

编者按：2013年第四届先进节能热处理技术与装备研讨会上邀请了多位行业专家作了精彩的节能技术、先进热处理技术报告，现把其中几个报告整理出来供读者分享。



齿轮在连续炉上的 稀土快速渗碳技术

哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司副总工程师 金荣植

一、稀土及其应用

(1) 稀土是我国的丰产元素，储量居世界第一位。自从20世纪中叶以来，随着对稀土研究的日益深入，认识到稀土是一族具有特殊性能的元素，并在传统产业和高新技术中获得广泛的应用。目前有专家认为，四种稀土功能材料对稀土应用量较大，发展前景十分看好，一是稀土永磁材料，其是支撑现代化电子信息产业发展的基础材料。二是稀土超磁致伸缩材料，其可以有效地提高国防、航天、航空等领域技术装备水平。三是稀土磁制冷材料，用于磁制冷装置，取代弗里昂等物质，用于空调和电冰箱等。四是稀土巨磁电阻材料，用于巨磁电阻磁场传感器等。因此，专家预测稀土行业将成为国民经济支柱产业，现在我国已将其作为战略物质加以控制。

(2) 稀土元素对钢铁冶金过程的影响及其在钢中的应用，是稀土研究的最重要成果和在工业中最早和最重要的应用之一。稀土不仅能够净化钢液，而且细化钢的凝固组织，改变夹杂物的形态、分布与性质，从而提高钢材各种性能。如提高钢的冲击韧性，降低钢的脆性转变温度，改善热塑性，抑制回火脆性，提高疲劳性能，提高抗氢致脆性，改善低温性能，提高屈服强度和抗拉强度，提高耐磨性，改善焊接性能，提高高温抗氧化性和耐蚀性等。

(3) 20世纪60年代以来，研究人员开始把稀土元素引入钢的化学热处理中。80年代以后，我国对稀土化学热处理的研究出现热潮，取得了许

多成果（包括渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等），并在生产中获得成功的应用。哈尔滨工业大学走在了前面，80年代同哈尔滨松江拖拉机厂合作，其“汽车拖拉机齿轮应用稀土碳氮共渗技术”获得黑龙江省科技进步二等奖。1990年哈工大“稀土特殊共渗热处理新技术”荣获国家发明二等奖和航天部科技进步一等奖等。因此，稀土化学热处理技术是具有我国自主知识产权的高新技术。

(4) 科研成果产业化才能够体现该项成果对社会的贡献，才是评价其价值的可靠的标准。哈工大从80年代以来就开始进行该项科技成果转化工作，并已成功应用在周期式作业炉中（如井式渗碳炉、密封箱式多用炉等）。虽然90年代在哈尔滨汽车齿轮厂、长春一汽等进行了连续式渗碳炉稀土渗碳技术产业化试验，但由于稀土渗剂堵塞滴注管等问题没有得到很好解决，而影响了其产业化效果。2003年开始哈工大材料工程学院刘志儒教授等同我公司进行合作，在单排炉上进行产业化试验，通过近一年的生产试验，虽然获得了一些成果，但由于稀土堵塞问题最终还是停止了应用。2006年我公司同哈工大、一汽嘉信炉子公司、哈尔滨意锋稀土材料公司进行合作，采用多项专利技术改进设计，由长春一汽嘉信炉子公司生产了当时国内第一条超长型热处理生产线（46盘），并获得哈尔滨市发展高新技术专项资金支持（项目编号：2007FG4B016）通过两年多的载重汽车弧齿锥齿轮稀土渗碳生产试验，已经达到了产业化效果。2009年通过了哈尔滨市科技

局验收（批准号：黑2009-0969）。2010年获得中国齿轮专业协会科技进步成果二等奖。2012年又通过黑龙江省科技厅项目验收（批准号：黑科验字[1012]第399号）。

二、稀土渗碳项目简介

目前，我国载货汽车生产量逐年上升，但中桥、后桥弧齿锥齿轮由于热处理质量等原因，在使用过程中常出现早期磨损、点蚀、剥落等问题，使用寿命偏低，因此成为我国载货汽车生产瓶颈之一。另外，由于这些齿轮渗碳层较深、生产周期较长，导致能耗高，排放较多，成本高，生产效率较低，产品质量稳定性较差，因此直接关系到企业生存问题，已经引起中国齿轮行业协会和热处理行业协会等专家的高度关注，2007年已列为攻关专题之一，并成为“十二五”齿轮行业重点发展产品之一。

稀土渗碳项目的实施就是在于解决上述问题，并将稀土渗碳技术在连续式渗碳炉中的应用实现产业化。

三、稀土渗碳技术原理

1. 稀土的可渗入特性

稀土原子半径（0.1824mm）是铁原子（0.117mm）的1.5倍。经过试验证明，稀土元素在化学热处理过程中可与间隙原子（C、N等）形成共渗，稀土原子的渗入必然引起周边铁晶格点阵发生膨胀畸变（见图1），使被渗钢晶体缺陷密度增殖。在渗碳过程中渗入的稀土元素可达到十几至几十个ppm。

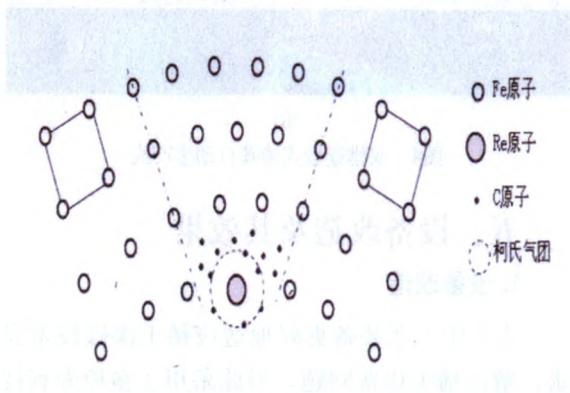


图1 稀土元素的渗入造成铁点阵的畸变

受微区弹性应力场（见图2）限制，稀土元素只能以单原子或双原子状态存在，这种离散存在的稀土元素将成为间隙原子C的形核核心，所形成的碳化物也必将是细小弥散分布。

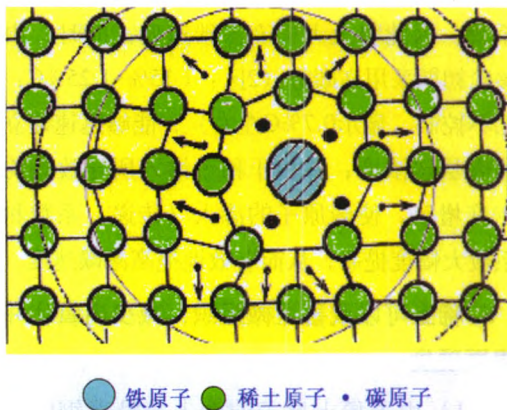


图2 渗入的稀土元素的微区弹性应力场

2. 稀土可以提高界面反应速度

由于稀土元素是电负性较低的元素，因而显示活性较高。采用稀土渗剂后可以加速预氧化层的还原，活化与净化工件表面，有利于活性[C]产生，因而加快间隙原子的渗入过程。

稀土在炉气中与碳（C）、氢（H）等元素发生作用，形成的大分子在炉气中流动并可以被被渗工件表面吸附，且在吸附过程中因其质量较大，可以破坏被渗工件表面的层流层，增大CO与工件表面的接触与碰撞，因此可以提高界面反应速度。

3. 稀土可以增大碳原子渗入系数和扩散系数

间隙原子的渗入首先是沿着基体的缺陷进行，然后进行扩散。渗速可以用渗入（传递）系数和扩散系数来表征。而渗入系数和扩散系数与温度、浓度差（碳势）、基体的缺陷密度、界面反应活性及钢的材质有关。

由于稀土元素的渗入，导致钢的基体缺陷密度增殖，使渗入系数增大，促使碳原子在晶格缺陷处偏聚，足够量的碳原子以稀土原子为核心，产生柯氏气团，处于柯氏气团顶端的碳原子容易产生跃迁转移，这种转移是跳跃式的，由一个柯氏气团向另一个柯氏气团或晶体缺陷转移扩散，这种扩散行为与常规的渗碳行为不同，可以使扩散系数大大增加，由以上两个因素共同作用，使渗

碳速度大幅度提高。

4. 稀土可以大幅度提高渗碳速度

如前所述, 稀土(渗剂)可以改善炉气质量, 提高界面反应速度, 增大渗入(传递)系数和扩散系数, 因此将大大提高渗碳速度。同时, 由于在渗碳初期采用高碳势(2区: 1.15%~1.25%C; 原工艺不控制, 显示0.7%C左右), 能够迅速建立较高的表层碳浓度; 并由于稀土渗入所导致钢的缺陷密度增殖, 使碳原子的渗入(传递)系数和扩散系数大幅度提高, 从而有效地提高渗碳速度。

5. 稀土可以改善显微组织, 减少内氧化并提高表面硬度

(1) 由于稀土原子的渗入是沿着钢的缺陷(相界面、晶界位错线、空穴等)进行的, 其分布是弥散的, 当其成为碳化物形核核心时, 所得到的碳化物也将是弥散分布的, 并因碳化物的大量析出而产生奥氏体再结晶, 使奥氏体晶粒细化。由于碳化物的弥散分布和奥氏体晶粒细化, 对马氏体的形核和切变长大起控制和阻碍作用, 迫使马氏体细化或超细化。

由于稀土的渗入可以有效地提高奥氏体中的碳浓度, 如果采用一定的工艺方法使奥氏体中碳原子以碳化物形式弥散析出, 不但可以降低马氏体组织级别, 而且可以降低奥氏体中的碳浓度, 在降温淬火时有效地向马氏体转变, 使残留奥氏体(量)减少。

(2) 由于稀土元素是电负性较低的元素, 因而显示活性较高, 与氧的亲合力极高, 而且稀土优先沿晶界扩散与偏聚, 氧将优先选择稀土进行氧化, 生成 RE_2O_3 稀土氧化物(个别还可以生成 REO_2 稀土氧化物), 使氧对合金元素的氧化行为受到很大抑制, 从而减小了(内)氧化作用, 减少了工件表面非马氏体的产生, 因此提高了工件表面硬度。

四、稀土渗碳工件与设备

工件如图3所示, 为EQ153型“东风”牌载货汽车后桥弧齿锥齿轮。材料为20CrMnTiH, 产品技术要求: 弧齿主、从动锥齿轮渗碳淬火有效硬化层深度要求为1.70~2.10mm; 金相组织、碳化

物、马氏体、残留奥氏体1~5级; 齿轮表面与心部硬度要求分别为58~63HRC和33~45HRC, 检验按QC/T262-1999《汽车渗碳齿轮金相检验》标准规定执行。

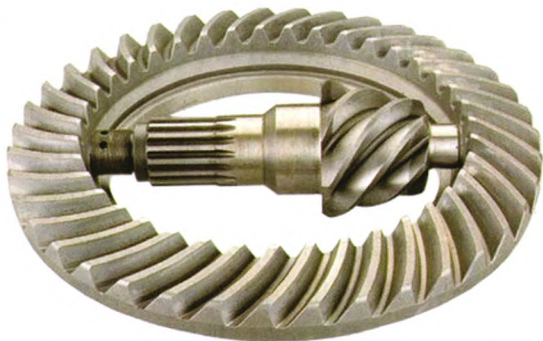


图3 EQ153型“东风”牌载货汽车后桥弧齿锥齿轮

如图4所示, 稀土渗碳用设备为双排稀土连续式气体渗碳自动生产线。



(a)



(b)

图4 双排连续式渗碳自动生产线

五、设备改造及其效果

1. 设备改造

为了使工艺装备更好地适应稀土渗碳技术要求, 解决稀土堵塞问题, 对此采用了多项专利技术对相关工艺装备进行改造。

(1) 双排稀土气体渗碳炉水冷却防结焦滴注及氮气除塞装置 (专利号: ZL201120410204.4)。

(2) 双排稀土连续气体渗碳炉渗碳介质流量盘 (专利号: ZL201120410188.9)。

(3) 双排稀土连续气体渗碳炉料盘设置及加热装置 (专利号: ZL201120410190.6)。

(4) 载重汽车弧齿锥齿轮双排稀土连续气体渗碳热处理设备 (专利号: ZL201120410186.X)。

(5) 双排稀土连续气体渗碳炉直连式侧风扇 (专利号: ZL201120410138.8)。

2. 改造后的工艺装备使用性能

(1) 由于稀土渗剂滴注管采用了水冷却防结焦的特殊装置及氮气冲洗程控系统装置, 保证了稀土渗剂不堵塞。

(2) 对连续炉渗碳介质流量盘进行改造, 保证了各种介质滴入流量的稳定性, 从而保证了稀土渗碳工艺的稳定性。

六、工艺装备改造重点

为避免稀土渗剂堵塞故障的发生, 以及使稀土渗剂达到良好控制效果, 在连续炉2~4区上加装稀土渗剂滴注系统, 如图5所示。

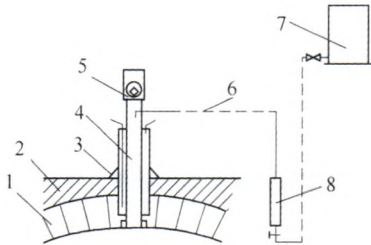


图5 稀土渗剂滴注系统示意图

1. 炉顶墙 2. 保温层 3. 滴注管固定 4. 滴注管 5. 不锈钢球阀
6. 输送管 7. 稀土甲醇高位箱 8. 流量计

七、工艺改进重点

稀土渗碳 (见图6) 与常规渗碳 (见图7) 不同, 一般采用较高的碳势 (3区: 稀土1.2%~1.4%; 常规1.05~1.15%), 充分利用渗碳炉2区预渗碳作用, 也采用较高碳势进行渗碳 (稀土1.15%~1.25%; 常规不控制, 显示0.70%左右), 适当控制扩散期碳势 (稀土1.05%~1.10%; 常规

0.90%~0.95%)。可将2、3区作为渗碳速度主控区, 尽量提高碳势; 将4、5区作为金相组织主控区, 通过降温或降低碳势等方法使表面过多的残留奥氏体析出细小颗粒状碳化物。在稀土渗碳工艺上对各区温度、碳势及介质流量等进行合理搭配与控制, 在保证渗碳速度增加 (稀土渗碳第一阶段) 的同时, 使渗碳层组织得到优化, 这是稀土渗碳技术为获得最佳金相组织 (第二阶段) 在控制方面所采取的关键手段。

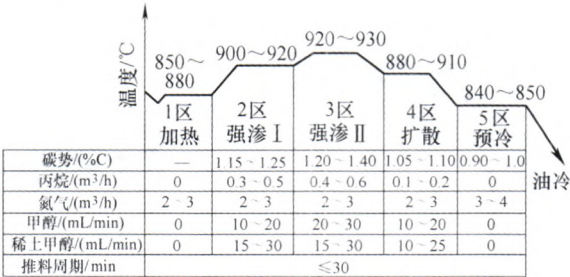


图6 稀土渗碳工艺曲线

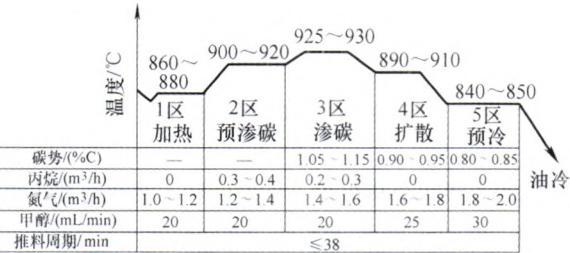


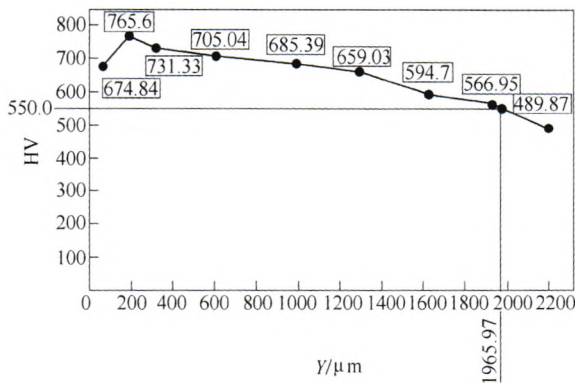
图7 原渗碳工艺 (未加稀土) 曲线

稀土渗碳效果与稀土加入量有关, 在渗剂中添加稀土并非越多越好, 而是有一个最佳值, 此最佳加入量范围与渗剂组成、渗碳炉容量、工件形状 (表面积) 及装炉量等多种因素有关, 一旦加入过量, 反而会使渗碳速度下降, 因此生产前需进行试验验证。可以说国内还没有一个完全相同的工艺。

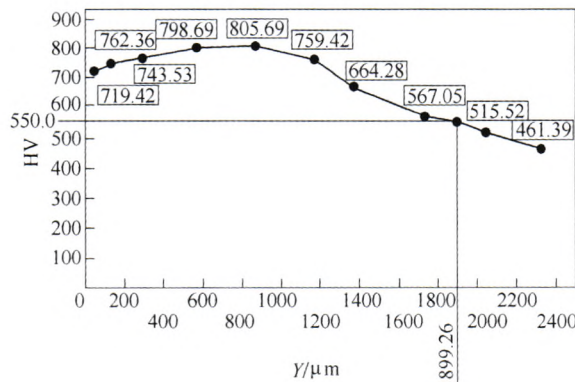
对于连续式渗碳炉及其他周期式渗碳炉, 初次使用稀土时, 需有一个预渗炉罐 (膛) 的过程。我公司采取发明专利 (201110327292.6) ——载重汽车弧齿锥齿轮在双排稀土渗碳设备上的热处理方法。

八、稀土渗碳效果

如图8所示, 表面硬度明显提高: 稀土渗碳后齿轮表面硬度平均提高近2HRC, 较好解决了表面硬度“低头”现象, 硬度分布得到改善。



(a) 常规渗碳工艺硬度分布



(b) 稀土渗碳工艺硬度分布

图 8

稀土渗碳金相组织：按原渗碳工艺热处理不够理想，组织级别波动较大，容易超级（见图9）；按稀土渗碳工艺得到细小弥散分布的颗粒状碳化物+少量残留奥氏体+细化马氏体（见图10）。



图9 常规渗碳工艺

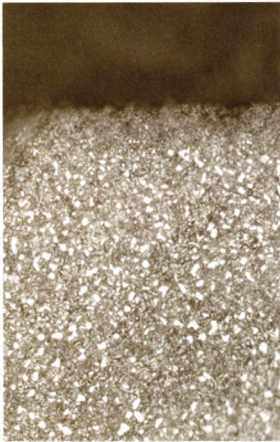


图10 稀土渗碳工艺

非马组织情况：原渗碳工艺得到非马氏体层深20~30 μm（见图11），稀土渗碳工艺得到非马氏体层深≤20 μm，较好地解决了齿轮表面硬度“低头”现象（见图12）。

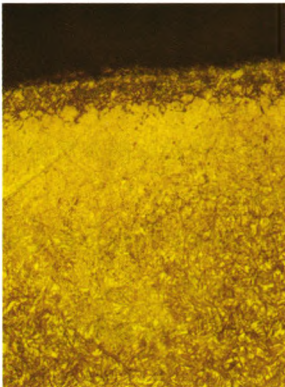


图11 原工艺的非马氏体

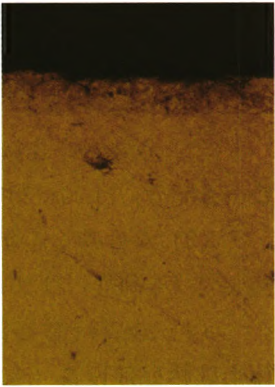


图12 稀土渗碳的非马氏体

稀土渗碳技术实施后质量稳定情况见表1。

表1 稀土渗碳检验统计（2009年5月）

日期（日）	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
硬化层深/mm	1.98	1.95	1.93	1.92	1.95	2.00	1.98	1.94	1.96	1.93
碳化物/级	2	3	2	2	3	2	3	2	3	2
马氏体/级	3	3	2	3	2	1	3	2	2	3
残留奥氏体/级	3	3	2	3	2	2	3	2	3	2
轴径硬度HRC	61.5	62	60.5	63	62	62	60	61.5	63	62.5

明显的稀土催渗效果：可提高渗碳速度（即生产效率）20%以上（见表2）。

表2

工艺	推料周期/min
原渗碳工艺	38
稀土渗碳工艺	30

九、稀土渗碳的“节能减排”效果

（1）节能效果 单位耗电量由2.04kW·h/kg下降到1.73kW·h/kg。降低耗电量15%以上，年节电70万元（见表3）。

表3 稀土渗碳技术实施前后单位物料消耗情况

工艺	项目	消耗物			
		电能/kW·h	丙烷/kg	甲醇/kg	稀土/L
原渗碳工艺	每1kg单耗	2.04	0.0065	0.038	0
	费用（元）	1.43	0.041	0.145	0
稀土渗碳工艺	每1kg单耗	1.73	0.0058	0.033	0.0004
	费用（元）	1.21	0.037	0.128	200

（2）减排 由于稀土渗碳后可提高渗碳速度20%，相应单位物料消耗降低，即相应减少了排放，以CO₂计算，每1kg齿轮降低CO₂排放15%以上。按同比齿轮年产量2000t计算，每年可减少排放600t左右。MW (20130619)