维普资讯 http://www.cqvip.com

第12卷第4期 焊 管 Vol.12, №.4
1989年7月 WELDED PIPE AND TUBE Jul.1989

16英寸ERW机组中频热处理机的工艺分析及其优化

李锦旗
（宝鸡石油钢管厂）

【摘要】本文通过我厂从西德引进的16英寸ERW机组中频热处理机对钢管加热的物理过程和相变特点的分析，提出了制定焊缝感应热处理工艺中应着重考虑的几个问题及优化工艺。

【关键词】热处理设备 工艺设计 优化

Analysis and Optimization for Heat-Treatment Technological Process of MF Heating Machines of 16″ ERW PIPE MILL

Li Jinqi
(Baoji Petroleum Steel Pipe & Tube Works)

【synopsis】 This paper analyses the process of physical change and phasetransformation during the period of heating pipe by the MF heat-treatment machines of the 16″ ERW PIPE MILL imported from W.Germany to Baoji Petroleum Steel Pipe & Tube Works. The paper has put forward the optimization and several points that must be taken into account seriously when formulating heat-treatment technological process for induction heating pipe.

【key words】 heat treating facility, technological design, majorization

1 前言

我厂从联邦德国萨尔茨吉特公司(Salzgitter Industriebau)引进的16英寸高频电阻焊管机组，不仅能生产符合API标准的输送管而且可以生产石油套管。其工艺流程图如下：

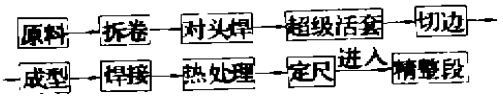


图1 16英寸ERW机组工艺流程示意图

从流程图可看出，焊缝热处理是焊管生产的重要环节之一，对高质量焊管的生产是至关重要的。AEG—ELOTHERM公司的焊管热处理设备是我国首次引进，为了消化吸收国外先进技术，对其进行工艺分析，是非常必要的。

2 高频焊管生产对热处理工艺的要求

在高频焊接过程中，由于趋肤效应、临近效应和热传导的共同作用，造成了焊接热循环峰值温度在管坯开口边缘的梯度分布，即出现了熔化区及部分熔化区、过热组织区、正火区、不完全正火区和回火区等特征区域。其中过热区组织由于焊接时温度在1100℃以上，奥氏体晶粒开始急剧长大，在化学成分和冷速适当的条件下，会形成一些硬而脆的相，使此区域的综合机械性能大大降低，参见图2。另外在焊接热影响区，伴随着梯度组织产生的同时也产生焊接应力。高频焊管生产要求通过焊缝热处理，达到消除应力，均匀和细化组织、提高焊接热影响区综合机械性能的目的。同时在焊缝感应热处理过程中，焊缝内外两侧存在温度差（尤其对厚壁管）所以要求在外侧不过热的条件下，内侧也达到或接近规定的热处理温度，这就对热处理工艺的制订提出了更高的要求。

维普资讯 http://www.cqvip.com

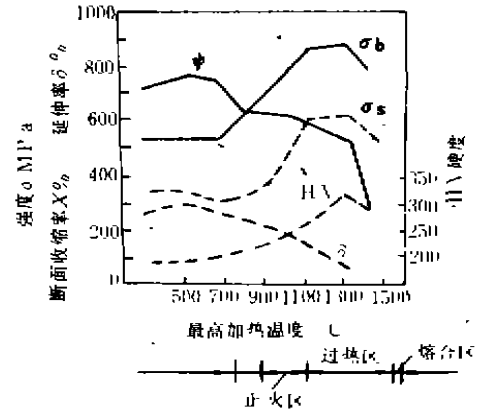


图 2 16Mn 钢焊接热影响区机械性能变化

3 16 英寸 ERW 机组中频热处理机性能参数

该热处理机组采用双机前后联合加热的工艺布局。1 号机组变频机输出频率为 1kHz，包括两台摇摆器（感应器组）最大输出功率分别为 650kW 和 450kW。在 I 号机组出口处装有一台 Iron 辐射型测温仪，以监测加热温度。II 号机组变频机输出频率为 3kHz，也包括两台摇摆器最大输出功率均为 450kW。在 II 号热处理机组出口处，安装有另一台 Iron 辐射型测温仪，可对最终热处理温度进行监控。该自动温控系统具有一定的先进性，可以在一定范围内，根据操作者设定的最终热处理温度和由 Iron 辐射型测温仪所测的实际温度，随着焊管机组生产速度的变化，自动调节输出功率的大小，使最终热处理温度保持在给定值。

4 中频热处理机加热钢管的物理过程和相变特点分析及工艺的优化

4.1 物理过程和相变特点分析

感应加热是基于电磁互感的原理，利用交变磁场在被加热体表面一定深度范围内产生的涡流热效应来加热物体的。在感应加热铁磁性材料过程中，当加热温度未超过钢的居里点以前，其磁滞效应释放出的热能也对工件起着加热的作用，但它是次要的，当材料失磁后，此效应也随之消失。

4.1.1 中频加热钢管的物理过程

假设某一瞬间中频交变电流的方向如图 3（感应器及钢管的横截面图）所示，垂直于纸面向外。由于交变电流的趋肤效应和临近效应，交变电流将主要分布在导电铜管的外侧；同时由于导磁体（硅钢片）的"驱流作用"将导电铜管中的电流驱向 II 型硅钢片的开口处。因此，铜管中电流密度分布特点是：外侧大于内侧、下半部大于上半部，在图 3 中用小黑点的疏密表示。由于硅钢片开口处铜管中的电流密度比不加硅钢片时电流密度大得多，这样在硅钢片与钢管间耦合距离 C 一定的情况下，相对地增加了通过钢管需加热部分的有效磁力线密度，提高了加热效率。硅钢片的另一作用是增强中频电流所产生的磁感应强度。

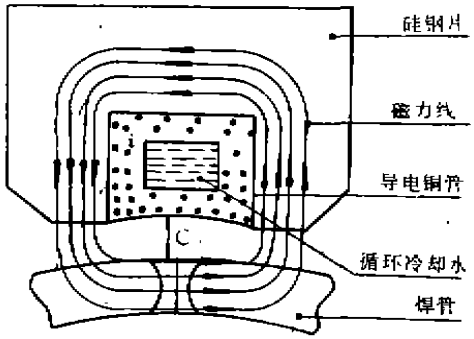


图 3 中频感应加热钢管焊缝示意图

从图 3 中被加热钢管的垂直方向看，在加热过程中由于趋肤效应，钢管中产生的涡流强度在钢管表面和距表面 x 距离处的大小关系遵循以下方程：

$$I_x / I_o = e^{-2\pi\sqrt{\frac{f\cdot\mu}{\rho}}\cdot x} = e^{-x/\delta}$$

式中：I_o——被加热体表面涡流强度，A；

I_x——距表面 x 处的涡流强度，A；

x——距表面的距离，mm；

f——电流频率，Hz；

μ——材料磁导率，G_s / O_e；

ρ——材料电阻率，Ω · cm；

δ——理论透入深度，mm。

由上式可以看出，随着 x 的增大涡流强度急剧减小。由焦耳一楞次公式

维普资讯 http://www.cqvip.com

$Q=0.24I^2Rt$ 可以看出随着电流变化下降更剧烈。在实际应用中规定，涡流强度下降为表面的 $1/e$ 处的深度是电流透入深度 δ。经公式推导：

$$\delta = 5.03 \times 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

（单位同上）。

对铁磁性材料讲，居里点前后（钢为 727～769℃），μ 显著减小，而 ρ 变化不大，见图 4、图 5 所示。这样就存在冷热两态涡流透入深度即 $\delta_{冷}$ 和 $\delta_{热}$。

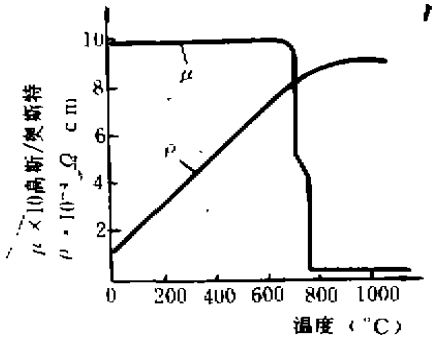


图 4　钢的磁导率和电阻率与温度的关系

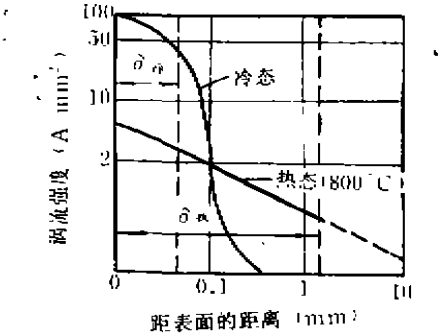


图 5　钢板感应加热时冷态和热态的涡流分布曲线（f＝200kHz）

再从图 3 中被加热钢管的水平方向看，由于交变电流产生的磁场按右手螺旋定则分布在导电铜管的四周，硅钢片具有很高的导磁率，所以磁力线主要集中在硅钢片中。在被加热的钢管上离导电铜管越近通过的磁力线越多，磁通密度越大，因而感应电动势及所产生的涡流也越大。在硅钢片以外，由于磁通密度急剧减小，所以钢管中产生的涡流急剧减小。因而在热处理影响区内也存在着温度的梯度分布，只不过由于热处理持续时间长和感应加热的特点决定了此梯度不象高频焊温度梯度那样大而已。

在 16 英寸 ERW 机组中，焊接后的钢管经焊缝磨光辊和超声波探伤仪进入中频加热机，经我们测定，此时焊缝外表面残余温度为 40～55℃。在钢管刚刚进入摇摆器温度明显升高前的瞬间，涡流在钢管表面的冷态分布规律可借用图 5、图 6 示意说明。

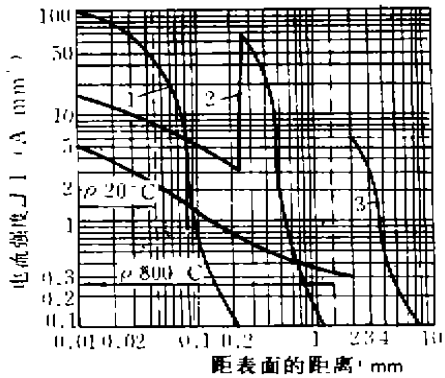


图 6　钢板感应加热过程中涡流大小的变化（f＝200kHz）

1——加热开始时　　2——加热中间

3——加热至 800℃

根据趋肤效应，越趋近钢管表面涡流强度越大，因此升温快。随着钢管的前进，其表面温度迅速升高。当表面出现超过居里点（769℃）温度薄层时，加热层就被分为两部分；外层是失磁层和与之相邻的未失磁层。由图 4 可知，失磁层内钢的磁导率 μ 急剧下降，造成了涡流强度明显下降，由

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-2\pi\sqrt{\frac{f\cdot\mu}{\rho}}\cdot x}$$

看出，此时最大的涡流强度是在两层的交界处，如图 6 所示。

涡流强度分布的变化，使两层交界处的升温速度比表面升温速度更大，依此使失磁层不断向管壁纵深移动。这样，钢管就得到逐层而连续的加热，直到热态透入深度 $\delta_{热}$ 为止。这种加热方式称为透入式加热。在此方式的加热过程中，当表面出现失磁的

维普资讯 http://www.cqvip.com

高温层后，电磁能就相对集中在与之相邻的未失磁层中，此时，钢管表面的温度仍在继续上升，但升温速度已明显减慢，即加热层温度的上升和厚度的增大，是在表面层加热减慢的条件下进行的。为了使焊缝内侧达到规定温度而提高焊缝外侧温度，从而使焊缝外侧造成过热；或者为防止焊缝外侧过热而降低加热温度，却造成内侧加热不足，这样内外不能兼顾的情况应该避免。

另外，对于一些厚壁管（壁厚大于 $\delta_{共}$），当失磁的高温层厚度超过热态的涡流透入深度 $\delta_{热}$ 以后，涡流完全按着热态特性分布。在继续加热时，热量基本上是依靠在厚度为 $\delta_{热}$ 的表层中析出，由于热传导的作用，加热层的厚度将随时间的延长而不断增大。这种加热方式称为传导式加热。

利用上述涡流透入深度公式可以算出：

f=1000Hz，$\delta_{冷}$=0.633mm，

$\delta_{热}$=17.4mm；

f=3000Hz，$\delta_{冷}$=0.365mm，

$\delta_{热}$=10.05mm

16 英寸 ERW 机组生产的钢管壁厚范围为 3.17～12.7mm。因此，对壁厚 10.57mm 以上的钢管在感应热处理时，有部分焊缝靠传导式加热。

4.1.2 感应加热过程中的相变特点

感应加热的一个特点就是加热速度快。该机组设计的最大速度为 45m／min，如果钢管外表面进入热处理机时残余温度为 40℃，Ⅰ号热处理机出口温度为 800℃，则加热速度为 190℃／s。在生产速度为 25m／min 时，加热速度应为 100℃／s。由于感应加热速度快，珠光体向奥氏体的转变不是如平衡状态图所示的在一个恒定温度（A_{c1}）下发生，而是变成了一个温度范围，随着加热速度的提高，这个转变温度范围愈大。对亚共析钢讲，感应加热对 A_{c3} 的影响比对 A_{c1} 的影响大得多，这是由于先共析铁素体向奥氏体转变时碳原子的扩散距离比珠光体向奥氏转变时更长。含碳量、加热速度和 A_{c3} 三者关系见图 7。焊管用钢一般为热轧低碳低合金钢，钢带母材有不同级别的带状组织存在。另外，焊缝熔合区原管坯开口端面处，由于焊接时的高温氧化而脱碳，进一步加剧了该区域成分的不均匀性。

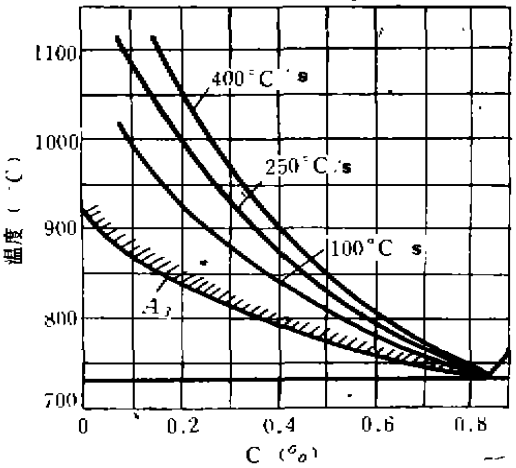


图 7 加热速度和钢中含碳量对 A_{c3} 的影响

4.2 热处理工艺的优化设计

要使热处理后焊缝区域具有良好的组织和性能，在原焊接工艺不变的前提下，必须注意控制加热过程中焊缝内外两侧温度差和奥氏体成分的均匀性。如果出现“过热”现象，非但不能改善和提高组织性能，而且会使之恶化；如果奥氏体成分的均匀性差，不同含碳量的区域在随后的冷却转变中会产生不同的组织，并将产生一定的组织应力，对性能的改善不利。

根据以上分析，笔者认为，在制订焊缝感应热处理工艺时，应着重考虑以下两点：

①由于焊缝内外两侧存在一定温度差和感应加热速度快使钢的 A_{c1}、A_{c3} 升高的特点，在确定最终加热温度时，应根据生产钢管的壁厚和机组速度等具体情况适当提高最终加热温度。在实际工作中就是要提高焊缝外表面温度（它是现场可监控参数），以保证内侧焊缝也达到要求的温度。

②鉴于钢管感应热处理加热速度快、成

维普资讯 http://www.cqvip.com

分不易均匀的特点，提高加热温度也有利于成分均匀化。但温度过高势必造成过热。所以在提高外表面温度的同时，工艺上应使被加热区域有更长的保温时间，以利于成分均匀化。

由于透入式加热比传导式加热具有加热速度快、热效率高、内外温差小等优点。因此，中频热处理（正火）工艺可以这样制订：Ⅰ号加热机由于其频率低，热态透入深度大的特点，加热时输入大的比功率，使钢管焊缝内外两侧温度尽量接近或超过钢的居里点（769℃）。Ⅱ号机可以在管壁已为热态的基础上，利用热态涡流分布较均匀的特点，输入小的比功率进行保温，使管壁温度和成分均匀，并监控中频热处理机出口的最终温度。

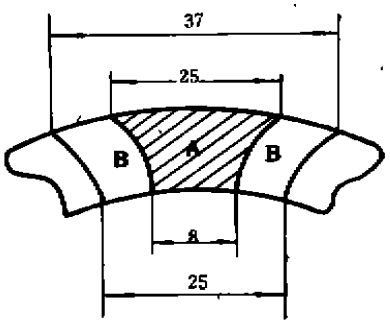


图 8 焊管焊缝正火处理组织区域示意图

A——完全正火区　　B——不完全正火区

图 8 是规格为 Φ426×10mm，材质为 T/S52k，正火（940±10℃）处理后组织区域示意图。由显微组织检查发现，完全正火区已全部将焊接热影响区包括。

5　中频热处理工艺过程分析

下面利用焊缝在整个感应热处理过程中，温度在钢管内外表面及沿管壁周向的分布，对工艺过程进行分析。钢管在 MF 加热机组中的加热曲线如图 9 所示，其温度分布曲线见图 10（a～e）。

数据测试条件：壁厚 $S=12$mm，生产速度 $v=14$m/min 时，材质对温度分布与变化的影响不大。

钢管进入加热机从 40℃ 左右的残余温度开始加热、并同时开始计时。Ⅰ号机输入大的比功率，使管壁外侧温度迅速上升，经 5 秒后（此时钢管出 NO.1 摇摆器），外侧焊缝表面温度已达 800℃。

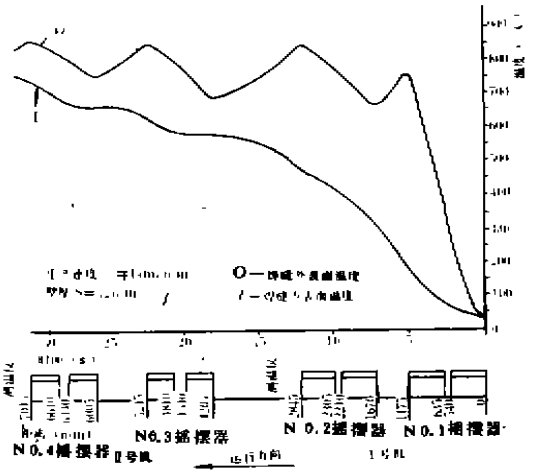


图 9 钢管在 MF 加热机组中的加热曲线图

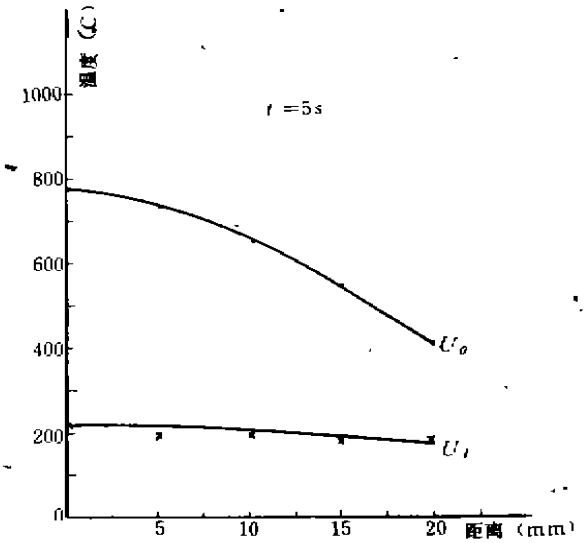


图 10（a）从钢管进入中频机计 $t=5$s 时，焊缝内外表面温度及温度在焊缝一侧沿钢管内外表面周向变化曲线

从图 9 看出，升温曲线斜率大，表明温升快。由于失磁层尚薄，内侧焊缝表面只有 200℃ 左右。此后，钢管进入无感应器的间隙区段。在这段时间里，已加热部分的热量

维普资讯 http://www.cqvip.com

在沿管壁周向传热的同时，内外表面分别向管腔和周围大气辐射散热，使已加热部分的总量有所散失，但由于内外壁存在温度梯度，高温区向低温区传热，结果使内壁温度

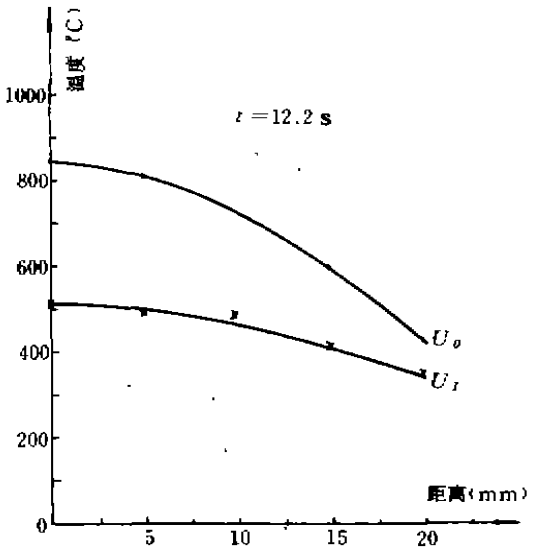


图 10 (b) $t=12.2$s 时温度分布曲线
(钢管刚出 NO.2 摇摆器)

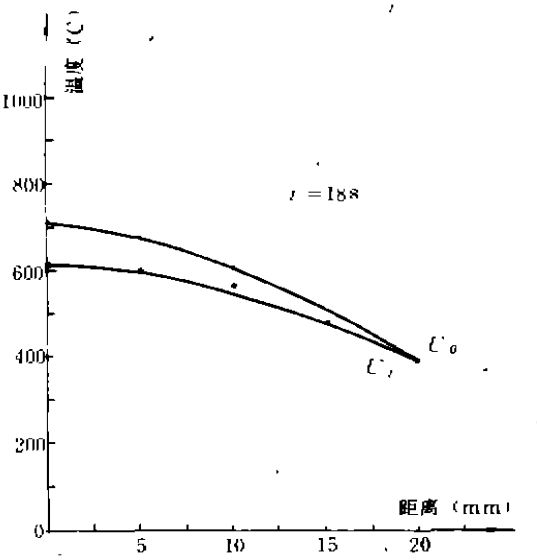


图 10 (c) $t=18$s 时温度分布曲线
(钢管刚到Ⅱ号机入口处)

反而升高（见图 9）进入Ⅰ号机的 NO.2 摇摆器后，钢管焊缝内外表面温度仍在升高，但从升温曲线上看，升温速度已比在 NO.1 摇摆器时小了许多。此后钢管进入Ⅰ.Ⅱ号机之间的间隙区段，如同钢管在第一个间隙一样，外壁温度下降，内壁温度升高。然后钢管依次进入 NO.3 和 NO.4 摇摆器，内外壁温度变化与前类同，只是升温速度变慢。在 $t=30.1$s 时，钢管位于热处理机出口处，此时，焊缝内外表面温度差不超过 100℃，内壁已达工艺温度、外壁也不过热。

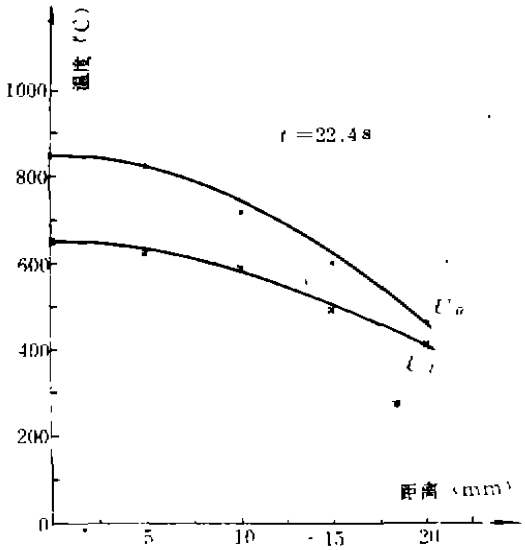


图 10 (d) $t=22.4$s 时温度分布曲线
(钢管刚出Ⅱ号机 NO.3 摇摆器)

热处理后的钢管，经 68m 长的空冷辊道进行空冷。在此过程中，被加热的部分在沿管壁周向传热的同时，也向管腔和周围大气以辐射形式散热。根据辐射公式，单位表面的热辐射损失 ΔW:

$$\Delta W = 5.72K_u\left[\left(\frac{T_{表}}{1000}\right)^4-\left(\frac{T_{介}}{1000}\right)^4\right] \quad (w/cm^2)$$

式中: $T_{表}$——被加热体表面温度，K;
$T_{介}$——周围介质温度，K;
K_u——热辐射系数。

由于刚出加热机时，$T_{外表}$ 大于 $T_{内表}$，$T_{外介}$ 小于 $T_{内介}$，所以外表面高温区不仅向内表面传热，而且其辐射散热的速度大于内表面。这样外侧比内侧散热速度快。如果机组生产速度慢，在空冷辊道上经过一定距离后，内外两侧温度将相等，而且有可

维普资讯 http://www.cqvip.com

能产生负的温度梯度，即内表面高于外表

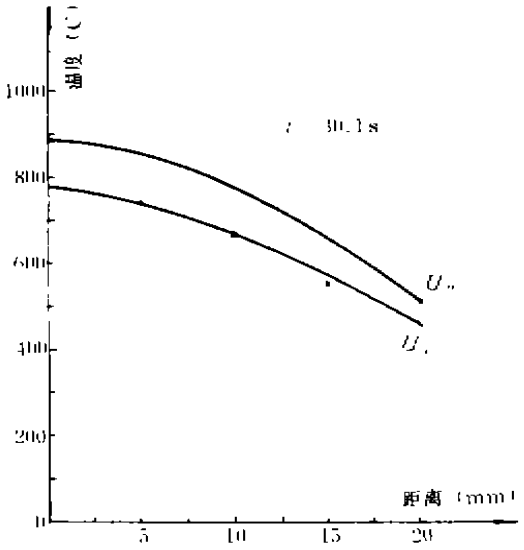


图 10（e）$t=30.1$s（钢管在热处理机出口处）温度分布曲线

面，出现内侧向外侧传热的情况。加热后的钢管经空冷后，焊缝温度降至 367℃（机组设计值）以下，进入 12 米长的强制冷却阶段。根据生产速度可选择喷淋和浸浴方式强制冷却。

6　结束语

16 英寸 ERW 机组中频热处理机进行焊缝热处理时，存在着最终热处理温度的确定，尤其是两个不同频率机子的温度分配问题。我们采用的优化选择方案是：根据所生产钢管的壁厚和机组速度，在普通热处理工艺的基础上，适光提高最终热处理温度；在温度的分配上，尽量增加 I 号机的输入比功率，使焊缝外表面温度达到或超过钢的居里点（769℃），相应地减小 II 号机的输入比功率，进行保温和均匀化。这样可以减小焊缝内外表面温度差，使成分均匀组织细化，以提高和改善焊缝性能。

参　考　文　献

1　《金属感应热处理》（上）机械工业出版社 1985 年 9 月第一版

2　《热处理工艺学》　科学普及出版社 1984 年 6 月版

3　《焊接金相分析》　机械工业出版社 1987 年 10 月版

4　联邦德国 AEG-ELOTHERM 公司资料

（收稿日期　1988—11—7）

（上接第 42 页）

度上限，X42 级 X52 级上限不高于下限的 78MPa（对此条件有分岐意见，一说范围放宽为 98MPa，一说钢卷板端部放宽即可，对此条款尚需进一步讨论）。

3.3 尺寸偏差

厚度偏差：　6～12.7mm 的为 ±0.4mm；

宽度偏差：　600～1500mm 的为 $^{+30}_{-0}$mm。

3.4 板型

月牙弯：每 10m 不超过 20mm，同时每 2m 不超过 5mm（二者同时存在）。

塔形：不大于 50mm（实际上应大大低于此值）。

板头（舌头或鱼尾）：X46 级及其以下或厚度不大于 6.5mm 的钢带卷两端均不超过 150mm。大于 X46 级或厚度超过 6.5mm 的钢带卷两端均不超过 600mm，并规定其为废品部分。

超标准（off gange）部分，指的是钢带卷内外层端部不大于 5m（或 10m）处。对此部分厚度偏差及机械性能的放宽问题，日本方面也曾提出过。我们的观点是必需尽量减短此超过规格部分，其厚度偏差可在较严格的基础上（如 ± 0.4）放宽 $^{+0.1}_{-0}$mm。另外超规格部分的机械性能上限可放宽 9.8MPa。

（收稿日期　1988—11—20）