



电焊管焊缝加工热处理技术—U & R 法

〔日〕矢 恒 浩 等

详细论述了U & R方法的理论依据及采用此方法对电焊管焊缝加工热处理的效果。

U & R METHOD FOR SEAM HEAT-TREATMENT OF ELECTRIC-WELDED PIPES

Tuneharu Yazawa etc.
(Japan)

The theoretical basis for U & R method and the result of seam heat-treatment of electric-welded pipes using the method are detailed.

1. 前言

近年来,电焊钢管的用途不断扩大,对产品质量的要求也日益严格。其中对特殊低温用高韧性电焊钢管的开发则更加紧迫。电焊管焊缝高韧性化的重要因素是原料、焊接及焊缝的在线热处理。

在原料方面,高纯净度钢的生产技术和热轧TMCP技术已有长足发展;在焊接方面,气体保护焊技术和自动热量输入控制技术也取得了显著的进步,所以焊缝在线热处理技术也应有更大的发展。该公司对焊缝的在线热处理条件进行了实验室模拟研究,并得出了最佳条件,从而确立了在实际生产线上低温高韧性电焊钢管的生产方法。该方法能使焊缝的韧性有大幅度提高。

2. 实验室模拟研究

目前电焊焊接是采用数百kHz的高频电流。由于高频电流容易在焊缝附近集中(邻近效应及集肤效应),这样可高效率地焊接,但另一方面意味着焊缝处容易急冷,导致组织硬化,使焊缝处的韧性显著恶化。因此现在一般是采用焊后焊缝退火装置进行焊

缝的在线热处理,而不触及钢管的基体。下面用PA模拟法对提高焊缝韧性的焊后退火条件进行研究。

2.1 焊后退火热处理的模型

焊缝用数台1kHz感应线圈串联及并联从管外表面进行感应加热。焊后退火加热模型实例如图1所示。

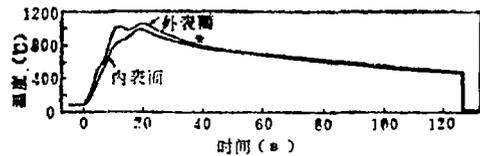


图1 焊后焊缝退火的加热周期曲线

钢板厚度为12.7mm时,钢管内、外表面达到最高温度大约需要20s,而管内外温差为100°C。达到最高温度后冷却到850°C,冷却速度10°C/s,随后为3°C/s。大约在450°C时水冷。本文的PA模拟热处理条件是依据该模型确定的。

2.2 焊缝处热处理

2.2.1 试验用材料

电焊管的焊接试验仍在焊缝处。将壁厚为12.7mm的电焊管压扁后,以焊缝处为中心将其切割成150×150mm的平板进行热处

理。试料的化学成分如表 1 所示。A 钢是容易生成珠光体的高碳低锰钢，B、C 钢的含碳量之和与 A 钢相同，碳、锰的含量比例有所变化。

试验用钢种的化学成分(%) 表 1

钢种	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ceq.
A	0.04	0.20	0.56	0.013	0.003	—	—	0.24
B	0.10	0.25	1.25	0.019	0.006	0.031	0.009	0.31
C	0.04	0.20	1.43	0.003	0.001	0.039	0.056	0.30

$$Ceq. = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

2.2.2 试验方法

试样中央的焊接部分由于进行两面感应加热，所以加热时间短。随后进行强制冷却，并且根据冷却速度的不同要求，采用喷射氮气或雾化喷射的方式进行。温度是用热电偶在板厚的中部进行测定的。

2.2.3 快速冷却及热处理条件

1) 快速冷却

试验条件如表 2 所示。高温区域快冷，低温区域以 3℃/s 实际速度冷却。

快冷热处理条件 表 2

加热温度(℃)	快冷速度(℃/s)	快冷退火温度(℃)	退火后的冷却速度(℃/s)
950~1050	10~150	850~500	3

2) 二次热处理

试验条件如表 3 所示。对二次常化(DN)与冷却时间(QT)进行了试验。所有的热处理均采用加热速度为 47.5℃/s、保温时间为 3s 的实验制度。缓冷至 300℃ 后进行水冷。

二次热处理条件 表 3

试验项目	一次加热		二次加热	
	加热温度	冷却条件	加热温度	冷却条件
二次常化	950℃	950~850℃ : 10℃/s 850℃以下: 3℃/s	950℃	950~850℃ : 10℃/s 850℃以下: 3℃/s
冷却时间	950~1150℃	水冷	650℃	3℃/s

2.2.4 检验项目

热处理后对焊缝处进行 V 型切口冲击试验，求出断口转变温度和位能值。另外，对于以铁素体为基体的组织，可由线性分析仪测出焊缝处铁素体的晶粒度。此外，还可通过焊缝处的外观来断定硬度(维氏硬度)。

2.2.5 试验结果

1) 快速冷却

试验结果如图 2 所示。

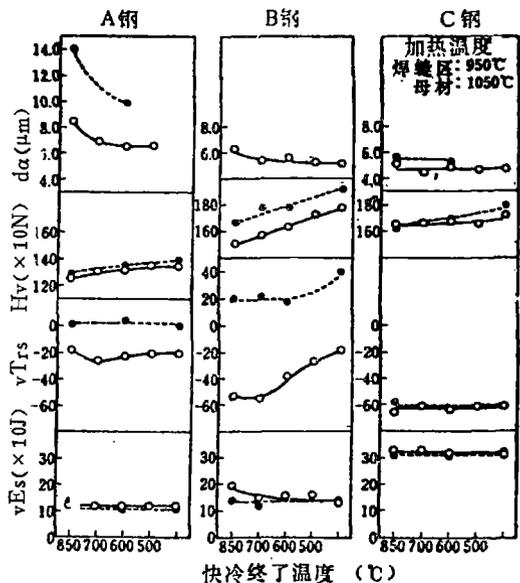


图 2 快冷示意图

A 钢含碳量高，含锰量低，故以 10℃/s 的速度快冷时铁素体的生成量较多，在高温下，未相变的奥氏体碳浓度较高，达到共析的程度，所以很快转变为珠光体，因而其附近很难产生硬化组织。为此加热温度为 950℃ 时，快冷到 700℃ 将不产生硬化组织而得到细化晶粒，转变温度大约为 7℃。B 钢比 A 钢含锰量高，硬化程度大，晶粒细化小，在 850℃、700℃ 保温时，转变温度相同，转变温度在 700℃ 以下时，性能将更加恶化。C 钢含碳量低，生成珠光体难，如改变快冷条件，其组织几乎不变，转变温度也不变。C 钢在 10~150℃/s，其他钢种在 10~50℃/s 速度范围内变化时，

快冷可使它们的断口转变温度不变。加热温度为1050℃时，A钢由于加热温度高，所以铁素体晶粒粗大，并且在珠光体晶界被拉长或形成纤维组织，为此转变温度升高。B钢加热到1050℃时，上部为粗大的贝氏体组织，因而韧性变坏。C钢在加热到950℃和1050℃时，其晶粒度、硬度、韧性等均无变化。

2) 二次热处理

二次热处理结果如图3所示。A、B、C钢二次常化的韧性均和一次常化韧性相同。

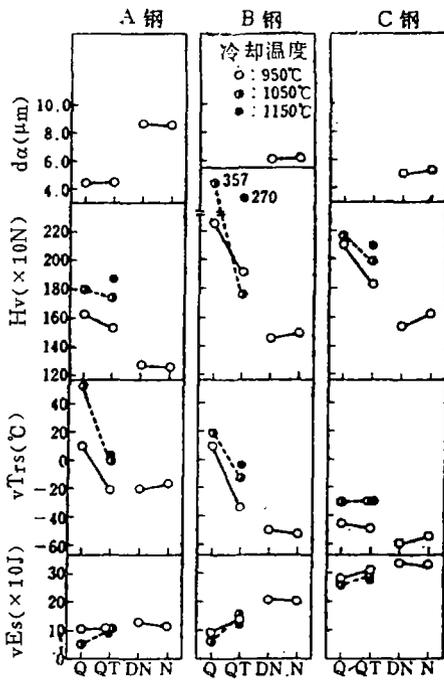


图3 二次加热示意图

Q—冷却 QT—冷却温度
DN—二次常化 N—常化

A钢和C钢在950℃淬火与一次常化的韧性相同，而其他钢的韧性均恶化，然而和常化材料相比，其韧性相同，但硬度较高。另外，为了防止过热韧性恶化，采用二次热处理是有效的方法。

2.2.6 讨论

图4表示试验用钢的加速冷却，二次热

处理后的铁素体晶粒度与转变温度之间的关系。

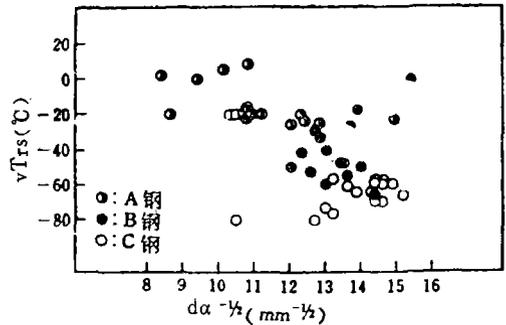


图4 铁素体晶粒度与转变温度的关系

图5所示为硬度与转变温度的关系（不包括淬火回火和常化组织）。断口转变温度与硬度强弱有关，而与铁素体晶粒度几乎无任何关系。

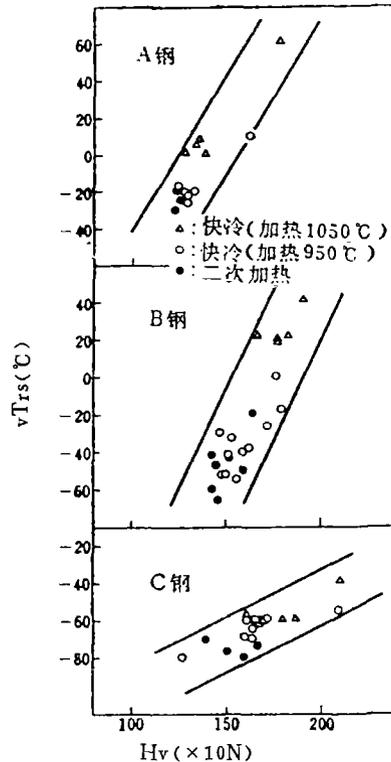


图5 硬度与vTrs间的关系

2.3 焊缝处加工热处理

从前述试验结果可知，为细化组织而加

快冷却速度的热处理很难改进焊缝处的韧性。因此，由加工热处理来改善韧性是不可取的。

2.3.1 试验方法

实验采用的是辊式成型加工装置。进行加工热处理的材料为C钢（直径 8 mm，长 12mm），试验条件如表 4 所示。

加工热处理技术条件 表4

加工温度 (°C)	减径温度 (°C)	快冷速度 (°C/s)	快冷温度范围 (°C)	空冷速度 (°C/s)
950	950或850	30	950~700	3

在950°C 或 850°C 进行加工，在 850°C 加工后做了快冷和缓冷两种试验，然后进行组织观察和硬度测定。再以相同试料的焊接热周期再现装置进行加热，与此同时对焊缝进行垂直方向压缩变形。随后进行冲击试验。

2.3.2 试验结果

加工温度的影响如图6、图7所示。

950°C 是奥氏体再结晶温度范围，不论是压下率还是晶粒度、硬度均为定值，而且冲击断口转变温度也不变。进行快冷时，硬度不变但铁素体晶粒随压下率增加而细化。反之，不进行快冷时，硬度随着减径率的增加而降低，但铁素体晶粒度是恒定的，如图 8、图 9 所示。从快冷条件看，断口转变温

度是不变的，因此可以认为硬度降低和组织细化是相矛盾的。

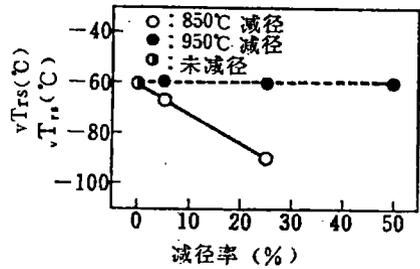


图 7 减径温度的影响（快冷：950~700°C）

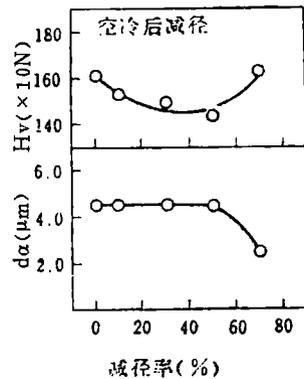


图 8 减径量的影响（减径温度：850°C）

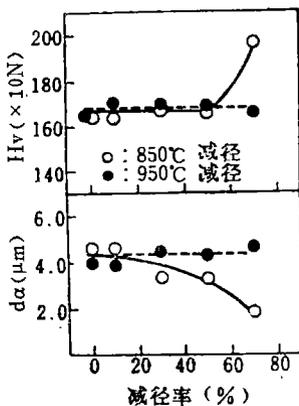


图 6 减径温度的影响（快冷：950~700°C）

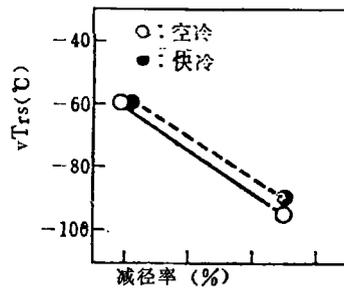


图 9 减径量的影响（减径温度：850°C）

2.4 改善焊缝处韧性的最佳热处理制度

现行的电焊管焊后退火即使进行快冷也难以获得更细的晶粒而增加硬化组织。因而韧性是否变化，可直接依据钢种的优劣加以判断。象碳素钢这种容易产生硬化组织的钢种，若要改善其韧性，必须以 0.3°C/s 的速度缓冷得到完全的铁素体、珠光体组织。若进行二次热处理则达不到细化效果，韧性也得不到改善。所以作为改善焊缝处韧性的

方法，宜采用焊后退火。焊后退火时的加工必须在奥氏体区域内进行，在950℃以上则无效。在850℃给予25%的加工变形量，断口转变温度在30℃以下，则加工后的快冷不需很快。

3. 加工热处理技术的应用

3.1 试验材料

试验用钢管材料为X65热轧板卷，尺寸200×5mm，化学成分如表5所示。

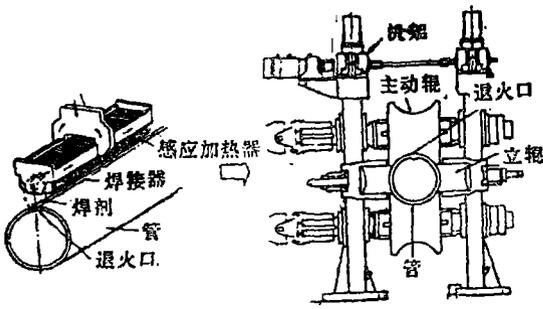
化学成分(%) 表5

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al
0.05	0.21	1.44	0.005	0.0005	0.039	0.057	0.030

3.2 减径法加工热处理技术

3.2.1 试验方法

钢管圆周减径如图10所示。在钢管四周设置定径辊，在管圆周上进行减径试验。减径机设置在焊后退火装置后边，焊缝处温度为850℃。由于在该减径机圆周方向减径，所以应对焊缝处进行高温软化，以便集中加工变形。表6示出本次试验的加工热处理条件和焊接条件。



(a) 焊后退火

(b) 管周减径

图10 钢管圆周减径方法

加工热处理技术条件 表6

焊接速度 (m/min)	退火温度 (℃)	温度(℃)		减壁率 (%)
		起始温度	终止温度	
13	980	870	835	10

钢管圆周方向的平均减少量为0.25%，由于在焊缝处加工变形集中，该处管壁将增厚10%。焊缝处断面增壁前、后的情况示于图11。此时焊缝处的温度实际降至850~870℃之间，冷却速度不必特殊控制，采用自然冷却。另外，焊接热量的输入用本公司设计的ER-TBC系统进行调整和控制。



(a) 焊缝变化



(b) 经圆周减径的焊缝

图11 焊缝处增壁前后对比

3.2.2 试验结果

常规材料与加工热处理材料的焊缝处冲击试验结果如图12所示。

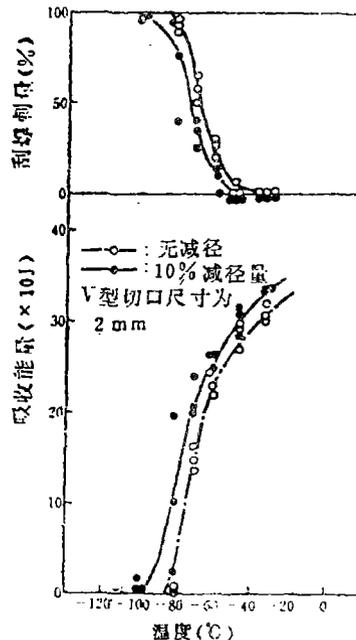


图12 圆周减径效应

减径法能使焊缝处的冲击韧性得到若干改善，但效果不明显，这是由于减径法对焊缝处造成的加工变形量较小之故，而对焊缝处局部增厚产生的影响相当明显。

3.3 辊轧法加工热处理技术

由于减径法受到加工变形量的限制，所

以必须将减径法和辊轧法并用而增加变形量来加以研究。

3.3.1 辊轧装置

本装置的特征是在增加变形量的同时，对壁厚进行加工，其装置如图13所示。

轧制方法是在钢管内表面使用小的轧

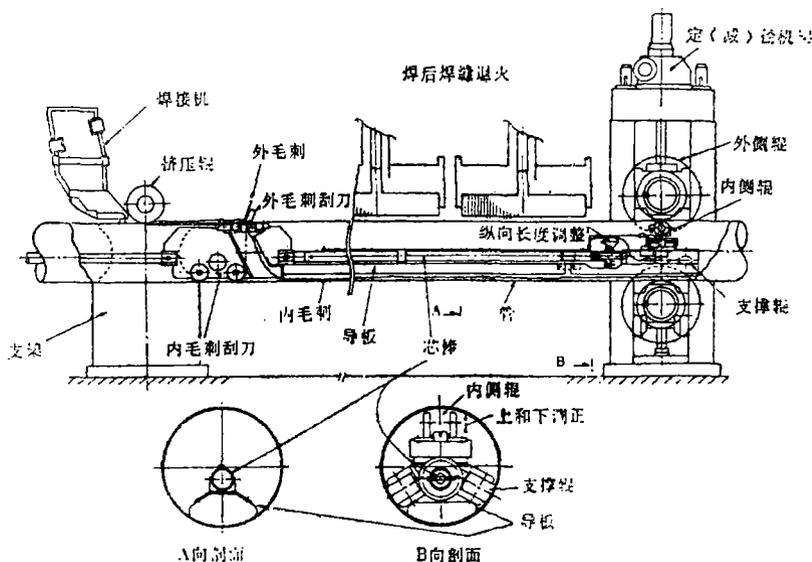


图13 U & R装置延伸简图

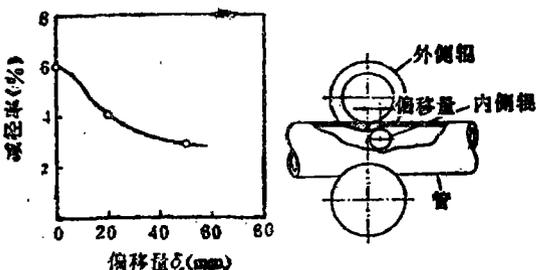


图14 减径率与偏移量之间的关系

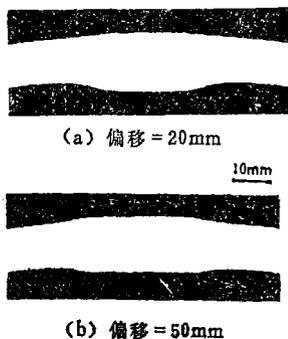


图15 焊接区域剖面图 (U & R法)

辊，而在外表面采用减径辊。此外，在焊接前的钢管开口处，装入长约20m的芯棒。辊轧装置的制造必须考虑如下几点特殊要求：

- 1) 轧制量易于控制；
- 2) 管内外侧的轧辊轴要一致；
- 3) 管内外表面装置要不妨碍焊缝毛刺的去除。

为满足上述要求，我们采取了以下措施：

(1) 控制轧制量

用机内的油压装置对管内表面轧辊的轧制负荷进行遥控调整。

(2) 调整焊管(纵向)轧制内外辊

图14所示为管内外轧辊轴偏移量与轧制量的关系。图15为此时的断面形状。

由图14及15看出，轧制轴偏移量增大，则轧制量减少，不会产生大的加工变形量。为防止管内外表面轧制辊的偏移，设置一种

沿管长方向的可调装置，以便调整芯棒长度使之符合轧制负荷的设定。

(3) 去除管内表面焊接毛刺

管内表面毛刺将使内表面辊装置和芯棒等的工作受到不良影响，因而在成对支持辊之间设置全长性半圆形切削导卫装置，以便使毛刺顺利地清除。

3.3.2 试验方法

加工热处理经减径后，管壁增厚情况示于表6。轧制和加工处理在850~790℃的温度范围内同时进行。轧制量在6%以下变化。此时观察焊缝处的冲击韧性、硬度、铁素体晶粒度等。冷却速度和减径法一样，仍然采用自然冷却。

3.3.3 试验结果

加工热处理后，断口转变温度为20℃时韧性改善明显。轧制量与铁素体晶粒度的关系示于图16。壁厚方向的轧制量与焊缝处转变温度的关系如图17所示。轧制量与硬度之关系示于图18。焊缝处的显微组织示于图19。

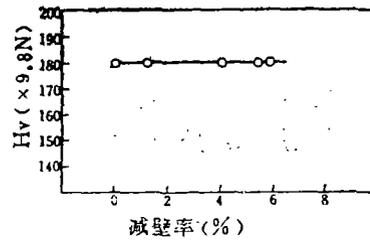


图18 减壁率与硬度的关系



图19 U&R法焊接区显微组织

4. 结论

决定焊缝处韧性的关键因素之一是组织状况。由于用焊后退火装置对焊缝处进行常化，故其组织保温时间短，冷却速度快，珠光体、铁素体被细化。作为改善该组织的方法，对快冷和二次热处理法进行了研究，这两种方法改善组织困难，尤其是硬化组织析出，导致韧性下降。加工热处理对焊缝处韧性改善是有效的。但是，必须增大变形量方能获得显著效果。同传统方法相比，焊缝处加工热处理后，其组织呈现晶粒细化，不发生硬脆。

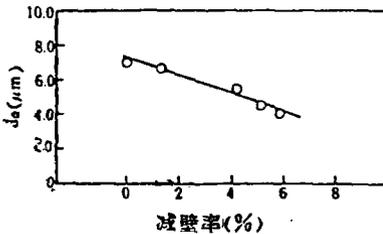


图16 轧制量与晶粒度的关系

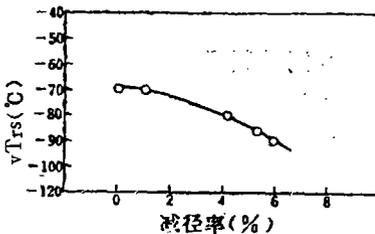


图17 轧制量与转变温度的关系

孙士秀 译自《NKK 技报》，1989，

No 126

吴峰 校