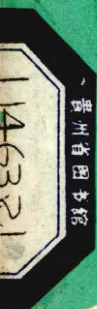


汽车齿轮材料译文集



1978

2

重庆重型汽车研究所

重庆重型汽车研究所赠

编辑出版发行	重庆重型汽车研究所 《汽车资料》编译组 (四川重庆4803信箱)
印 刷	重 庆 印 制 第 一 厂
出 版 时 间	1978年 月 日

内部资料

工本费： 元

内 容 简 介

在机械设计和制造工作中如何选择合适的材料，并能充分发挥这种材料的特性，对于产品的性能有很大的影响。本册就汽车齿轮设计中如何考虑材料问题，选择了三篇文章，其中包括：

1. 汽车齿轮加工技术和热处理技术的最近动向。

该文比较全面地介绍了近年来齿轮的加工技术和热处理技术的发展趋向。

2. 齿轮材料的选定及其热处理。

该文阐述如何选择齿轮材料，并介绍了重负荷齿轮新的热处理方法。

3. 提高疲劳强度的表面热处理法及其在设计上的问题。

该文着重论述表面热处理对提高疲劳强度的作用，并以齿轮、曲轴、花键轴、半轴为对象，从设计上来加以说明。

目 录

1. 汽车齿轮加工技术和热处理技术的最近动向..... (1)
2. 齿轮材料的选定及其热处理..... (19)
3. 提高疲劳强度的表面热处理方法及其设计上的问题..... (40)

汽车齿轮加工技术和热处理 技术的最近动向

在汽车工业中不论是重型车或轻型车，都存在着提高性能、提高可靠性、安全性、公害问题、降低成本、节省劳力等各种问题。基于这些目的，在齿轮的制造中，也进行着许多新技术的研究和应用。

众所周知，齿轮的设计不仅要考虑其疲劳极限的平均值或者最低值，而且也要考虑制造过程中的不稳定性，以制定其合理的安全系数。

为此在炼钢、毛坯成形，机械加工，热处理等制造过程和产
品检查中，要努力尽可能的制造既能大量生产，又能达到性能波动小，可靠性更高的齿轮。

齿轮是汽车的重要部件之一，大都是采用渗碳淬火等热处理方法以谋求提高其强度。

在这种热处理技术中为了取得齿轮的最高性能，减少质量波动，应采取各种措施。本文主要是对渗碳淬火齿轮有关造成强度波动的主要原因，以及降低其波动幅度的制造技术加以叙述。

齿轮的最佳渗碳淬火

(1) 材料的选择

用于汽车渗碳淬火的齿轮材料一般以 SCr21, SCr22H, SCM22, SCM24H 的铬钢，铬钼钢居多。最近也采用了锰钢，

锰铬钢，锰铬硼钢等。含镍钢虽然冲击疲劳寿命长，但是由于成本高，因此很少采用。在设计 and 热处理技术上我们认为采用比较廉价的材料，可以取得优异的性能。

(2) 怎样决定渗碳深度

为了取得高的疲劳强度、耐点蚀性，必须具有最佳渗碳深度。

图1表示光滑圆轴旋转弯曲时渗碳深度和疲劳极限之间的关系，从图中可以看出，以半径的25%左右的渗碳深度可以得到最高的疲劳强度。

齿轮必须根据齿的大小来选定其最佳渗碳深度。

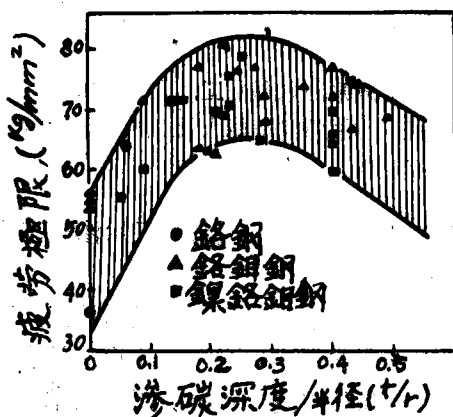


图1 渗碳深度和疲劳极限的关系

图2系表示齿轮径节与最佳渗碳深度的关系。当齿轮要求有高的耐点蚀性时，渗碳层深度就要稍深一点；如果齿轮要求有高的弯曲疲劳强度，渗碳层深度则要求稍浅一点。

图3系表示渗碳处理时对渗碳深度和热处理标准费用之间的关系。如图所示，由于渗碳深度直接关系到渗碳处理费用，因此

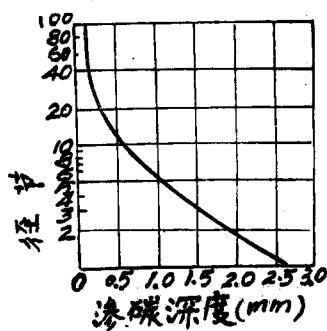


图 2 齿轮的最佳渗碳深度

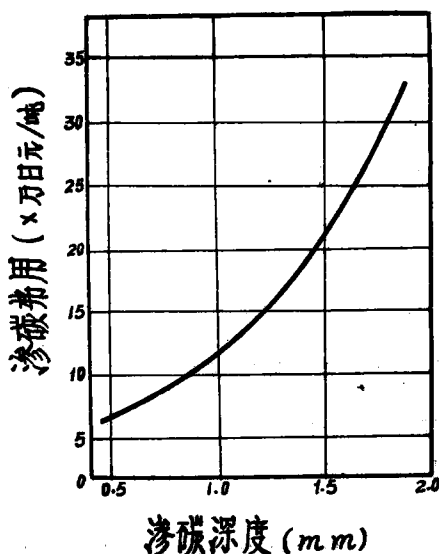


图 3 渗碳深度和标准渗碳处理费之间的关系

在选择渗碳深度时，也必须充份考虑其处理费用。

如前所述，由于渗碳深度的波动会造成齿轮强度的变化，因此在热处理过程中要自动控制其温度和时间，使其波动幅度减

少，通常渗碳深度的偏差应保持在 $\pm 10\%$ 以内。

(3) 采用淬透性控制心部硬度

齿根的表面残余压应力对齿轮的弯曲强度有很大的影响。这种残余压应力一般是由淬火所产生的表面与心部的硬度差来表示的。

因此从表面到心部的硬度梯度显得很重要，但是一般讲心部硬度是把齿根硬度作为质量控制目标。

齿根硬度的规定值在轻型车为 $H_{RC}28-38$ ，在重负荷齿轮上为 $H_{RC}32-45$ 。为了获得这种合适的齿根硬度，要以材料的淬透性和渗碳后的淬火方法进行控制。

为了降低齿根硬度的波动范围，因此在订货时不应采用材料的端淬淬透性带全宽，而应当按照较狭的淬透性带来购买。为了获得均一的心部硬度，汽车制造者认为在购买材料时，应把淬透性带的上、下限幅度差限制在 $H_{RC}8-10$ ，而且在此幅度内应按上、中、下分别进行批量管理，以及采用改变淬火时的冷却速度，这些措施对后面将要谈到的热处理变形，会得到良好的效果。

(4) 渗碳硬化层的性能和强度

齿轮表面渗碳硬化层的性能是齿轮强度的主要因素。渗碳硬化层的性能一般用表面硬度来代表，汽车齿轮硬度大致控制在 $H_{RC}58-63$ 。

在选择齿轮材料和热处理条件时必须考虑到与此表面硬度有密切关系的渗碳层淬透性、表面碳浓度，残余奥氏体量、内氧化等问题。

渗碳层的淬透性与前述齿根硬度有关的淬透性不同，它仅表示有关渗碳层的硬化性能，是相对于前者的心部淬透性而言，故

称为表层淬透性。对此渗碳层淬透性作用良好的元素以钼最为有效。一般用于渗碳的钢材中以 SCM24H 为最好，其次是 SCM-22H，SNM23H，象SCr21H SCr22H那样的铬钢是不好的。利用这种性能，在高接触表面压应力的齿轮上、象SCM24H那样渗碳层淬透性高的材料就用得很好。

表面碳浓度的波动小是齿轮性能上的重要因素之一，目前固体渗碳，液体渗碳几乎都已不采用，因而这种波动实际上也很少存在。虽然制造厂家对表面含碳量的规定不尽相同，但是大体上均采用0.8—1.0%之内。最近大部份气体渗碳炉采用红外线CO₂分析，能自动控制炉内气氛，因此表面含碳量的波动可限制在含碳量的±0.05%以内。

象汽车发动机的挺杆，只要求磨损良好，因而可以采用调正表面含碳量，使表面能析出游离渗碳体以降低磨耗。但是在齿轮上就不能采用类似于这种措施。

渗碳硬化层的抗回火性对高速旋转和滑动速度高的齿轮来说是重要的。虽然有添加Si、Al等以增加抵抗马氏体回火软化和添加Cr、Mo、V等元素采用高温淬火后500—600℃温度回火使碳化物析出，利用所谓二次硬化等耐热渗碳用钢，但是由于渗碳时Si、Al有内氧化产生和成本高等原因，所以只使用于特殊的齿轮上。

产生于渗碳淬火零件表面的残余奥氏体，由于过去认为对疲劳强度、耐点蚀性、尺寸变化等方面会给予不良的影响，因而采用了使奥氏体尽量少的热处理方法，但是最近已有了新的见解。由于明白了在残余奥氏体上施行喷丸处理后，能大大提高耐点蚀性、疲劳强度，所以与过去不同，可以认为存在有5—15%左右的残余奥氏体已成为一种有益的倾向。如后面所述，残余奥氏体量由于采用X射线衍射可以很好测定奥氏体含量的精度，所以可以肯定今后其含量的波动可以变得更加狭小。

由于渗碳时的气氛对Cr、Mn、Si、Al等元素的氧化性，因此这些元素在表面下会产生内氧化，促使表面的淬透性降低，在 $10-20\mu$ 左右深度处形成象托氏体那样的不完全淬透层。这种现象在现行的渗碳工艺中是必然会发生的，因而使表面的残余压应力变小，从而降低了疲劳强度。

因此当齿轮需要高强度时是不想采用锰铬钢、铬钢等渗碳用钢，这些齿轮采用铬钼钢较为适当，或者在渗碳周期结束时添加 NH_3 ，使N在表面上进行扩散，使降低的淬透性得以提高，以便减少不完全淬透性，这是目前减少疲劳强度波动所采用的热处理技术。

(5) 防止热处理变形的办法

齿轮的热处理变形对齿轮强度来说是非常重要的问题，也是促使产生噪音的原因。齿轮接触不好的齿轮由于局部接触而使接触面压应力增高，从而产生点蚀，或者招致齿根的早期损坏。为此在热处理过程中曾采用种种措施防止变形。

图4为汽车主传动被动锥齿轮模压淬火装置的剖面图，这种装置过去曾广泛采用。图中内上模(1)和外上模(2)系分别用压力压住齿的大小两端，下模(3)可以改变平面角度，扩展器(4)可以压住齿轮的内径。采用这四个机构分别改变其压力和平面，以固定来自渗碳炉的加热齿轮，用这种方法进行淬火可使热处理变形减少。再者，由于可以把淬火油的流量改成三个等级，所以可以考虑S曲线来制定热处理变形小的条件。

除此以外主传动主动锥齿轮淬火时则采用旋转滚柱淬火装置以限制其轴部变形。对内径尺寸要求有一定精度的传动齿轮套等，可用柱塞把内径加以限制而进行淬火的插塞式淬火法。采用这些淬火方法，可以减少热处理变形的波动范围，此外也采用材料装料时进行批量管理，使热处理变形减少。

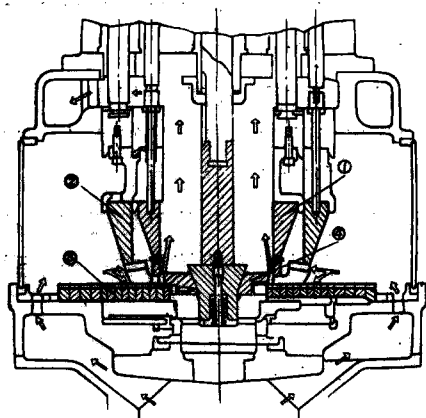


图4 齿轮模压淬火装置的剖面图
①上内模 ②上外模 ③下模 ④扩展器

(6) 采用无损检查法提高齿轮的可靠性

热处理齿轮过去是采用按批量取样切开来检验其渗碳深度，心部硬度，金相组织等。但是近几年来由于无损探伤法的发展，已采用无损的，不影响生产率的检查方法。由于是无损，所以可以使检查齿轮的数量多一些，因而可得到质量波动小，可靠性更高的齿轮。

渗碳深度的测定是采用计测材料的顽磁力，预先作成测量线，并能在数秒内进行测定。表面光洁度，氧化状态等是造成测定误差的主要原因，但是这些状态如果固定，则测量误差可以在 $\pm 5\%$ 内。

残余应力是影响齿轮强度的重要因素，虽然过去在实验室内作为研究项目加以测定，但是最近随着高性能和高可靠性齿轮的要求，已作为质量管理的一个环节进行测定。残余应力测定系把标识X射线射向物质，由X射线衍射测定晶面距离，从晶面距离的畸变程度以决定残余应力的大小，并求得其方向。最近由双线

检测器的采用，测定时间只要数分钟，并且由于也能测定齿根等复杂形状，因而已得到广泛的使用。

测定残余奥氏体的方法，可以根据由X射线衍射所采用的校正被衍射马氏体与奥氏体某一晶面的积分强度比的计算式来测定。最近由于制成了回转对阴极的强力X射线衍射装置，以及阶梯式扫描的应用等。因此精度已能很好测定到1%以下。还有采用校正式与计算机结合处理方法等均被一一用到大量生产工艺中去。

这种无损检查法的发展，为制造较高可靠性的齿轮，在技术上起了很大的作用。

其他热处理的齿轮

(1) 调质、高频淬火、软氮化处理

齿轮进行热处理的方法，除渗碳淬火工外，还有调质，高频淬火、软氮化等。采用调质处理的齿轮，一方面由于机械加工成为最后加工，所以有必要选择使齿轮的齿根硬度获得充分淬透性的材料。但是另一方面通常考虑到大量生产，如果硬度不在 H_B300 以下，则切削性就有问题，因此作为需要高强度的齿轮是无法采用的。

由于采用渗碳时需要防止渗碳，所以特殊的大型齿轮等都采用高频淬火。进行高频淬火时，表面硬度和淬火形状是很重要的，沿齿形轮廓淬火的齿轮虽然疲劳强度优异，但是考虑到成本，一般都采用图5所示的穿透淬火方法。

软氮化处理（盐浴氮化）是在以 KCN 、 KCN 为主要成份的 570°C 盐浴中，使齿轮表面处形成 $10-20\mu$ 左右的氮化物层及在此层下氮的扩散层，以提高耐磨损和疲劳强度的表面处理。由于它是在钢的相变点下进行处理，热处理变形小，所以能很好地

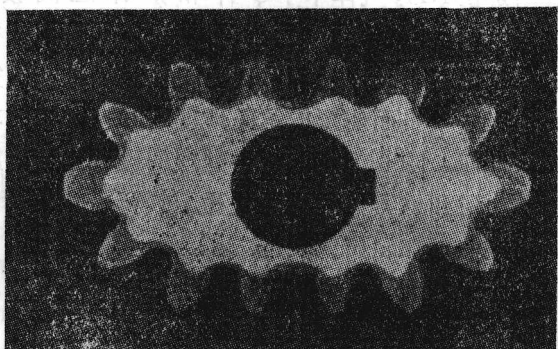


图 5 椭圆齿轮的穿透高频淬火。

用于发动机正时齿轮等。在采用这种热处理时得到的热处理变形还可以更小些，如要求轮齿接触误差更小的话，处理前可先在 570°C 以上的温度进行消除加工应力退火是相当有效的。

近年来在气体气氛中进行这种氮化处理，已经很为盛行。这种处理是采用RX渗碳气体再在NX无氧化保护气体和 NH_3 混合气氛中处理。由于成本和处理设备在消除公害上有优点，所以近来特别盛行。

综上所述，在所进行的热处理齿轮上都有各自的特征，因此在考虑了这种特征与成本、生产率的关系之后，就必须选定齿轮的材料和热处理。

(2) 新的热处理方法

作为新的热处理方法，引人注目的有真空渗碳、离子氮化、硼硬化等。真空渗碳是把零件在真空下加热到渗碳温度，由于在

装有真空的炉内导入渗碳气体，因此可以使渗碳时间缩短。

离子氮化是在 NH_3 气体中于零件和炉体之间接上 100—1500V 的直流电压，由于零件表面离子化，氮从表面进行扩散，因此与过去的氮化相比时间较短，现在正在继续进行研究。

硼硬化处理是在表面使形成维氏硬度 2000—3000 的非常坚硬硼化物的表面处理。图 6 为用电解法处理的硼硬化层。应用于齿轮时，由于硬化层和铁素体的交界处易于损坏，并有剥落的缺点，因此尚需进一步加以研究改进。

这些新的热处理方法，今后尚有待于进一步研究应用。

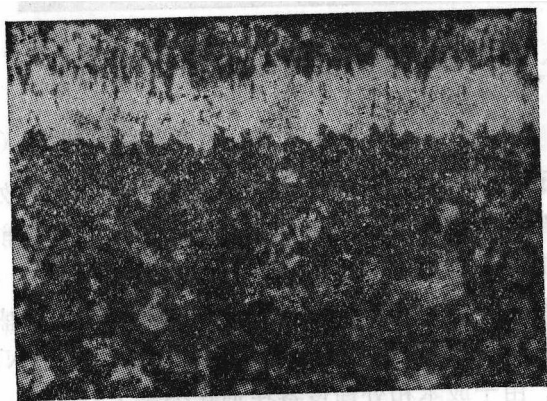


图 6 硼硬化层
腐蚀: PPP 腐蚀后 5% 硝酸酒精溶液

×500

齿轮加工技术的新动向

随着采用价格低廉的材料，以及制造性能高，误差小的齿轮技术的发展，汽车用齿轮已开始用低合金钢代替高合金钢，不过这种趋向是很缓慢的，这几年来这些高合金钢与低合金钢比例几乎没有变化。

作为最近汽车用齿轮的加工技术，在机械加工方面，有使生产率提高的快削钢的应用，还有过去作为机械加工前的齿轮毛坯成形方面已经采用了冷锻等塑性加工，最近由于新技术的发展，塑性加工和机械加工之间的距离已经缩小了，其中有的已经全面代替了机械加工。

(1) 快削钢的应用

在机械加工中由于自动化和数控等加工技术的发展，要求工具寿命长和切削速度高。随着这种情况的出现，作为汽车用齿轮材料快削钢的需要已迅速增长。

另一方面齿轮的齿根形状对疲劳强度影响很大，因为齿根一有阶梯出现，不仅会扩大缺口效应，并且是使切齿加工的齿轮强度波动扩大的主要原因。最近发展的刀具顶部能加工齿根为全圆角的工具已经得到了应用，在使用这种刀具时，以及要求齿面加工有良好的表面状态，最近快削钢的使用已成为其必要的条件。

用于汽车齿轮的快削钢中添加 0.10—0.30% Pb 的铅快削钢，和添加 0.04—0.07% S 的硫快削钢，约占全部快削钢的 80—90%，这些快削钢在低切削速度范围内是良好切削性的钢种。近年来在高切削范围内已发展应用有良好切削性的钙脱氧快削钢。在实际

齿轮机械加工中，同一齿轮要进行低切削速度和高切削速度的加工，以及由于最近已开始注意采用硬质合金刀具的切齿加工，所以钙脱氧的快削钢已经以钙硫快削钢和钙硫铅快削钢那样的复合快削钢的方式来使用。

为了不降低齿轮的性能范围，在快削钢的应用中添加了提高切削性元素要造成材料费用的提高，由于可以从加工费的降低得到补偿，所以最后成本反而变得低廉，因此可以认为其需要量会进一步得到增长。

（2）优点多的冷锻、温锻

冷锻、温锻、精密锻造、烧结锻造等最近已成为很盛行的齿轮塑性加工。不仅生产率高，材料利用率好，而且与切削加工相比齿根形状可以做得更加良好，同时由于也具有能改善公害、劳动环境等其他方面的优点，因而已得到积极的采用。

在再结晶温度下所进行的加工方法中，常温进行的冷锻具有材料利用率高，加工件机械性能改善，以及精度好等优点，用于轿车的差速器行星齿轮等比较小型齿轮上，由于可以完全省去齿的切削，可以显著提高生产率，因而已被广泛采用。

冷锻由于是种常温加工，因此金属的内部阻力大，需要大容量的压机，模子的寿命也短，并且对合金钢来说加工性不好，以及由于在大形齿轮压制时因压床容量小等理由无法采用冷锻而改为热锻，在这种情况下广泛采用精密锻造。一般的热锻由于热量关系易使模子磨损、氧化等而造成精度不好，因此最后机械加工的加工余量也大，材料的利用率也差。为此近年来已研究采用热锻和冷锻中间温度的方法，其中有在 $150-450^{\circ}\text{C}$ 进行的温锻，以及在 $600-800^{\circ}\text{C}$ 进行的所谓半热锻造。作为温锻的应用例子有轿车双曲线主动小齿轮的毛坯，这种锻造法可用大约为热锻原材料重量的60%进行制造。

冷锻和温锻不能各自分别应用，在美国的齿轮毛坯制造中似乎也有锻粗加工时采用冷锻，成形加工时采用温锻二者并用进行的锻造方法。

温锻时重要的是温度控制，作为其加热方式有高频感应加热，直接通电加热、火焰加热等。由于高频感应加热容易引起表面和中心的温差，火焰加热温度也容易不均匀，因此目前采用的加热方法以直接通电法居多。

在与冷锻、温锻盛行的同时，适应于这些加工法的原材料也开始进行研制。基于大部分合金元素对变形的抗力都很大，其中尤以碳的影响为最大，硅次之，因此以铝脱氧的钢材显示出良好的结果。考虑到淬透性与变形抗力，添加硼的钢材是良好的，并在其中添加铬、锰显示了良好的性能。由于采用了这种变形抗力小的钢材，因此可以省去中间退火、减少工序数和提高生产率。

还有，采用冷锻，温锻和机械加工的组合作以制造复杂形状的齿轮最近也越来越多了！在这种情况下使用快削钢也显得多了，随着这种情况的出现，就产生了提高切削性能元素对冷锻、温锻性能的影响问题，有关这方面问题的研究正在进行。在提高上述快削钢的切削性能元素之中，钙对变形抗力的影响最小，硫、铅会使变形能力降低，由于铅在 250℃ 会扩大其不良影响，因此在温锻时不适宜采用此温度。

于是，可以认为随着冷锻、温锻研究的进展，在最近的将来 80% 的汽车齿轮会采用这些加工方法。

(3) 粉末冶金的成本问题：

粉末冶金齿轮过去只应用于轻负荷的小型齿轮等，然而由于烧结锻造的发展和热处理方法的采用，目前也已经用于汽车上重要的齿轮。

作为使用在汽车的例子，有轿车上的差速器行星齿轮，该齿