

低压渗碳及其应用

F. W. Eysell

1. 引言

低压渗碳又称真空渗碳是热处理领域里的一种较新发展。采用这种渗碳方法时,大多使用 CH_4 、天然气或在特定条件下也采用丙烷作为真空炉内渗碳零件的碳素供应气体。工作压力很低,在100至400毫巴之间,渗碳温度范围在900至1100℃之间。

2. 工艺过程

低压渗碳如同在井式或箱式炉内进行的常规气体渗碳那样的简单。装料后炉膛抽真空到 10^{-1} 毫巴并加热到渗碳温度。建议将炉料保温10至20分钟后再向炉内送入渗碳剂,藉此方法,不仅能确保对炉料渗碳结果均匀性极为重要的工件内部温度均匀,而且尚能蒸发掉工件表面上的有害污染物。在渗碳阶段后,视渗碳剂种类和数量的不同,钢表层含碳量可达到其各所在渗碳温度时的奥氏体的饱和含碳量。

按照钢的成份,当表层含碳量在0.7至最大值1%时,零件具有最佳机械性能如疲劳强度和缺口冲击韧性以及残余奥氏体量少和碳化物自由度。经渗碳阶段后形成的高含碳量随后由于扩散而降低。为了避免扩散阶段进一步渗碳,渗碳阶段结束后再抽真空到约 10^{-1} 毫巴。

渗碳钢组织的晶粒长大倾向视处理温度和处理时间而异,这一点不论对合金或非合金渗碳钢均同样有效。虽然加入钒或铝(钒粒钢)确能延迟晶粒的长大,但渗碳温度

于1000℃时此影响已不复存在,于是形成混合晶粒或粗晶粒组织。如此形成的晶粒对零件的性能来说是不够理想的。为了细化晶粒,炉料必须在高温渗碳和扩散处理后,在淬硬之前先冷却到低于700℃。为了改进传热性能而向炉内送入氮,使气压大约达到700毫巴。此外,强制循环和最佳的散热面不仅能加速散热而且能使炉料内部均匀冷却。

炉料冷却至室温或在珠光体转变温度区域内转变后再加热到淬火温度。为了保持较小的热损失,建议在高温下将在冷却阶段中送入的氮重新从炉内抽出。奥氏体化处理结束后在油中冷却。

盘形齿轮和其它零件,例如它们需要单独地在转底炉内再加热并用压床冷却,在渗碳和扩散阶段结束及缓冷至室温之后离开渗碳炉。图1示出一种工艺流程的示意图,亦

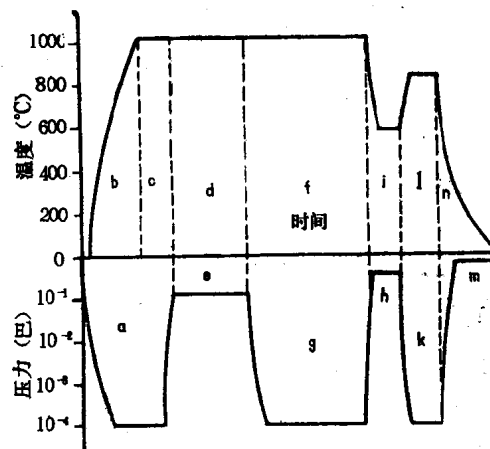


图1 低压渗碳的工艺周期:

温度-时间-过程: b=加热, c=透热, d=渗碳阶段, f=扩散阶段, i=在珠光体转变温度区域内等温转变, l=再加热到淬火温度并保温, n=冷却或淬火。压力-时间-过程: a=抽气, e=渗碳压力, g=抽气, h=冷却之间通入, k=抽气, m=冷却时通入

即表示温度、压力和时间三者之间的配合关系。

3. 渗碳装置的基本原理

以钢淬硬用的高温真空炉为出发点研制出了低压渗碳的冷壁炉。双壁水冷室不仅能减少炉壳外壁的热量并且能预防水槽在高温下的内爆。

为了达到淬硬的目的，真空炉也采用金属，大多采用钼，作为电热元件。诚然，钼不仅对氧而且对反应气体中的碳素很敏感。但对于低压渗碳而言采用石墨加热元件更为有效。已采用石墨布作为淬火炉的加热元件；石墨布除了便于装拆外还具有平面型热辐射的优点。但在渗碳过程中这种布的物理和电气性能也会发生变化。这就不适宜用石墨来制成加热棒，因加热棒产生局部集中的热量；特别在低工作温度情况下将导致在炉膛内产生温差。采用石墨层压材料时也要考虑到这种效应，厚度约为2毫米类似于纸板的加热平面，是这样来成型的，以使在反应室内存在最理想的温度分布。

在加热系统和内壁之间设置防护屏。目前，真空炉采用金属反射体，而在许多情况下，淬火炉采用非金属绝热材料来代替；对于淬火炉来说以铝硅二氧化物为基的绝热材料确实具有良好的绝热性。但在低压渗碳情况下，将会遇到来自渗碳气体中的氢和绝热材料之间发生不良的反应。

另一方面，对于低压渗碳时采用石墨毡可得到良好的效果。此外，石墨还有一种基本特性。在加热阶段石墨已与剩余气体中的氧发生反应（即约在 500°C 时与 O_2 ，约在 750°C 时与 H_2O 以及约在 1000°C 与 CO_2 发生反应）；这就是所谓的石墨的吸气作用，其意义在于再不需要抽真空至极低压力，因为负压的剩余气体已被十分疏松的绝热材料所吸收。

箱式真空炉可配置前室也可不配置前

室，无前室的真空炉其炉料仅在氮中进行冷却。诚然可采用其它气体冷却如氢，但其散热性与氮相比还有待进一步的改进。因此基于成本和可靠性的原因，在实际生产中氢仅在特殊情况下才被采纳作为冷却气体。在采用氮气冷却的情况下保持炉膛内压力低于大气压而气密时才通入氮气。炉料冷却速度由循环速度以及气体中间冷却和气体压力来确定。通过提高压力超过1巴还能稍微提高冷却速度，然而采用足够强的循环和中间冷却仅有较小的效果。对于要求冷却速度相当低的情况下仅送入较少的 H_2 压力。此外在压力超过1.5巴时真空装置作为由技术监督协会控制的压力装置。

因此为了达到最佳冷却强度应把主要目标放在改进气体循环、供气及中间冷却方面。诚然注意了所有这些措施，冷却速度视工件厚度和材料成分的不同可能过低，于是只能借助于油冷了。图2示出了带有前室的一台

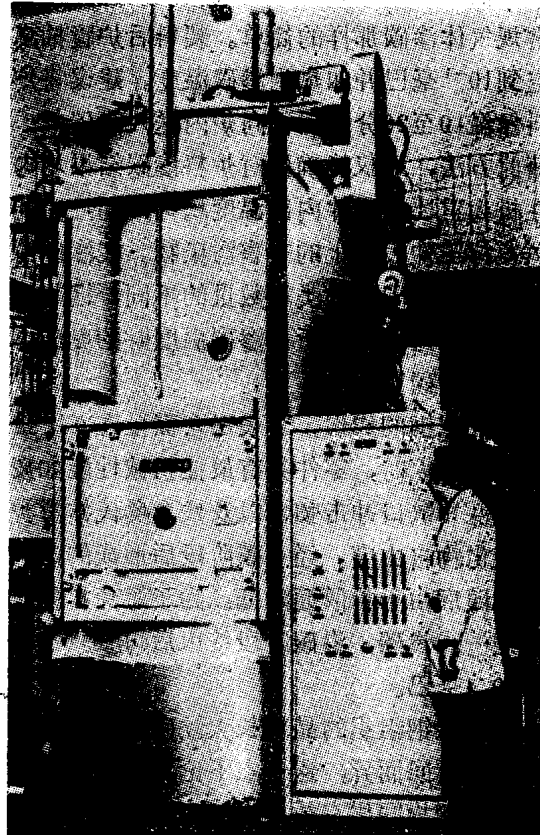


图2 带前室的真空炉 (VKQF型)

箱式真空炉。在前室的上部是氮冷却部分，而其下部是油循环再冷却。

带前室真空炉可装或不装置中间门，要是中间门有故障时，由前室排出的油雾散布到反应室而凝结在炉子冷内壁上或沉淀在十分疏松的绝热毡上，从而导致其热裂和损坏，在极端情况下将引起短路而带电。一个气密中间门将阻碍发生这种效应。这时打开前室门装卸炉料时空气不会通过气密中间门而进入反应室，从而保持温度恒定。无气密中间门和石墨元件的炉子在打开炉门前必须先将炉子冷却到 100°C 以下。

在装设昂贵的真空气密中间门时能保持加热室处于低压状态。更换炉料时仅需要将前室抽真空，由于需要抽真空的体积很小，所以也就缩短了抽真空时间。也可采用较大的真空泵来达到同样的效果。

采用习用的气体渗碳装置时将油浴置于大气或由氮、 CO_2 和氢组成的渗碳气氛中。这种气体一部分被油所吸收。将加热的炉料浸入时，此时气体将发生煮沸从而导致工件表面不均衡的冷却和形成斑点。在带有整体油浴真空炉的情况下就几乎使油在全部时间内都处于低压状态。加入已除气的油，用相同的方法可以保持近于无气的状态。

几年来真空井式炉已在市场上经销，这种装置是这样设计的：即从炉膛内取出的炉料放进位于炉子上部的钟罩内，关闭中间门后不仅可使钟罩内的炉料在氮中冷却，而且可连同钟罩一起在预定的冷却工位进行冷却。采用这种方法后就有可能使真空渗碳的炉料不仅在 100 至 300°C 的热浴中冷却而且还能在油或水中冷却。由于可能采用水冷，所以非合金钢可以进行低压渗碳处理，因而没有必要再进行单独淬硬处理。图3示出了一种具有冷却浴的这种类型的炉子。

4. 工艺参数的说明

硬度、渗碳深度及表层含碳量被认为是



图3 用于 1350°C 以下的金属材料热处理的多用途真空装置(VSQ型)

渗碳硬化零件之特性参数。正如气体渗碳那样，低压渗碳的渗层深度和表层含碳量也决定于渗碳温度、处理时间及碳素供应。为使在实际生产中对渗碳深度和表层含碳量的参数提出之所有要求都正确，制订了低压渗碳曲线图。这种曲线图给出当时参数如温度、处理时间和 CH_4 供应情况与渗碳深度和表层含碳量之间的关系。

4.1 渗碳温度

为了得到大的渗碳深度大多在 1000 至 1100°C 之间进行渗碳。如同普通的气体或盐浴渗碳，工作温度低于 1000°C 仅在较小的渗碳深度或氰化时才采用。提高反应温度，不仅加速扩散速度即提高碳素在钢中的迁移和单位时间内渗碳深度，而且提高奥氏体中饱和碳的极限值。应特别试验渗碳深度小于 1 毫米采用低温渗碳时是否还有意义。甚至在上述条件限制下，渗碳时间还是较长的。

但在一定情况下省去了在珠光体转变温度区域转变后零件淬硬细化晶粒的工序。

应注意到在低温下 CH_4 、天然气或丙烷的热分解和反应与吸热型气体的常规气体渗碳相比较在载气体上具有明显的变化。此种效应可通过加大供气量或提高 CH_4 分压来达到,也可采用具有高碳素的供应气体来工作。

4.2 处理时间

低压渗碳也可应用扩散定律来求出渗碳深度,亦即渗碳深度大约随处理的时间的平方根而增加。由渗碳阶段和扩散阶段组成的处理周期(刚好近似于这两部分时间的总和)作为决定渗碳深度的标准。

渗碳阶段后碳素供应和成品零件所要求的表层含碳量之间的差值越大,则扩散时间越长。渗碳时间和扩散时间或两者时间的总和之间的关系可通过计算或由相应的工作图表上查得。

4.3 碳素供应

在习用气体渗碳情况下,渗碳气体的性质通过碳势来描述。这个仅由温度和气体成分确定的固体值在低压渗碳时却不存在。

在作低压渗碳时碳素供应气体即 CH_4 含量对渗碳深度和表层含碳量的影响比用吸热型气体和丙烷的常规渗碳来得大^[1]。取过低值的意义是减少碳素供应也减少表层含碳量。压力范围的上限将决定于炭黑在炉膛内和零件上的出现,炭黑的出现不仅对工件外观而且对碳素的吸收都产生有害的影响。在实际一次通入的条件下建议选用如下数值:渗碳温度为 1040°C 时 CH_4 压力最大为200至250毫巴,渗碳温度为 1100°C 时 CH_4 压力最大为300至400毫巴。

图4示出了工作温度为 1040°C 在各种分压下一次供应 CH_4 情况下渗碳深度和处理时间及 CH_4 压力之间的关系。渗碳深度是指含

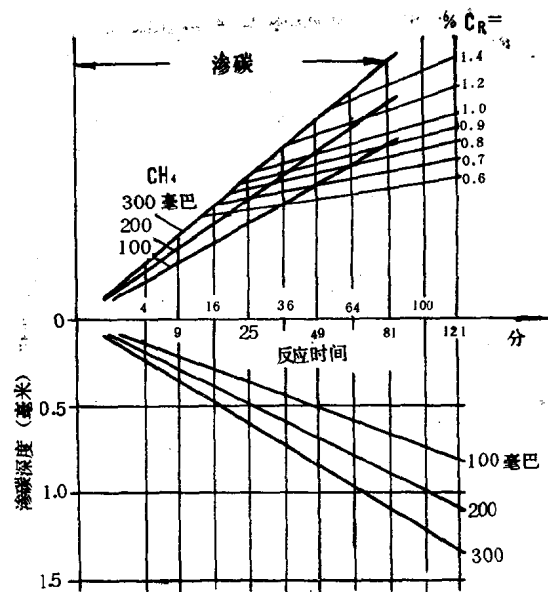


图4 钢C15在 1040°C 一次通入时的低压渗碳曲线图

碳量为0.3%的深度。

实践证明应用这种一次通入 CH_4 的方法还会受到一定限制,因为气体在炉膛内的反应过程中是相对静止的;在工件表面上几乎不发生气体的交换作用。在渗碳过程中已分解的气体甚至在压力提高情况下又会化合;在这种情况下即使提高 CH_4 的分解度,有效碳素供应量还是较小的。

当渗碳时间超过30分钟时,这个时间也取决于温度和工件表面情况,表面含碳量的增加缓慢。甚至再延长保温时间反而会降低表层含碳量。于是反应可与扩散处理相比较。

此外,必须指出放置炉内零件相互间位置要保持较大的间距(大于20毫米)。因此不适宜处理小件及粒状材料。对狭孔和盲孔零件的渗碳处理并不是完美无缺的;在同一批炉料内其渗碳深度和表层含碳量必然会出现较大的分散性(大于 $\pm 10\%$)。但上述缺点可通过气体运动或气体交换来消除。渗碳深度和表层含碳量彼此协调时在规定的反应时间之后可将部分分解的反应气体用泵抽出。为了能再现所得结果,应使工件表面的时间间隔和渗碳温度相匹配。

如果通入气体达到一定压力或 CH_4 的含量,则可以把压力升高或 CH_4 含量降低到一个规定数值作为更新气体的脉冲。渗碳时间越长、工件表面积越大、渗碳温度越高以及与 CH_4 含量或压力的额定值的容许误差越小,则越要求经常重复此种气体交换。借此方法可供应一种最佳的反应气体。应将以气体运动为条件的气体交换视作为确实有效的辅助作用。此种系统对空心件或深孔件的渗碳处理特别有效。图5示出具有不同直径的深孔和盲孔试件经过这种渗碳处理后的实例。



图5 低压渗碳:对孔径由 $\phi 3.5$ 至10毫米零件的渗碳作用

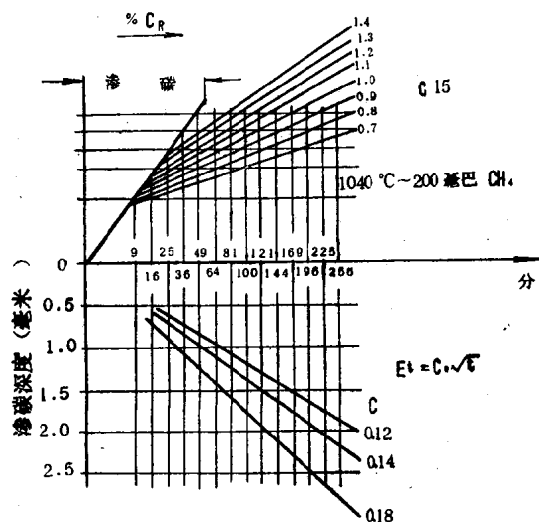


图6 低压渗碳:钢C15的渗碳深度和表层含碳量与渗碳时间和扩散时间之间的关系,取 CH_4 分压作为特性参数

在图6中描绘了钢C15的渗碳深度和表层含碳量与渗碳时间和扩散时间之间的关系,并选择 CH_4 分压作为特性参数。对于合金渗碳钢来说,其表层含碳量和渗碳深度方面存在的偏差类似于常规渗碳法的相互关系。

根据常规渗碳法也连续供应规定数量的 CH_4 气体。为使炉膛内压力保持在200至400毫巴,必须连续地将多余气体用泵抽出。当处理温度保持恒定不变时流量就取决于炉容和工件表面积,每米³炉膛每小时总共需要0.5至1米³之间的气体。

通过连续不断地供应渗碳气体的方式以达到使气流通过炉料。按照装料方法和工件形状的不同可能会发生遮挡气流的现象;特别是在处理时间短的情况下还会导致所得结果产生严重的分散性。通过附加大约等量之氮到 CH_4 中去可达到改善气体的流过或紊流作用的目的。这种方法大多应用在温度低于950°C而渗碳深度较小的渗碳处理及氰化处理。对于在800°和900°C之间氰化时应供应大约两倍于 CH_4 流量的 NH_3 。

5. 渗碳结果

在具有 CH_4 或丙烷的吸热型气体中施行常规渗碳时不仅有碳素而且还有氧(通过分压由 H_2O 和 CO 或 CO_2 供给)与钢表面即与存在的合金元素或拌同元素发生反应^[2, 8]。图7示出了所计算出的氧势^[4]。在零件表层存在钛、硅、钒、锰和铬合金元素

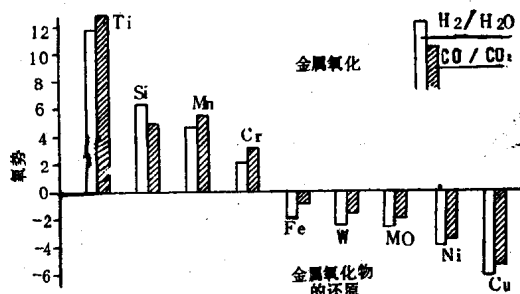


图7 在应用吸热型气体时在930°C下所计算氧势

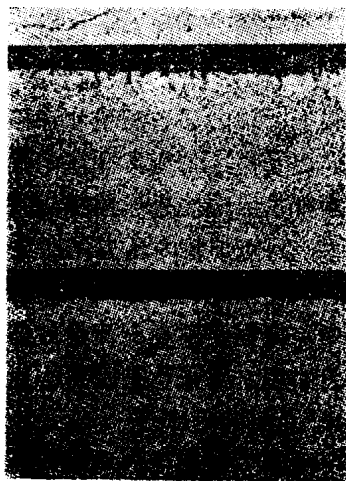


图8 采用不同渗碳方法时表层的氧化作用

时,在渗碳的同时还要考虑这些元素的氧化作用(图8)。表层氧化物的形成及其厚度也取决于钢的冶炼和渗碳时间。这种氧化物对组织的转变产生不良影响;在这些氧化物范围内经常出现屈氏体组织取代马氏体组织。由此促使表层区域内的内应力状态亦发生变化^[4,5]。此外,由于这种晶界的氧化,晶粒之间的结合发生松弛。

近年来在文献中经常报导有关表层氧化成因、观测及相互关系方面的文章^[6]。显著的表面氧化无疑地会导致降低零件强度特性,特别是降低动负荷下的强度特性^[5,7,8]。为使零件达到最好的表面质量,迄今均得进行重磨。

在不含游离氧气氛中施行低压渗碳时并不发生这种损害表层的现象,因而渗碳后具有较高的持久性强度值^[8]。图9示出对材料20NiMoCr65(AISI4320)分别施行低压渗碳和常规气体渗碳后进行旋转弯曲疲劳试验后的对比关系^[10]。

渗碳后缓慢冷却得到混晶或粗晶结构。通过重新奥氏体化和冷却可强烈地使粗晶粒细化。阻碍晶粒长大的添加物一部分为钢内的合金成分,一部分为存在的杂质,当渗碳温度高于1000℃时溶解或均匀分布在组织内。图10示出钢8620在1040℃渗碳,渗碳深

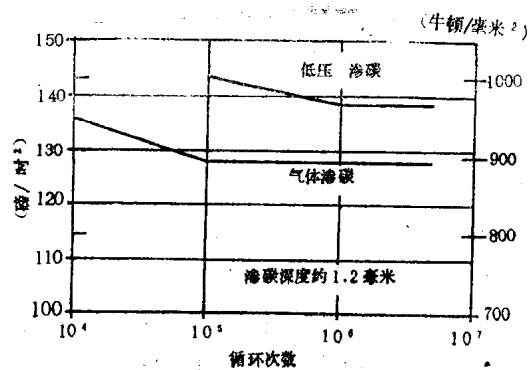


图9 钢20NiMoCr65的旋转弯曲疲劳性能与不同渗碳方法的关系

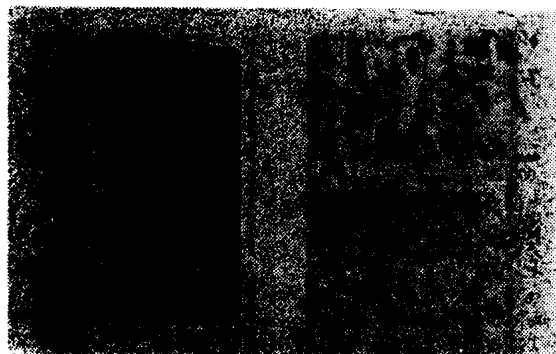


图10 钢8620在1040℃低压渗碳后的显微组织
渗碳深度约1.2毫米, A = 表层组织, B = 渗碳和冷却后的芯部组织, C = 渗碳、冷却及淬火后的芯部组织; V = 放大倍数

度约为1.2毫米的表层截面的显微组织;右上图为渗碳后芯部组织,右下图是淬火后的组织。

心部材料经高温处理后其性能并没有变坏。经试验研究确证在高温处理后,甚至在延伸率和冲击韧性保持不变的情况下强度和屈服极限还会提高^[10,11,12]。

渗碳后得到较大渗碳深度时,含碳量从表层向心部呈相当陡斜的曲线分布。通过扩散降低表层含碳量而增加渗层深度。正确地调节渗碳和扩散时间几乎可达到表层区域内含碳量呈水平切线形式分布。图11示出了1100℃处理时间长达50分钟经不同扩散处理后含碳量的分布曲线,渗碳是在约400毫巴的CH₄气氛中进行的。

根据典型的含碳量分布曲线,经低压渗

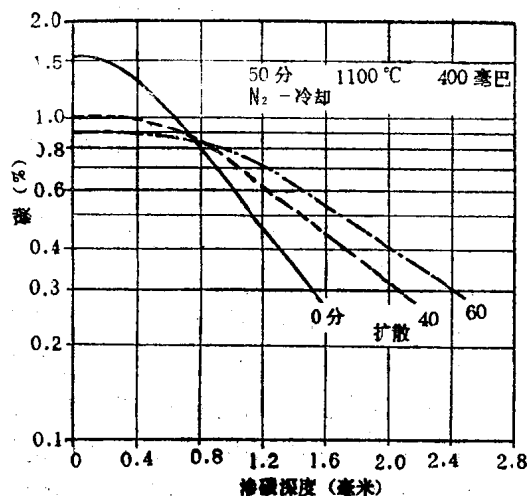


图11 低压渗碳经不同扩散处理后的结果

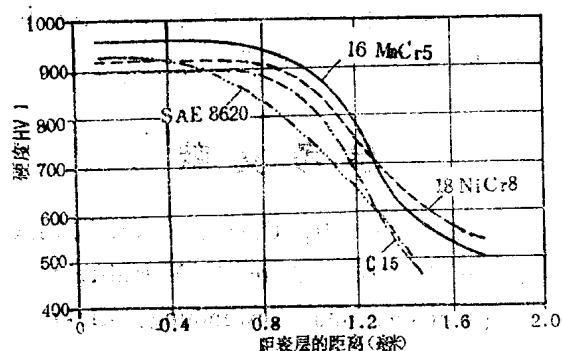


图12 各种钢种经低压渗碳及淬硬后的硬度分布曲线: 低压渗碳50分1040℃ 270毫巴CH₄ + 40分1040℃ 约0.14毫巴, 830℃至850℃淬油

碳后, 硬度分布曲线表明: 在总淬硬层中有比较大的一部分具有相等的硬度。图12示出各种渗碳钢经渗碳及淬硬复合处理后的硬度分布曲线。

6. 应用实例

几年来不仅进行了大量基础研究以求得各种参数而且还处理了许多具有各种用途的结构零件。玻璃切割轮的摩擦轮, 当其渗碳后最外层含碳量大于1%时具有最佳的耐磨性能。图13示出了一批石料成型板的炉料。用更新气体在1040℃渗碳60分钟且用相等的扩散时间即可得到所期望的表层含碳量达1.4%, 渗碳深度约为1.5毫米。



图13 经低压渗碳之石料成型板

在大多数情况下, 正如在汽车工业和传动箱制造工业中均规定表层含碳量低于1%, 渗碳深度在0.6和1.4毫米之间。轴套、轴类、起动盘、喷嘴以及万向接头也正如在各种应用情况下的齿轮那样同样获得了最成功的渗碳效果。图14示出经渗碳后的齿轮。带有螺旋齿形的盘形齿轮和传动小齿轮热处理后不再需要重磨, 其经表层氧化损伤的表面仍完整有效。齿轮在不含游离氧的渗碳气氛中渗碳后可以承受更高的载荷。

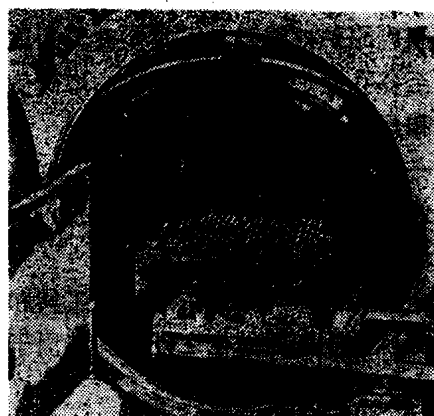


图14 经低压渗碳之齿轮

如同在自动箱式炉内进行的习用渗碳法, 在渗碳深度大于0.8毫米的情况下低压渗碳包括在珠光体转变温度区域的转变及随后细化晶粒的淬硬是较为经济的, 在重型机器制造和矿山机械制造中, 进一步用于制造大型螺栓、重型轴承、拖拉机链及装甲车链条。

工具制造也采用低压渗碳,甚至对于导轨及由耐热工具钢及高速工具钢制造的切削刀具和挤压模具也采用渗碳处理。在这种特殊处理情况下^[13,14](迄今唯一是在粉末渗碳中实施过)可以达到具有优越耐磨性能的超过HRC68的极高表面硬度。低压渗碳能抑制目前尚不能避免的在表层范围内晶界轻度氧化。

7. 低压渗碳的优点

与习用渗碳法相比较在低压范围内渗碳具有下列优点:

—在这种渗碳条件下不会发生有害的表层氧化作用。

—特别是当渗碳深度超过1毫米时,这种渗碳处理是经济的。

—渗碳剂需要量较小。

—对环境保护极为相宜,仅有微量废气排出且根本不需要点火火焰和安全火焰。

—可省去保护气体发生器。

—在淬火车间没有来自炉墙的热辐射。

—节省了炉衬成型时间(常规渗碳炉用陶瓷制成的炉衬需要几小时至数天的成型时间直至多孔性炉衬吸收所采用的渗碳气体达到饱和程度为止)。

—装置经常处于操作准备状态(真空炉能在停工较长时间后又立即重新投入运行且热处理结束后可直接停车)。

—万能操作(真空炉除了对工具和结构零件施行低压渗碳硬化之外,尚能用于稳定化退火及钎焊)。

—可节省间歇工作制时的能量(除了加热元件及绝热外部零件之外,真空炉本身几乎不吸收能量。采用陶瓷炉衬的常规渗碳炉却要求保持连续地运行,大多要超过周末,但是当采用一班或二班制工作时即使降低温度也要损耗许多空载能量;而真空炉在工作时间结束后即可停车)。

—用于维护及易损件的费用是极低的。

8. 结 论

对于渗碳和氰化处理来说,应用甲烷或天然气在低压范围内进行处理为生产操作人员提供了一种更为经济的方法。它比习用渗碳法得到更好的表面质量。

有各种尺寸和结构的箱式和井式真空炉可供用户选择,以保证使工件数量和工件形式得到最佳匹配。在正确选择工艺参数时,在无表层氧化的渗碳层中即无骨骼状碳化物又无有害含量的剩余奥氏体存在。较短的处理时间,特别要求大的渗碳深度时,仅需用较少的渗碳剂和能量以及有益于环境保护则是这种处理方法的其他优点。

参 考 文 献

- [1] F.W.Eysell; Über die Aufkohlung im Unterdruckbereich, Verfahrensparameter und Anwendung. Elektrowärme(1976)12, S.B 312—317.
- [2] W. W. Schmelzer; The oxidation of the iron in carbon dioxide-carbon monoxide atmospheres Trans. Metallurg. Soc. AIME 218 (1960)4. S.674—681.
- [3] A. Rahmel; Über den Einfluß von Wasserdampf und Kohlendioxid auf die Oxidation von Eisen und Eisenlegierungen bei hohen Temperaturen. Werkstoffe und Korrosion 16 (1965)10. S.837—843.
- [4] R. Chatterjee-Fischer; Randoxidation bei einsatzgehärteten Teilen— Versuchsergebnisse. ZWF 71 (1976) 9, S.367—371.
- [5] Wiegand, Tolasch; Der Einfluß der Randoxidation auf die Ausbildung der Oberflächenzone und auf Biege

- wechselfestigkeit einsatzgehärteter Proben. Werkst. u. Betrieb 99 (1966) 5. S. 327—333.
- [6] R. Chatterjee-Fischer; Zur Frage der Randoxidation bei einsatzgehärteten Teilen—Literaturauswertung Härt. Techn. Mitteilungen 28(1973).
- [7] W. Beumelburg; Der Einfluß der Randoxidation auf die Schwing- und Biegefestigkeit einsatzgehärteter Proben. Härt. Techn. Mitteilungen 25(1970)3, S. 191—194
- [8] H. Brugger; Schlagbiegeversuche zur Beurteilung einsatzgehräteter Stäbe. Schweizer Archiv Wissen-sch. u. Techn. 3(1970)7, S. 219—229.
- [9] W. J. Ptashnik; Influence of partial pressure carburizing on bending fa-tigue durability. Gen. Mot. Corp. publication M 77-008.
- [10] W. J. Doelker; Vacuum carburizing. Metal Progress May 1977 S. 50—56.
- [11] J. Conybear und W. J. Titus; Ef-fects of high-temperature austeniti-zing on AISI 8620. Metall Progress Nov. 1977 S. 61—65.
- [12] S. Terauchi. H. Terauchi und K. Kamci; Some properties of carbu-rized steels at higher temperatures. Publ. Kansai Universität Osaka/ Japan.
- [13] F. W. Eysell; Das Aufkohlen und Anlaßverhalten von Schnellstahl zur Erzeugung besonders verschlei-ßfester Schnittwerkzeuge. Durfer-rit-Hausmitt. 1956 H. 29, S. 15—21, 1957 H. 30, S. 16—20, 1960 H. 33, S. 38.
- [14] W. Haufe; Schnellstähle. Carl Han-ser Verlag München 1972.
- [15] Dawes und R. W. Reynoldson; Parameters for gas quenching in vaccum furnaces. Metall Progress July 1971, S. 72—73.

[洪裕诚译 蒋国栋校]

原载《ZwF》, 1978, 73, №9, 463—469.

气体渗碳参数——碳势、碳的扩散系数 和反应速度的数学和计算机确定

J. Pavlossoglou

1. 前 言

一个过程的数学模型由常数和变数组成。变数可以再细分为不同的组, 十分重要的是要能够辨识这些组, 从而能运用和讨论这种模型。

变数有两组:

a) 自变数是确定命题的变数, 其数值即每一命题的给定数据;

b) 因变数, 其数值由方程式算出。它是命题的解。

变数的定义和命题有关而和变数本身无关, 自变数可成为因变数, 反之亦然。

在模型中必须引用的物理常数,例如气体渗碳过程中的碳扩散系数,反应速度系数和气氛的碳势,都是参数。为了取得参数的数值,目前利用数学分析和试验结构,以便和试验结果比较来检验模型的可用性。因为在参数的可用性这种特殊情况下,是把试验条件以及试验结果都作为自变数使用的,并使物理常数成为因变数,因此往往会出现一定的不可靠性。除此特殊情况之外,这些参数都用作为自变数。

数学模型的参数可由已发表的数据算出,或根据旨在确定这些数值的特殊试验的试验结果来列出。由于经济上的原因,所有这些参数值几乎都不是由特殊的试验确定的,而其中有许多是一起确定的,方法是从整个系统或一个可资比较的系统取用试验结果,然后用参数匹配法加以处理,以便确定哪些参数值能最好地使模型与试验结果一致^[1]。但预测的准确性则取决于作为模型基础的公式列得正确^[2,8]。

在参数匹配阶段^[2,8],试验结果和模型之间会显出差异。它说明试验结果和模型预测之间不协调。在试图改善这种不协调时,需要审查原始假设和改变某些方程式^[1,22,24]。如果参数匹配步骤已经完成,并且已知模型的准确度极限,则模型的设计就结束,可以使用。

为了取得参数匹配步骤所需的上述试验数据,必须规划规定的试验。这种规划在任

何实际工作开始之前一般是必不可少的。然而研究工作者通常都是以一系列的试验开始,并不首先根据已知反应变数的特性和有待确定的参数作出规划^[2,3,4,28]。

任何试验,如其结果在某些给定的条件下是一个或一组可测的反应,就都会从规划工作中得到收益。实验工作的主要对象是确定因变数和自变数的反应之间的相互关系。

2. 建立模型时的实验工作

在考虑设计模型所需的实验工作时,可以从两个彼此完全对立的观点出发^[1,24]。建立模型的艺术就在于把这两个观点统一起来,从而得到足够精密的模型,以实现开始工作时制订的目标,而且迅速地提供结果,使结果仍可用于规划。

理论的解决途径是把所有的常数列入模型方程式之中,然后分别构思测定各个常数本身的实验。这种实验工作具有基础性,而且布局和设计时设想的过程没有相似之处。这些试验结果应可配入理论模型之中。

半经验的解决途径则是直接引用实验室试验结果,确定出构成模型的方程式中未知变数的数值组,使模型给出和实验测定相同的结果,例如采用光谱分析,在给定温度下渗碳后一定时间间隔内测定的钢表面碳浓度。

理论模型当然可能比较好,但在工业条件下,如时间紧迫,几乎不可能作实验,而且要在过程设计可用的时间内取得结果时,几乎就非用半经验模型不可了。把半经验模型和分别对于一些比较重要而容易求得的常数作出的实验性估计,正确地结合起来,可以说是工业条件下最现实的解决途径。

2.1 气体渗碳参数的确定

为了确定气体渗碳参数,即气氛的碳势(C_L),碳的扩散系数 D 和反应速度系数 K ,

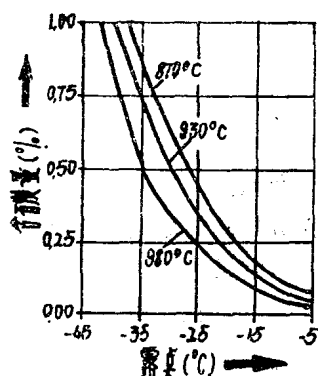


图1 在不同温度下实验用放热式气氛中水蒸气含量和Y铁含碳量平衡的计算曲线^[3,7]

选用下述数学分析和试验程序。

2.1.1 碳势 C_L

对于在吸热式气氛中的碳钢和合金钢，可以通过测定气氛中的 H_2O 或 CO_2 浓度，进行热力学计算来确定碳势 C_L ^[5, 6]。利用这种非天然气氛的优点是能够自动控制和调节气相，使热处理过的钢表面上含有预定的碳量^[5]。

现推荐一种经过实验检验过的方法，用以计算高温下的合成气体和低合金钢表面含碳量之间的热力学平衡；这种方法可用来监控热处理过程。

以计算机计算的数值作为用于选择由天然气燃烧的保护气体和工业性热处理程序编制的初始值。

根据钢在不同放热式气氛中平衡条件的计算能够控制该气氛的渗碳能力，办法是：在气体-空气混合物在发生器中燃烧时，大范围地自动控制空气/气体比来改变混合气体中基本组分 CO 和 H_2 之比。

对于实验用气氛的成分，气氛中有限的碳浓度值，可由气相中水蒸气(露点)与 γ 铁含碳量之间的平衡计算曲线(参阅图1^[6, 7])得出。在870, 925和980℃下，炉子工作区中的两种气相的参数相当于0.4~0.9%的碳势值^[6, 7]。

将富丙烷吸热式 RX 气体和850和950℃之间的处理温度，用于 CD_4 , NC_6 和 MC_5 钢*时，Kaczala等^[8, 9]采用了另一种碳势计算方法。他们用较薄的试样(0.1毫米)只确定表面反应的动力学和气体平衡常数；或用较厚的试样求得通用的浓度方程式，这样，就兼顾了两个同时进行的反应(表面反应和扩散反应)。碳势 C_L 根据气体的成分，特别是气氛中的乙烯量确定。Kaczala等^[8, 9]的方法，实质上是一种连续的热的重量分析法，采用这种方法时，连续记录试样的重量变化和由比色分析求出的气氛变化。

气体渗碳期间试样重量变化的记录提供了表面碳素固定反应的动力学。采取了一切谨慎措施来尽量排除每次试验中由扩散引起的影 响，特别是试样厚度很薄和两面发生反应的影响。这样，正如沿试样长度分布的局部分析可以证实的那样，气体渗碳时渗入的平均碳量只稍微受到浓度梯度的影响。因此，和时间有关的碳素富化与气氛成分以及温度 Θ 之间在每次试验中都存在相同的关系(参阅图2^[8, 9])。

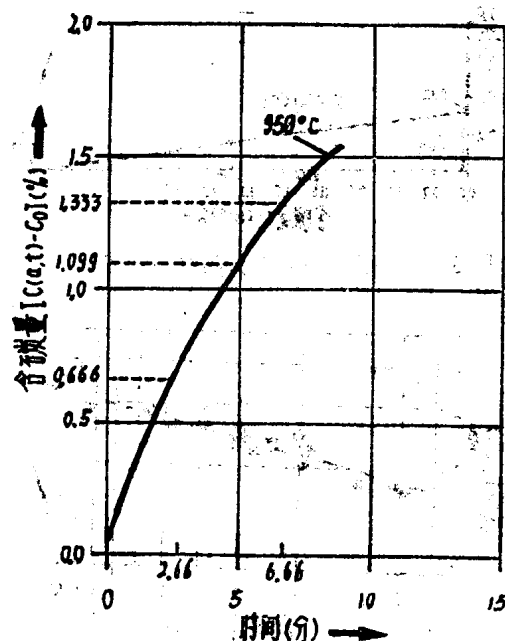


图2 在950℃时自动记录温度曲线例：表明在富丙烷吸热式 RX 气体中的18 CD_4 钢的碳素富化与时间的关系^[8, 9]

描述薄试样上碳析出速度的方程式可以写成：

$$\frac{dC(a,t)}{dt} = k' [C_L - C(a,t)] \quad (1)$$

其中， C_L 是气氛的碳势； k' 是反应速度常数； $C(a,t)$ 是在时间 t 时试样的平均碳浓度。

由图2的曲线^[8, 9]，人们可以查出所有试验中不同时间的 $\frac{dC(a,t)}{dt}$ 。对于同一时

* CD_4 是 $CrMO_4$ 钢， NC_6 是 $NiCr_6$ 钢， MC_5 是 $MnCr_5$ 钢——译注

间, 由这条曲线相应地得出 $C(a, t)$ 如下:

$$\left\{ \frac{dC(a, t)}{dt} \right\} = -k' C(a, t) + k' C_L(2)$$

$$\text{或 } y = -k' x + (k' C_L) \quad (3)$$

由方程式(2)的直线斜率得出 k' , $C(a, t) = 0$ 时的纵座标给出 $k' C_L$ (参阅图3), 由此可以求得 C_L 。

Kaczala等^[8,9]曾经指出, 所有他们的经验均满足这一关系。由他们试验数据(图3)可以得知, k' (反应速度常数)和气体无

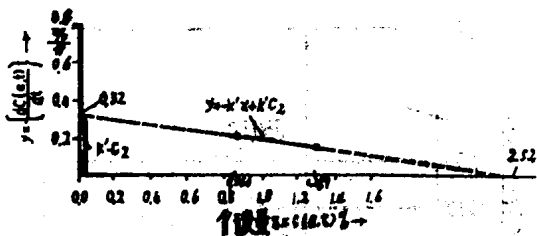


图3 利用图2曲线的方程式(2)的图示

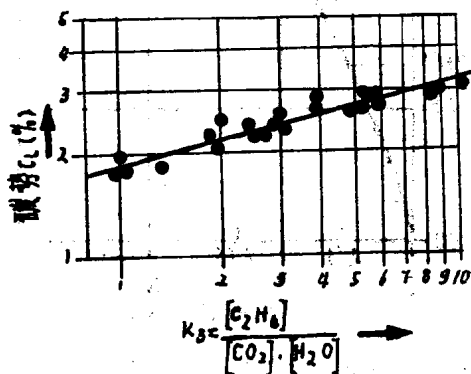


图4 C_L 与“气氛变数” K_3 的关系

关, 而只和温度有关^[8,7]。这就意味着对于同一碳势 C_L , 反应速度是可以热活化的, 而且温度愈高, 反应速度愈高, 这可从方程式(1)得出。18CD4钢的 k' 值与温度的关系列于表1。

Kaczala等^[8,9]为气体渗碳气氛的“气氛变数” K_3 列出了一个经验表达式。 K_3 表达气氛中作为渗碳组分的 C_2H_4 和二氧化碳及水蒸汽之间的平衡, 而后二组分是脱碳组分, 阻碍渗碳过程, 即:

$$K_3 = \frac{[C_2H_4]}{[CO_2] \cdot [H_2O]} \quad (4)$$

如果顾及文献^[8,9]的

$$C_L = a \cdot (K_3)^n \quad (5)$$

则知 C_L 和 K_3 成对数关系。式(5)中 a 和 n 是常数, 它们与钢的成份有关, 但与温度无关, 例如, 对于18CD4钢: $a=1.83, n=0.25$ ^[8,9]。

2.1.2 碳势的数学确定

为了求得确定碳势所需的数据, 可以根据方程式(3)有系统地规划试验程序。利用图2^[8,9]的数据(用图解法定出给定浓度和时间的关系曲线的梯度)得到图3的直线。这条直线在 y 轴和 x 轴上的截距分别为0.32和2.52, 因此斜率 $-k' = -0.127$ 。因为 $0.32 = k' C_L$, 所以 $C_L = 2.52$ 。上述过程归纳于表1中。

2.1.3 反应速度系数 K

为了确定反应速度系数, 文献^[7]设计了一种渗碳试验程序, 用工业纯铁箔片(0.04—

表1 求 C_L 的试验过程 (对18CD4钢和富丙烷吸热式RX-气体)

自 变 数		因 变 数						
初始含碳量 (%)	温度 (℃)	时间 (分)	$\{C(a, t) - C_0\}$ (%)	$\left\{\frac{dC(a, t)}{dt}\right\}$ (%)	K' (分 ⁻¹)	$K' C_L$ (%分) ⁻¹	C_L (%)	$K_3 = \frac{[C_2H_4]}{[CO_2] \cdot [H_2O]}$
0.19 (18CD ₄)	950	2.66	0.666	0.208	根据斜率 (见图3)	根据纵 座标 (见 图3)	2.52	根据式(5) 对于钢18CD ₄ $K_3 = 3.59$
		3.99	0.933					
		5.00	1.099	0.146	0.127	0.32		
		6.66	1.333					
		8.44	1.533					

• 用图2数据

•• 从图2用作图法求得

0.05毫米)在870, 925, 和980℃下:

a)在给定碳势的标准成分吸热式气氛中(露点在-7℃和+1℃之间)进行;

b)在经过沸石去除CO₂和H₂O的弱放热式气氛中进行,其成分为CO₂≤0.1%, CO=7.5%, H₂=5.5%, H₂O=0.001% (露点-60℃),其余为N₂。

箔片试样用机械手直接装入炉子的工作区,经保温5到30分钟,不接触空气而淬入油中。

如果d代表箔厚(0.04到0.05毫米),并假定 $K \cdot d \ll D$ (这对薄箔片是切合实际的),其中D是碳在γ铁中的扩散系数(厘米²/秒),K(厘米/秒)是考虑反应速度大小的一个系数,再假设表面上的反应是一级反应^[10],则:

$$\frac{dC(a,t)}{dt} = k' [C_L - C(a,t)] \quad (6)$$

其中, k' 是渗碳期间箔片中的增碳速度(秒⁻¹), C(a,t)是箔中平均最终碳浓度, C_L是气氛中碳的极限浓度,在此情况下,它等于计算出的平衡值(%)。

由上述关系式得出下列一阶微分方程:

$$\frac{dC(a,t)}{dt} + k' C(a,t) = k' C_L \quad (7)$$

其通解可写成:

$$C(a,t) = C_L + \lambda \cdot \exp(k't) \quad (8)$$

其中, λ是常数, t=0时,其值可取为:

$$\lambda = C(a,0) - C_L \quad (9)$$

其中, C(a,0)是箔片的初始碳量 C₀ (%)。

于是:

$$\lambda = C_0 - C_L \quad (10)$$

代入方程式(8):

$$C(a,t) = C_L + (C_0 - C_L) \exp(k't) \quad (11)$$

$$\text{或 } k' = \frac{-1}{t} \ln \left\{ \frac{C_L - C(a,t)}{C_L - C_0} \right\} \quad (12)$$

如K(厘米/秒)是反应速度系数,则在

K和渗碳期间箔中增碳速度k'之间有以下关系^[7]:

$$K = k' \frac{d}{2} \quad (13)$$

其中, d是箔厚(厘米),于是

$$K = k' \frac{d}{2} = -\frac{d}{2t} \ln \left\{ \frac{C_L - C(a,t)}{C_L - C_0} \right\} \quad (14)$$

反应速度系数K可由每次试验中随时间、温度和C(a,t)值而变的箔片渗碳试验结果算出(参阅表1)。

气氛中极限碳浓度值C_L,如前节所述,可由试验气氛的成分求得。用上述方法计算反应速度系数,自然只能得到渗碳反应的平均速度系数,也就是说,在采用箔片淬火法时,难以确定碳的表面浓度对该参数的影响^[10]。

在箔片上求得的平均反应速度系数的定量数据,用于根据方程(15)^[11-12]计算在受控试验气氛中渗碳时工业纯铁试样(直径25毫米,长10毫米)扩散层中的碳浓度分布。

$$\begin{aligned} C(x,t) = & C_0 \\ & + (C_L - C_0) \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right] \right. \\ & \left. - \exp \left[\frac{Kx + K^2 t}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right] \right. \\ & \left. + \frac{Kt^{1/2}}{D^{1/2}} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

方程式(15)是一个半无限物体在第三类临界条件下气体渗碳模型的解^[11-12]。为了求得反应速度系数的数值,式中所用的扩散系数值是根据Krishtal^[12]在奥氏体中测出的碳扩散系数值。

图5表明实验值和计算值之间相当一致,碳势和反应速度系数的上述假设的正确性。

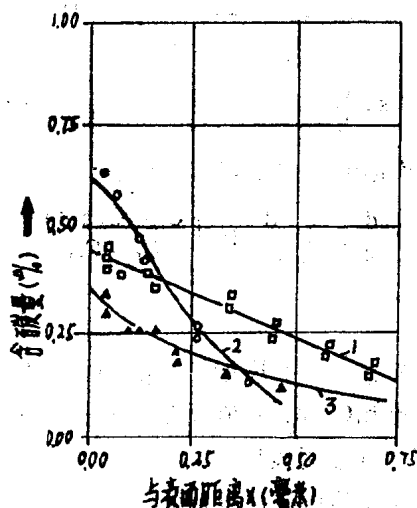


图5 扩散层中碳浓度的分布^[7]: 曲线1, 2, 3均根据渗碳的工业纯铁(0.08%C)的试验数据给出。曲线1(□): 吸热式气体, 925℃, 5小时, 露点+1℃, 即碳势0.52%, 反应速度系数 $K = 0.85 \times 10^{-5}$ 厘米/秒。曲线2(○): 吸热式气体, 870℃, 3小时, 露点-1℃, 即碳势0.8%, $K = 0.4 \times 10^{-5}$ 厘米/秒。曲线3(▲): 放热式气体, 980℃, 100分, 露点-32℃, 即碳势0.35%, $K = 1.5 \times 10^{-5}$ 厘米/秒。

2.1.4 K的数学确定和计算机确定

确定反应速度系数K的另一方法是使用 $x=0$ 时的方程式(15), 并假定碳势和扩散系数事先都已根据实验数据确定, 或取自己发表的数据: 即:

$$C(o, t) = C_o + (C_L - C_o) \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{K^2 t}{D} \right) \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{K t^{1/2}}{D^{1/2}} \right] \right) \right] \right\} \quad (16)$$

其中, $C(o, t)$ 是任意时间 t 时的表面碳浓度,

$$\begin{aligned} \text{即 } \frac{d}{dK_o} \left\{ F(K_c) \right\}_{K_o=K^*} &= 2K^* \frac{t}{D} \exp \left[-\left(\frac{t}{D} K^{*2} \right) \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{t^{1/2}}{D^{1/2}} K^* \right] \right) \right] \\ &\quad - \frac{2t^{1/2}}{(\pi D)^{1/2}} \end{aligned} \quad (20)$$

进行上述演算以后, 用FORTRAN(公式翻译程序语言)列出程序表(附录1, 略)。

C_L 是碳势, C_o 是钢的初始含碳量, D 是扩散系数, K 是未知的反应速度系数, 方程式(16)可以写成随反应速度系数而变的表达式, 即反应速度系数为因变数而 $C(o, t)$ 为自变数时, 其数值用试验数据给定。 C_L 和 D 是物理常数, 它们或来源于以前的确定, 或来源于文献数据:

$$F(K) = \frac{C(o, t) - C_o}{C_L - C_o} - 1 + \exp$$

$$\left[\frac{t}{D} K^2 \right] \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{t^{1/2}}{D^{1/2}} K \right] \right\} \quad (17)$$

由方程式(17)可用Newton-Raphson迭代法算出反应速度系数。

$$K_{r+1} = K_r - \frac{F(K_r)}{F'(K_r)} \quad (18)$$

$$\text{其中, } F'(K_r) = \frac{d}{dK} [F(K)]_{K=K_r}$$

$$F'(K_r) \approx 0 \quad r = 0, 1, 2, \dots$$

Newton-Raphson迭代法按以下程序进行:

1. 开始估计一个合适的 K_o 值, 比如 K^*
2. 当某一规定的判据得到满足, 比如 $|F(K_r)| < \epsilon$, 其中 ϵ 可以取很小的数值, 例如 10^{-3} , 则计算结束,

$r=0$ 时, Newton-Raphson方程式(18)可写成:

$$K_1 = K_o - \frac{F(K_o)}{F'(K_o)} \quad (19)$$

其中, K_o 等于 K^* , 它是个合适的估算值, $K_o = K^*$ 时, $F(K_o)$ 根据方程式(17)计算, 而且

$$F'(K_o) = \frac{d}{dK_o} \left\{ F(K_c) \right\}_{K_o=K^*}$$

表面上的含碳量可以通过安排以下的试验顺序和采用一种测定表面含碳量的方法(例如光谱分析)进行实验确定。选用一定的

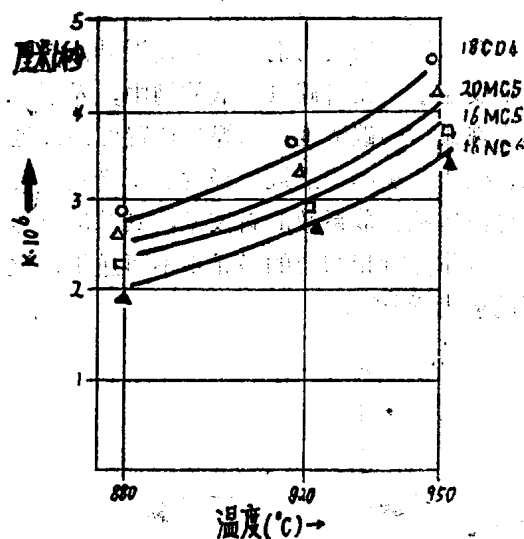


图6 18CD4, 20MC5, 16MC5, 16NC6 钢的K值与温度的关系^[8,9]

温度范围,例如800到1000℃。在给定温度 $T = T_1$ 下,半无限物体的表面处理时间为 $t_1, t_2, t_3, \dots$, 则表面上相应的碳浓度为 $C(o, t_1), C(o, t_2), C(o, t_3), \dots$ 。将温度850, 880, 920, 和950℃下取得的反应速度系数代入方程式

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q_K}{RT}\right) \quad (21)$$

中进一步运算,以使用统计匹配法确定参数 K_0 和 Q_K 。测定的温度范围愈宽, K_0 和 Q_K 值愈精确。例如18CD4, 16NC6, 20MC5和16MC5钢^[8,9]的统计匹配,如图6的曲线所示,图中利用了上述温度下反应速度系数的试验数据,这些数据也可用以计算例,如18CD4钢的参数 K_0 和 Q_K (参阅表2)。

这个方法(利用Newton-Raphson-迭代法)的优点是:反应速度的计算值并不描述平均的速度系数,且与反应系数 k' (渗碳速度)的数值无关,而是直接地与表面上

表2 确定K的试验过程(18CD4钢,温度:880,920,和950℃)

自变数初始 碳浓度(%)	温度 (°C)	时间 (分)	碳势 (%)	D (厘米²/秒)	因变数表面 浓度(%)	$K_{r+1} = K_r - \frac{F(K_r)}{F'(K_r)}$	$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q_K}{RT}\right)$
0.19	880	30	1.00	1.25×10^{-7}	0.42	$K_{880} = 2.75 \times 10^{-6}$ 厘米/秒	
		60			0.486		
		90			0.53		
		120			0.56		
		150			0.583		
		180			0.61		
0.19	920	30	0.83	2.13×10^{-7}	0.372	$K_{920} = 3.57 \times 10^{-6}$ 厘米/秒	$K_0 = 0.0113$ 厘米/秒 $Q_K = 70953$ 焦耳/克分子 (19100卡/克分子)
		60			0.425		
		90			0.457		
		120			0.482		
		150			0.502		
		180			0.520		
0.19	950	10	1.50	3.28×10^{-7}	0.437	$K_{950} = 4.43 \times 10^{-6}$ (厘米/秒)	
		20			0.515		
		30			0.569		
		40			0.612		
		50			0.646		
		60			0.675		
		70			0.70		

的碳量 C_0 、碳势 C_L 和扩散系数 D 有关。如果最后三个系数的测定精度令人满意，则 K 的精度也会令人满意。

2.1.5 扩散系数 D

Paschke 和 Hauttmann^[14] 首先提出的测定 γ 铁中碳扩散系数的方法，是把两根扩散元素浓度不同的钢条对焊起来，进行扩散退火(参阅图7)。退火时，碳原子由含碳量较高的钢条中扩散出来，并通过两钢条间的

界面层而迁移。扩散形成的碳浓度分布如图8所示。然后对钢条进行切削，并逐层分析碳量，从而得出与界面层距离的关系曲线^[17, 18]。

在含碳量较高的钢中，越接近界面层，碳浓度越小。在含碳量较低的钢中，界面层上出现最高的碳浓度，与焊接位置的距离越大，碳浓度越小。最近已经发展了确定高合金奥氏体碳扩散系数的新技术，其基础是与过程数学分析相结合的多元素不可逆扩散过程的热力学^[20]。

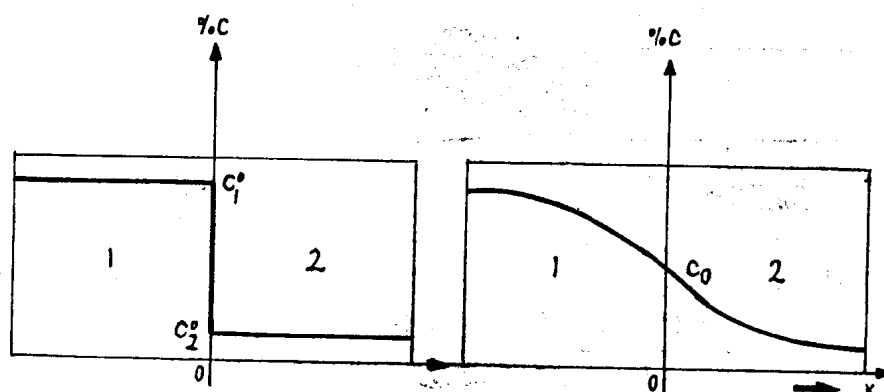


图7 退火前扩散偶中的碳分布^[12, 15]

图8 退火后扩散偶中的碳分布^[12, 15]

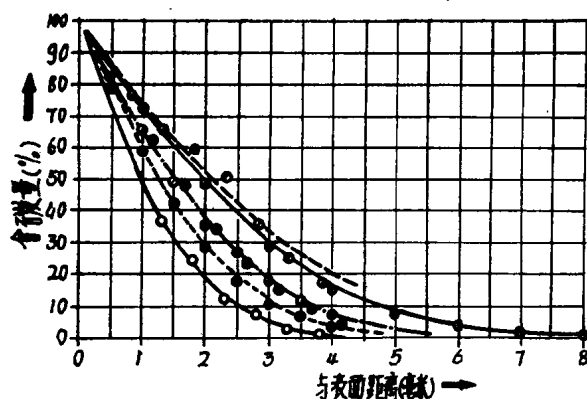


图9 半无限圆柱体碳扩散试验的结果^[14]

- 温度 925℃, 28 小时后, 扩散系数 9.35×10^{-3} 厘米²/24 小时;
- 温度 1000℃, 18 小时后, 扩散系数 2.33×10^{-3} 厘米²/24 小时;
- ◎—◎ 温度 1100℃, 9 小时 40 分钟后, 扩散系数 6.25×10^{-3} 厘米²/24 小时;
- 温度 1200℃, 3 小时后, 扩散系数 1.95×10^{-3} 厘米²/24 小时;
- φ—φ 温度 1200℃, 6 小时 40 分钟后, 扩散系数 1.69×10^{-3} 厘米²/24 小时;
- 温度 1250℃, 4 小时后, 扩散系数 2.46×10^{-3} 厘米²/24 小时

2.1.6 扩散系数 D 的数学和计算机确定

在焊接钢条的原有界面(数学上的面)上, 在处理时间 t 期间, 碳浓度近似地保持常量, 且等于两钢条中初始浓度的平均值^[14, 17]

$$C(0, t) = \frac{C_1^0 + C_2^0}{2} = C_0 \quad (22)$$

其中, C_1^0 和 C_2^0 是两钢条的初始浓度(见图7)。

试样可视为具有恒定表面浓度的半无限物体。

如 $C_1^0 \gg C_2^0$, 则图7右测试样有以下的初始条件和临界条件:

$$C(x, 0) = C_2^0 \quad (23)$$

$$C(\infty, t) = C_2^0 \text{ 或 } \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0 \quad (24)$$

从上述分界和初始条件〔即式(22)到(24)〕及Fick第二定律出发,利用算子法^[11,12]得出以下解:

$$C(x, t) = C_0 + (C_2^0 - C_0) \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right] \quad (25)$$

如果 C_2^0 很小或是零时,方程式(25)可写成:

$$C(x, t) = C_0 - C_0 \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (26)$$

$$\text{其中, } C_0 = \frac{C_1^0 + 0}{2} = \frac{C_1^0}{2}$$

所以方程式(26)可写成:

$$C(x, t) = \frac{C_1^0}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right] \right\} \quad (27)$$

方程式(25)可作为扩散系数的函数,得下列形式:

$$F(D) = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right] - \frac{C_0 - C(x, t)}{C_0 - C_2^0} \quad (28)$$

方程式(28)是扩散系数D的非线性方程式,因而必须用Newton-Raphson迭代法^[13,21]求D,即:

$$D_{r+1} = D_r - \frac{F(D_r)}{F'(D_r)} \quad (29)$$

其中, $r = 0, 1, 2, \dots$ 且 $F'(D_r)$

$$= \frac{d}{dD} \left\{ F(D) \right\}_{D=D_r}$$

假设 $F'(D_r) \neq 0$

$r = 0$ 时,方程式(29)成为:

$$D_1 = D_0 - \frac{F(D_0)}{F'(D_0)} \quad (30)$$

当将 D_0 取一个合适的估算值,即 $D_0 = D^*$ 时,则由方程式(28),得出 $D_0 = D^*$ 时的 $F(D^*)$ 。于是, $F'(D^*)$ 可由如下表达式给出:

$$F'(D^*) = \frac{d}{dD_0} \left\{ F(D_0) \right\}_{D_0=D^*} = \left\{ \frac{-x}{2D_0(\pi D_0 t)^{1/2}} \exp \left[-\frac{x^2}{4D_0 t} \right] \right\}_{D_0=D^*} \quad (31)$$

关于用公式翻译程序语言FORTRAN编制确定D的程序表,参阅附录I*。对于上述迭代法,必须取得在时间t时距焊位X处碳浓度的试验数据。通过化学分析或光谱分析可以得到浓度-距离曲线,薄的车削切屑(约厚0.1毫米)可用于化学分析^[17]。

如果取0.1毫米厚的层,也可以利用光谱分析。在有限面上进行光学分析和X射线分析,也得到了广泛应用。此类测定都是在横截面磨片上进行^[16,17]。

对一种给定初始碳浓度的钢种及在尽可能宽的温度范围内,测定其扩散系数D的试验工作,可在上述数学分析和实验分析的基础上进行(参阅表3)。在925, 1000, 1200和1250℃温度下用这种方法求得的扩散系数值,再用统计匹配技术进行处理,从而定出扩散参数 D_0 和 Q_D 的值,这时用方程式:

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{Q_D}{RT} \right) \quad (32)$$

它可写成:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{Q_D}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (33)$$

方程式表明, $\ln D$ 随 $1/T$ 线性地变化,即当 $\ln D = Y$, $\ln D_0 = A$, $Q_D/R = B$, 和 $T = 1/x$ 时,则由方程式(33)得出以下关系式:

$$Y = -BX + A \quad (34)$$

对于给定的扩散系数值及其相应温度(参阅表3),可以用图解法或用统计法^[28]求得A和B的数值。就是说座标 $Y = \ln D$ 和 $X = \frac{1}{T}$ 的直线的斜率给出B,由B算出 Q_D 值;

在 $X = 0$ 即 $1/T = 0$ 时,直线在纵座标轴上的截距给出A,这就是 D_0 的值。此外,A和B的数值,即 D_0 和 Q_D 的相应数值,也可以按照下式用回归分析法确定:

$$Y = A_X - B_X X \quad (35)$$

其中,未知参数可用最小二乘法来确定^[16,21,28]。方程式(35)也可写成如下