

# (00Cr22Ni5Mo3N + Q345C) 不锈钢复合板 热处理工艺研究

Study on Heat Treatment of Clad Plate Made of 00Cr22Ni5Mo3N  
and Q345C Stainless Steel

太原钢铁集团(有限)公司

王一德 李国平 王立新 李志斌

由于不锈钢与碳钢热处理工艺不同,因此在不锈钢复合板的热处理时必须兼顾二者的特点。实践证明(00Cr22Ni5Mo3N + Q345C)不锈钢复合板完全可以通过适当的热处理工艺解决复层脆性相的析出与基层低温冲击的矛盾,成品已在我国长江三峡水利枢纽工程的建设中大量使用。本文就(00Cr22Ni5Mo3N + Q345C)不锈钢复合板的热处理工艺进行研究。

关键词:双相钢 复合板 热处理 研究

## 1 前言

不锈钢-碳钢复合板是以不锈钢为复层,碳钢为基层,通过特定的方式结合为整体。由于该产品可以节约2/3以上的不锈钢,并且在能够保持各自特性以及满足使用要求的前提下,降低生产成本,因而被广泛应用于冶金、石油化工、水利、核工业、食品、建筑等诸多领域。本文所述的(00Cr22Ni5Mo3N + Q345C)不锈钢复合板就是通过直接爆炸焊接的方式进行生产,目前已经被大量用于长江三峡水利工程的排沙底孔、泄洪深孔、反弧门等结构件的制作。

00Cr22Ni5Mo3N是典型的含N、超低碳、双相不锈钢,其固溶处理后的室温组织中 $\alpha/\gamma = 50/50$ 。由于Cr在 $\alpha$ 中的扩散速度快,而且 $\alpha$ 中Cr含量较高,即使有 $Cr_{23}C_6$ 的析出, $\alpha$ 中的Cr会扩散予以修复,因此有良好的抗晶界腐蚀的能力;双相组织对裂纹的延伸有很强的阻碍作用,使得其具有较强的耐应力腐蚀性能;(0.10~0.20)%N的加入,大大提高了其耐Cl<sup>-</sup>的点蚀及水流中耐“气蚀”的能

力;此外该钢种在1300℃的高温下仍能保持30%的 $\gamma$ ,因而具有优越的高温焊接性能;屈服强度是类似SUS304单相奥氏体不锈钢的2倍,表面硬度HB=250~290,完全可以用于高速水流、泥沙及“气蚀”对结构件磨损破坏的环境中。

不锈钢复合板的热处理主要有两方面的作用:一是为了消除因瞬间爆炸焊接产生的界面结合应力,二是改善复合板经爆炸焊接后的塑性,使其满足加工和使用的要求。由于爆炸复合使不锈钢与碳钢成为一体,而二者的热处理工艺不同,因此在制定复合板热处理制度时,必须二者兼顾。

## 2 热处理工艺

### 2.1 00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢热处理特点

00Cr22Ni5Mo3N是一种富Cr、Mo的奥氏体-铁素体双相不锈钢,因此在热处理的过程中,极易析出一种含高Cr、Mo的Fe-Cr(-Mo)金属间化合物 $\sigma$ 相,该相硬而脆,在钢中少量存在便可大大破坏钢的塑韧性。以双相钢中, $\sigma$ 相优先从铁素体中析出,析出一般按 $\alpha \rightarrow \sigma + \gamma'$ ( $\gamma'$ 为新生奥氏

体)的晶界反应方式进行。该相的析出与钢中合金元素的含量有密切关系,而双相钢存在大量  $\alpha-\gamma$  的相界,也为  $\sigma$  相的析出创造了良好的条件,因此对于双相不锈钢的热处理来说,避免  $\sigma$  相的析出尤为关键。

从化学成分的角度分析,Mo 的含量越高,越有利于  $\sigma$  相的析出,并可明显提高  $\sigma$  相稳定存在的范围,Mo 含量与  $\sigma$  相析出的关系见图 1。

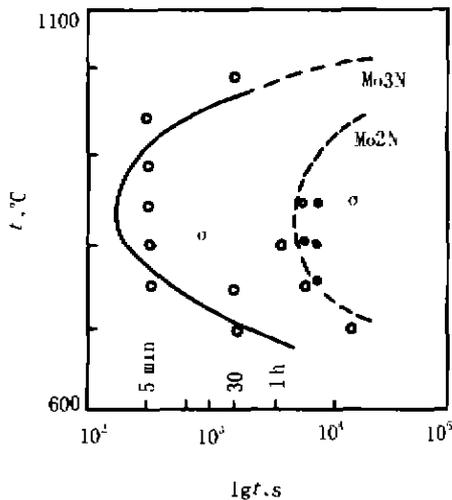


图 1 含 2% Mo 和 3% Mo 的双相不锈钢  $\sigma$  相的析出比较

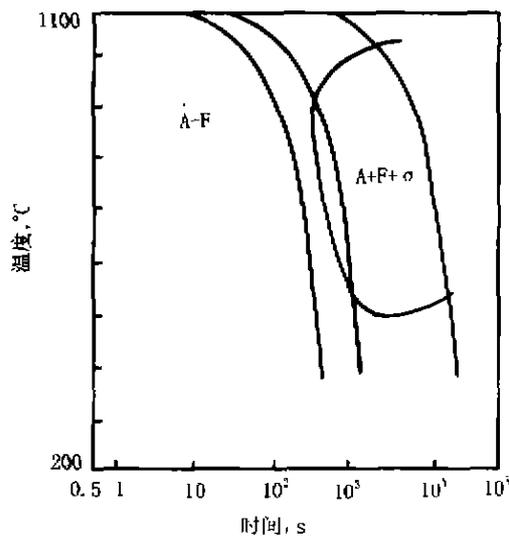


图 2 00Cr22Ni5Mo3N 的连续冷却转变曲线

从加热温度和冷却速度的角度分析,由于  $\sigma$  相的析出是一个晶界反应过程,因此必须注意加热温度、保温时间、冷却速度的合理选择。试验证明,根据钢中化学成分的不同,一般 00Cr22Ni5Mo3N 中的  $\sigma$  相析出并能够稳定存在的范围为 800 ~ 950 °C,这与 00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈

钢相比,前者温度范围较宽,温度上限较后者高。00Cr22Ni5Mo3N 的连续冷却转变曲线 (CCT) 见图 2。

## 2.2 基层材质 Q345C 热处理特点

Q345C 是一种低碳低合金结构钢,与同类钢种 Q345A、Q345B 相比,要求有良好的低温冲击韧性,Q345C 规定做 0 °C 冲击,纵向  $A_{KV} \geq 34J$ 。为此我们在冶炼过程中,要求进行铁水预处理,降低 S 的含量,并通过在钢中单独或复合添加强碳化物形成元素 Nb、V、Ti 以及强氮化物形成元素 Al,使得在  $\gamma$  与  $\alpha$  的热变形过程中由于形变诱导析出微细的碳化物、氮化物,有一定的沉淀强化作用,同时能够阻止位错、晶界和亚晶界的迁移,提高奥氏体再结晶的温度,延缓奥氏体的再结晶,防止晶粒长大,达到铁素体晶粒细化的目的,从而在提高钢材的塑韧性的同时,降低其脆性转变温度。

屈服强度与晶粒直径服从 Hall - Petch 关系:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k_1 d^{-1/2}$$

式中  $\sigma_0$ ——铁素体单晶体的屈服强度

$d$ ——晶粒的直径

$k_1$ ——晶格强度常数

对于低合金钢,  $k_1 d^{-1/2}$  对强度起主要作用,即铁素体晶粒越细,  $\sigma_s$  越高,韧性也越好。

一般 Q345C 轧后进行正火处理,目的就是为细化晶粒,改善性能。正火温度为 890 ~ 900 °C,空冷。

## 3 不锈钢复合板热处理试验结果及分析

在上述分析的基础上,进行了复合板以及 Q345C 的相关试验,数据分别见表 1、表 2 (两组试样的基层 Q345C 成分不一样,试样状态也不一样)。

(1) 由表 1 可知,经爆炸复合后未经热处理的外弯试验完好,而延伸较低,这是因为爆炸焊接的过程相当于淬火,虽然发生组织变化,但并未使复层发生脆化,即没有脆性相的析出。

(2) 在 880 °C、900 °C、930 °C 处理后的试验结果,均发生了外弯复层开裂,而且复合板延伸率较低,从断口宏观观察,复层基本未发生颈缩,无延伸,纯属脆断。对复层进行金相组织分析,确认有富 Cr、Mo 的  $\sigma$  相析出,见图 3。以上发生断裂的试样,经加热到 970 °C 处理后再进行外弯试验,结果均完好,这也说明了  $\sigma$  相的析出是一个可逆过

表1 不同状态下复合板的力学性能

	$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ %	$A_{KV} (0^\circ\text{C})$ J			内弯	外弯
爆炸复合后未热处理		630	13	144	110	128	完好	完好
爆炸后经 880℃ 热处理	425	605	标外断	104	110	88	完好	裂
爆炸后经 900℃ 热处理	415	580	标外断	94	84	98	完好	裂
爆炸后经 930℃ 热处理	420	605	21	92	90	105	完好	裂
爆炸后经 950℃ 热处理	425	610	28	95	116	116	完好	完好
爆炸后经 970℃ 热处理	440	615	28	98	116	94	完好	完好
爆炸后经 1000℃ 热处理	365	560	26	14	18	16	完好	完好

注: 1. 弯曲试验中, 弯心直径  $d=3a$ ,  $180^\circ$ ,  $a$  为试样总厚度; 2. 热处理过程是指包括加热、保温、冷却的全过程

表2 复合板用基板 Q345C 纵向冲击功与热处理温度的对应关系

温度 ( $^\circ\text{C}$ )	920	930	940	950	960	970	980	1000
纵向 $A_{KV}$ ( $0^\circ\text{C}$ )	64 67 82	54 57 70	47 48 56	46 52 58	44 46 56	45 55 58	40 51 54	14 18 21

注: 试验条件: 加热到规定温度, 保温 40 分钟出炉空冷; 本组试样未进行爆炸复合。

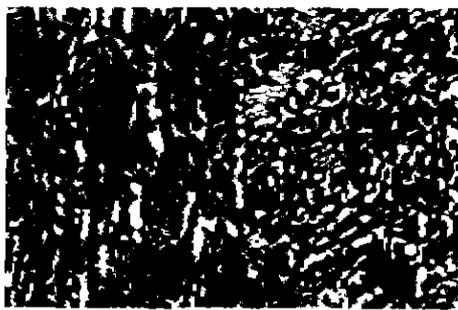
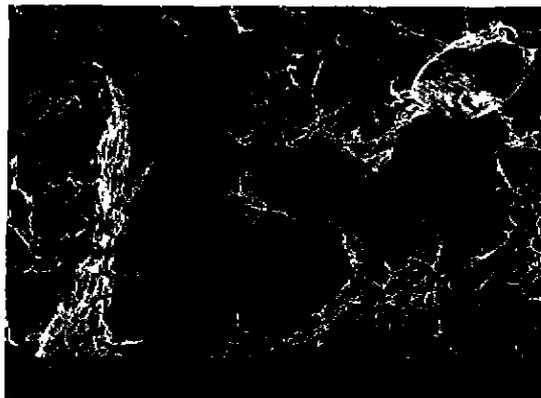
图3 00Cr22Ni5Mo3N 中  $\sigma$  相析出的组织

图4 冲击功高的断口扩展区形貌

程, 经过高温处理后又重新溶解, 从而消除复合板的脆性。

(3) 由表2可以看出, 经 1000℃ 处理的试样发生基层  $0^\circ\text{C}$  冲击功不合, 从断口扩展区的形貌比较 (见图4、图5), 冲击功高的断口扩展区有明显的韧窝带, 而且宏观断口形貌呈纤维状, 有强烈的塑性变形, 表面不平, 有均匀的暗灰色; 冲击功低的

断口扩展区几乎无明显的韧窝带, 而且宏观断口呈晶粒状、表面较平滑, 有高度的反光性和强烈的金属光泽, 这是由于在高温下长时间加热, 钢中奥氏体晶粒粗大、从而析出的铁素体晶粒粗大, 直接导致低温冲击韧性不好。

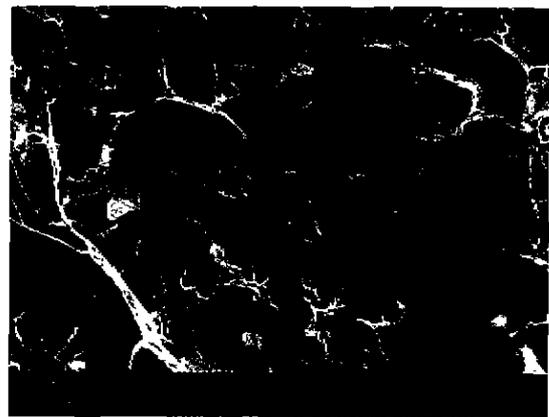


图5 冲击功低的断口扩展区形貌

#### 4 结论

(1) (00Cr22Ni5Mo3N + Q345C) 不锈钢复合板热处理时, 复层不锈钢容易析出脆性的  $\sigma$  相, 这破坏了复合板的塑性, 但可以通过改变热处理制度得以消除, 即  $\sigma$  相的析出过程是可逆的。

(2) (00Cr22Ni5Mo3N + Q345C) 不锈钢复合板热处理温度如果太高, 远超出基层的正常正火温度的范围, 会导致低温冲击不合。

(3) 制定合理的热处理制度, 可以保证该不锈钢复合板的各项性能, 从而满足各行业对该钢种复合板的需求。

(下转第 60 页)

能谱分析。结果显示为 20 号钢正常化学成分，两个位置成分没有差别。

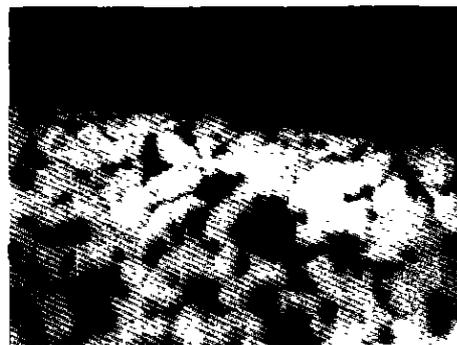
表 1 小蛇管材料化学成分 (质量%)

	C	Si	Mn	P	S
小蛇管	0.21	0.29	0.58	0.012	0.021
20 号钢	0.17	0.17	0.35	≤0.035	≤0.035
GB5310—1995	0.24	0.37	0.65		

### 2.3 硬度测试



(a) 未减薄位置 400x



(b) 减薄位置 (穿洞附近) 400x

图 3 小蛇管材料金相及内壁截面形貌

图 3 同时显示穿洞处管壁的微观形貌。图 3 (a) 显示未减薄处管子内壁凹凸不平，表面有较厚的垢层；图 3 (b) 显示管子穿洞附近壁厚减至很薄处内壁很光滑，表面膜很薄。

### 3 穿洞分析及结论

小蛇管采用冷轧低碳钢管弯制而成。弯制过程会使管子背侧减薄，钢管壁厚不太均匀。检查没有穿洞的正常位置，直管段的壁厚偏差约为  $\pm 0.20\text{mm}$ ，符合标准要求，但在弯管附近取任意截面检查，不仅管子圆截面成为椭圆形，管内通道长短轴尺寸有达 11mm 和 8mm，使流体通道截面变形及面积大大减小；更有厚度偏差达  $\pm 1\text{mm}$ 。在这些地方，流速加大，冲刷剪切力加大，在背侧薄的地方，很容易因磨损或腐蚀而使厚度进一步减薄。

在管道突然发生形状变化的地方，流体会产生

对小蛇管横截而进行显微硬度测试，结果表明不论是减薄处，还是未减薄处，其显微硬度值均为 HV200—210，没有区别。

### 2.4 金相分析及穿洞管壁微观形貌

对蛇管穿洞附近壁厚减薄处与未穿洞壁厚无减薄处进行金相观察，其金相组织均为铁素体与层片状的珠光体，与正常 20 号钢金相组织一致，如图 3 所示。

局部扰动，这些地方常常产生湍流与冲击液流作用，是冲刷腐蚀最为严重的地方<sup>[1,2]</sup>。流体在小蛇管弯曲部位附近的直管壁有高的湍流强度，这些地方冲刷严重，产生具有一定深度的表面光滑的马蹄形腐蚀坑，并能快速穿透管壁<sup>[3]</sup>。

小蛇管失效是弯管工艺使流道流速大且流体扰动强烈的位置减薄及内部流体冲刷腐蚀减薄造成的，导致从里向外穿洞而致冷却水泄漏。

### 参考文献

1. M. G. 方坦纳等. 左景伊译. 腐蚀工程 第二版. 化学工业出版社. 1983
2. 荷吉化学有限公司. 中国腐蚀与防护学会译. 腐蚀与防护系列录相片解说词. 1987
3. 美国金属学会. 金属手册第八版第十卷失效分析与预防. 机械工业出版社. 1986

(上接第 32 页)

### 参考文献

1. 杨觉先. 金属塑性变形物理基础. 1991. 11
2. 陆世英. 不锈钢应力腐蚀事故分析与耐应力腐蚀不锈钢. 原子能出版社. 1985. 9

3. 魏振宇 吴玖. 双相不锈钢论文集. 冶金工业部钢铁研究总院. 1992

作者简介：王一德，男，1938 年生，教授级高级工程师，太钢（集团）总工程师，国家有突出贡献专家。长期从事不锈钢、硅钢的研究和大型企业的科研、技术管理工作。邮编：030003。