齿轮渗碳热处理技术的新进展

爱协林工业炉工程（北京）有限公司 （102200） 石康才

【摘要】 提高经济效益、减少气体耗量、降低内氧化和减少变形的要求，促进了新一代气体渗碳炉的发展。本文重点介绍了用于齿轮渗碳淬火的最新设备和工艺技术。第一节介绍带淬火油槽的气体渗碳炉的最新进展。这一技术在许多工业领域（如汽车工业）的化学热处理中占有稳定的位置。第二节介绍了低压渗碳（LPC）和高压气体淬火工艺。该技术已获得重大发展并达到工业成熟阶段，与气体渗碳相比有许多优点，是一种先进的表面硬化技术。本文还介绍了低压渗碳工艺的基本方面以及用新的工艺技术能获得满意结果、良好的渗层的均匀性和一致性。最后介绍了新开发的气淬室，它可用于气体渗碳炉的生产线中，该装置与推盘式炉相结合可以发挥气淬的许多优点。

一、新型气体渗碳炉的设计

在过去的20年间，为改进气体渗碳工艺和炉子设计，人们做了不懈的努力。由于吸热式气氛、氮－甲醇气氛和天然气－空气气氛在热处理领域获得广泛的应用，因此在汽车工业的许多部门，连续式推盘式炉已成为必不可缺的设备。

经济效益需求的增长促进了新装备的改进，从而改善了产品质量，提高了热处理结果的重复性。这种改进的目标是通过改进炉子的设计，降低气体消耗量、内氧化和畸变。

1. 双排和三排式推盘式炉

已有许多工厂安装了这些炉子，它们都有一定的设计特点。然而用户要求不同，设备的设计也有所区别。例如：高温炉必须根据生产能力、被处理材料的级别、设计硬化层深度（CHD）来设计。对于要求生产能力大和硬化层深度深的零件，常常应用双排或三排炉。该设备的设计的主要特点将在下面的例子中说明。

2. 生产线设计

用户的特殊要求如下：减少气体消耗；减少齿轮变形；内氧化层≤15μm；结果的高质量和重复性。

技术参数：

生产能力 1430kg/h（毛重）

料盘尺寸 565mm×565mm×790mm

最大负荷 300kg（毛重）

加热区 8盘

渗碳和扩散区 3×18盘

周期时间 1.10mm CHD（有效硬化层深），10min

1.25mm CHD（有效硬化层深），12min

根据渗碳室的通过能力，设计成三排推盘炉，质量指标应达到窄小表面硬度偏差和碳浓度分布要求，表面硬度以及长期生产过程中结果的重复性记录。表1是要求值和测量结果。

3. 生产线设计

根据以上要求来进行新的炉子设计。为了达到零件最小的畸变，工件清洗之后，需在预热炉中进行预加热，即运行5个工位，同时升到预加热温度500℃。随后在每一排炉中运行8个工位升到渗碳温度。

为使气体消耗降到最小并减小内氧化，前室料盘从底部装入（见图1）。该技术已获得专利（中国专利号：ZL01204256.0）。由于在进料口下边安装了点火器，在底装料门打开之前点火器很快点燃，使气氛中的氧含量大大减少。由于采用不同的推料周期，三排推盘炉允许同时处理不同硬化深度的零件。每一排在渗碳和扩散区运行18个工位。

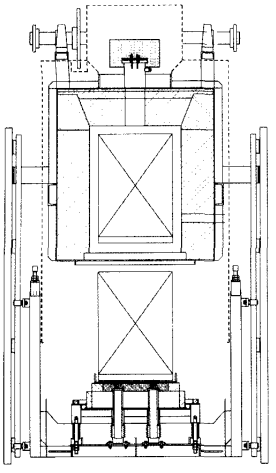

图 1

淬火在油槽中进行，该油槽既可以减少气体消耗，又可以减少零件的畸变。这一淬火装置在油搅拌器和料盘之间安装了专用导流装置，由于油是以均匀速度定向垂直流动，从而改善了工件的畸变值。

当淬火过程完成后，料盘通过一个横向推料装置，被转移到第二个平台上，然后进入底出料口。残留油滴淋完后料盘运出，平台下落，油槽被一盖子密封，油和盖子的空间充上氮气以避免淬火油的老化，接着工件通过贯通式的清洗机和回火炉。

4. 热处理结果

改进的炉子在长期生产运行中已达到了设计的全部要求，热处理后的结果见表 1。此外与通常的气体渗碳炉相比，在工艺气体耗量约节省 40%、能耗约节省 50%的前提下，硬化范围要求很窄小也能达到。由于降低了运行成本和零件质量的改善，这条生产线建设所增加的一些费用，仅用一年就可以收回。

表 1 带底装料和底出料三排推盘式炉的质量数据

测试项目		规范要求	结果	
			数值	标准偏差
表面硬度	回火前	≥63.5HRC	64.4	0.3
	回火后	60～62HRC	61.2	0.3
表面碳浓度		(0.77±0.05)%	0.8	0.013
层深		±10%	1.043	0.08
内氧化		≤15μm	12μm (减少 50%)	5.5

（续）

测试项目	规范要求	结果	
		数值	标准偏差
心部硬度偏差	±20HV30	364HV30	11
渗碳气体消耗	减少约 40%	—	—
能耗	减少约 50%	—	—

二、低压渗碳高压气淬——常规渗碳的工艺改进

最近几年来，应用真空渗碳的兴趣有很大增长。同 20 年前起步时相比，低压渗碳经历了更大的发展，现在已达到工业化的成熟阶段。许多早期发表的文章叙述了低压渗碳，其压力范围在 0.02～0.05MPa（200～500mbar），应用甲烷做渗碳气氛。由于压力参数和渗碳气氛都变化，我们现在能够获得重复性好与结果均匀一致的工艺。

低压渗碳与气体渗碳相比的优点是：这种渗碳方法不仅使工件得到不氧化的表面，对环境无污染，而且与气体淬火相结合时变形有所改善；通过提高渗碳温度可减少处理时间；低的气体消耗和能量消耗；防止了炭黑的出现。

1. 质量传递和反应机制

低压渗碳的工艺参数如下：通常压力范围在 0.003MPa（30mbar）以下连续变化（气体入口与居中间泵下部相连）。气体的压力连续变化使在已通孔以及不通孔处有更好的渗碳均匀性，这是由于新鲜反应的气体传送更容易所致。

低压渗碳中丙烷是常用的一种工艺气体。与气体渗碳相比，由于真空系统中使用不含氧的反应气体，因而不能进行碳势控制。在这种情况下最重要是碳的质量流量（mc），它可定义为单位时间、单位面积上传到材料上碳的数量，这一参数可以同气体渗碳工艺直接比较。

丙烷在热的工件表面上的热分解容易进行，单室炉中分解的比率决定于平均装炉量（炉料的面积约 2.5m^2）和炉压（0.003MPa）。结果表明，随着渗碳温度的提高反应会更好，即丙烷需用量下降。理论上可用碳量所占总量的 40%～60%，在这里由于分解反应产生的中间产物有乙烯、乙炔以及甲烷，这些对于渗碳反应是有用的，而且也是一种良好的工艺气体。低压渗碳中用乙炔，该技术在 1997 年获得专利（SU668.978），而

且在日本和欧洲有一定的使用范围。应用乙炔可以改善长深不通孔和过渡孔渗碳的均匀性；然而丙烷相反，随着渗碳温度的提高，不通孔的渗碳能力下降。其原因已查明，这是由于温度的提高，导致分解速度和分解率提高所致。

在毫巴范围内，甲烷在试验温度下裂解率仅在3%以下，这时低压渗碳是不恰当的。为了使甲烷充分地热分解，CH_4 的分压必须升高到0.03MPa（300mbar）以上，在大范围内出现炭黑的危险将被控制住。结果的不确定性是这种工艺较少使用的重要原因。

为了使渗碳时间减到最小，我们开始使用碳质量流量 mc =（100～200）g/m^2 的工艺规程，而且在几分钟内必须使表面碳含量达到1%以上。通过降低碳的质量流量，使碳的供应和碳向基体扩散之间达到动态平衡。

图2表示在单室真空炉中各工艺阶段的典型工艺程序：加热、低压渗碳、扩散、温度到淬火温度、气淬。可通过扩散计算程序对渗碳进行工艺模拟，而计算结果是建立在大量实际试验基础上的。

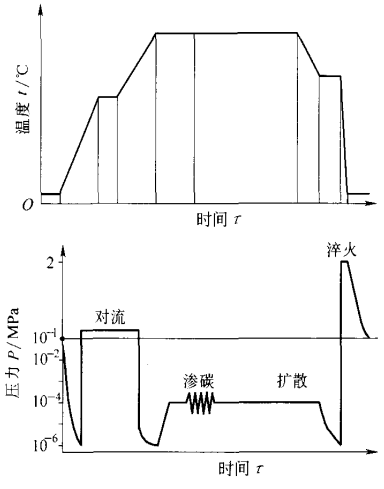

图 2

通过调节渗碳时间和扩散时间，可以把表面碳含量和硬化层深度调节到需要的值。

2. 扩散

采用真空技术时，提高渗碳温度对炉子而言是没有限制的；然而渗碳温度的提高，相应伴随着晶粒长大，其程度与所用钢的质量有关。

V. Schüer 用标准的经稳定化的细晶粒钢棒进行的详细试验表明，如果钢中铝和氮的含量足够高，在980℃以上渗碳4～8h，将不会引起晶粒粗化，晶粒粗化的最大比例为10%（见表2）。这就使得有效硬化层1.4～2mm的工件渗碳后不需要经过中间等温退火，而直接淬火成为可能。这与把渗碳温度升到最高1020℃、保温时间15min相比，晶粒增大似乎不明显（硬化层深0.45mm）。奥氏体化后等温退火仅用于在1020℃以上，渗碳层深超过1.4mm的渗碳，这使工艺时间增长。

表2 渗碳温度、时间与晶粒长大的关系

10%晶粒粗化的渗碳温度/℃	18CrNi8	16MnCr5	17CrNiMo6	20MnCr5
900	>8h	>8h	>8h	>8h
940	4h	>8h	>8h	>8h
980	1h	4h	4～8h	>8h
1020	5min	5min	5min	15min

减少工艺时间，提高热处理效率的要求，迫使钢铁供应商对高温稳定材料进行积极的研究。如果工件直接淬火不影响材料和产品，高温渗碳将受到市场的欢迎。第一批具有高稳定性的材料，最近已经生产出来。

3. 淬火

淬火可根据工件的最大厚度以及几何形状，炉型（单室、双室或多用箱式炉）等采用1～2MPa（10～20bar）的氮气或氦气完成。

用高压气淬代替油淬不仅能保证表面质量好，而且常常又能减少畸变。此外，气淬取消了一道后清洗工序，因此降低了抛光费用。无氧化渗碳与最小变形相结合的理念从而产生。低压渗碳由于取消后清洗工序，从而降低了费用。

4. 渗碳结果

（1）均匀性　图3是5个试棒的碳分布图，它是在炉子装满工件时测出的，测到0.35%C处，层深为0.80～0.85mm。

（2）工件几何形状　用40mm×100mm圆棒进行了通孔和不通孔渗碳试验，并在不同位置测试了硬度分布。

在选定的几何条件下两种孔的渗碳结果非常均匀（见图4），接着又进行了两个不同形状齿轮的显微断面

检测，可以看出在齿顶和齿根上渗碳非常均匀。采用乙炔渗碳使得很深的不通孔和过渡孔的渗层均匀性有很大的改进。甚至几何形状复杂，厚度变化大的喷嘴类零件都可以获得均匀的处理结果。

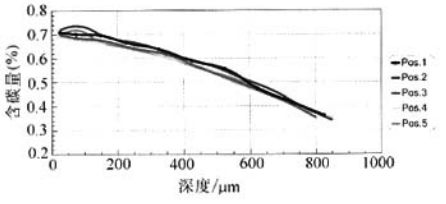

图 3

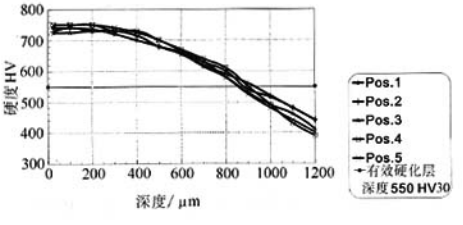

图 4

5. 应用举例

(1) 齿轮和齿轮轴　齿顶和齿根上的硬度分布主要取决于齿轮的几何形状，模数要求的硬化层。图 5 是主动轴和齿圈照片，这些零件渗碳到有效硬化层深 0.6mm (625HV30)。

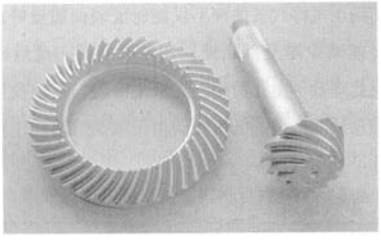

图 5

图 6 是在真空炉渗碳的其他产品，如齿轮、同步圈等。值得注意的是同步圈的齿顶和齿根有很好的渗碳均匀性，甚至在 0.3mm 硬化层深时渗碳仍然很均匀，渗碳温度为 930℃，渗碳和扩散总时间约 8min。

汽车工业中粗的齿轮轴进行低压渗碳，甚至在非常稠密的装炉时，渗碳仍很均匀。

图 6

带有分离淬火室的现代低压渗碳生产线改进了淬火能力，使载重汽车实心齿轮零件渗碳淬火成为可能。大轴（每件重约 15 ~ 25kg）和同步齿圈（达到每件 6kg）等许多产品满意的热处理结果扩大了该工艺的应用范围，展示出新工艺的应用前景。

(2) 烧结材料　具有残余气孔的烧结材料采用气体渗碳有一定困难，这是因为表面积大的多孔道在很短的时间充分渗碳是困难的。相反低压渗碳则具有优势，渗碳仅限制在工件表面，因为孔的尺寸比 100μm 还要小很多。

把 ϕ10mm 用 Sint D30 材料制造的微型齿轮进行渗碳处理，硬化层深达到 0.25mm，避免了齿的全渗透。渗碳是在 300Pa (3mbar) 丙烷 930℃，6min 下完成的。

为了增加渗碳工艺的可靠性和均匀性，也可在 850℃到 900℃，用延长渗碳时间来实现。

工艺条件和气体耗量应同工件相适应，否则，扩散温度不能溶解的碳化物将出现。

6. 生产线的设计

低压渗碳通常可在传统单室真空炉中实现，它配有工艺气体分配设备，加热用特殊石墨电加热器和一些最新的技术设备。

在单室中为了达到足够的淬火速度，推荐使用压力 2MPa (20bar)，并用氮和氦为淬火气体。

为了使工件和材料得到足够的淬火速度，可优先使用配有最大 1 ~ 2MPa (10 ~ 20bar) N_2 冷却室的炉子。

在两室之间工件可以按滚动方式快速地实现转移 (见图 7)。

需要较大生产能力的汽车工业低压渗碳主要用连续式多室炉，这些炉子包括一个锁气室，允许用 0.1 ~ 0.2MPa (1 ~ 2bar) 氮气对流加热的加热室由 1 个或 2 个渗碳室、2 个或 3 个扩散室（该室可降温到淬火温度），最后为淬火室，它带有用一个淬火可卸载的闸门

(见图7)。冷的淬火室可有效地把许多不同形状、不同厚度的工件进行渗碳淬火，氮气或氦气的冷却压力1~2MPa(10~20bar)可使汽车齿轮心部达到要求的硬度。

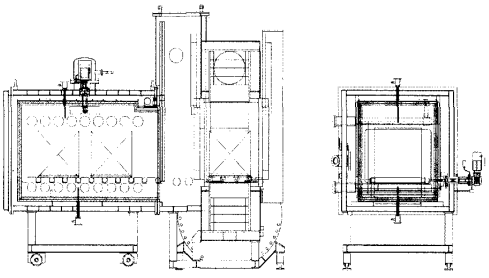

图 7

三、高压气淬技术在推盘式炉气体渗碳生产线上的应用

气淬技术具有市场需要的许多优点。在过去10年，由于气淬生产线较大的增长，它的应用范围也有很大的发展，从而为高压气淬渗碳生产线的实施指出了方向。

生产线的设计原则要与LPC淬火装置相一致，然而最重要的是炉子气氛和淬火装置要尽可能分离。这种分离是必要的，因为淬火气体中可燃气体成分必须在5%以下，才可保证设备的安全性和降低安全管理费用。

由于推盘炉目前经6~10min的周期工作，所以在渗碳时都需要气体循环装置，必须尽力将渗碳气体和淬火介质分开。

图8介绍了淬火装置的设计和气体渗碳线的改进情况。在气体渗碳室和供气淬压力室之间有一带滚动转移系统的中间室，可以10s以下的速度平稳地转移到淬火室，中间室的入口制作得很窄小，以使炉子氧气和淬火室的氮气相互干涉减到最低程度。

中间门中的氮气因受工件的温度影响被加热而膨胀，从而使得气流与工件反向移动。工件转移到淬火装置以后，中间门被关闭。为了进一步降低可燃气体的成分，密封后可通过预排气阀使淬火室排气。

增加抽气并不增加淬火气体净化，而且通过缩短周期和气体回收能使可燃气体稳定在5%以下。

采用气淬的优点是省掉后清洗工序。不需要清洗介质和油，减少零件的畸变，有可能省去磨削工序，气体淬火装置可代替油淬，这不仅对于新炉型，而且对于现代常规炉子也是很好的。

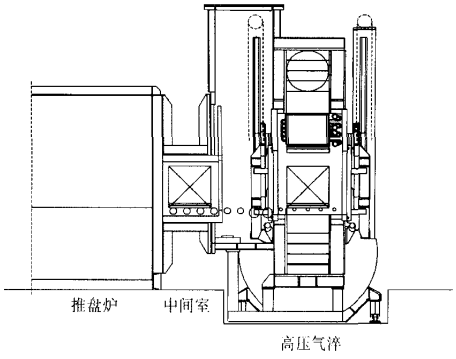

图 8

四、结语

上述两个例子说明现代气体渗碳炉完全可以满足人们改进零件质量、提高经济效益的要求，低能耗量、气体耗量、表面内氧化和畸变也可大大降低，使产品质量提高，运行成本大大降低。

低压渗碳是一新的技术方向。由于技术改进，可以替代常规气体渗碳，除了工件表面无氧化之外，工艺的区别在于工艺周期短，这可用较高的温度和应用高压气淬实现。通过炉子技术改进以及工艺参数的优化，可以消除低压渗碳形成炭黑和均匀性不足等问题。

生产线上配上真空系统是一个颇具吸引力的主张。

特别是应用高压气淬时，工件表面光亮、无油，由于不用油淬火，因而可以满足最严格的环保规程。此外，气淬可降低零件的畸变，从而大大降低采用新工艺的费用。在这方面无氧化物的渗碳表面是很有价值的。

双室或多室炉同单室炉一样，可以实现压力在1~2MPa(10~20bar)之间，用氮或氦气进行气淬。对于连续生产线，气体净化和回收也是必要的。把加热、渗碳、扩散、淬火室分开的连续式炉，因汽车工业的需求，已得到较大的生产线能力，气体淬火技术的改进使得其应用范围大大扩展。新开发的气淬室与推盘炉相结合使气淬技术的优点得到发挥，使得气体渗碳生产线有高的生产能力和合理的热处理成本。

(20050930)