

论我国渗碳齿轮制造中的若干问题（上）

郑州机械研究所（河南 450052） 陈国民

【摘要】 渗碳淬火工艺在齿轮制造中占有重要的地位。近年来，我国齿轮渗碳淬火工艺取得了长足的进步，但仍然存在一些深层次的技术问题。本文就齿轮钢材冶金质量和锻件质量、渗碳齿轮毛坯的预备热处理及渗碳后的冷却工艺、齿轮的接触疲劳和弯曲疲劳强度、心部硬度和组织，以及表面含碳量等与齿轮生产和应用密切相关的问题进行了分析讨论，并提出了一些改进意见。

我国齿轮工业近年来发展十分迅速，全国齿轮生产总值已达 700 亿元（人民币），而且各类齿轮都得到全面发展。在车辆齿轮方面，我们已能批量生产各类汽车、工程车、拖拉机、摩托车渗碳淬火齿轮；在工业齿轮方面，已能生产功率达 6.5 万 kW、线速度 210m/s、直径达 4m 的渗碳淬火齿轮，基本上能满足冶金、矿山、石化、起重运输、建材机械及航空航天飞行器、船舰发动机等高参数齿轮生产的要求。

我国齿轮渗碳淬火设备和工艺由于现代材料及电子信息技术的发展，使得几十年来困扰我们的碳势控制问题从硬件和软件得到了根本解决，而且根据齿轮生产特点，通过技术改造已经形成了多用渗碳炉、连续渗碳炉、直径达 5m 的各种规格井式渗碳炉以及真空渗碳炉的完整体系，完全能够满足各类齿轮生产的需要。应当说，我国齿轮的渗碳淬火技术已进入了一个新的阶段。

然而，如果从齿轮钢材冶金质量和锻件质量、齿轮疲劳强度和可靠性，以及热处理生产工艺等方面进行分析，尚存在一些问题，这些就是我们与国外先进技术水平差距，也是我们今后的努力方向，当然，其中也有一些属于需要探讨的问题。

一、渗碳齿轮钢材的冶金质量

钢材冶金质量是保证渗碳齿轮强度的基础。随着齿轮承载能力的提高及可靠度的严格要求，便对齿轮钢材的内在质量提出了高的要求，如在 ISO 6336—5 及 GB/T 8539 中就明确提出：钢材在钢包中脱氧及精炼，并真空脱气；浇注过程应有防氧化措施，最高含氧量 2.5×10^{-5} ，并按夹杂物检验方法检验 A、B、C、D 四类夹杂物，这表明对钢材的纯净度十分重视。我国目前齿轮钢

材冶金质量与国外先进水平相差很大，这也是影响我国渗碳齿轮强度性能和工艺性能的重要原因之一。

1. 钢材冶金质量对性能的影响

钢材的冶金质量包括化学成分；低倍缺陷，如偏析、缩孔、疏松、白点等；高倍缺陷，如非金属夹杂物、带状组织及混晶等。

以下就低倍偏析和高倍非金属夹杂的缺陷进行分析。

（1）钢材的低倍偏析 偏析是钢中化学成分及其杂质的不均匀分布现象，它是钢在冶炼及结晶过程中形成的一种常见缺陷，钢的偏析会对性能产生不利的影响。

一是对淬透性的影响：由于钢材成分偏析而引起钢材淬透性及显微组织的变化不同，图 1 显示了这种结果。

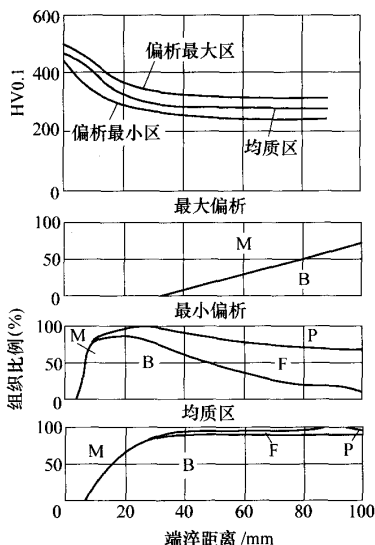


图 1 25CrMo4 钢的淬透性曲线及显微组织

从图 1 中曲线看到,在端淬试样的冷却速度范围内,合金元素聚集区转变成 M 或 B。而合金元素贫化区则转变成 P + F + B 的混合组织,相应的端淬曲线带宽就扩大,这对齿轮的生产自然会带来不利的影响。

二是对力学性能的影响:偏析降低钢材的 A、Z、 α_k 塑性、韧性性能,随着偏析程度的增加,不但性能降低的幅度也增加,而且性能具有方向性,横向性能明显低于纵向性能。

三是对热处理和加工的影响:偏析形成的 C、S、P、Mo 等合金元素的区域聚集,C 的偏析会使热处理性能恶化。从一件 75t 钢锭分析得到,下端轴心 w_c 为 0.26%,而冒口上端的 w_c 达到 0.51%,这就使锻件顶部钢材易淬裂,而下部硬度达不到要求。S、P 的集聚引起脆化,在热处理时产生裂纹。

(2) 钢材的高倍缺陷——非金属夹杂物 非金属夹杂物的产生来自两方面:一种是冶炼中炉体、钢包等的耐火材料及其反应物,属于宏观夹杂物;另一种是气体,如 O、N 及 S 形成的化合物,属于微观夹杂物,这是钢中夹杂物的主要来源。

宏观夹杂物的尺寸一般在 1mm 以上,用超声波探伤可以发现。

显微夹杂物的尺寸一般在 $10^{-4} \sim 1\text{mm}$ 范围,必须用金相显微镜观察,并按金相法评级。

非金属夹杂物种类不同表现的形态也不相同。

硅酸盐是球形,硫化物及硅酸盐压制后呈条带状;铝的氧化物呈链状或在压延方向是点状积聚;大部分氧化物、氮化物压制不变形而呈不规则的点状分布。

由于非金属夹杂物与基体的物理和力学特性差异很大,所以实际上是一种危害很大的缺陷。

一是对热处理的影响:由于夹杂物与金属基体的热膨胀系数不同,在热处理过程中会产生很大的内应力,经测试可达 124MPa,尤其是脆性夹杂物,如 Al_2O_3 产生的应力更大。

另外,在气体渗碳中,夹杂物会促使内氧化深入,即增加黑色组织形成的倾向。

二是对力学性能的影响:夹杂物在金属中实质起到裂纹的作用。在抗拉强度试验中,主要影响是塑性和韧性,尤其对横向性能的降低更为严重。图 2 是夹杂物对断面收缩率的影响。夹杂物对缺口冲击值的影响与对 Z 的影响相似,即明显降低冲击值。表 1 是试验结果。

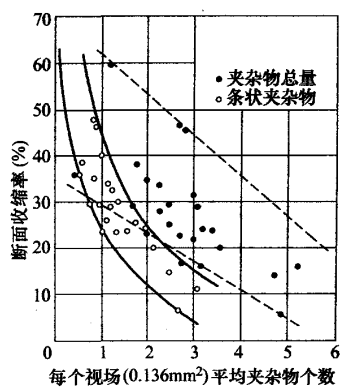


图 2 夹杂物数量对断面收缩率的影响

表 1 非金属夹杂物对冲击韧度的影响

冶炼方法	含氧量 ($\times 10^{-6}$)	非金属夹杂含量(质量分数,%)				a_K /J·cm ⁻²
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	总量	
普通冶炼	45	40.29	3.75	0.45	54.12	85.3
真空脱气	20	10.40	2.30	-	16.70	151.9*

*此 a_K 值对应的含氧量为 1.6×10^{-5} 。

夹杂物对疲劳强度的影响与其夹杂物数量和尺寸相关,图 3 是夹杂物尺寸对弯曲疲劳强度的影响。应当指出,对不同强度钢的临界夹杂物尺寸是不相同的,强度越高,临界尺寸越小。而对于表面硬化层,其临界缺陷尺寸是相当微小的。只有当表面存在残余压应力,其允许尺寸才会增加。通常在硬化层之下的过渡区由于存在拉应力而使临界尺寸大大减小,所以过渡区对夹杂物十分敏感。

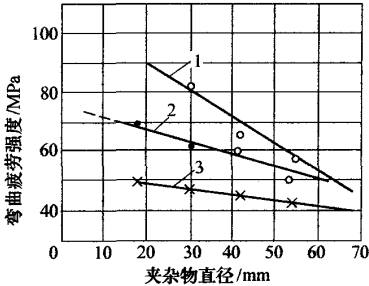


图 3 成为疲劳断裂起点的夹杂物的几何平均直径和弯曲疲劳强度的关系(铬镍钢)

1— $R_m = 1830\text{MPa}$ 2— $R_m = 1340\text{MPa}$
3— $R_m = 880\text{MPa}$

在各种类型的非金属夹杂物中，难于变形的硬而脆夹杂物，如颗粒状的 Al、Ca 硅酸盐和成堆状的 Al_2O_3 等氧化物会引起严重的应力集中而诱发疲劳裂纹的形成，从而降低疲劳强度。易于变形的硫化物对疲劳性能的影响不大。

2. 提高钢材冶金质量

钢材通常采用电弧炉在大气中冶炼的工艺比较简单，也经济。但合金成分由于烧损而不易控制，而且钢液中杂质和气体含量也较高，浇注时还会产生二次氧化，因而钢的质量难以保证。

钢液的纯净度是保证锻件质量的关键环节，目前先进的冶炼方法是采用电炉粗炼 + 二次精炼。二次精炼方法通常采用喷粉法、真空碳脱氧法（VCD）、钢包精炼法（VAD、CF）、大气吹氧氩脱碳法及电渣重熔等方法。

通过二次精炼可以使钢中 H、O、N 的含量控制到很低的水平，并大大降低 S、P 的含量，显著减少了非金属夹杂物的数量，改善了夹杂物的形态。

随着炼钢技术的发展，钢包精炼法显示出了它的独特优点而得到广泛应用。采用钢包精炼法时，普通的平炉或电炉仅起到熔化钢液的作用，当钢液到温后，只进行脱碳和脱磷，然后将钢液倒入钢包进行精炼。

钢液进入钢包后首先进行吹氩、预热及成分的预调整，并造还原渣。钢液在 133.322Pa 以下的真空度下用氩气强力搅拌去气，然后进行脱氧和脱硫，并调整钢液成分和温度，等待浇注。按以上精炼方法，可以达到：氧 $< 2 \times 10^{-5}$ 、氢 $< 1 \times 10^{-6}$ 、硫 $< 1 \times 10^{-5}$ 、磷 $< 3 \times 10^{-5}$ 。

真空脱气冶炼工艺可提高钢材纯净度，从而提高钢的力学性能。对某些高要求的齿轮有时还采用电渣重熔。电渣重熔法是在水冷结晶器中，借助熔融炉渣的电阻热使电极熔化来生产钢锭的方法，其原理见图 4。其优点如下：

(1) 粗钢锭部分熔化呈液态，凝固可控，使二次枝晶间距缩小，最大程度地降低了偏析，而且还改善了非金属夹杂物的沿晶界分布的特点。

(2) 电渣重熔钢锭的致密度高，钢锭的顶部和底部、中心和边缘的密度没有差别（见图 5）。当锻造比为 1.5 即可达到普通钢锭锻造比 4 的密度 $7.840 g/cm^3$ 。

(3) 电渣重熔钢锭的化学成分和力学性能沿截面分布均匀，各向异性小，使韧性得到提高。

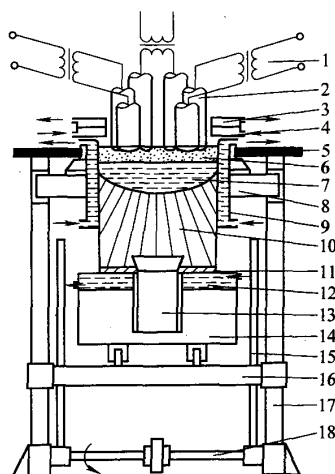


图 4 200t 级电渣重熔炉示意图

1. 变压器 2. 自耗电电极 3. 排气装置 4. 保护罩
5. 工作平台 6. 渣池 7. 金属熔池 8. 支承架
9. 结晶器 10. 电渣锭 11. 引锭板 12. 水冷底板
13. 钳把 14. 平车 15. 丝杆 16. 支承台
17. 立板 18. 传动装置

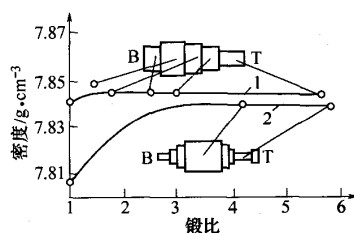


图 5 电渣锭与普通锭大锻件各部的密度

- 1— $\phi 2300mm$ ，重 80t 电渣锭
2— $\phi 2000mm$ ，100t 普通锭
B—钢锭底部 T—钢锭顶部

二、齿轮锻件的质量控制

锻件质量是齿轮毛坯生产中的另一大关键，在 ISO6336—5 和 GB/T 8539 中对锻件生产的锻造比、晶粒度及粗车后超声波探伤都作出了明确的规定要求，以保证锻件质量。我国渗碳齿轮锻件生产目前尚是一薄弱环节，很重要的原因是对锻件的技术内涵缺乏认识，因此在硬件设施及工艺规范方面水平都很低。

齿轮的锻件一般来说，当钢料直径在 150mm 以下多采用轧制，>150mm 时采用锻造。而对于齿轮，很少采用直接轧制成形的方法，而是以锻造为主。为了获得良好的齿轮锻件坯料，应当重视锻造比及锻后的热处理。

理加工。

1. 锻造比

(1) 锻造比对钢锭低倍组织和力学性能的影响 铸锭经一定的热塑性变形后，其组织和性能将发生很大的变化，在三向压应力作用下，热塑性变形能有效地破碎粗大的树枝状和柱状结晶组织，使之细化并沿主伸方向分布，能使铸锭中的疏松、气孔、缩孔等缺陷焊合而组织致密，还可充分破碎铸锭中的偏析、夹杂物等而使组织趋于均匀，改善带状组织。

表2为40CrNiMoA钢锭（4.0St）经不同锻造比拔长后的低倍组织变化情况。由表2中横向低倍组织的变化情况可见，在锻造比 $y < 4 \sim 6$ 的范围内，钢材的中心疏松和一般疏松级别随锻造比增大而显著减小。钢在锻造比3以下，随着锻造比的提高其致密度显著提高。图6是锻件密度经锻后的变化情况。

表2 不同锻造比对40CrNiMoA钢锻材低倍组织的影响

规格/mm	400	330	284	230	200	164	127	90
锻造比 y	2	3	4	6	8	12	20	40
横向	中心	4	3	2	1.5	1	0.5	0.5
	疏松							
低倍	一般	4	3	2	1.5	1	1	1
	疏松							
纵向低倍		变形逐渐深透至心部，鱼骨状结晶破碎，沿轴向形成粗短纤维，边部柱状晶尚明显并列存在		柱状晶破碎，全断面形成纤维状。锻造比为6时边缘残余枝晶尚明显		纤维较密实，少量主杆斜向分布		纤维密实，呈波浪形，局部流线不清晰、不连续

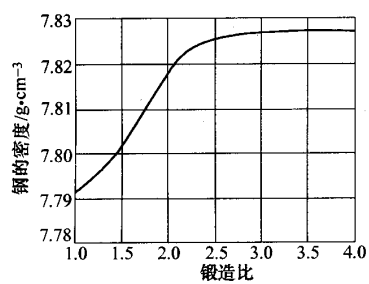


图6 锻件的锻造比和密度的关系
铸锭凝固过程中，合金元素和杂质元素结晶于晶轴之间，形成树枝状组织，要完全破碎树枝状晶需较大的

锻造比，一般要5以上，然而当锻造比提高到5以上，整个锻件截面呈现明显的流线结构。纤维组织（流线的出现使金属的性能在不同方向上有明显差异，即呈现各向异性。表3为纤维方向对40CrNiMoA钢力学性能的影响，可看出纤维方向对强度指标影响不大，而对塑性指标影响较大，对不同材料影响的程度不同。纤维方向对塑性指标之所以影响较大，是因为沿材料流线分布有大量脆性杂质和化合物，所以横向试样受拉伸应变时，将以这些异相质点为核心形成显微孔洞，并不断扩大和连成大的裂纹。孔洞的排列方向与纤维方向是一致的，因此，横向试样在不太大的拉伸变形之后，裂纹便贯穿试样的整个横断面，使试样发生断裂。

表3 纤维方向对40CrNiMoA钢力学性能的影响

材料	取样方向	力学性能（平均值）					
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	HBW	α_K J·cm ⁻²
40CrNiMoA	纵向（0°）	1054	952	18.2	63.5	3.41	148
	弦向（45°）	1056	955	17.3	62.1	3.43	137
	横向（90°）	1054	952	16.0	55.0	3.43	114

锻造比对40CrNiMoA钢锻材的疲劳性能和断裂韧度的影响如表4所示。由表4可以看出，随着锻造比的增加，钢的疲劳极限显著提高，当 $y = 8$ 时， $\sigma_{-1} = 520 \sim 530$ MPa，比铸态提高了43%~46%，锻造比继续增大时 σ_{-1} 不再提高，保持在相同水平上。所以，锻造比对疲劳性能的影响比对常规力学性能影响大，为了使疲劳性能稳定在较高水平上，一般需要较大的锻造比。但是，增大锻造比之后为了不使锻件的横向性能下降太多，必须提高材料的冶金质量（提高材料的纯洁度和减少铸造缺陷）。锻造比增加，对钢的断裂韧度影响不大。

表4 锻造比对40CrNiMoA钢锻材的旋转弯曲疲劳和断裂韧度的影响

锻造比 y	0	2	3	4	6	8	12	20	40
光滑旋	— 组	363	451	471	480	490 ~ 500	520 ~ 530	520 ~ 530	520 ~ 530
转弯曲									
疲劳 σ_{-1}	— 组	324 ~ 333	461	471	480 ~ 490	490 ~ 500	520 ~ 530		520
/MPa									
断裂韧性									
$K_{IC}/$		160	163	168	168	173	166	167	168
$MPa \cdot m^{-1/2}$									163

(2) 锻造比的选择 主要考虑金属材料种类、锻件性能要求、工序种类及锻件的形状尺寸等因素。

合金结构钢钢锭比碳素结构钢钢锭的铸造缺陷严重,所需的锻造比要大些。真空冶炼钢的质量比一般大气冶炼钢的质量好,所需的锻造比可小些。

当锻件受力方向与纤维方向不一致时,为了保证横向性能,避免明显的各向异性,可取锻造比为 2.0 ~ 2.5;当锻件受力方向与纤维方向基本一致时,锻造比可取 2.5 ~ 3.0;当锻件受力方向与纤维方向完全一致时(例如水压机立柱),为提高纵向性能,可取锻造比为 4 或更高。

齿轮锻件的锻造比一般为 3 ~ 5。

2. 锻后热处理

齿坯锻造后其冷却有空冷、坑冷和炉冷几种方式,可根据钢材种类和截面尺寸大小确定。为了改善组织,特别是消除白点,建议采用锻后等温冷却热处理,图 7 是一种典型工艺。

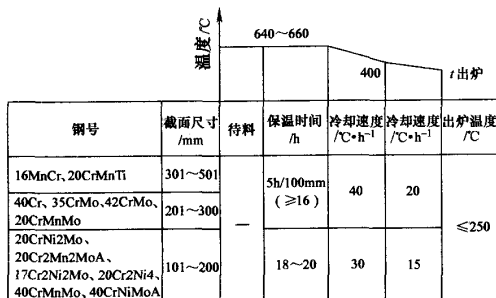


图 7 锻后等温冷却规范

锻后热处理有两个重要目的:一是细化晶粒、改善组织;二是去除钢中的氢,防止白点和氢脆的产生。

(1) 细化晶粒,改善组织 晶粒度对钢的性能,特别是韧性影响很大,图 8 是晶粒度对冲击性能的影响。晶粒度及晶粒的均匀性还对后续的热处理产生影响。

钢在锻造时变形的不均匀性以及高温时停留的时间过长,往往造成晶粒粗大而且不均匀,特别是对于一些高淬透性齿轮用钢,如 20Cr2Ni4、18Cr2Ni4W、40CrNiMo 等。从连续冷却转变图看到,即使是很低的冷却速度也很难转变成珠光体组织,所以在锻后的冷却过程中几乎都转变成针状贝氏体或贝氏体 + 马氏体

的混合组织。这类非平衡组织再度加热向奥氏体转变时,新相既可生成针状奥氏体,也可生成球状奥氏体,或混合型奥氏体。如果生成针状奥氏体,便会产生组织遗传性,使今后再次加热转变时恢复原来的粗大奥氏体晶粒。因此,锻后的热处理就是力求使锻后的非平衡组织尽量转变成以球状为主的奥氏体。要实现这一目的,应控制以下工艺参数:加热速度一般在 100 ~ 300℃/min 时可形成球状奥氏体,原始晶粒得到细化,无组织遗传性产生。加热温度可根据钢材的相变点确定,通常细化晶粒的工艺和锻件的去氢可以在一起考虑。

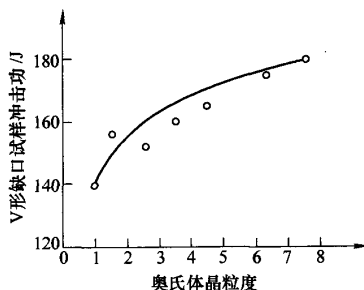


图 8 奥氏体晶粒度对 3.5% NiCrMoV

钢冲击韧度的影响

(2) 钢中氢的去除 分为真空除气和去氢退火。

第一,真空除气。要消除白点和氢脆,首先要降低钢中氢的含量,使其达到极限含氢量以下。从这点出发,最关键而有效的措施是炼钢时对钢液进行真空除气处理。

第二,去氢退火。消除白点和氢脆的另一措施是减小锻件的内应力,防止氢向应力集中处逆向扩散聚集,并同时给以足够的能量让氢向外部扩散而达到去氢的目的。为达到以上目的,最有效的方法就是去氢退火。由于氢在 γ 相和 α 相中的溶解度和扩散系数不同,特别是氢在 α 相中的溶解度低,而扩散系数还大,这就使得在退火过程中氢具备得以不断地向外扩散的条件。

去氢退火往往与锻件的正火(或退火) + 高温回火合并进行。去氢退火温度通常为 650℃。退火后应尽可能慢速冷却,以防止新的内应力产生,一般冷却分两个阶段:400℃以上,由于钢的塑性较好,内力不易形成,所以冷速可大一些;400℃以下,冷速就放慢。

(待续) (20070908)