

冷轧板 退火
工艺控制
罩式炉

罩式炉退火工艺的最佳控制

Liesch J 等

(卢森堡阿尔贝德公司)

(12) 66-73

Liesch, J

34.2 ✓

T4162.8
T41562

摘 要 对冷轧板质量以及对设备生产率要求的不断提高,迫使冷轧板生产厂家对生产流程进行越来越严格的控制。1988 年底在阿尔贝德公司确立的关于罩式炉退火工艺,特别是强对流退火工艺的研究项目,其目的也就在于在缩短退火时间的同时,提高带钢质量,减少保护气体和能源的消耗,以及为用来加工库存钢卷的退火设备开发出一种最佳的控制规则。本文对此进行了介绍。

1 引言

在对确定退火工艺的物理过程进行研究时,轴向与径向热传递的配合常数间的关系,对于从气体到钢卷边缘,以及钢卷内部的热传导都具有决定性的意义。数据分析指出,为此必须确定有效的、宏观、可测的数值,这些数值与目前已知的数值有很大偏差。理论研究证实了径向热传递具有决定性作用的推测。

根据这个结论制定的控制规则只含有一个随机参数,该参数对那些不可预见的影响作了描述。这个参数对计算出的升温的影响在 20℃ 以下,所以在这个区间内,最低温度对于任何一个炉子来说都可以作为调节温度的函数预测出来。最佳的调节曲线也可以在诸如带钢质量、分层管理标准等辅助条件确定之后,通过将所生产的全部钢卷尺寸关系逆转的方法预先计算出来。

2 目前工艺控制中的空白

退火设备的生产率主要取决于对最终产品的质量要求、生产过程中退火的工艺环节和退火参数调整之间关系的认识。目前生产率的提高主要是由设备的设计者来进行,如增加保护气体的循环介质质量或用氢气生产工艺取代氮气生产工艺。由于对退火工艺的物理和化学过程及其相互作用的认识尚不完

善,人们在严格的过程控制方面还没有能够取得更大的实质性进展。所以过程控制或者是要具备很大的安全余地,或者是与生产工序在线连接。在第一种情况下是不必要的长加热时间,在第二种情况下安装传感器的设备投资却妨碍了费用的最优化。

此外,用户的愿望与厂家的要求分别属于两种不同的情况,它们对退火时间的要求完全相反。在工艺控制尚不能令人满意的情况下,为了保证质量和表面清洁度达到规定要求,需要较长的退火时间、较高的温度和消耗较多的保护气体。

设备操作者将试图通过尽可能短的退火时间、尽可能高的装炉量和严格遵守对钢卷温度的规定来提高设备生产率。

仅依据一些具有启发性的论据,并不能确定一个带有一定辅助条件的给定的炉子的最佳调节温度曲线。

从理论分析的角度来说,不仅是建立方程组的复杂性增加了理论分析的难度,而且退火过程中钢卷特性呈现出的多样性也加大了人们认识主要影响因素的难度。在阿尔贝德-杜德林根冷轧厂退火的钢卷包括重量在 4~7t,宽度在 800~1500mm 的各种型号。

制约设备生产率提高的两个主要问题

是:

—只有确定了调节温度曲线才能避免“退火过度”和不必要的长时间“均热”,并且满足质量要求;

—在对厚度超过 1.5mm 的带钢进行退火时,带钢表面的净化程度不够。

图 1 对各种影响因素间相互作用的复杂性作了概括描述。

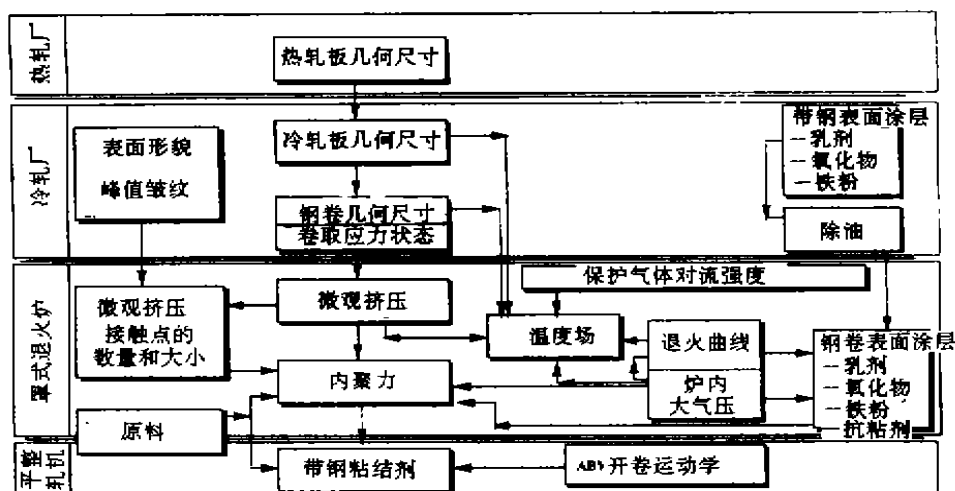


图 1 操作影响因素间的相互作用

3 退火过程中的物理学

3.1 随机影响因素

在日常工业生产中,生产条件并不总是同理想模拟状态相一致。一系列不可预见的因素将对钢卷温度产生影响。

—连续的钢卷绕圈间的接触点的数量是未知的,它虽然不是主要的因素,但也影响热量在径向上的传递^[1]。

—表面洁净度在局部上是不同的,并且在各个带卷之间也不相同。带钢表层覆盖物也会改变热传递:它会通过汽化吸收金属的热量,改变接触点数量,吸收带卷绕圈之间的辐射等,见图 2。此外,汽化温度还对局部压力,即绕圈张力和带卷内的温度分布有很大依赖性。

—在正常的生产操作中,炉内装料状态(带卷堆置高度、带卷尺寸等)常会经历短时期的变化。几乎伴随着每一个退火过程,通过对流器的保护气流都会以一种不可预见的方式发生着变化^[2]。这种变化又导致了带卷边

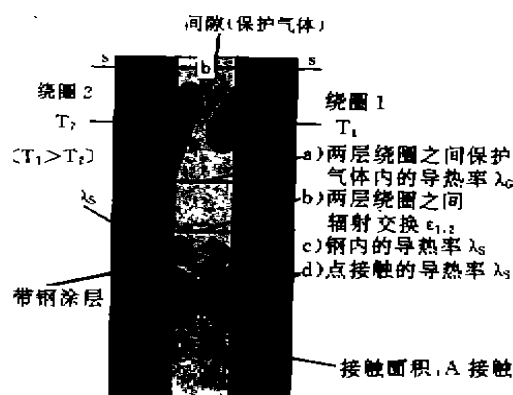


图 2 钢卷内的径向热传递(显微镜下)

缘上水平对流热传递的变化。

因此,控制模型中必须包含一个优先的自由参数。随机因素对温度的影响情况必须通过测量来确定。只有区间极限可以通过理论计算推算出来。

3.2 退火过程的数据研究

在一个控制模型发展到在工业上成熟地使用之前,必须对其中的重要工序进行基本

的分析,以使其能满足具有灵活性、牢固性、标准化和简单化的标准。

在阿尔贝德公司进行研究的最初部分是

利用流体动力学程序来进行的。在图3中对需要进行数字分析的工艺过程用示意图表达出来。

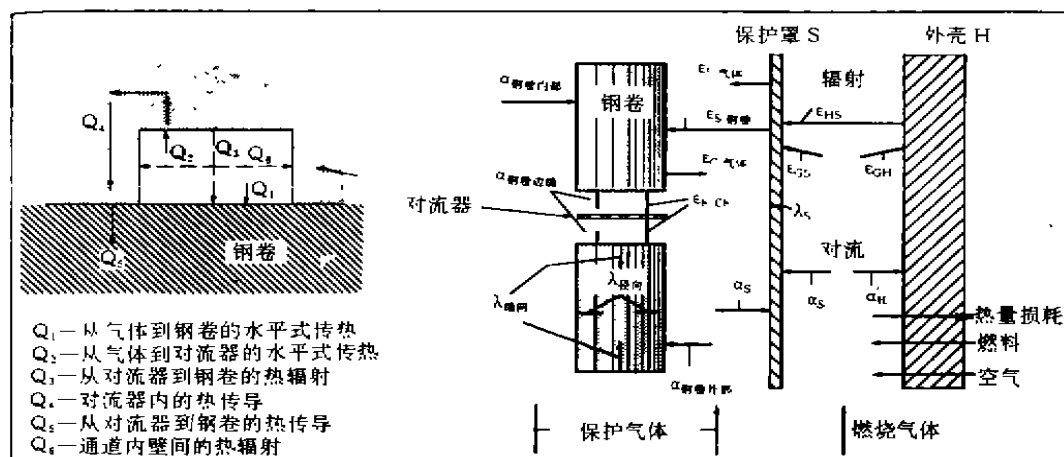


图3 罩式炉退火过程中的热传递系数

尽管从原则上讲,一个完全三维的数字描述是可能的,但也存在一些问题,这些问题使得用数字来解相关的方程组更加困难。相互辐射作用对于方程解算器来说也是一个不稳定的因素,它滞延了相互作用法的收敛,大大延长了计算时间。在期待的临界位置,压力或者温度梯度很大,因此必须对不连续化进

行非常仔细的选择。这就又延长了计算所需的时间。关于参数的研究也需要人们花费大量时间。所需的计算机内存容量超过了在阿尔贝德研究中心所使用的 Vax3600 型及 HP9000/720 型计算机的内存量。

科研人员对研究进行了分类。升温用一个二维的旋转对称模型(见图4)来计算。在

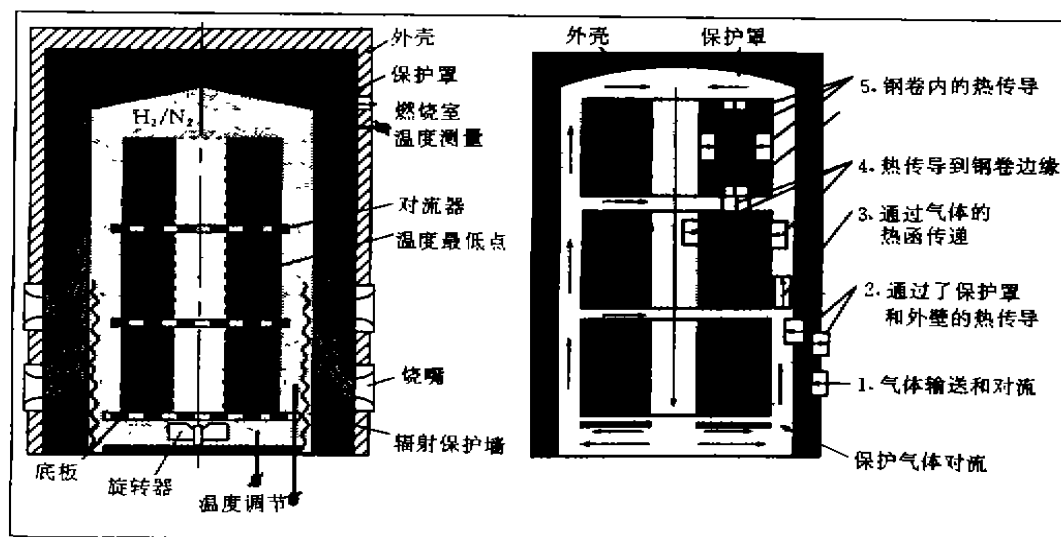


图4 罩式炉及其模型的示意图

这个模型中对流器表达的不精确,通道里气流的压差通过引入一个平行板之间分层气流的摩擦系数 f 作了近似的描述(所用符号见表 1)。

表 1 使用的符号

Re	雷诺数
L	平行板间距离
T	温度
u	气体速度
ν	动力学粘度
ρ	气体密度
α_x	从气体到 x 的稳流式热传导系数
ϵ_{xy}	x 和 y 之间的辐射相互作用系数
$\lambda_{\text{轴}}$	钢卷轴向导热率
$\lambda_{\text{径}}$	钢卷径向导热率
λ_x	在媒介 x 内的导热率
$\theta(x)$	亥维赛函数: $\theta(x)=0$, 如果 $x<0$; $\theta(x)=1$, 如果 $x\geq 0$
$r(T_{\text{min}})$	对应径向上最低温度的半径
$A_{\text{接触}}$	钢卷层间的接触面积
b	间隙宽度
$\epsilon_{1,2}$	层 1 和 2 之间的热辐射交换系数
热辐射交换系数:	
ϵ_{HS}	在外壳和保护罩之间
ϵ_{GS}	燃烧气体和保护罩之间
ϵ_{GH}	在外壳和燃烧气体之间
$\epsilon_{\text{钢卷}}$	在保护罩和钢卷表面之间
$\epsilon_{\text{S-气体}}$	在保护罩和保护气体之间
热传导系数:	
σ'_s	从燃烧气体到保护罩
σ'_H	从燃烧气体到外壳
$\sigma_{\text{钢卷}}$	从保护气体到钢卷表面
$\sigma_{\text{钢卷边缘}}$	从保护气体到钢卷边缘

$$f=96/\text{Re} \quad \text{Re}=2 \cdot L \cdot u/\nu \quad (1)$$

这种近似法保证了在二维模型中通过带卷之间缝隙的保护气体流量准确。摩擦系数通过对流器通道内压力损耗的公式来确定:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{f}{2D} \rho u^2 \quad (2)$$

对于已完全形成的湍流来说 f 和雷诺数没有关系^[5,6]。但还不可能用这里所说的模型来对通道中的湍流产生的影响进行研究。

主要参数包括径向和轴向上的导热系数、气体的辐射吸收值、循环速度及带卷尺寸。

当然,带卷的层结构不可能一圈一圈地得到再现。所以在模型中钢卷被描述为一个有各向异性特性的非均质的固体。主要的各

向异性都与导热率有关。

通常在模型中只是将烧嘴外壳的外部温度以及燃烧室内烧嘴的调节或温度规定为边界条件。而其余的所有变量则可由此计算出来。

用分隔开的三维模型研究对流器内气体流动。利用这个模型,对于任何形状的通道,无需进行大量计算即可对带卷边缘附近气体的流动加以分析。进行这一研究的主要对象是在带卷边缘附近的涡流和与之相关的热传递,以及保护气体向带卷各层的间隙之间扩散的可能性。

3.3 热传导的各向异性

温度毫无疑问是一个需加以确定的变量,而且无论是钢卷内部在给定时间的温度分布,还是通过整个循环过程在给定地点的升温都需加以确定,因此,各种热传递过程的彼此权衡和对这些热传递过程起主要影响作用的参数,如保护气体的种类及其成分、气体速度,对流器几何形状、带卷的卷取张力和表面覆盖层等的确定都具有十分重要的意义。

对于带卷加热来说,带卷内径向与轴向导热率之比($\lambda_{\text{径}}/\lambda_{\text{轴}}$)具有基本的意义。这种各向异性在文献中引起了人们的广泛注意。值得注意的是,在一般情况下,所进行的理论研究和试验研究都使人确信,从原则上讲可以采用同氮气环境下完全相同的方法,在氢气环境下对钢卷进行加热。最早的数字研究为 $\lambda_{\text{径}}/\lambda_{\text{轴}}$ 关系的确立作出了贡献。

模型的自由参数通过与一系列试验数据的结果相适应的方法来确定。图5就是一个典型的结果。对于板厚在1mm左右的钢板,从这些计算中可以得到下面的公式:

$$\lambda_{\text{轴}} = \lambda_{\text{轴}} \quad (3a)$$

$$\lambda_{\text{径}}(\text{N}_2) = \lambda_{\text{轴}} [0.04 + 1.875 \times 10^{-4} T] \quad (3b)$$

$$\lambda_{\text{径}}(\text{H}_2) = \lambda_{\text{轴}} [0.23 + 5.6 \times 10^{-4} T] \quad (3c)$$

这些公式同文献中引用的数值是非常吻

合的。应注意的是,文献中给出的数值只是在

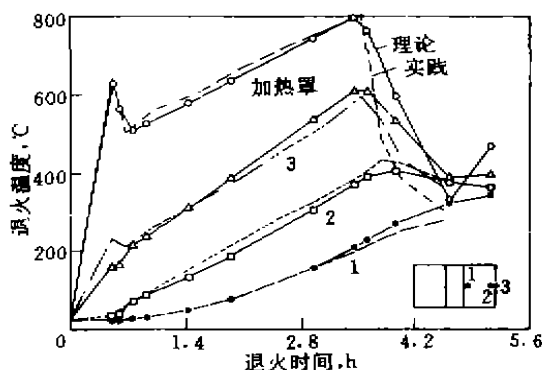


图5 作为燃烧室内温度函数的钢卷加热的数字计算

一定条件下才有效,此外还显示出不太明显的分散性。公式(3a)到(3c)给出的数值处于这种分散范围之内。

在通常情况下,从公式(3b)中可以得出以下结论,即在氮气中径向传热对带卷加热的贡献可以忽略不计。即使在氢气中,相对于轴向传热来说径向传热的量也很小(3c)。

对退火开始时结果的详细研究也显示,计算出的钢卷表面温度大大低于实际测得的温度。这种差异是不能仅从热辐射吸收系数的改变来解释的。此外,在对流器流量相近的情况下,轴向上的传热量并没有实测值那么大。这些现象表明,必须对公式(3a)到(3c)进行可能的修正。

根据下面的理由可以对这些“修正”作出定性评价。

在钢卷加热时会产生径向压力,这种压力迭加在带卷的剩余卷取张力上。它是带卷中温度分布不均的结果^(8~11)。在氢气环境下,由于这种温度分布的不均衡性较弱,所以带卷的剩余卷取张力也没有在氮气环境下大。压力的大小可以用由数字模型计算出的带卷温度来推导。

图6中是一个径向上剩余卷取张力和总压力的典型曲线图。这里的正值表示张应力,负值表示压力应力。“压”意味着板层间隙缩

小,因此接触点就会增多,这导致了在径向上

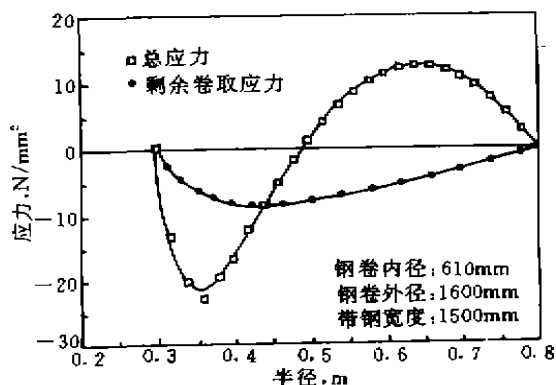


图6 钢卷内的径向应力

热传递能力显著增强,这种现象在氮气环境下尤为明显。

压力减小则间隙增大。因为 $\lambda_{\text{总}}$ 已经同在没有接触点时计算出的数值相对应,所以它开始不会产生什么影响。带卷表面由于热辐射的影响在退火开始时产生了很大的温度梯度。因此径向上的辐射热传递将会导致在这个区域内很早就出现向带卷内部有效热传递的增加。这与径向上热传导能力局部增强是相符的。我们试图用下面的公式来描述这样一个“有效的”导热性系数:

$$\lambda_{\text{总}}(H_2, r, T) = A\theta(\lambda_{\text{总}} - A) + B\theta(A - \lambda_{\text{总}}) \quad (4)$$

$$A = \lambda_{\text{总}}[1 + 2.15 \cdot 10^{-3} T(r)] \cdot f(r)$$

$$B = \lambda_{\text{总}}$$

系数 $f(r)$ 在这里是一个具有图7中描述的典型形状的函数。

在起始阶段只有剩余卷取应力具有重要意义,所以它此时表现为一个突出的最大值。因为热应力和热辐射的影响很快便显示出来,在外部 $f(r)$ 也会迅速超过原始值0.23。消除应力则会导致在外部 $f(r)$ 迅速下滑,幅度比预计的减去剩余卷取应力之后的幅度要大。因为自变数是纯粹定性性质的,所以不可能将函数限制在一个狭小的界限内,但总的说来还是可以确定,在这里 $\lambda_{\text{总}}$ 非常接近 $\lambda_{\text{总}}$ 。

在一些区域内在300℃时就可取用 $\lambda_{\text{钢}}$ 值。

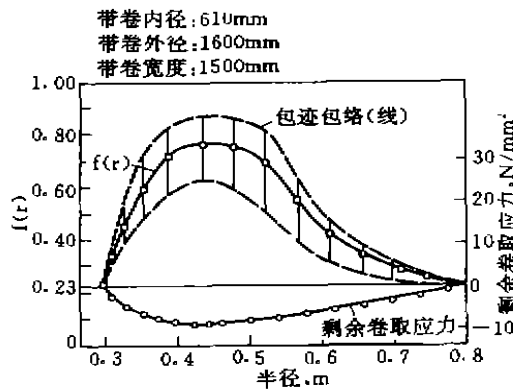


图7 局部变化的“有效”径向导热性系数的公式

图8描绘了运用从图7中得出的 $f(r)$ 时的结果。数字计算的加热曲线同测量值在所有的位上从一开始就是一致的。

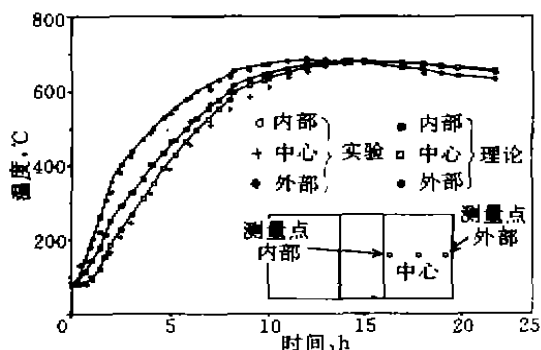


图8 采用图7给出的热传递系数对带卷加热进行的数字计算

此外,当 $\lambda_{\text{气}}$ 固定改变 $\lambda_{\text{钢}}$ 时,这些结果是稳定的,偏差小于10%,所以数据分析是可信的。

这些结果表明,在钢卷内和从气体到钢卷的热传递过程的比例以及轴向和径向上的传热的相对意义需要重新评价。

3.4 轴向热传递系数

从方程(3)可知,相对于轴向上向钢卷内部的传热来说径向上的传热可以忽略不计。但根据方程(4),这种忽略至少在氢气环境下

是不允许的。另外,上面的分析指明,对于钢卷加热来说,轴向上传热的有效作用非常小。因为钢卷内部 $\lambda_{\text{钢}} = \lambda_{\text{钢}}$,所以从气体到钢卷边缘的平流式热传递必然是非常弱的。

要说明这个问题,需要对对流器通道内的气流进行详细的分析。由于篇幅所限,我们不能在这里对此问题从理论上和数字上做详细分析。我们将在其它地方弥补这项工作。但实验的确表明,实际上在钢卷加热时,特别是在温度最低点升高时,轴向传热的贡献是非常小的。

一炉内的装料状况和钢卷尺寸对对流器的气流流量影响很大^[2]。在钢卷上部边缘和中部周边的气流流量之间(及保护气体的平均速度间)的差值可以达到3倍。

一对流器通道的几何形状导致了气体向内径方向的流动大大加速,见图9。这一点对所研究的所有类型的对流器和对流器变化都是有效的。气流进入对流器的入射角度不会改变这一结论。这个角度只对外缘附近的气流速度 u 产生影响。通道内的加速因数“ $u(\text{max})/u(\text{min})$ ”大于3是可能的。

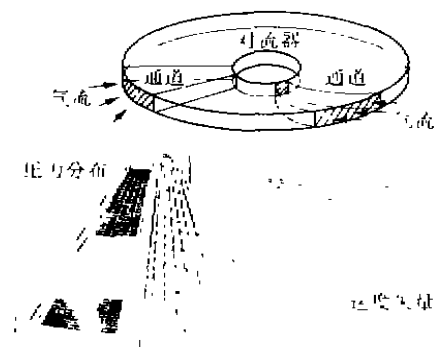


图9 在各种几何形状的对流器中的气流

热传导系数取决于对流器通道中的气流速度。第一个结论指明了温度最低点向着气流流量低的一侧垂直推移。从第二个结论中可以得知,在钢卷内边缘上的轴向热传递会更好,因此在忽略轴向上的热传递时,温度最

低点向钢卷外边缘方向移动。

这两个结论与大量的实验数据是不一致的。

从数字分析得知,在对流器通道内从气体至钢卷边缘的热传递系数很小^[12,13]。这意味着,带钢的加热几乎完全是由径向上的热传递起决定作用。

4 结果分析

通过研究得出了控制方程的分析答案,即温度的升高和分布可以作为调节温度的函数加以确定。由此产生的热应力同样也可以从这个答案中计算出来。我们在这里不做更详细的探讨,只是指出几个结果。

带卷中温度最低点并不是固定在径向上 $r_{\text{内}} + 1/3R$ 处 (R : 带卷厚度; $r_{\text{内}}$: 带卷内径的 $1/2$), 而是从中心向内径方向移动。温度最低点的移动速度以及最低温度的平衡位置基本上是保护气体和调节温度梯度的函数。在氮气环境下, 这个最低温度比在氢气环境下更加靠近内径, 并且明显得多。在氢气中:

$$r_{\text{内}} + 1/3R < r(T_{\text{min}}) < r_{\text{内}} + 1/2R \quad (5)$$

对所有的调节温度梯度都有效。

对于综合控制来说最低点温度的计算可能是误差最小的, 见图10。在图11中, 绘出了在氮气中退火8h的情况。在这里也体现了一致性。轴向和径向上的传热对最低点温度升高的贡献可以通过模型来计算。从图11中的曲线可以得知, 径向传热几乎只对带卷的加

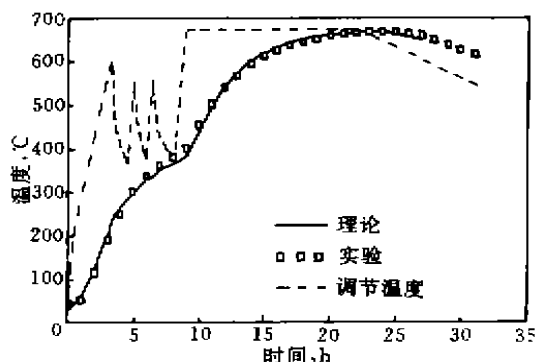


图10 在温度最低点温度升高的分析计算

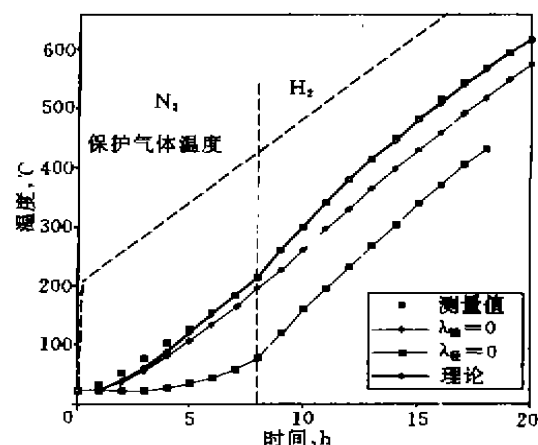


图11 作为调节温度函数的升温的分析计

算, 热传递在径向和轴向上的份额热有贡献。轴向传热所占比例在10%左右。通过详细的实验工作已经证实了这些结论^[14]。显然, 从方程式(3a)到(3c)我们得不出任何关于带卷内温度最低点升高的结论。

如在理论物理研究中所用的方法, 此处引用一些宏观的“再标准化”的配合常数是必要的, 它们从总体上对热传递进行了描述, 从它们的公式中可以直接推导出关于轴向和径向传热的相对意义的结论。

带卷内的热应力可以从温度的分析解中计算出来。

径向热应力分布曲线的形状同图6中所描绘的区别不大。压力的最大值可达 20N/mm^2 左右, 而减压则可达 30N/mm^2 。这些数值只有当带卷在很宽的区域内远远超出了蒸馏温度而使总应力保持负值时才有意义。由于带钢的卷取应力决定着受压力区域的膨胀, 所以它对表面清洁度起着很大的作用。

5 退火工艺的控制模型

在计算最佳的调节温度曲线时必须输入的参数数量, 对于制定一个易操作的控制程序非常重要。这个问题最终被简化为对退火过程中经受的随机影响因素的确定。

如果这些随机因素的影响大, 那么由这些变化产生的过程间隔也大, 模型只能在线

使用^[15]。将测量结果的计算值反馈到模型上,则可以将这些随机参数列出详细清单,接着就能预报出退火的最高温度和退火时间等工序参数。我们可以依据数字计算结果来制定在线控制模型,或者制定一个分析模型,它的参数在最后阶段不必再具有直接的物理意义,而是从现象学上归纳了不可预测的影响因素。

最后这种方法具有时间短、操作简单的优点,这也是在实际条件下判断实时控制程序的可实现性的两个重要准则。

另一方面,在随机影响受到限制的情况下,人们通过向模型输入各自的“最坏情况”,可以在生产率、能量等没有太大损失的情况下排除这些模型参数。

对于阿尔贝德-杜德林根厂的罩式炉来说,温度波动的总区间可以限制在最大20℃的范围内。

在它的最后内容中控制模型不再含有自由参数,在计算作为调节温度函数的加热曲线时只需向模型输入带卷尺寸。

退火过程可通过下面两种方式优化:

a)在确定带卷升温拐点值时要考虑到质量标准、温度最低点应达到的最低值、冷却梯度等。由这些值可以按照模型计算出最佳的控制温度曲线。因此对于每一个给出了质量要求的带卷在退火前其最佳的退火曲线已经是已知的。然后存料管理程序将按存料情况确定的装炉量和理论计算出的退火曲线组合在一起,可使生产率达到最高值。可将少量可能的退火曲线存入数据库中。从原则上讲,可以据此制定一个控制程序,该程序根据存料

管理程序的结果可为每一个退火炉座从数据库中调出退火曲线,并准备好控制参数,见图12。

b)在产品品种发生未预料到的变化时,将根据一个表格从各个退火曲线的特点综合出退火时间。这个总退火时间虽说不能认为是最佳的,但却是在给定情况下最适当的。此外,在手动输入带卷尺寸之后,程序可以从已有的“退火曲线”数据库中调出所需要的炉子参数并进行退火准备。这个方法比a)中所述

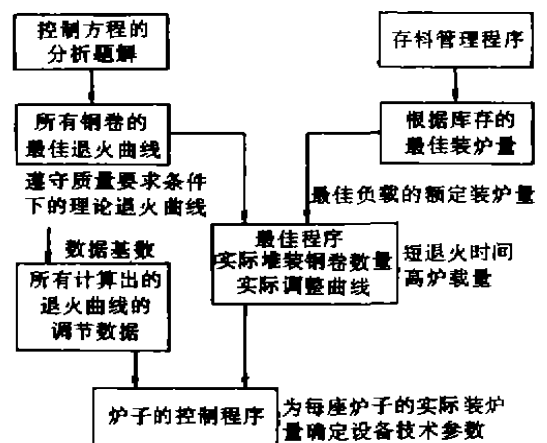


图12 最佳控制程序示意图

的方法更贴近实际的工业生产,所以值得采用。

阿尔贝德-杜德林根厂正在为实现a)中所讲的方案努力。

(参考文献略)

陈云 译自《Stahl und Eisen》,1992(11),
91~98

单麟天 校