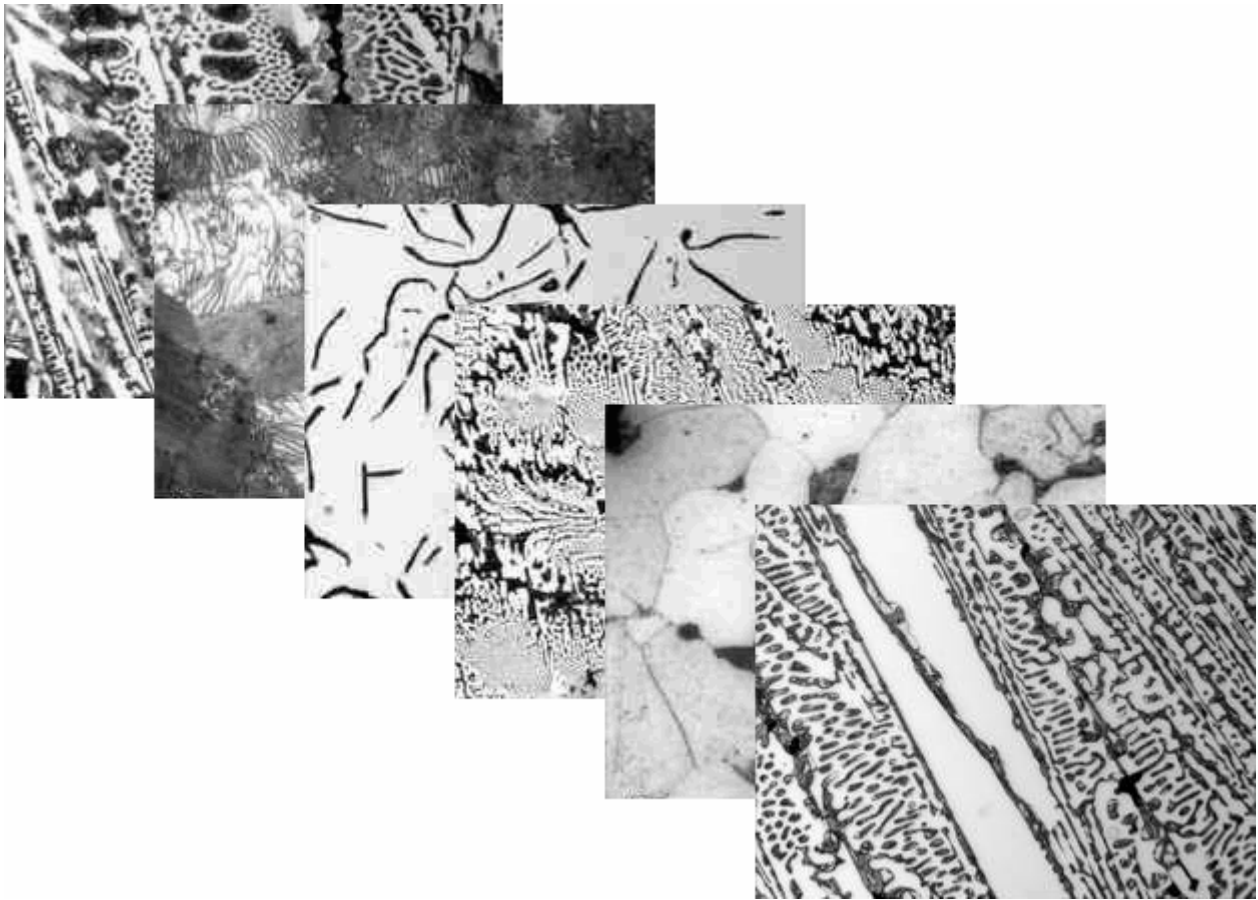


扩散控制

在热处理中优化质量和工艺流程



本文记述了一种创新的具有自适应的控制技术：自动创建扩散工艺过程最佳处理程序

2004年6月版---可随时更改，不另行通知

demig Prozessautomatisierung GmbH
Haardtstrasse 40
D-57076 Siegen
Germany

1. 介绍

尽管金属结构通过渗碳硬化能够改变达到一定的特征，但由于在工艺过程中要考虑诸多运行参数，因此必须创建一种先进的控制技术。这种技术不仅可以节省大量工时，还因其优化的热处理工艺而省去所有花费昂贵的测试。为此，demig 在 DE-VR 4008 控制系统中配置了一套在线扩散计算专用程序。该专家系统功能如下：

----- 自动生成优化处理程序。

----- 工艺过程中对实时处理程序加以自适应

按照 DIN ISO9000ff 标准要求，根据实录数据检验材料损伤状况和质量。

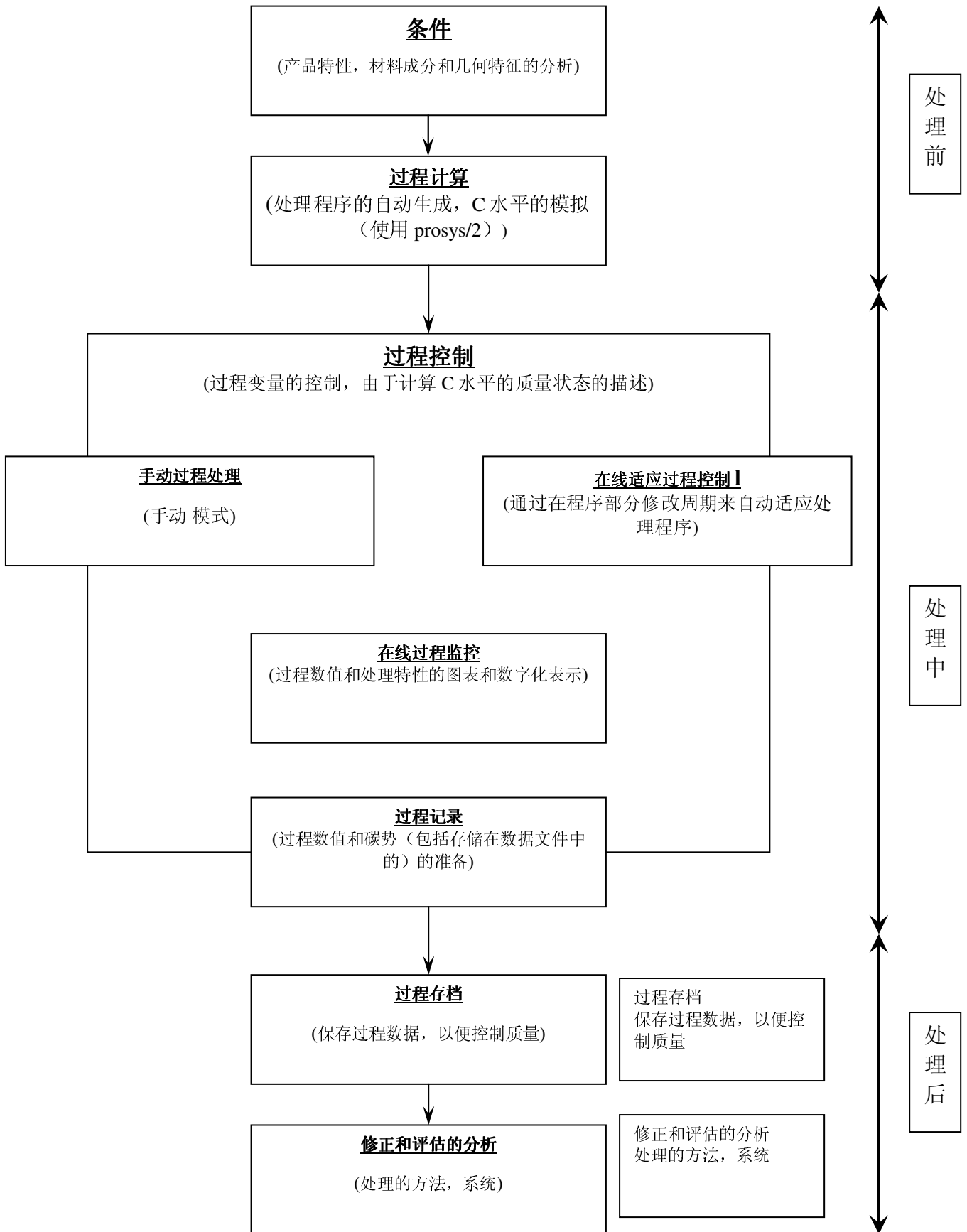
扩散过程的模拟分析只能在监控管理系统 prosys/2 中完成。借助这项模拟分析，可以创建用于控制系统的处理程序，并且可以预先模拟整个过程，给出热处理的可视效果图。模拟分析之后，用户还能够手动修改先已自动生成的程序，达到强化处理过程的目的。任何时候均可进行新一轮的模拟分析，达到所需的处理工艺响应的工艺效果之后，再将编程数据传输给控制系统。如果系统中装有专家系统，随即进行工艺过程自适应“在线”调节。否则，监控系统创建的工艺将被控制系统控制在静止工作状态。

1.1. 热处理

由于金属材料的用途不同，某些金属特征如硬度、抗拉强度、屈服点、凹口试杆测试刚性或耐磨性有明显差异。特殊的热处理工艺可以改变材质，使其达到所需结构。先决技术条件是材料结构必须在稳定状态（已冷却），随之，进行热导调节工艺运行及各种反应之后才会导致结构改变。为了获取材料的某些产品综合特性，例如一种材料表面采用相应的凹口试杆刚性测试后，要保证耐磨损耐腐蚀仅更换材料表面则可。最常用的工艺之一是渗碳硬化处理。渗碳过程中碳原子在材料表面沉积，经淬冷之后达到所要硬度，而材料心部的原有特性没有改变。

1.2. 工艺加工技术

为了获取最好材料质量，正确的技术及再加工的可行性必然需要扩散工艺。因为许多参数，如：渗碳温度、滞留时间及气氛（碳势），合金组分，扩散介质的吸附力，设备安装的技术标准以及部件的外形尺寸，对工艺效果是很重要的。这些复杂的工艺过程只能依靠一种富有创新精神的控制技术来实现。之所以称其为专家系统，是因为积多年经验为基础，不仅能够为自动程序生成（过程分析）输入全部已知信息，而且还能够在工艺运行期间适应整个过程。处理过程的记录和分析可用于质量控制，并可以作为后续程序的补充数据得以储存。



图表 1 完整流程的描述

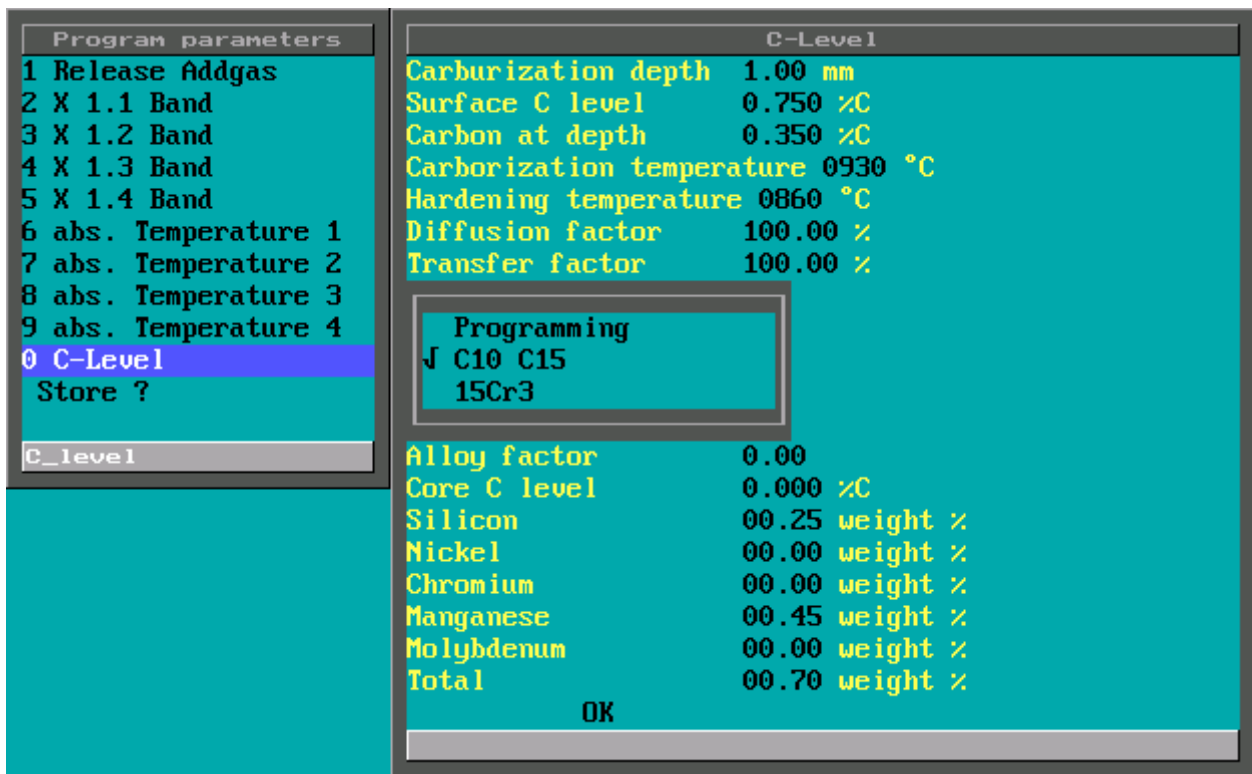
2. 描述

当初专家系统的基本理念是为了达到一种高质量水准的，具有简化的处理周期，合理的价格定位，以及较高的可用潜力和最佳利用率的产品。最重要的是找到一种适用不同的处理程序，即能避免长时间的花费昂贵的试验序列，又能够永久的适应不同的运行条件工艺方法。

2.1. 热处理前

2.1.1. 运行条件

在金属材料渗碳及硬化程序创建之前，首先应分析设定值。在“齿轮的热处理”示例中，工作任务及其基本故障均作了详细解释。所示参数是固定的，与运行程序的编制参数相符，只是各金属待硬化处理材料的合金组分有所不同。



图表 2 输入程序参数

2.1.1.1. 产品特性的设定

首先应确定产品的特征。目的在于找出那里机械应力最高：齿根？齿根面或齿顶？扩散计算以平面的固定扩散为基础。按照 Fick 定律，局部浓缩梯度（扩散曲线）与原子的数量成正比，在一定的时间内通过材料表面垂直流向扩散。这些工艺条件有利于计算齿轮的齿根面，便于计算扩散运行。但是，齿顶的扩散面积很大，有可能存在过量渗碳的问题，还有可能损伤材质。齿根同样，因其固定扩散面积较小，可能造成渗碳不足，淬火后无法满足耐磨损要求。为了解决疑难材料固定渗碳问题，可以进入“在线扩散计算”，形式如下：

(a) 用户需要按照“齿根”磨损标准作为校正因数，如温度系数，扩散系数或传导系数等。数值小于 100% 会影响停留时间，尤其影响渗碳温度滞留。自适应运行优选法采用这些数据

作为一套处理程序自动生成的校正系数，当然，还用于热处理期间优质工件扩散曲线的实时计算。

(b) “齿顶”磨损尺度的其他计算数据，如碳势，必须控制渗碳层深度以便避免渗碳过量的影响。钢的低含碳比高含碳量生成的碳化物要少。

2.1.1.2. 材料组成（合金成分）

采用扩散工艺加工，其计算及模拟（prosys/2）时，合金钢的组分数据是很重要的，相比其他而言，特别会影响钢中碳的活性。例如锰、铬会降低碳的活性。此外，铬还降低临界冷却率（由于热传导系数 λ 较小，热传递增加），导致铬对有效表面深度加高。铬、钼促使积碳，锰亦增大有效表面深度，但不会促进碳化物的生成。合金组分采用百分比表示，或可用不同标准的合金钢制作一个数据库。

2.1.1.3. 渗碳温度

由于碳、铁的可溶性一般，就渗碳温度而言，只须考虑奥氏体范围，因为在此范围（面心立方晶格的结构）晶体结构较高。渗碳温度多数情况设置在 900°C—950°C 之间。随着渗碳温度上升，扩散速度加快，这也影响待渗碳层的增长速度。经过这一过程可缩短渗碳工艺运行并能节省宝贵的工艺时间，但是负面影响是工件的晶粒增大。采用最佳方案找出平均值是很重要的。

2.1.1.4. 硬化温度

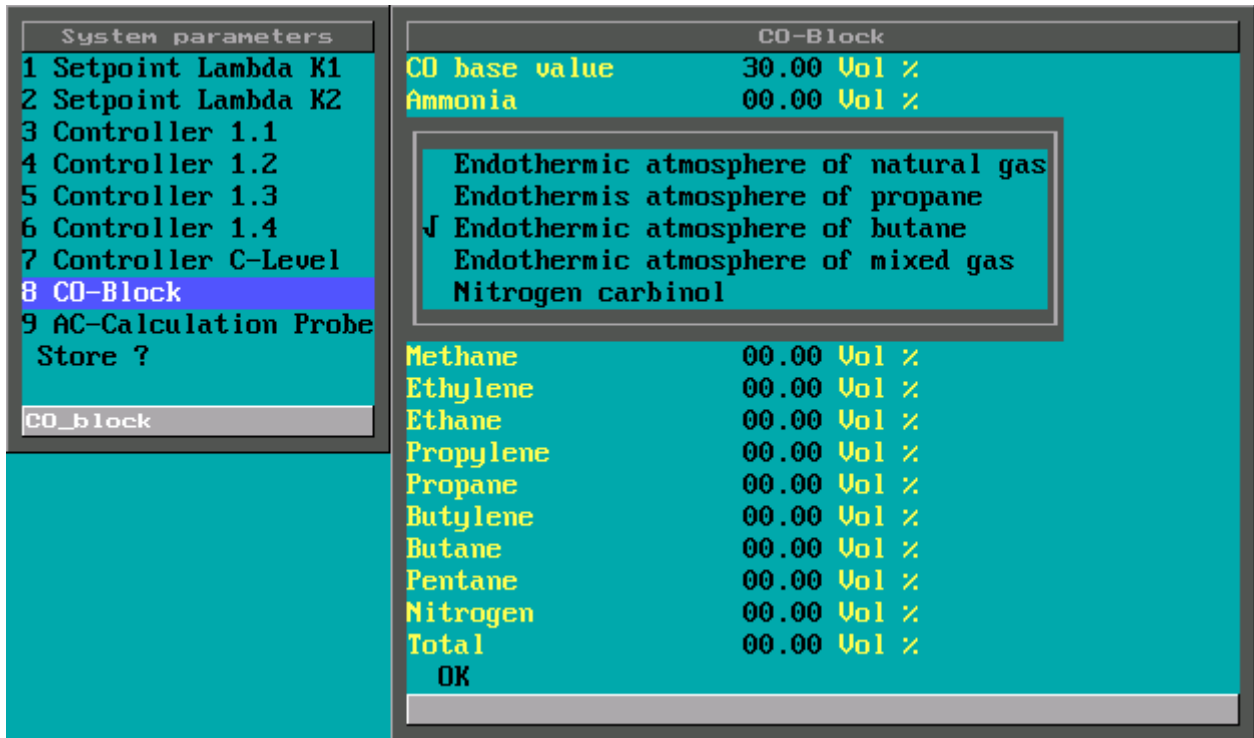
硬化温度是指淬火开始时硬化运行过程的温度，所以，工件经过渗碳处理后应被冷却到较低的温度。有些钢的急冷速度因“渗碳温度”初始值较高，所以达到材料所需硬化处理的速度比较缓慢，否则，工件存在初始冷却裂纹及变形增强的危险。

2.1.1.5. 渗碳层深碳势（CD）及表面碳势

有效表面深度（ECD）是指工件表面与经硬化处理完成后之间的厚度，硬化值为 550HV（维氏硬度计检测）。保持给定急冷时间内，硬化处理碳势值达到 0.3%—0.5%（标准值为 0.35%）。渗碳层深（CD）是工件碳势必须达到的渗碳层深设定值（即渗碳层深的碳势）。在硬化处理按照给定数据优化急冷速度运行条件下，碳势直接与有效表面深度（ECD）相关，否则，ECD 可能移动到更高的限制碳势。采用“表面碳势”程序按照原已注明的输入数据计算出扩散曲线，可以生成运行程序内的不同扩散段。

2.1.1.6. 气氛组成

空气组成数据编入控制系统的碳势计算和程序建立系统。有些数据对于碳势计算非常重要。例如，氧探头实测值，特别是 CO 分析仪的实测数据，热电偶的实测数据以及传感器没有测出的其它气体的数据。对于没有传感器实测运行变量而建立的模拟，以及没有使用 CO 分析仪的控制器进行的“在线”扩散计算，必须标明空气组分，碳传导系数“ β ”的计算用以表示渗碳密度的数值。空气组分以百分比标识或可以从数据库直接提取。



图表 3 气氛组成的输入

2.1.2. 过程计算

2.1.2.1. 过程程序的创建

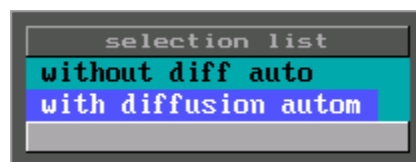
为了建立一套工艺运行程序，首先必须先建立一套程序，这可借助符号程序设计方法创建，即快又简单，最便捷的方案是采用 3 个程序段就足够了。以下示例中每个程序段代表一个运行工况：

I. 准备

首先将运行工况设置在“炉运行准备”，例如，加热炉温到设定温度以便启动渗碳运行，按操作手册说明设置控制系统数据，控制系统专用配置将根据各个炉子分别生成可行性效果。

II. 渗碳

下一步，激活自动扩散，设定如温度、时段及碳势可设为 0。这些数值依据先前输入的参数自动校验。如果这些参数不设为 0，程序中的输入值则先选参数值。



图表 自动扩散的激活

III. 硬化和淬火

最后一步应该设置淬火值（与第一运行段的输入值相同），但重要的是仅仅激活一个程序段中的自动扩散——扩散段。

硬化程序的编程方法如下：

Furnace Setpoint : DIFF 01:00:00 00:05:00			
1	Nitrogen atm.	A3.5	01:00:00 0:01:00
2	Endogas atmsp.	A3.4	00:00:00 0:01:00
3	End of program	A3.7	00:05:00 0:01:00
NUM +/- = insert/delete F2 = store			

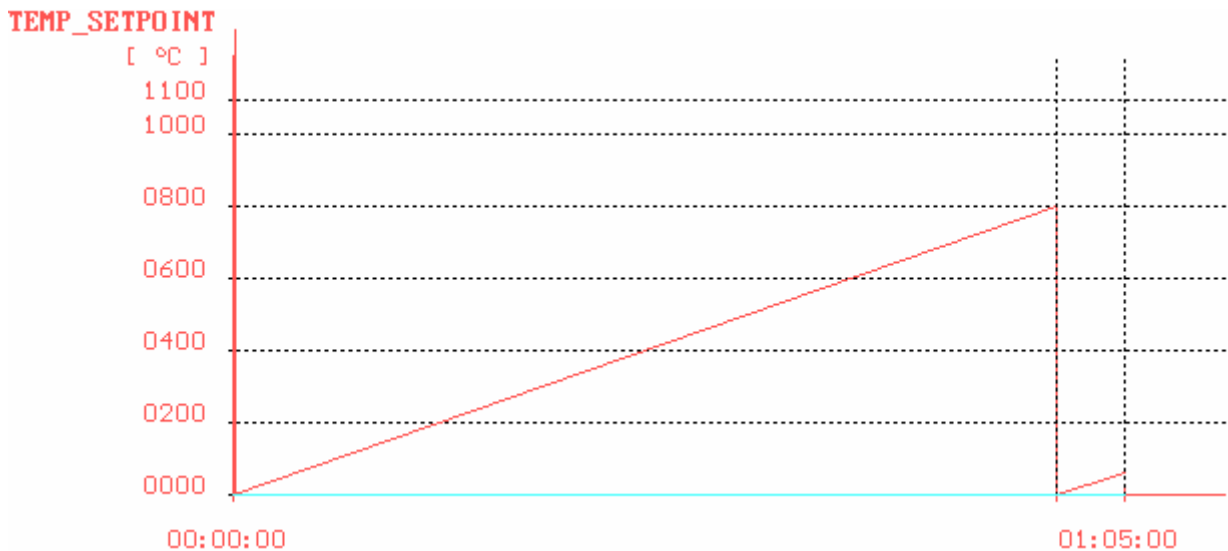
图表 5 一个程序节的例子

该例中单个程序段的编序如下：

Nitrogen atm. A3.5	Endogas atmsp. A3.4	End of program A3.7
Ramp time 01:00:00 hh:mm:ss	Ramp time 00:00:00 hh:mm:ss	Ramp time 00:05:00 hh:mm:ss
Storing time 0:01:00 h:mm:ss	Storing time 0:01:00 h:mm:ss	Storing time 0:01:00 h:mm:ss
Heating	Heating	Heat.+cooling A3.6
TEMP_SETPOINT 0800	Endogas options	TEMP_SETPOINT 0060
Monitoring selection	with diffusion autom	C_LEVEL_SETPOINT 0.00
Stop till Temp. A3.1	TEMP_SETPOINT 0000	C_LEVEL_SETPOINT 0.00
C-Level =0 0.00	C_LEVEL_SETPOINT 0.00	without process gas
	with process gasA3.2	
	with process airA3.3	

图表 6 单个程序节的设定点

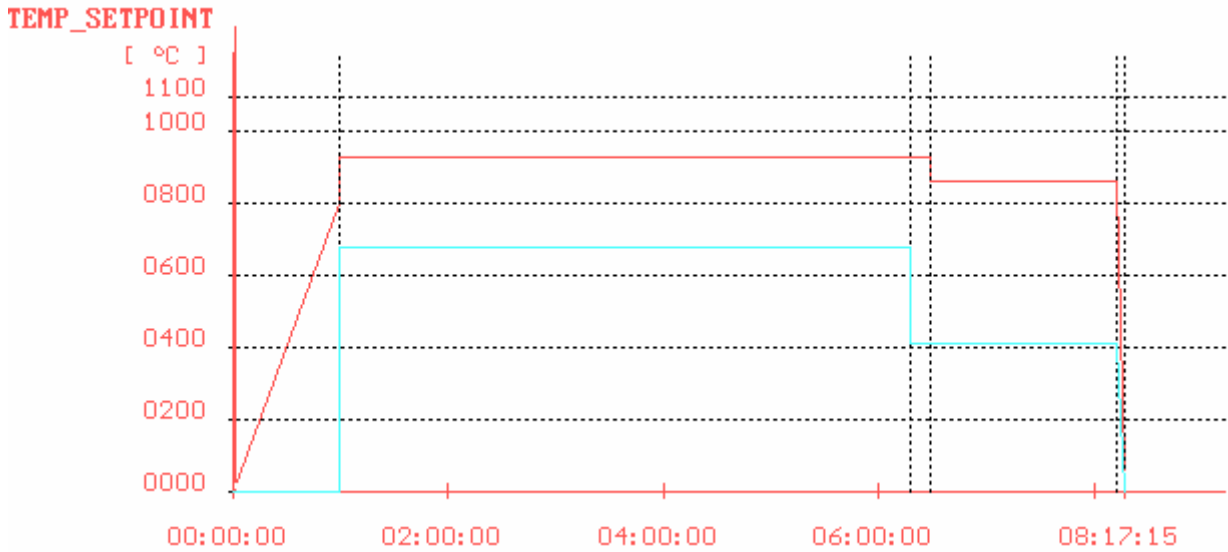
程序建立之后必须以一个参数集与一个运行程序相连接。该运行程序可以装入控制系统的工作存储器中。运行程序的过程如下：



图表 7 在扩散计算之前的工艺流程模型

图例中，红线表示已编程的温度设定点的过程曲线，蓝线表示碳势设定点的过程曲线。扩散段所有设定点为 0 时显示了全部三个程序段。

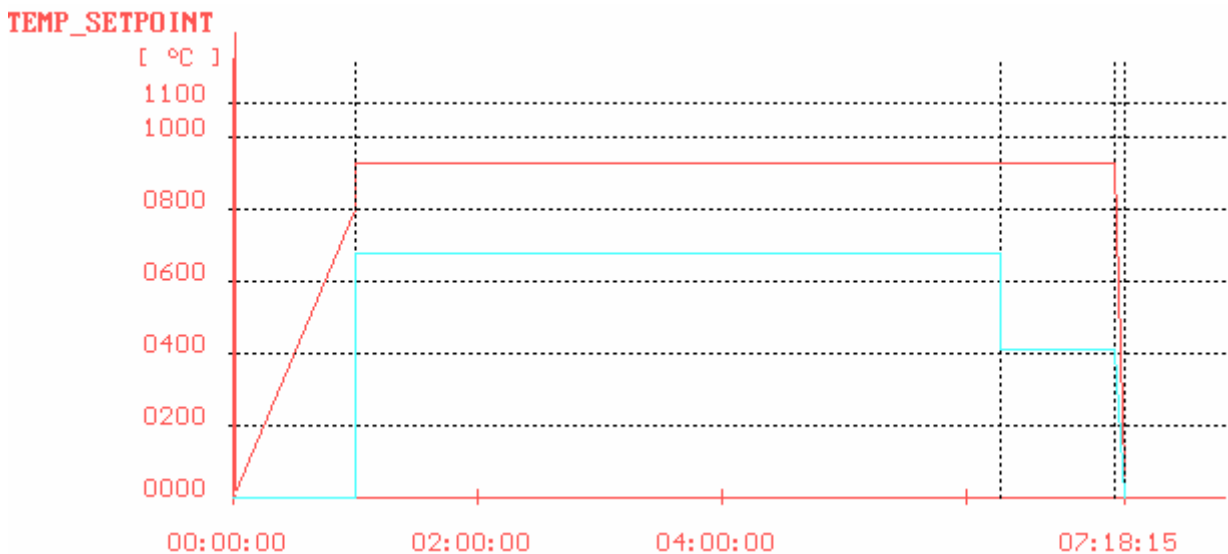
扩散段计算之后设定点曲线示例如下：



图表 8 在扩散计算之后的工艺流程模型

这是一套完整的用于工艺设定点的运行程序。示例表示添加了 5 个后续程序段。这样，参数中设定了另一个硬化温度参数，而不是渗碳温度。第六程序段中用户看见一个下降到硬化温度的温度设定点。这是当工艺运行程序结束时淬冷开始的温度，这套程序被称为“温度下降程序”，该题目文件已在 2.1.1.4 节阐述。

I 如果硬化温度、渗碳温度相同，只需由自动扩散计算加入 3 个程序段，这套程序被称为“无温度下降程序”。本示例设定点的过程如下：—假设所有其它参数相同：



图表 9 不带有温度降低的工艺流程模型

2.1.2.2. 碳化物限定和碳化物调节的测定

碳化物是因工件在渗碳过程中碳量超过饱和状态造成的，特别在扩散表面较大的区域（与齿轮相比）尤其如此。碳化物会损坏材质，而且只有采用强热处理的方式才可能脱除。现有不同的方法可以避免碳化物的生成：

a) 表面碳势的调节

采用这种方法测量工件表面的碳势，用户必须设定一个碳化物限位置（最大允许碳量），这表示该工件永久控制在碳化物无危险范围，由于过多的碳势及由此产生的加速扩散工艺运行，减少了工艺运行时间。

a) 炉内气氛碳势的调节

专家系统编制了一套空气动力测量方式。这表示，这套专用程序可根据合金因数的输入数据，硬化运行中特别是渗碳温度和碳化物因数 3（见注 3）计算该工件的碳化物限量。该系统还将此合金因数作为炉内气氛碳势设定点，在渗碳超量时作切换点（降低碳势）。根据大量的试验和累积的经验表明，不同规格合金含量迥异的工件，碳化物指数以及气氛碳势及工件表面碳势之间的差异，取决于合金，在任何情况下，工艺保持在低于有害碳化物范围运行，运行时间将由专家系统计算。

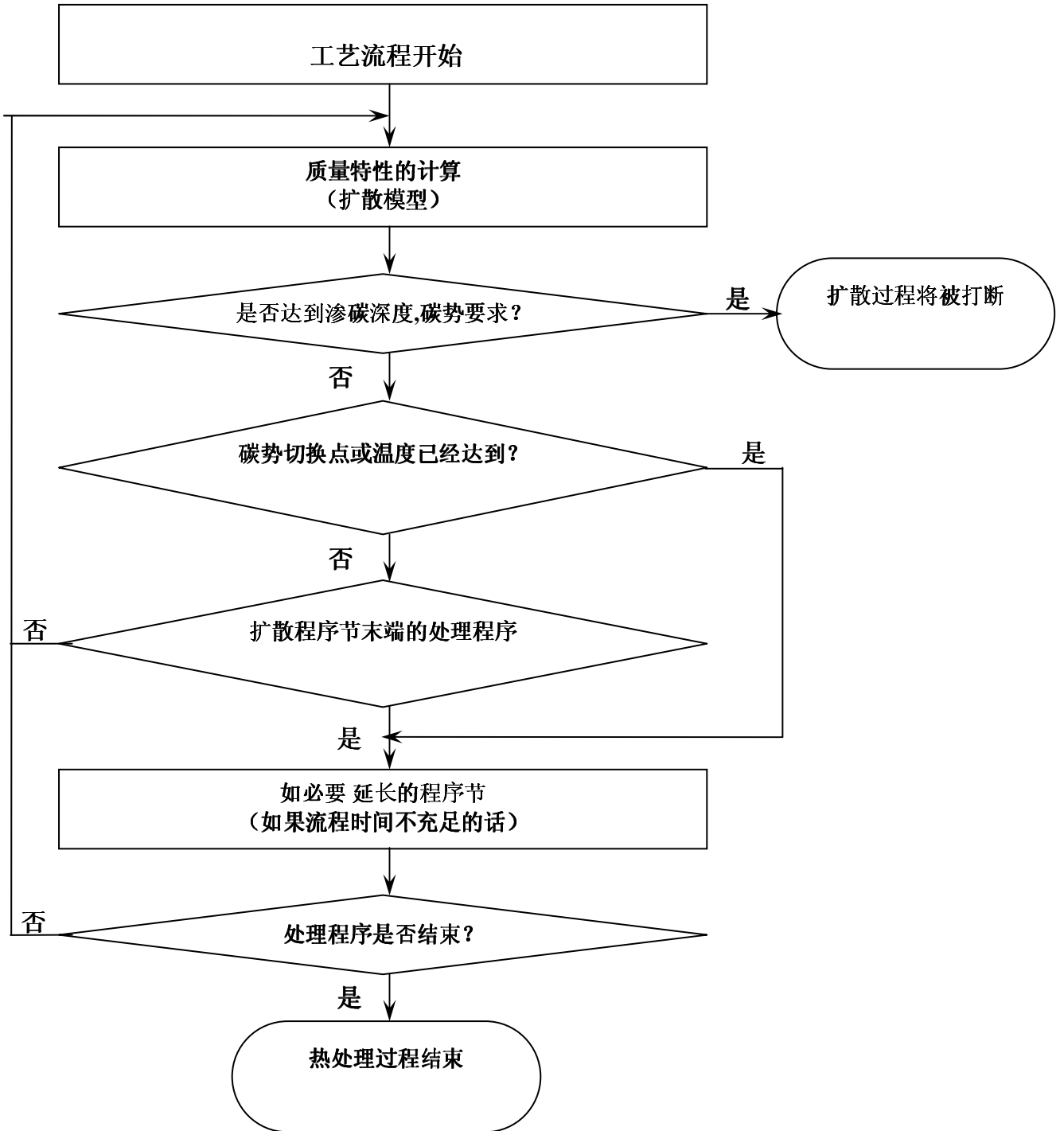
注 3：取决于合金因数的校正值

2.2. 热处理期间

2.2.1. 过程监控

启动工艺运行程序，按照设定点和程序功能（控制记录）控制实际值。当前运行变量永远是作为连续运行工艺控制准备的。根据系统设置以及用户配置要求，可以选择可视显示，数据显示，趋势显示及不同的记录仪。运行期间，用户有权在任何时候进行人工操作。

图表 11 自动扩散的功能



2.2.2. “在线”自适应过程控制

与标准工艺流程相反，本工艺运行程序启动以后，只能靠人工操作进行改动，控制系统的任务由自动扩散计算进行整合扩展。没有自动（见注 4）扩散的已编程序段中，控制系统借助限位置（带宽）实现段扩充的方法引导运行并控制必要的趋势使运行得以优化。在工艺程序计算建立的带有自动扩散的段中，系统按照工艺变量计算每分钟的当前质量特征（扩散曲线），扩散曲线在扩散记录仪表（在线）上显示并按照下述标准自动调整：

- a) 当前计算显示碳势降低的切换点，特表示温度已经达标。
切换点是 c 水平降低的那个时间点，为了表层的脱碳；或是温度降低的时间点，为了达到淬火温度。在自动程序创建中，这些切换点从输入的参数来计算。为尽快达到在对应渗碳深度的 c 水平，渗碳过程从一个高于所需表层 c 水平的 c 水平数值开始进行。这意味着在炉内的 c 水平气氛需要在继续的处理过程中下降，以使表层的 c 水平脱碳到所要求的数值。这个切换点通过扩散速度，炉内 c 水平来计算，即使在 c 水平降低之后，在加工件中心的碳的扩散也是在一定限定范围里进行的。由于一些干扰，如过高的温度或 c 水平，这个切换点可以在计划时间之前就到达了。控制系统能够觉察到，并改变程序节的时间。现在具有高 c 水平的程序节被缩短，这样程序直接修改下一个程序节。（减少 c 水平数值）同样的过程也将发生在到达温度降低到淬火温度的切换点的时候。
- b) *处理流程的扩散程序节即将结束的时候*
在各个扩散段结束之前，专家系统由“在线”扩散计算再次计算各扩散段。系统波动如碳势值低温度低，都会拖延处理运行过程，造成当前扩散段的扩展，扩散段再次重新计算，段的时区自动延长，这表示时间段可以延长直至达到所需处理效果为止。这个方法可以重复进行，直至顺利完成本次热处理并进行下步处理程序。
- c) *达到渗碳深度*
假设固定“在线”扩散计算查出已经达到最佳渗碳层深，但由于某些未能预见的影响，与当前程序状态无关，加工运行可能会立即中断。与此同时，某个处理程序会被激活并计算。因此，热处理继续进行下一步，这样避免了渗碳层深碳势超量可能损坏工件的后果。

2.2.2. “在线”工艺过程图

热处理工艺运行期间，用户随时可以观察到扩散和温度记录仪的当前状况，根据安装种类，控制系统的配置以及所有工艺变量技术条件，均以当前工厂装置工况以几何图形和数字形式显示。为此，专家系统根据计算以扩散曲线（在扩散记录仪中）提供每分钟制作的热处理工况。

2.2.3. 工艺过程记录

- a) 工艺运行变量创建和记录按照工艺过程设计形态，系统本身及客户技术标准、质保要求来完成。所有数据记录期间——直接实录运行过程变量（实际值），其它相应的设定点及当前装置工况：均由控制系统的内部数据存储器储存。这些数据通过计算算法（例如：不同载荷热电偶的平均实测值）作为附加的生成数据并储存。

2.3. 热处理之后

2.3.1. 工艺运行资料

当今，工艺过程的重新构建是质量准则及无故障工艺运行的最重要保证之一。这些资料对客户及终端用户（制造厂）是重要的，与其它方法一道用以防范材料损坏，可以解决客户疑难求助，还可以作为有效的库存收据阻止积压。此外，可用作质量保证书，避免用错防范工具如 FMEA，亦可用作质检标准。

此外，所有结果参与修改分析，根据效果和重要性，以使参数设定值、工艺程序、气氛的组分以及系统的部件如机械、测量系统，控制等均可做改进。

3. 处理运行的模拟（只是过程监控系统 prosys/2）

现行的质量保证防范错误的措施与过去采用的完工后检查“好-坏”相反。因此，在工件进行热处理之前，借助计算机模拟的方法检验系统或人工输入生成的工艺程序，通过修改参数的方法提供工艺运行的稳定性。

选定一项工艺程序或将一道硬化程序和一个参数文件组合之后，即可开始扩散模拟分析。根据模拟计算得出期望扩散曲线，并以几何图形显示参数和程序数据。

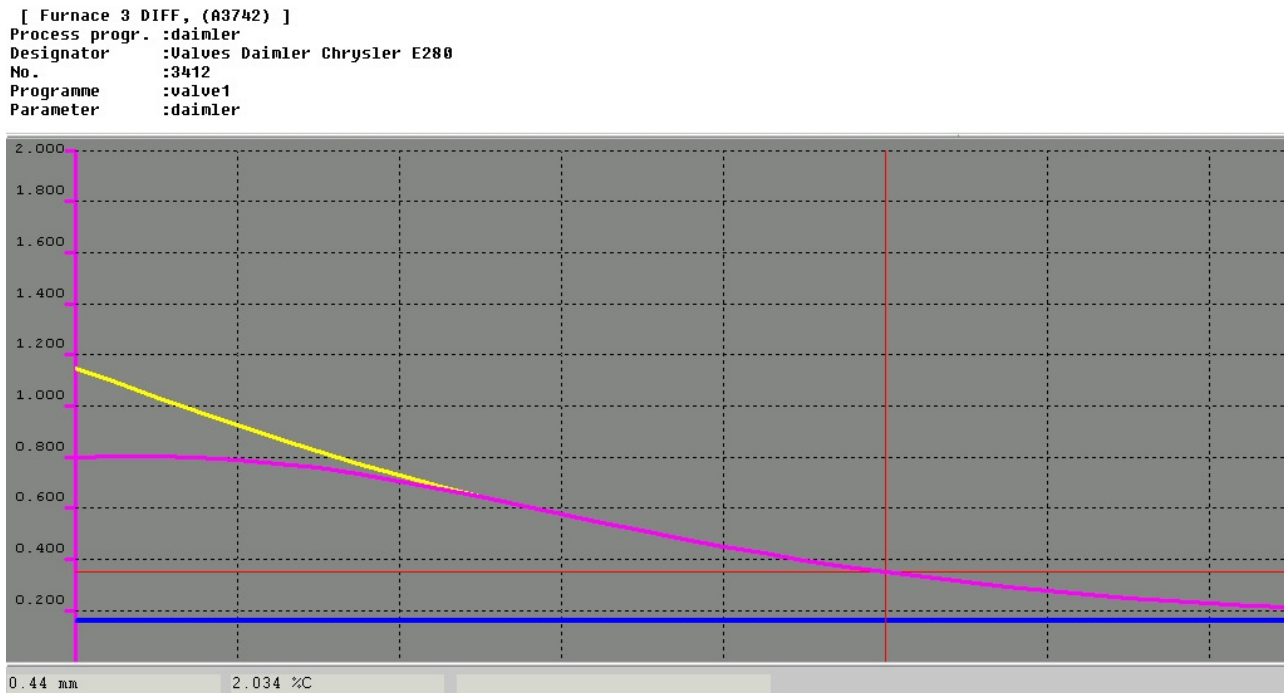


Fig. 10: Diffusions simulation of prosys/2 图表 10 prosys/2 的扩散模拟

这个曲线图解释如下：

蓝色曲线: 材料核心的 c 水平

黄色曲线: 过度渗碳开始时材料中最大碳含量

紫色曲线: 材料中实际碳分布情况

垂直红线: 渗碳深度设定点

水平红线: 渗碳深度的 c 水平/c 水平限定范围

即使在模拟分析期间仍能清楚表示如何获取渗碳层深期望碳势量——在最佳（最短）时间里——使得碳势增加，以及如何在最后一步降低碳势，脱除表面区域积碳以期达到预定值。模拟显示超高碳势期间的扩散过程和降低碳势处理后的过程。现在，专家可以用数字分析系统曲线，费用昂贵的测试大部分可以省略。对特殊工件如单个部件生产则无须测试了。模拟有助于优化工艺运行，根据系统可以判断出影响热处理工艺过程的波动，可以按照区段的设定值更改时间。通过模拟的方法将工艺过程分成 3—5 个程序段，可用来修改获取另一个渗碳曲线。参数的修改，特别是硬化程序中参数的修改，将以一种新的模拟曲线展现。达到期望效果之后，工艺程序传输给控制系统，自适应（在线）调节现在开始描述。通过监控系统即可观察当前记录数据，以及控制系统的程序过程。

4. 总结

自动扩散计算（优化）专用程序如下：

——热处理之前

根据参数自动创建工艺程序,模拟工艺程序的扩散曲线(仅 prosys/2 具备此功能)。

——热处理期间

几何图形展示扩散曲线(在线),确保自适应工艺控制具备自动工艺程序最佳化。

——热处理之后

能够根据实录数据重新构建热处理工艺运行。

5. 术语汇编

程序:	用户创建的程序,由控制系统逐步进行操作。
可视化:	装有几何图形显示,并可总览最重要的工艺参数。
渗碳深度:	由渗碳工件表面垂直位置测定碳含量是否达到设定限值。
处理程序:	见工艺程序。
碳化物:	由于工件渗碳过量形成的,特别是大面积超量会破坏材质。
碳势:	在炉内形成的可调控含碳气氛,碳势是碳化介质渗碳效果的指标,控制渗碳气氛。与纯铁比较它能精确测定渗碳的位势。
扩散曲线:	在材料表层扩散的碳的集中情况
有效渗碳深度(ECD):	定义了淬火材料的深度,那里的硬度需要达到 550HV。
硬度:	材料硬度可以通过各种方法来测量和定义。最常用的方法是根据布氏硬度, Vickers (HV)和 Rockwell (HRB, 或 HRC)。
切口韧性:	切口韧性是检验材料吸收震动和冲击不会断裂的能力因数。
核心碳势:	整块材料在渗碳之前合金内的含碳量。
碳活性:	炉内气氛中,碳浓度与待碳化材料之间的势差。
碳传导系数:	不同的渗碳反应运行速度差异极大。在渗碳动力的使用说明中,这些反应均已写入并有关于碳传导系数 β 的叙述。
渗碳曲线:	参见扩散曲线。
人工介入:	意指人工修改运行过程中的设定值和实际值。
亚稳态结构:	钢,如奥氏体钢,没有固定的结构,结构在冷却之后变化,如马氏体或贝氏体不锈钢。
数字显示:	以数字显示当前运行数据。
自动扩散:	当前处理程序与运行工艺的恒定适配。
程序参数:	材料数据的输入(与其它合金组合时)及用于热处理的必要带宽。
过程程序:	控制系统可载程序,包括一套处理程序和一套程序参数。

屈服强度:	通过拉伸试验分析工件具体变化。
记录:	当前工艺过程实录值以图解法显示，运行完工后数据可存储也可作为质量证书打印或存档。
系统参数:	此参数在各个工艺程序中均有效，如控制参数和吸热气体组合。
趋势显示:	设定点和实测值以柱状图显示当前比较值。
超量渗碳:	碳浓度越高，碳化物危险越大。
抗拉强度:	抗拉强度指材料最大可载拉伸应力（拉伸力/表面积），可由试验确定。



representation for China:

office: Nanjing Mao Long Machinery Electrical
Appliance & Meter Limited Liability
Company
南京茂隆机电仪表有限责任公司

Contact Person: Tang Maojiong 唐懋炯

Street: Room 101,F2 Jin Ling Royal Garden No,67
Mu Xu Yuan Street
苜蓿园大街67号金陵御庭园F2座101室

postal code city: Nanjing 210007 南京市

country: China

phone: +86 25 84855925

fax: +86 25 84271892

Email: mlco@public1.ptt.js.cn

