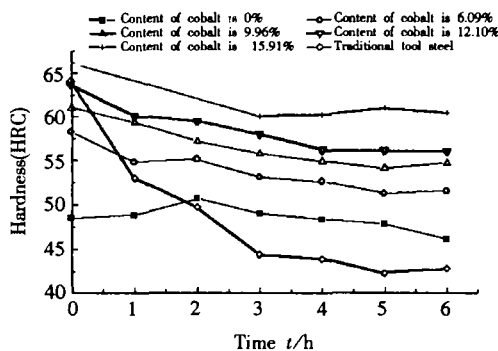


图7 Co对堆焊金属红硬性的影响

Fig.7 Effect of cobalt on redhardness of surfacing metal

## 6 时效硬化机理的分析与讨论

上述研究结果表明,所研制焊丝堆焊金属具有非常显著的时效硬化能力。其主要原因是因为焊丝堆焊金属中含碳量极低,同时含有大量的钨、钼、钴、镍等时效强化元素,时效处理后在马氏体基体上可以析出大量、高密度、弥散分布的金属间化合物。

众多研究表明<sup>[3,4]</sup>,在时效初期发生 Spinodal (增幅)分解,产生富W与贫W的调幅结构。在时效过程中这样的富W区逐渐变为与基体共格的亚稳相 $\eta'$ ,而在贫W区出现 $\text{FeCo}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Co}$ 超结构。这种微细的周期的调幅结构对位错运动有着强烈的阻碍作用,因而产生强烈的硬化作用。

所形成的金属间化合物主要是 $[\text{FeCo}(\text{Ni})]_7(\text{W}\text{Mo})_6$ 和 $[\text{FeCo}(\text{Ni})]_3(\text{W}\text{Mo})_2$ <sup>[5]</sup>。较新的研究分析表明,时效硬化主要是通过W、Mo金属间化合物的析出引起的,金属间化合物主要是 $\text{Fe}_3\text{W}_2$ 、 $\text{Fe}_7\text{W}_6$ 、 $\text{Fe}_2\text{W}$ ,而Co和Ni主要通过影响金属间化合物的析出数量、析出形态及分布状态来影响时效硬化的效果<sup>[6]</sup>。由于Co可以降低层错能,使位错密度增加,降低W、Mo等元素在基体的溶解度,使析出相更多、更弥散,所以Co含量增加可以显著提高金属的时效硬度。另外,还有研究表明<sup>[7]</sup>,金属内部缺陷的存在有可能提高时效的峰值硬度。作为铸态合金的堆焊金属,内部的缺陷应该比锻造合金多,因此会促进时效硬度的进一步提高,这也是堆焊金属出现超高硬度的原因之一。

该堆焊金属中,由于Co在扩大奥氏体区的同时,又可使奥氏体的逆转温度升高,以及金属间化合物有极强的抗聚集的能力,因而使堆焊金属具有良好的红硬性和抗回火软化的能力。而传统的高速钢在加热时碳化物很容易发生聚集和长大,从而使红硬性和抗回火软化的能力大大降低。

## 7 结 论

(1) 时效硬化工具合金TIG金属粉芯焊丝堆焊金属时效硬化能力非常显著,时效处理后堆焊金属具有非常高的硬度和良好的红硬性。

(2) Co对堆焊金属的硬度和红硬性有重要影响,随Co含量增加堆焊金属的硬度和红硬性增加,当Co含量为15.91%时堆焊金属的平均硬度可达到70.2HRC,经6h的加热后,硬度还可以保持在60HRC以上。

(3) 焊后热处理工艺对堆焊金属硬度有重要影响,当时效处理工艺为:560℃×2.5h时,堆焊金属可以获得最高硬度。

## 参考文献:

- [1] 魏琪,朱学军,李文静. 时效硬化工具合金TIG堆焊金属粉芯焊丝研制[J]. 焊接,2001,(12):20-22,34.
- [2] 王岚,陈景裕. Fe-W(Mo)-Co(Ni)时效硬化工具合金的组织[J]. 机械工程材料,1988,12(6):17-20.
- [3] Tomoo Suzuki. Precipitation hardening in maraging steels[J]. Trans Iron Steel Inst Japan, 1974,14(2):67-71.
- [4] 失岛悦次郎,宫崎亨,伊藤卓雄,等. Fe-W-Co系析出硬化钢の时效硬化について[J]. 日本金属学会志,1971,35(4):331-338.
- [5] 李忠厚. 时效硬化高速钢研究(II)——时效高速钢的组织[J]. 机械工程材料,1993,17(4):42-45.
- [6] 李忠厚,李小平,徐重. W, Co, Ni对时效合金强度和韧性的影响[J]. 中国有色金属学报,1999,9(2):237-240.
- [7] 陈景裕,李忠厚. 时效硬化工具钢[J]. 机械工程材料,1986,10(6):20-25.

**作者简介:** 魏琪,男,1953年出生,工学硕士,副教授。主要从事焊接冶金、金属焊接性及新型焊接材料的研究工作。获北京市科技成果二等奖、三等奖各1项,申报国家专利4项,发表论文20余篇。

**Email:** bjpussyh@bjpu.edu.cn