

齿 轮 热 处 理
研 究 集

国防工业出版社

齿轮热处理译文集

《齿轮热处理》编译组 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本文集从国外期刊上选择了有关齿轮化学热处理方面的文献12篇,内容主要是渗碳、碳氮共渗和氮化齿轮的选材及热处理工艺,齿轮热处理缺陷和防止方法,齿轮在使用中的损伤形式及其原因。

本书可供从事齿轮热处理以及设计、检验的工人和技术人员参考。

齿轮热处理译文集

《齿轮热处理》编译组 译

*

国际工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

太原市南郊小店印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 7³/₈ 157 千字

1980年2月第一版 1980年2月第一次印刷 印数: 00,001—23,000 册

统一书号: 15034·1822 定价: 0.78 元

前 言

齿轮是航空发动机、机车车辆、农业、矿山和石油机械等多种机械和机床必不可少的基本零件。齿轮质量的优劣，直接影响到各种机器使用的可靠性和经济性，从而也关系到我国国防工业、机械工业现代化和农业机械化的进程和速度。

要提高齿轮的质量和使用寿命，就需要合理地选择齿轮用钢，正确地制定齿轮热处理工艺规范和防止齿轮在热处理中可能出现的缺陷和在工作中的损伤。为此，我们遵照毛主席关于“洋为中用”的指示，查阅和收集了美、英、日、苏、法、西德等国的有关齿轮热处理的资料，并将其中一部分翻译、整理，以译文集形式出版。

译文集的内容包括：1. 表面硬化齿轮用钢的选择；2. 齿轮化学热处理（渗碳、碳氮共渗和氮化）工艺；3. 齿轮的热处理缺陷及其防止方法；4. 齿轮在齿轮中的损伤形式及其原因。此外还选译了几篇其它内容的文献。

本书由有关厂所院校翻译、校对，并由陆尔伯最后校核和编选。由于水平所限，文集中还会有翻译错误和遗漏之处，恳请读者批评指正。

《齿轮热处理》编译组

目 录

齿轮材料和热处理.....	1
承受滚动疲劳的机械零件渗碳处理问题.....	13
渗碳齿轮的热处理.....	43
齿轮在流动粒子中的化学热处理.....	60
真空渗碳的应用.....	67
碳氮共渗研究.....	76
齿轮低温碳氮共渗	112
盐浴软氮化在齿轮制造中的应用	119
大小齿轮在淬火与渗碳时的尺寸变化	139
齿轮的热处理变形以及几个冶金参数对 使用性能的影响	145
齿轮——防止热处理变形方法的实例	160
防止齿轮热处理变形的措施	202
附录 1 国外常用的齿轮钢号	216
附录 2 美国航空和宇航渗碳齿轮推荐工艺	221

齿轮材料和热处理

大和久重雄

1. 齿轮类别和性能要求

齿轮一般总是经热处理后再使用，这样比较保险。因此，按热处理工艺的不同可将齿轮大致分为四类：（1）渗碳齿轮；（2）高频或火焰淬火齿轮；（3）调质齿轮；（4）正火齿轮。渗碳齿轮和高频或火焰淬火齿轮，由于高的表面硬度和好的心部韧性这两个优点妥善地得到结合，所以具有耐磨、耐疲劳和耐点蚀等良好的特性，可以说是齿轮中最好的。大多数齿轮均属此类。调质齿轮适合于作中小型、中等载荷和轻载荷齿轮用。正火齿轮主要作船用大型无噪音齿轮用。这类齿轮是将正火毛坯切齿后就直接使用，因而，非常忌讳热处理引起的淬火变形，它的设计重点是防止噪音，而避免齿面磨损是次要的。为了使齿面保持良好的接触状态，多半是经镀铜后使用。

如上所述，最重要的齿轮是表面硬化齿轮，因此，下面主要介绍这种齿轮。齿轮的表面硬化方法有渗碳、高频淬火和火焰淬火，所要求的性能为下列三项：（1）耐磨性好（齿面）；（2）耐疲劳强度高（齿根）；（3）耐点蚀性高（齿面接触部分）。当然，切削加工性和成本等因素也应加以考虑，但这些因素可以说是属于第二位的。

渗碳齿轮是将低碳钢齿轮毛坯渗碳,再经淬火而硬化的,它具有耐磨和耐点蚀等优异性能。这是因为钢的含碳量越高,其耐磨性和耐点蚀性越好。高频淬火和火焰淬火主要是用来对 S 45 C (0.45 % C) 之类中碳钢进行硬化,表面硬度虽然相当高,但因其含碳量低,耐磨性并不好,而对于提高耐疲劳性能则卓有成效。简言之,当以提高耐磨性为主要要求时,最好采用渗碳;当以提高耐疲劳强度为主时,最好采用高频淬火和火焰淬火。这样看来,渗碳齿轮的性能还是比较全面的,它不仅耐磨,而且也耐疲劳。因此,本文着重阐述渗碳齿轮用钢的选材及其使用方法。

2. 应考虑的必要条件

作为渗碳齿轮,应考虑以下几点:(1) 渗碳层(表面)的显微组织;(2) 渗碳层深度(有效渗碳层深度的硬度为 HRC50);(3) 合金元素含量;(4) 切削加工性;(5) 成本等。

齿轮的轮齿必须不发生弯曲,并且能够耐压。由于轮齿的接触部分发生大的滚动和滑动,而这种滑动就是齿面产生点蚀(剥落)的起因。滑动是以节圆为界朝相反的方向进行,所以两侧的疲劳裂纹也向相反的方向扩展,这种疲劳裂纹就成了滚动疲劳即点蚀的起因。图 1 表示这种疲劳裂纹。从图中可清楚地看出,以节圆为界,两边的裂纹方向彼此相反。其次,由于齿轮的轮齿承受交变弯曲应力,齿轮会产生弯曲疲劳。再次,在齿与齿的啮合处产生的摩擦热,使油膜破裂,从而造成胶合。当齿轮的接触压力过大时,容易发生胶合,而且还发生磨损,因此,必须使齿面的硬度提高。此外,在

选择齿轮用钢时，还须对其经济性、加工性、易切削性和热变形特性等因素进行考虑。

设计齿轮时，必须进行下列各项计算：

- (1) 保证规定强度所需的径节；
- (2) 轮齿接触处的赫兹应力（传动齿轮）；
- (3) 齿根弯曲应力（主要是小齿轮）；
- (4) 轮齿接触处的接触载荷（小齿轮）；
- (5) 轮齿啮合处的摩擦温度；
- (6) 过载程度和次数。

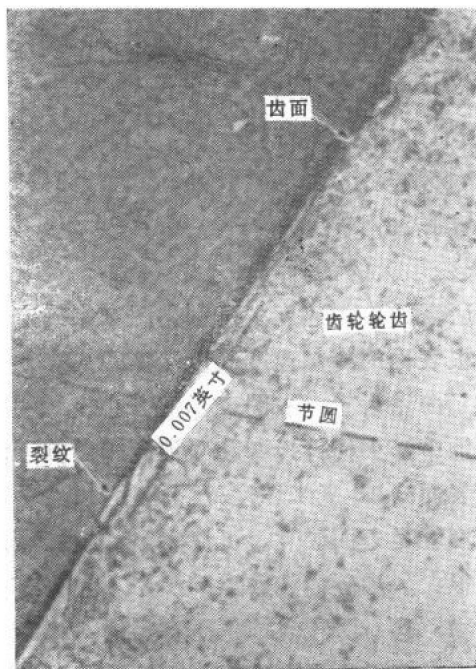


图1 齿轮节圆处的齿面裂纹
(节圆上下裂纹的方向相反)

根据 AGMA (美国齿轮制造协会) 推荐,

- (1) 压应力—— 154 公斤/毫米^2 ;
- (2) 弯曲应力—— 63 公斤/毫米^2 ;
- (3) 接触应力——剪切屈服极限的 55 %;
- (4) 胶合温度—— 260°C 。

合金钢 (含铬、镍、钼) 能满足上述条件, 而碳素钢、锰钢、硼钢只能承受上述应力的 80 %。

3. 钢材的选择

要问渗碳齿轮应选用什么钢种这个问题, 倒不如从反面回答不能选用哪些钢材。渗碳齿轮不得采用下列的钢种:

- (1) 非金属夹杂物多的钢;
- (2) 切削加工性差的钢;
- (3) 粗晶粒钢和铝脱氧钢 (铝脱氧钢在渗碳时易产生反常组织, 而硅脱氧钢较好);
- (4) 淬火变形大的钢种等。

齿轮硬化所需的冷却速度, 可利用图 2 来确定。图 2 给出了径节与齿根表面的冷却速度 (以端淬距离表示) 之间的关系。左图表示薄壁齿轮, 右图表示实心小齿轮的情况。这两张图都是在油中淬火搅拌冷却和喷油冷却的例子。表面冷却速度是在距表面 0.15 毫米深度处测得的。当然, 可以认为这个部位的硬度就是表面硬度。可以看出, 搅拌冷却和喷油冷却速度差别很大。渗碳齿轮的渗碳层中不允许有贝氏体组织和网状碳化物, 这对防止点蚀也是有用的。

表所列是为了确保齿根硬度大于 HRC60 所需的冷却速度, 以及与此速度相适应的钢种。例如, 有一个径节为 5 的

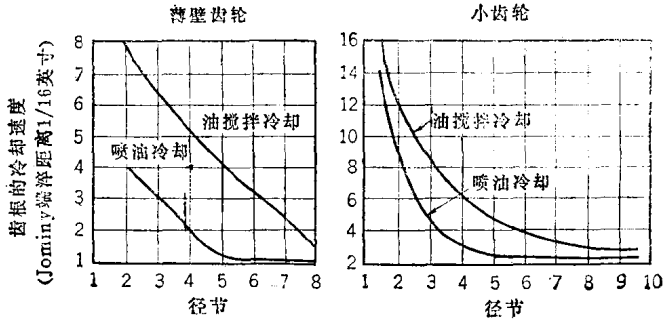


图2 径节与齿根表面冷却速度之间的关系

(与表一起使用, 选择齿轮用钢种)

适合于渗碳齿轮用的钢种(SAE钢号)

获得淬火硬度 HRC60 所需的冷却速度, 端淬距离× $\frac{1''}{16}$	直 接 淬 火			重新加热淬火		
	渗 碳 层 的 含 碳 量 %					
	1.10	0.90	0.80	1.10	0.90	0.80
1	1018	1018	1018	1018	1018	1018
2	1524	1524	1524	1524	1524	1524
3	4026	4026	4026	8620	8620	4118
4	4118	4118	4118	8620	8620	8620
5	4118	4118	4118	8620	8620	8620
6	8620	8620	8620	8720	8620	8620
7	8620	8620	8620	8720	8720	8720
8	8720	8720	8720	8822	8822	8822
9	8822	8822	8822	8822	8822	8822
10	8822	8822	8822	8822	8822	8822
11	8822	8822	8822	4320	8822	8822
12	8822	8822	8822	4320	4320	4320
13	8822	8822	8822	4320	4320	4320
14	8822	8822	8822	4320	4320	4320
15	8822	8822	8822	4820	4820	4820
16	8822	8822	8822	4820	4820	4820
18	4320	4320	4320	4820	4820	4820
20	4320	4320	4320	4820	4820	4820
20以上	4320	4820	4820	9310	9310	9310

薄壁齿轮在搅拌的油中淬火时，可从图 2 求出冷却速度为端淬距离 4.2 (1/16 英寸单位)，再从表查出，为了确保齿根硬度 HRC60，若渗碳后直接淬火时，应采用 4118 钢；若渗碳后重新加热淬火，则应采用 8620 钢。若不允许出现贝氏体，则应选用淬透性更好的钢（即端淬距离更大的钢）。

4. 必须防止点蚀

如上所述，在确定表面硬度和显微组织之后，下一个问题是如何防止渗碳层发生点蚀。点蚀是表层下部由剪切作用引起的疲劳破坏。因此，要防止点蚀，就须增加渗碳层深度以及提高表面强度。根据最近的研究，渗碳层中存在一定数量的残留奥氏体(10~20%)，可有效地防止点蚀。因而，希望积极地发挥残留奥氏体的作用。为了防止点蚀，还必须规定 HRC 为 50 的硬化层的最小深度。为此：

(1) 如图 3 所示，在轮齿的最低接触点处绘一条直线与齿面垂直，与轮齿的中心线相交，其交点与最低接触点之间的长度为 L ，求出在 $L/2$ 处的冷却速度；

(2) 根据齿面需要形成的显微组织选择淬透性适当的钢种；

(3) 根据心部硬度达到 HRC30~45 的要求，选择钢的含碳量（含碳量小于 0.3% 为宜）；

(4) 硬化到 HRC50 的深度按下式计算：

$$CD = \frac{12 \times 10^{-6} P_t}{B \cos \theta}$$

式中 CD ——硬化层深度 (HRC50) (英寸)；

P_t ——作用于齿的切向力 (磅)；

B ——齿宽 (英寸);

θ ——压力角。

表层下的硬度随含碳量而异, 渗碳层的含碳量越高, 或者含碳量相同而合金元素越多, 则冷却速度越快, 表层下的硬度就越大。如果要求在指定的深度处具有所需的硬度时, 那么可采用中合金钢、增加渗碳层深度和提高冷却速度等措施。

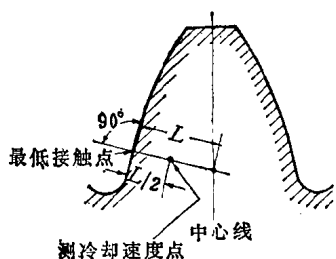


图3 求轮齿冷却速度的点

第二种可选择方法是, 减小渗碳层深度, 把淬透性好的钢在强制油搅拌的状态下进行淬火。对于齿数少的大型齿轮, 采用高合金钢、中等冷却速度是合适的。

对于 SAE4320 (SNM23) 和 4820 类中合金钢, 表面层下 1.5 毫米邻近处的含碳量每增加 0.10%, HRC 增加 3 个单位 (此处的冷却速度相当于端淬距离 J3~J9)。为了保证具有适当的扩散层, 重要的是应使硬化层总深度为渗碳层深度 (有效深度) 加 0.5 毫米; 对于小齿轮, 加 $\phi 0.25$ 毫米即可。当渗碳层中的含碳量一定时, 理想临界直径 (D_1) 每增加 1 英寸时, 表面层下的硬度 HRC 约增加 $3 + \frac{2}{3} \times$ 冷却速度 (以端淬距离表示, 单位为 1/16 英寸)。例如, 设表面层下含碳量为 0.4%; 以 J9 的冷却速度冷却, D_1 增加 1 英寸, 则硬度增加 $3 + \frac{2}{3} \times 9 = 9$, 即 9 个 HRC 单位。上述公式仅适用 0.17~0.25% C 的渗碳钢。然而, 对于淬透

性 (D_1) 好、近乎达到 6 英寸的钢, D_1 每增加 1 英寸时的硬度增加比就降低。因此, 提高冷却速度可以增加表面层下的硬度。要想增加渗碳层深度, 可以选用高合金钢, 但导致成本增加、机械加工费用增加。若要提高心部硬度, 也可选用含碳量较高的钢, 例如, 用 8622 钢 (0.22% C) 代替 8620 钢 (0.20% C)。虽然强制搅拌可加大冷却速度, 然而必须注意, 不均匀的搅拌将会使淬火变形增加。

5. 渗碳表面层含碳量的选择

通常, 齿轮表面含碳量为 0.85~1.00% (大于 0.70%), 而实际应根据轮齿相互间的滑动量的大小调整表面含碳量。滑动量越大, 表面含碳量应越高, 这对防止胶合是有效的。此外, 渗碳层中如有 15~25% 残留奥氏体时, 有助于抗滑动磨损和点蚀。含碳量应从渗碳层向心部逐渐地减少, 其减少的比率以深度每增加 0.25 毫米含碳量最少降低 10% 为宜。但是, 这仅对重载齿轮、渗碳层深度大于 1.25 毫米者而言。

6. 对淬火组织的要求

淬火组织的必要条件是没有网状碳化物。无镍合金钢的重新加热淬火温度最好取 840°C (渗碳层中含碳量小于 0.9%)。但是, 在直接淬火时不必担心网状碳化物的析出。无论是重新加热淬火、还是直接淬火, 淬火方法对淬火组织影响极大。直接淬火时, 温度稍低于渗碳温度, 在 840°C 下淬火。这样做是为了控制残留奥氏体量。无论是重新加热淬火, 还是直接淬火, 齿轮的性能是相同的。直接淬火时:

- (1) 即使是低合金钢也不易出现贝氏体组织;
- (2) 淬火变

形小；（3）马氏体针中易产生显微裂纹（当含碳化物形成元素多时，或马氏体针粗大时，容易产生这种显微裂纹）。一旦产生显微裂纹，疲劳性能就降低。这种显微裂纹可通过控制渗碳层中的含碳量和淬透性等措施加以克服。但是必须注意，当钢中不含镍而用锰、铬和钼等元素来提高淬透性时，容易产生显微裂纹。

渗碳齿轮直接淬火时，含有15~30%残留奥氏体，齿轮硬度只要不小于HRC57，残留奥氏体不致成为问题。齿轮制造人员认为，残留奥氏体提高齿轮的性能，是好的。含有25%残留奥氏体的齿轮经喷丸强化后提高了抗疲劳性能。为了消除残留奥氏体，使用冷处理虽然增加了齿面硬度，然而却导致抗点蚀性能减弱，这方面已有许多数据可予证实。因而有人建议，渗碳齿轮不需冷处理让其有残留奥氏体而直接使用。残留奥氏体在使用过程中，在表面压力大的地方产生类似于奥氏体形变处理之类的强化作用而使其硬度、强度增加。由于它与喷丸强化表现出同样的行为，因而效果也相同。但是必须注意，当存在残留奥氏体时容易产生磨削裂纹。图4是这种磨削裂纹的例子。对于齿轮中存在残留奥氏体的利弊还是一个需要慎重探讨的课题。

重新加热淬火适用于高合金钢齿轮和需要快速冷却的齿轮。虽然直接淬火容易产生显微裂纹，然而重新加热淬火却引起网状碳化物和脱碳等问题。

齿轮渗碳大部分是气体渗碳（包括滴注式）。在由CO和少量CO₂气体组成的可控气氛中渗碳时，有时候产生表面氧化和晶界氧化（见图5），其深度最大约0.05毫米。这主要与钢中所含的硅和锰有关。对于大多数齿轮来说，虽然危

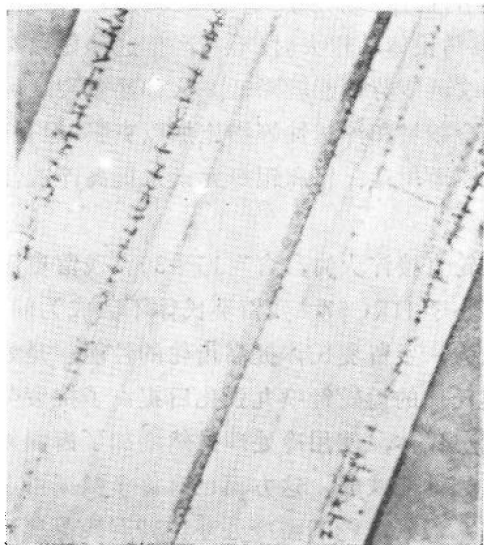


图 4 由于残留奥氏体产生的磨削裂纹(花键轴)

害程度不大，但是还是使用低硅钢（真空除气）为好，渗碳时使用富 CO 气体作载气。

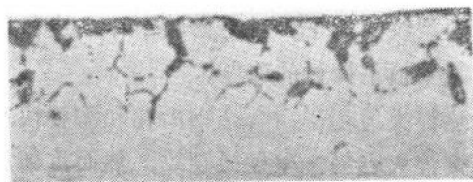


图 5 渗碳齿轮表面附近的晶界氧化(8620钢)($\times 408$)

7. 心部含碳量和硬度的确定

所谓心部硬度实际上系指轮齿中心线处的硬度。如果点蚀得到解决，心部硬度就不是重要的问题。当着重考虑齿根

的弯曲疲劳时，就应设法提高齿根表面的残余压应力。最好是渗碳钢的含碳量要低，渗碳层深度不要太深，表面和心部的含碳量差别越大，残余压应力就越大，弯曲疲劳强度就提高。无疑，如果对齿根进行喷丸，性能将更进一步提高。认为渗碳层深度通常取作模数的 0.2 倍是适当的，无论是比它浅、还是比它深，结果均不佳。心部的显微组织应达到完全奥氏体化，没有块状铁素体存在。

8. 表面硬度的确定

渗碳齿轮表面适当的硬度为 HRC62~63、即锉刀锉不动。用锉刀检查软点和局部脱碳是很方便的。此外，用锉刀锉时还能估计表面残留奥氏体量，硬度低时，用锉刀能锉动，表示残留奥氏体多，如果进行冷处理，硬度就提高。为了防止胶合和提高耐磨性，硬度应大于 HRC60。为此，在 150°C 以下回火（一般情况下在 180°C 回火）。回火温度低时，必须注意磨削裂纹的产生。大型齿轮大多在 190~200°C 回火，硬度 HRC55，虽然磨损较大，然而由于轮齿接触面变宽，使载荷均匀分布，运转时的噪音就小。

9. 韧性和短时疲劳寿命的关系

当齿根承受的弯曲应力大于 70 公斤/毫米^2 时，运转一定时间之后，若完全无损，则其短时疲劳寿命是好的。变速箱齿轮在运转时，其承受的冲击载荷往往超过静扭矩的 8 倍以上，因此在这种情况下，疲劳寿命按 $N=200,000$ 计算。这时，要求韧性和强度兼备，而且还要耐胶合和磨损，使问题变得更加复杂。经济而有效的方法是回火到 HRC55~60。这样做，

耐点蚀、弯曲疲劳强度、耐磨性、耐胶合性等有所降低，然而这样低的硬度对间断使用的零件确有成效。此外，对有韧性要求的齿轮，用含镍钢最恰当。

10. 对点蚀的考虑

对于渗碳齿轮若是因齿根处弯曲疲劳而损坏，则可根据金属学的知识来解决。譬如损坏在使用次数 $N=500,000$ 以下发生的，则将高镍钢在较高温度下进行低温回火，或者齿根进行喷丸。如果需要 $N=1,000,000$ 次时，最好改用低碳高合金钢。当然，在这种情况下，必须采用强烈淬火冷却，这样就在渗碳层内产生大的残余压应力，从而提高疲劳强度。此外，由于存在铝之类的大块夹杂物而容易产生疲劳损坏，因此最好用非金属夹杂物少的镇静钢。

如果齿轮因点蚀而损坏，则应首先变更设计，降低齿面接触压力，因为在很多情况下这是由于赫兹压力的计算错误造成的。当然，齿啮合的调整也是很重要的。点蚀机理是在赫兹压力的最大拉应力处产生的一种疲劳破坏，与接触处的滑动有关，当然，还与接触处的摩擦及摩擦热所产生的应力有关。点蚀也发生在非金属夹杂物存在的地方。对于残留奥氏体可有效地防止点蚀的实际试车结果应予以重视。

译自《金属材料》1972年10月 Vol. 12, №10 (日文)