



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 3480.5—2021/ISO 6336-5:2016

代替 GB/T 3480.5—2008

## 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第 5 部分：材料的强度和质量

Calculation of load capacity of spur and helical gears—  
Part 5: Strength and quality of materials

(ISO 6336-5:2016, IDT)

2021-05-21 发布

2021-12-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 .....	I
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语、定义与符号 .....	2
4 齿轮疲劳强度极限值的确定方法 .....	3
4.1 总则 .....	3
4.2 A 法 .....	3
4.3 B 法 .....	3
4.4 $B_r$ 法 .....	3
4.5 $B_K$ 法 .....	3
4.6 $B_p$ 法 .....	3
5 本文件中的疲劳极限——B 法 .....	3
5.1 应用 .....	3
5.2 接触疲劳极限 $\sigma_{H\ lim}$ .....	4
5.3 弯曲疲劳极限 $\sigma_{F\ lim}$ 和 $\sigma_{FE}$ .....	4
5.4 $\sigma_{H\ lim}$ 、 $\sigma_{F\ lim}$ 和 $\sigma_{FE}$ 图的说明 .....	5
5.5 $\sigma_{H\ lim}$ 和 $\sigma_{F\ lim}$ 的计算 .....	5
5.6 表面硬化齿轮的渗层深度 .....	17
6 材料质量及热处理工艺要求 .....	20
6.1 一般原则 .....	20
6.2 正火低碳锻钢或铸钢、普通碳素钢 .....	21
6.3 黑心可锻铸铁 .....	21
6.4 其他材料 .....	21
6.5 试样 .....	31
6.6 抛丸机械清理 .....	32
6.7 强化喷丸 .....	32
附录 A (资料性) 调质齿轮控制截面尺寸的确定 .....	33
附录 B (资料性) 心部硬度系数 .....	35
参考文献 .....	36

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 3480《直齿轮和斜齿轮承载能力计算》的第5部分。GB/T 3480 已经发布了以下部分：

- 第1部分：基本原理、概述及通用影响系数；
- 第2部分：齿面接触强度（点蚀）计算；
- 第3部分：轮齿弯曲强度计算；
- 第5部分：材料的强度和质量；
- 第6部分：变载荷条件下的使用寿命计算。

本文件代替 GB/T 3480.5—2008《直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第5部分：材料的强度和质量》，与 GB/T 3480.5—2008 相比，主要技术变化如下：

- a) 更改了适用范围，增加了“ISO 6336-6”和锥齿轮计算内容（见第1章，2008年版的第1章）；
- b) 更改了术语和定义，增加了“ISO 6336-1”的引用（见第3章，2008年版的第3章）；
- c) 增加了“Br 法”（见 4.4）；
- d) 调质合金钢 ME 线由实线更改为虚线（见图 5，2008年版的图 5）；
- e) 更改了部分材料的引用标准（见表 1 各注，2008年版的表 1 各注）；
- f) 删除了某些材料“硬化层深度可根据经验确定”的表述（见图 13～图 16 中的注，2008年版的图 13～图 16 中的注）；
- g) 更改了材料与热处理的一般原则（见 6.1，2008年版的 6.1）；
- h) 多处更改了材料的质量及热处理要求（见表 2～表 8，2008年版的表 2～表 8），例如更改了白亮层要求，将“且  $\epsilon/\gamma'$  氮化物比率  $> 8$ ”改为“且  $\gamma'/\epsilon > 8$ ”（见表 7 中的第 10 项，2008年版的表 7 中的第 10 项）；
- i) 更改了喷丸工艺（见 6.7，2008年版的 6.7）；
- j) 删除了 2008 版附录 C。

本文件使用翻译法等同采用 ISO 6336-5:2016《直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第5部分：材料的强度和质量》。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 225—2006 钢 淬透性的末端淬火试验方法（Jominy 试验）（ISO 642:1999, IDT）
- GB/T 1356—2001 通用机械和重型机械用圆柱齿轮 标准基本齿条齿廓（idt ISO 53:1998）
- GB/T 3374.1—2010 齿轮 术语和定义 第1部分：几何学定义（ISO 1122-1:1998, IDT）
- GB/T 3480.1—2019 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第1部分：基本原理、概述及通用影响系数（ISO 6336-1:2006, IDT）
- GB/T 3480.2—2021 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第2部分：齿面接触强度（点蚀）计算（ISO 6336-2:2019, IDT）
- GB/T 3480.3—2021 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第3部分：轮齿弯曲强度计算（ISO 6336-3:2019, IDT）
- GB/T 5617—2005 钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定（ISO 3754:1976, NEQ）

- GB/T 9450—2005 钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核(ISO 2639:2002,MOD)
- GB/T 10095.1—2008 圆柱齿轮 精度制 第1部分:轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值(ISO 1328-1:1995,IDT)
- GB/T 10561—2005 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法(ISO 4967:1998,IDT)
- GB/T 13304.2—2008 钢分类 第2部分:按主要质量等级和主要性能或使用特性的分类(ISO 4948-2:1981,MOD)
- GB/T 17879—1999 齿轮 磨削后表面回火的浸蚀检验(idt ISO 14104:1995)
- GB/T 18253—2018 钢及钢产品 检验文件的类型(ISO 10474:2013,IDT)
- GB/T 33362—2016 金属材料 硬度值的换算(ISO 18265:2013,IDT)
- GB/T 34484.1—2017 热处理钢 第1部分:非合金钢(ISO 683-1:2016,MOD)
- GB/T 34484.2—2018 热处理钢 第2部分:淬火及回火合金钢(ISO 683-2:2016,MOD)
- GB/T 37618—2019 渗氮钢(ISO 683-5:2017,MOD)

本文件做了下列编辑性修改:

- 将 ISO 6336-5:2016 之 5.3.2 中的符号“ $Y_{\delta \text{ rel-T}}$ ”和“ $Y_{R \text{ rel-T}}$ ”分别改为“ $Y_{\delta \text{ rel T}}$ ”和“ $Y_{R \text{ rel T}}$ ”;
- 将参考文献 ISO 1122-1 列入第2章清单,在参考文献中增加了 ISO 10300(所有部分);
- 将 ISO 6336-5:2016 表1的注改为表1的段。

本文件由全国齿轮标准化技术委员会(SAC/TC 52)提出并归口。

本文件起草单位:郑州机械研究所有限公司、浙江双环传动机械股份有限公司、南京高速齿轮制造有限公司、重庆齿轮箱有限责任公司、西安法士特汽车传动有限公司、大连创新齿轮箱制造有限公司、浙江中柴机器有限公司、郑州中机轨道交通装备科技有限公司、綦江齿轮传动有限公司、洛阳科大格尔传动研究院有限公司、江苏中工高端装备研究院有限公司、南京科润工业介质股份有限公司、郑州高端装备与信息产业技术研究院有限公司、中机生产力促进中心。

本文件主要起草人:陈国民、王志刚、牛万斌、李海霞、汪正兵、胡昭南、刘义、林太军、何孟兴、李宝奎、成崎、吴长鸿、朱百智、聂晓霖、刘波、任素红、卢金生、邓效忠、王长路、管洪杰、范瑞丽、张海涛、李五田、陆学利、左永平、赵建华、弓宇、陆军。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为:

- 1987年首次发布为 GB 8539—1987《齿轮材料及热处理质量检验的一般规定》,2000年第一次修订;
- 2008年第二次修订时,改为 GB/T 3480.5—2008《直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第5部分:材料的强度和重量》;
- 本次为第三次修订。



## 引 言

GB/T 3480 系列构成了渐开线圆柱齿轮(内齿或外齿)承载能力计算的体系,考虑了以往实际经验的总结和将来新型技术的应用。

本文件所列出的齿轮疲劳强度数据的变化范围可能较大。这是由于化学组分波动、材料缺陷、几何结构、热加工(如棒材类型、锻轧、锻造比)、热处理工艺及残余应力等因素导致。

本文件中各表列出了齿轮强度的主要影响因素和不同材料质量等级的技术要求。这些因素对于齿轮接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的影响又在各图中反映出来。

本文件涉及最常用的齿轮材料及热处理工艺,而不涉及特殊材料、特殊热处理或加工工艺。另外,本文件对各种材料、特种加工或热处理工艺的适用性也不作评价。



# 直齿轮和斜齿轮承载能力计算

## 第5部分:材料的强度和质量

### 1 范围

本文件给出了齿面接触强度极限和齿根弯曲强度极限,并提供了推荐值。本文件还规定了材料质量和热处理的技术要求,并说明了其对强度极限的影响。

本文件的推荐值适用于 ISO 6336-2、ISO 6336-3 及 ISO 6336-6 中的强度计算,适用于工业齿轮、高速齿轮及船用齿轮产品,也可用于 ISO 10300 中锥齿轮承载能力的计算。本文件可用于上述标准中所涉及的啮合状态、基本齿条齿廓、齿廓参数、结构设计等,计算结果与采用 ISO 6336-1 和 ISO 10300-1 的计算符合性很好。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 53 通用机械和重型机械用圆柱齿轮 标准基本齿条齿廓(Cylindrical gears for general and heavy engineering—Standard basic rack tooth profile)

ISO 642 钢 淬透性的末端淬火试验方法(Jominy 试验)[Steel—Hardenability test by end quenching (Jominy test)]

ISO 643:2012 钢 表征晶粒度的金相测定法(Steels—Micrographic determination of the apparent grain size)

ISO 683-1 热处理钢、合金钢和易切削钢 第1部分:非合金钢(Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels—Part 1:Non-alloy steels for quenching and tempering)

ISO 683-2 热处理钢、合金钢和易切削钢 第2部分:淬火及回火合金钢(Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels—Part 2:Alloy steels for quenching and tempering)

ISO 683-3 热处理钢、合金钢和易切削钢 第3部分:渗碳淬火钢(Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels—Part 3: Case-hardening steels)

ISO 683-4 热处理钢、合金钢和易切削钢 第4部分:易切削钢(Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels—Part 4:Free-cutting steels)

ISO 683-5 热处理钢、合金钢和易切削钢 第5部分:渗氮钢(Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels—Part 5:Nitriding steels)

ISO 1122-1 齿轮 术语和定义 第1部分:几何学定义(Vocabulary of gear terms — Part 1:Definitions related to geometry)

ISO 1328-1 圆柱齿轮 精度制 第1部分:轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值(Cylindrical gears—ISO system of flank tolerance classification—Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth)

ISO 2639 钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核(Steels—Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases)

ISO 3754 钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定 (Steels—Determination of effective depth of hardening after flame or induction hardening)

ISO 4948-2 钢分类 第2部分:按照主要质量等级和主要性能或使用特性的分类 (Steels—Classification—Part 2: Classification of unalloyed and alloy steels according to main quality classes and main property or application characteristics)

ISO 4967 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法 (Steel—Determination of content of non-metallic inclusions—Micrographic method using standard diagrams)

ISO 6336-1 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第1部分:基本原理、概述及通用影响系数 (Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors)

ISO 6336-2 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第2部分:齿面接触强度(点蚀)计算 [Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 2: Calculation of surface durability (pitting)]

ISO 6336-3:2006 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第3部分:轮齿弯曲强度计算 (Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 3: Calculation of tooth bending strength)

ISO 9443 热轧棒材及线材表面质量等级 (Surface quality classes for hot-rolled bars and wire rod)

ISO 10474 钢及钢产品 检验文件的类型 (Steel and steel products—Inspection documents)

ISO 14104 齿轮 齿面磨削烧伤的化学浸蚀检测方法 (Gears—Surface temper etch inspection after grinding, chemical method)

ISO 18265 金属材料 硬度值的换算 (Metallic materials—Conversion of hardness values)

EN 10204 金属产品 检验文件的类型 (Metallic products—Types of inspection documents)

EN 10228-1 钢锻件的无损检测 第1部分:磁粉探伤 (Non-destructive testing of steel forgings Part 1: Magnetic particle inspection)

EN 10228-3 钢锻件的无损检测 第3部分:铁素体及马氏体组织的超声波探伤 (Non-destructive testing of steel forgings—Part 3: Ultrasonic testing of ferritic or martensitic steel forgings)

EN 10308 无损检测 钢棒的超声波检测 (Non-destructive testing—Ultrasonic testing of steel bars)

ASTM<sup>1)</sup> A388-01 大型钢材锻件的超声波探伤规范 (Standard practice for ultrasonic examination of steel forgings)

ASTM A609-91 铸件、碳钢、低合金钢和马氏体不锈钢的超声波探伤规范 (Standard practice for castings, carbon, low-alloy, and martensitic stainless steel, ultrasonic examination thereof)

ASTM E428-00 超声波探伤标块的制作与控制规范 (Standard practice for fabrication and control of metal, other than aluminum, reference blocks used in ultrasonic testing)

ASTM E1444-01 磁粉探伤规范 (Standard practice for magnetic particle examination)

### 3 术语、定义与符号

ISO 1121-1 界定的术语和定义、ISO 6336-1 界定的符号与单位适用于本文件。

国际标准化组织和国际电工委员会在以下网址维护用于标准化的术语数据库:

——IEC <http://www.electropedia.org/>

——ISO <http://www.iso.org/obp>

---

1) 美国试验与材料协会。

## 4 齿轮疲劳强度极限值的确定方法

### 4.1 总则

各种材料及其状态下的接触疲劳极限和弯曲疲劳极限优先通过齿轮运转试验的方法确定,而试验条件和试件尺寸应尽量与所关注齿轮的实际使用条件及尺寸一致。

当评价台架试验结果和生产现场数据时,要确认其是否包括了影响许用应力的各种因素。例如,在确定齿面接触强度时,要考虑润滑条件、表面粗糙度和齿轮结构的影响;在确定齿根弯曲强度时,要考虑齿根过渡圆角半径、表面粗糙度和齿轮结构的影响。如果源于试验或生产现场的许用应力考虑了某一特定因素,则在 ISO 6336-2 或 ISO 6336-3 计算程序中的相关系数可取 1.0。

### 4.2 A 法

接触疲劳极限和弯曲疲劳极限由齿轮运转试验得到。试件齿轮应与关注齿轮尺寸基本相同,试验条件也应尽量接近齿轮的使用条件。

### 4.3 B 法

接触疲劳极限和弯曲疲劳极限是由基准试验齿轮在基准条件下的台架试验得到,弯曲疲劳极限也可由脉动试验得到,并要考虑实际经验。5.2 和 5.3 中上述极限值正是这样确定的。

疲劳极限分为 ME、MQ 和 ML 三个等级。恰当的等级选择可根据产品类型和质量控制经验,依照第 6 章的表述。

### 4.4 B<sub>r</sub> 法

接触疲劳极限通过滚子接触疲劳试验方法而得到。应该注意,这种试验数据往往高于轮齿的接触疲劳极限。

### 4.5 B<sub>k</sub> 法

弯曲疲劳极限通过带有缺口试样的试验得到。应注意两点:一是试样缺口半径与厚度之比应近似等于齿根危险截面圆角半径与齿根危险截面弦长之比,二是试样表面状态也应接近齿根圆角处的表面状态。在评估试验数据时,需要说明的是试验件通常只承受单一脉动弯曲应力,而实际轮齿的齿根圆角要承受复合的弯曲、剪切和压应力。各种材料的强度值可从试验获得,或从参考文献中查阅。

### 4.6 B<sub>p</sub> 法

弯曲强度极限通过无缺口试样的试验得到。分析试验结果时应注意 4.5 所述。考虑到缺口敏感性的影响,计算中应包括实际缺口形状及缺口系数。由于这些因素的变化,疲劳极限值(许用应力值)会有很大差异。不同材料的强度数据可查阅已有试验数据或参考文献。

## 5 本文件中的疲劳极限——B 法

### 5.1 应用

疲劳极限值可以从图 1~图 16 得到,或由公式(2)加表 1 计算得出。

图 1~图 16 所示接触疲劳极限和弯曲疲劳极限的前提是已经根据齿轮尺寸正确地选择了材料成分、热处理工艺及检测方法。

对于某些材料,如果有可用的试验数据,也可以此代替图 1~图 16 中的值。

本文件中所用数据全部经过试验和实用验证。

本文件中的数据是在 1%失效概率下得到的。其他失效概率下的数据,可在此基础上通过统计分析处理进行修正。但这种修正应特别谨慎,或者要求进行附加的验证试验,或者应提供详实的数据来源,以支持该失效概率下的数据置信度。

如要得到其他失效概率(可靠度)下的数据,应对  $\sigma_{H\lim}$ 、 $\sigma_{F\lim}$  和  $\sigma_{FE}$  以适合的“可靠度系数”进行修正。经过修正的强度值,在符号下加角标以表示相应的失效概率(例如 10%失效概率时的应力值表示为  $\sigma_{H\lim10}$ )。疲劳试验结果的统计分析见参考文献[9]。

图 9 和图 10 给出的接触疲劳极限和弯曲疲劳极限是基于有效硬化层深度为  $0.15m_n$  至  $0.2m_n$  的精加工齿轮。

对于沿齿廓感应淬火、渗氮、碳氮共渗及氮碳共渗的齿轮,表面硬度值对于强度的影响还不能准确判定,但齿面上其他与材料和热处理有关的因素对强度的影响却是肯定的。

在某些情况下,本文件并未覆盖全部硬度范围,其应用区域在图 1~图 16 中由线的长度标示。

表面硬化钢(图 9~图 16)以 HV 硬度为基准坐标,而以 HRC 作为参考坐标。两种硬度值的换算关系表见 ISO 18265。

## 5.2 接触疲劳极限 $\sigma_{H\lim}$

在某一接触应力下运转到规定的应力循环次数而未发生扩展性点蚀,即可得到接触疲劳极限  $\sigma_{H\lim}$ 。对于某些材料,耐久性疲劳强度范围的起始点指 ISO 6336-2 中各种材料寿命系数  $Z_{NT}$  所对应的转数(循环次数)。例如,对于渗碳淬火、调质及感应淬火齿轮,均以  $5 \times 10^7$  转数为耐久性疲劳强度的起始值。

图 1、图 3、图 5、图 7、图 9、图 11、图 13 及图 15 中的  $\sigma_{H\lim}$  值是基于下列基准试验条件和基准试验齿轮参数<sup>2)</sup>:

——中心距	$a=100\text{ mm}$
——螺旋角	$\beta=0(Z_\beta=1)$
——模数	$m=(3\sim5)\text{ mm}(Z_x=1)$
——齿面粗糙度	$R_z=3\text{ }\mu\text{m}(Z_R=1)$
——节圆线速度	$v=10\text{ m/s}(Z_v=1)$
——润滑剂黏度	$\nu_{50}=100\text{ mm}^2/\text{s}(Z_L=1)$
——相同材料的配对齿轮	$(Z_w=1)$
——齿轮精度等级	ISO 1328-1 中的 4 级~6 级
——齿宽	$b=10\text{ mm}\sim 20\text{ mm}$
——载荷影响系数	$K_A=K_V=K_{H\beta}=K_{H\alpha}=1$

当齿面损伤达到下列情况时,试验轮齿可判为失效:对于调质齿轮,损伤面积达到所有工作齿面的 2%;对于表面硬化齿轮,损伤面积达到所有工作齿面的 0.5%或单个工作齿面的 4%。该判据只用于试验分析,而不针对齿轮产品。

## 5.3 弯曲疲劳极限 $\sigma_{F\lim}$ 和 $\sigma_{FE}$

### 5.3.1 试验齿轮的弯曲疲劳极限 $\sigma_{F\lim}$

$\sigma_{F\lim}$  通过基准试验齿轮(见 ISO 6336-3)的试验获得,该值考虑了材料、热处理、齿根圆角表面粗糙

2) 在不同试验条件下得到的数据可根据基准条件修正。应注意的是,  $\sigma_{H\lim}$  不是连续载荷下的接触应力,而是 ISO 6336-2 规定的载荷循环次数下非扩展性点蚀损伤的接触应力上限。

度等因素。

### 5.3.2 齿轮材料的弯曲疲劳极限 $\sigma_{FE}$

$\sigma_{FE}$  (见 ISO 6336-3) 是无缺口试样的基础弯曲强度, 假设材料 (含热处理工艺) 为完全弹性状态:

$$\sigma_{FE} = \sigma_{F \lim} \cdot Y_{ST} \quad \dots\dots\dots (1)$$

基准试验齿轮的应力修正系数  $Y_{ST} = 2.0$ 。对于大多数材料,  $3 \times 10^6$  应力循环次数可作为耐久性疲劳强度范围的起始点 (见 ISO 6336-3 中的寿命系数)。

图 2、图 4、图 6、图 8、图 10、图 12、图 14 和图 16 中的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  是基于下列基准试验条件及如下基准试验齿轮参数 (见 5.2):

——螺旋角	$\beta = 0 (Y_{\beta} = 1)$
——模数	$m = (3 \sim 5) \text{ mm} (Y_X = 1)$
——应力修正系数	$Y_{ST} = 2.0$
——缺口参数	$q_{ST} = 2.5 (Y_{\delta \text{ relT}} = 1)$
——齿根圆角处的粗糙度	$R_z = 10 \text{ } \mu\text{m} (Y_{R \text{ relT}} = 1)$
——齿轮精度等级	ISO 1328-1 中的 4 级 ~ 7 级
——基本齿条	ISO 53
——齿宽	$b = 10 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$
——载荷系数	$K_A = K_V = K_{F\beta} = K_{Fa} = 1$

### 5.3.3 双向载荷弯曲疲劳极限

图 2、图 4、图 6、图 8、图 10、图 12、图 14 和图 16 中的弯曲疲劳极限值适用于轮齿单向载荷。当存在反向满载时, 应减小  $\sigma_{FE}$  值。在最不利的条件下 (例如每次双向载荷都相等的中间轮),  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  值应乘以 0.7; 当反向载荷不经常出现时, 可根据齿轮使用过程中预期的反向载荷情况选择一个适当的系数。这部分内容见 ISO 6336-3:2006 中的附录 B。

### 5.4 $\sigma_{H \lim}$ 、 $\sigma_{F \lim}$ 和 $\sigma_{FE}$ 图的说明

对于超出图 1~图 16 中硬度范围的接触疲劳极限和弯曲疲劳极限值, 可由供需双方在使用经验的基础上协商确定。

### 5.5 $\sigma_{H \lim}$ 和 $\sigma_{F \lim}$ 的计算

基于图 1~图 16 的接触疲劳极限  $\sigma_{H \lim}$  和弯曲疲劳极限  $\sigma_{F \lim}$  可按照以下公式计算:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{H \lim} \\ \sigma_{F \lim} \end{array} \right\} = A \cdot x + B \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$x$  ——最终表面硬度 HBW 或 HV;

A、B ——常数 (见表 1)。

表面硬度范围应严格控制在表中最低和最高硬度值之间, 并与图 1~图 16 结合起来使用。

表 1  $\sigma_{H \lim}$  和  $\sigma_{F \lim}$  的计算

序号	材料	应力	材质类型	缩写	图号	等级	A	B	硬度	最低硬度	最高硬度
1	正火低碳钢/ 铸钢 <sup>a</sup>	接触	正火低碳锻钢	St	1a)	ML/MQ	1.000	190	HBW	110	210
2						ME	1.520	250		110	210
3			铸钢	St(铸态)	1b)	ML/MQ	0.986	131	HBW	140	210
4						ME	1.143	237		140	210
5		弯曲	正火低碳锻钢	St	2a)	ML/MQ	0.455	69	HBW	110	210
6						ME	0.386	147		110	210
7			铸钢	St(铸态)	2b)	ML/MQ	0.313	62	HBW	140	210
8						ME	0.254	137		140	210
9	铁	接触	黑心可锻铸铁	GTS (珠光体)	3a)	ML/MQ	1.371	143	HBW	135	250
10						ME	1.333	267		175	250
11			球墨铸铁	GGG	3b)	ML/MQ	1.434	211	HBW	175	300
12						ME	1.500	250		200	300
13			灰口铸铁	GG	3c)	ML/MQ	1.033	132	HBW	150	240
14						ME	1.465	122		175	275
15		弯曲	黑心可锻铸铁	GTS (珠光体)	4a)	ML/MQ	0.345	77	HBW	135	250
16						ME	0.403	128		175	250
17			球墨铸铁	GGG	4b)	ML/MQ	0.350	119	HBW	175	300
18						ME	0.380	134		200	300
19			灰口铸铁	GG	4c)	ML/MQ	0.256	8	HBW	150	240
20						ME	0.200	53		175	275
21	质锻钢 <sup>b</sup>	接触	碳钢	V	5	ML	0.963	283	HV	135	210
22						MQ	0.925	360		135	210
23						ME	0.838	432		135	210
24			合金钢	V	5	ML	1.313	188	HV	200	360
25						MQ	1.313	373		200	360
26						ME	2.213	260		200	390
27		弯曲	碳钢	V	6	ML	0.250	108	HV	115	215
28						MQ	0.240	163		115	215
29						ME	0.283	202		115	215
30			合金钢	V	6	ML	0.423	104	HV	200	360
31						MQ	0.425	187		200	360
32						ME	0.358	231		200	390

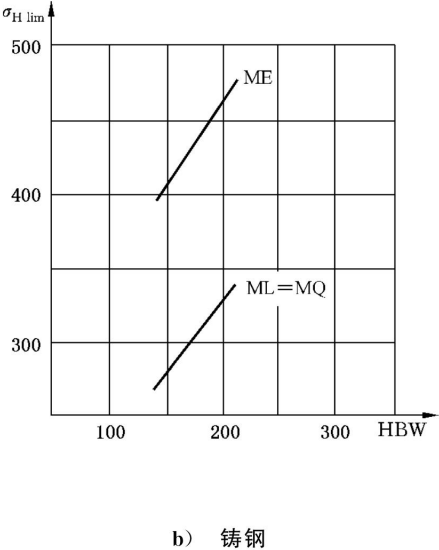
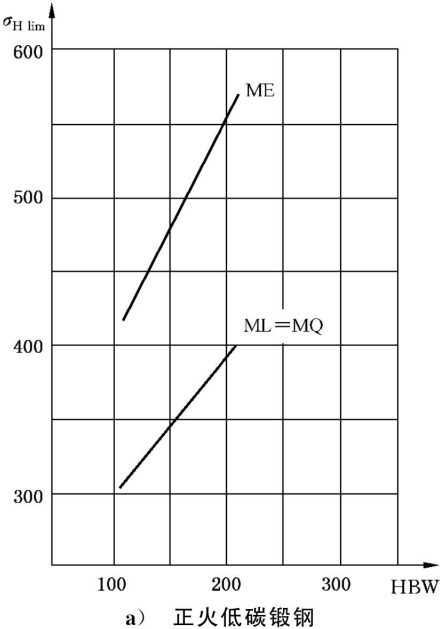


表 1  $\sigma_{H\lim}$  和  $\sigma_{F\lim}$  的计算 (续)

序号	材料	应力	材质类型	缩写	图号	等级	A	B	硬度	最低硬度	最高硬度
33	调质铸钢	接触	碳钢	V(铸态)	7	ML/MQ	0.831	300	HV	130	215
34						ME	0.951	345		130	215
35			合金钢	V(铸态)	7	ML/MQ	1.276	298	HV	200	360
36						ME	1.350	356		200	360
37		弯曲	碳钢	V(铸态)	8	ML/MQ	0.224	117	HV	130	215
38						ME	0.286	167		130	215
39			合金钢	V(铸态)	8	ML/MQ	0.364	161	HV	200	360
40						ME	0.356	186		200	360
41	渗碳锻钢 <sup>c</sup>	接触		Eh	9	ML	0.000	1 300	HV	600	800
42						MQ	0.000	1 500		660	800
43						ME	0.000	1 650		660	800
44		弯曲	心部硬度 $\geq 25$ HRC 偏下	Eh	10	ML	0.000	312	HV	600	800
45						MQ	0.000	425		660	800
46			心部硬度 $\geq 25$ HRC 偏上				0.000	461		660	800
47							0.000	500		660	800
48			心部硬度 $\geq 30$ HRC			ME	0.000	525		660	800
49	火焰或感应 淬火锻钢和 铸钢	接触		IF	11	ML	0.740	602	HV	485	615
50						MQ	0.541	882		500	615
51						ME	0.505	1 013		500	615
52		弯曲		IF	12	ML	0.305	76	HV	485	615
53						MQ	0.138	290		500	570
54							0.000	369		570	615
55						ME	0.271	237		500	615
56	渗氮锻钢: 渗氮钢 <sup>d</sup> / 渗氮调质钢 <sup>b</sup>	接触	渗氮钢	NT(渗氮)	13a)	ML	0.000	1 125	HV	650	900
57						MQ	0.000	1 250		650	900
58						ME	0.000	1 450		650	900
59		弯曲	调质钢	NV(渗氮)	13b)	ML	0.000	788	HV	450	650
60						MQ	0.000	998		450	650
61						ME	0.000	1 217		450	650
62			渗氮钢	NT(渗氮)	14a)	ML	0.000	270	HV	650	900
63						MQ	0.000	420		650	90
64						ME	0.000	468		650	900

表 1  $\sigma_{H \lim}$  和  $\sigma_{F \lim}$  的计算 (续)

序号	材料	应力	材质类型	缩写	图号	等级	A	B	硬度	最低 硬度	最高 硬度
65	氮锻钢： 渗氮钢 <sup>d</sup> / 渗氮调质钢 <sup>b</sup>	弯曲	调质钢	NV(渗氮)	14b)	ML	0.000	258	HV	450	650
66						MQ	0.000	363		450	650
67						ME	0.000	432		450	650
68	氮碳共渗锻钢 <sup>e</sup>	接触	调质钢	NV (氮碳共渗)	15	ML	0.000	650	HV	300	650
69						MQ/ME	1.167	425		300	450
70							0.000	950		450	650
71		弯曲	调质钢	NV (氮碳共渗)	16	ML	0.000	224	HV	300	650
72						MQ/ME	0.653	94		300	450
73							0.000	388		450	650
表 1 应结合图 1～图 16 中对应的脚注使用。											
<div><div><sup>a</sup> 应符合 ISO 4948-2。</div><div><sup>b</sup> 应符合 ISO 683-1 和 ISO 683-2。</div><div><sup>c</sup> 应符合 ISO 683-3。</div><div><sup>d</sup> 应符合 ISO 683-5。</div><div><sup>e</sup> 应符合 ISO 683-1、ISO 683-2、ISO 683-3 或 ISO 683-5。</div></div>											

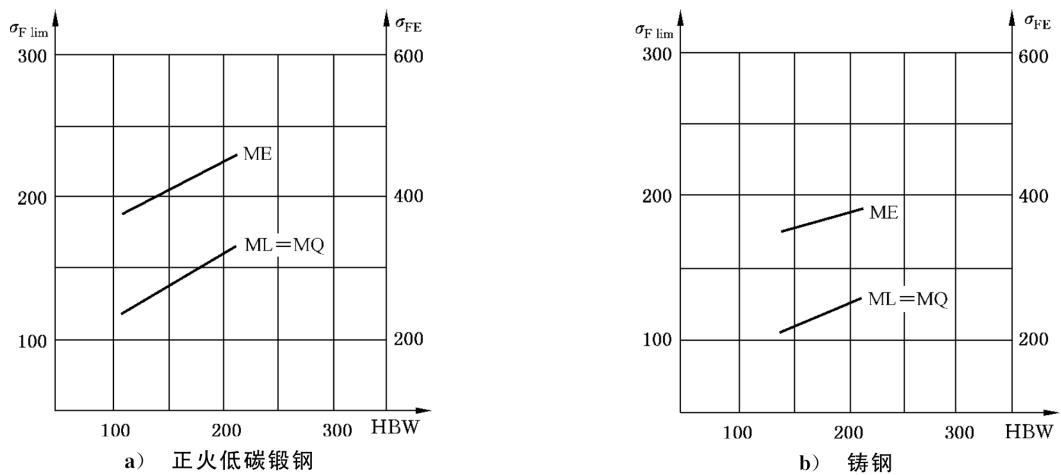


标引序号说明:

$\sigma_{H \lim}$  ——接触疲劳极限,单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>);

HBW ——表面硬度。

图 1 正火低碳锻钢和铸钢的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见 6.2)



标引序号说明：

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方毫米(N/mm<sup>2</sup>)；

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方毫米(N/mm<sup>2</sup>)；

HBW—— 表面硬度。

图 2 正火低碳锻钢和铸钢的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见 6.2)

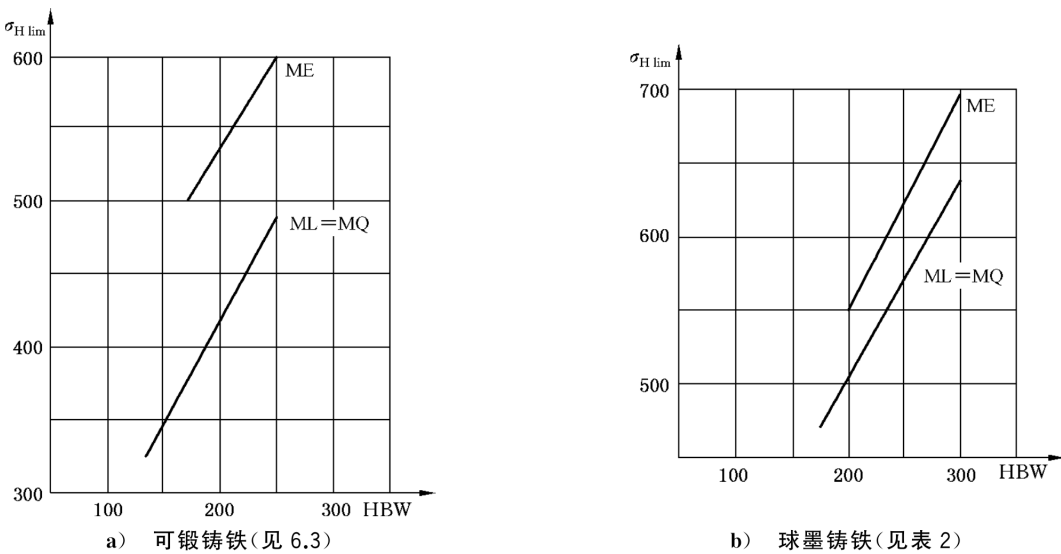
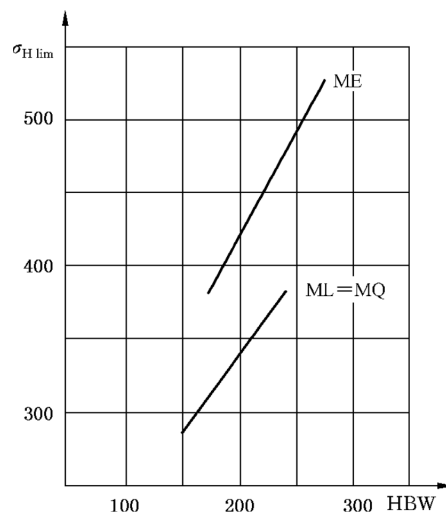


图 3 铸铁材料——铸铁的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见 6.3 和表 2)



c) 灰铸铁 (见 表 2)

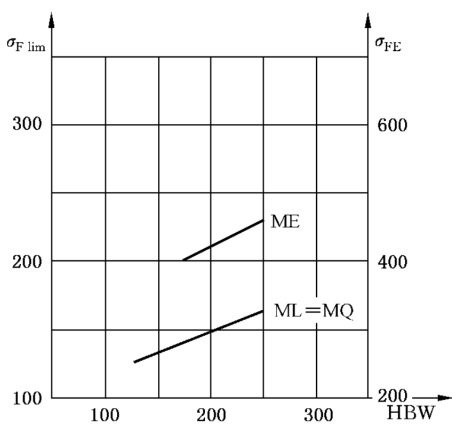
标引序号说明:

$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限, 单位为牛顿每平方米 (N/mm<sup>2</sup>);

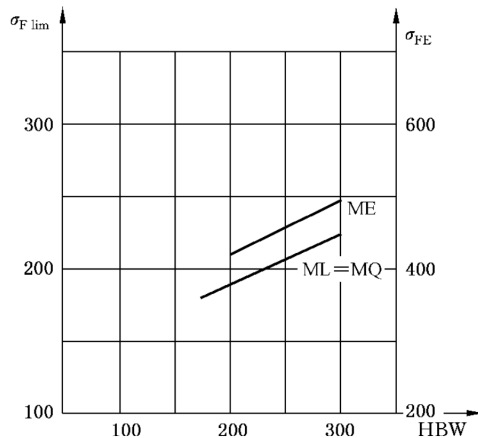
HBW —— 表面硬度。

注: 当 HBW < 180 时, 表明组织中存在较多的铁素体, 不推荐用作齿轮材料。

图 3 铸铁材料——铸铁的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见 6.3 和表 2) (续)

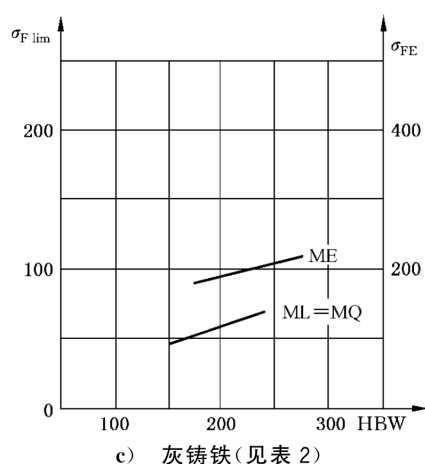


a) 可锻铸铁 (见 6.3)



b) 球墨铸铁 (见 表 2)

图 4 铸铁材料——铸铁的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见 6.3 和表 2)



标引序号说明:

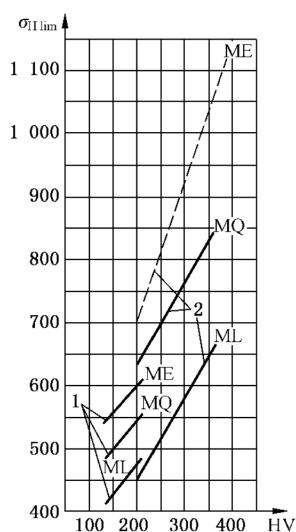
$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HBW —— 表面硬度。

注: 当  $\text{HBW} < 180$  时,表明组织中存在较多的铁素体,不推荐用作齿轮材料。

图 4 铸铁材料——铸铁的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见 6.3 和表 2) (续)



标引序号说明:

$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HV —— 表面硬度;

1 —— 碳钢;

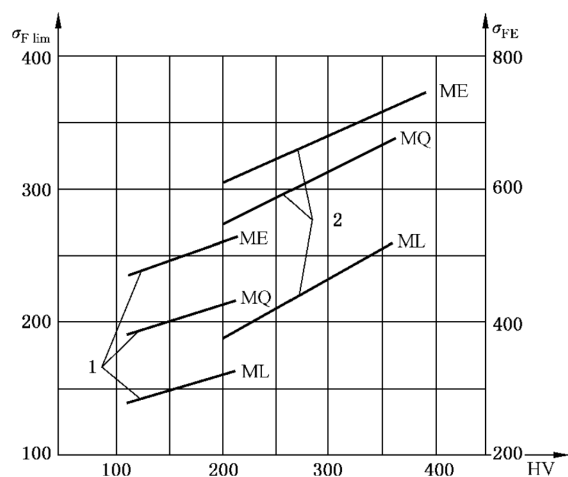
2 —— 合金钢。

注 1: 名义含碳量  $\geq 0.20\%$ 。

注 2: ISO 6336-5(2003 版)中合金钢的 MX 级已由现在的 ME 代替。

注 3: 使用合金钢 ME 线时更要偏重于生产厂家经验。该线是尚未达到稳态点蚀时的数据,与最近(2011 年)的标准试验结果出入较大。

图 5 调质锻钢的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见表 3)



标引序号说明：

$\sigma_{F\lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限，单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>)；

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限，单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>)；

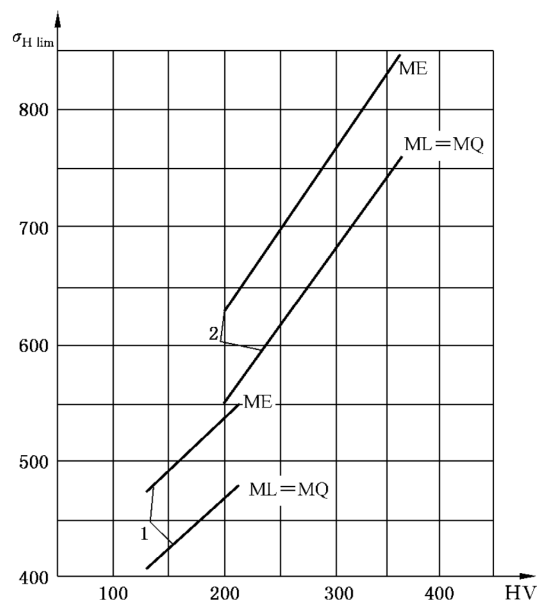
HV —— 表面硬度；

1 —— 碳钢；

2 —— 合金钢。

注：名义含碳量 $\geq 0.20\%$ 。

图 6 调质锻钢的  $\sigma_{F\lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 3)



标引序号说明：

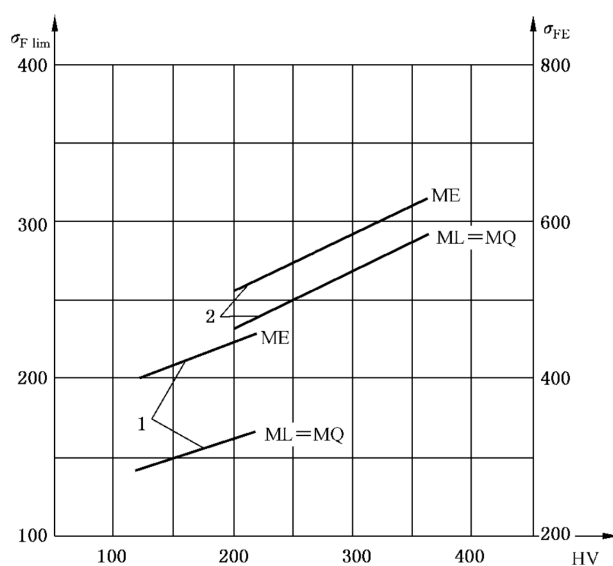
$\sigma_{H\lim}$  —— 接触疲劳极限，单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>)；

HV —— 表面硬度；

1 —— 碳钢；

2 —— 合金钢。

图 7 调质铸钢的  $\sigma_{H\lim}$  (质量要求见表 4)



标引序号说明:

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

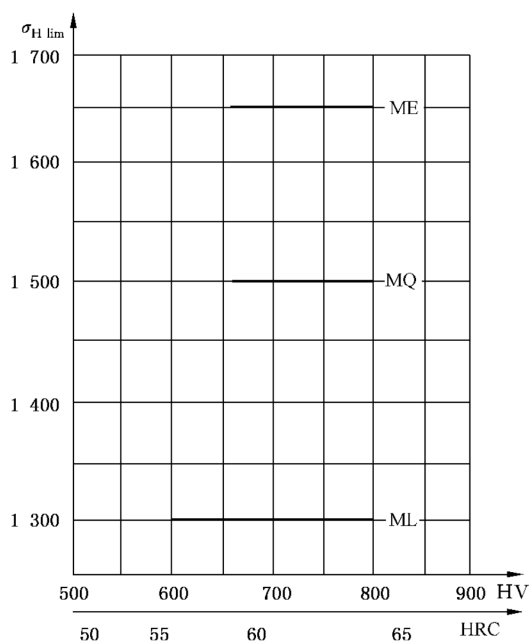
$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HV —— 表面硬度;

1 —— 碳钢;

2 —— 合金钢。

图 8 调质铸钢的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 4)



标引序号说明:

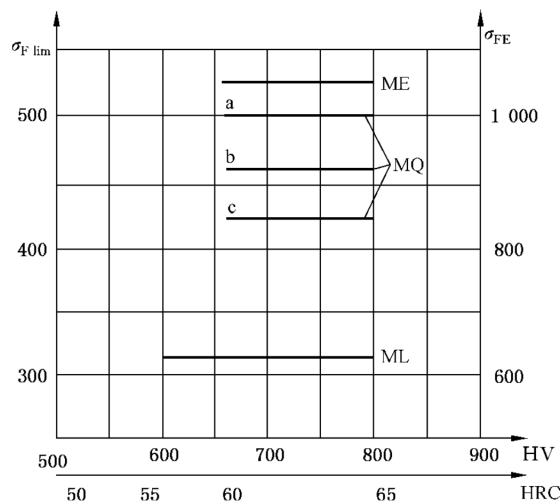
$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HRC —— 表面硬度;

HV —— 表面硬度。

注: 要求有合适的硬化层深度,见 5.6.1。

图 9 渗碳锻钢的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见表 5)



标引序号说明：

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

HRC —— 表面硬度；

HV —— 表面硬度；

a —— 心部硬度 $\geq 30$  HRC；

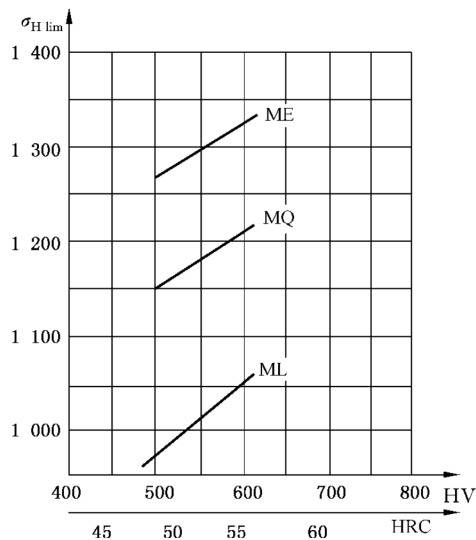
b —— 心部硬度 $\geq 25$  HRC,  $J=12$  mm 处 $\geq 28$  HRC；

c —— 心部硬度 $\geq 25$  HRC,  $J=12$  mm 处 $< 28$  HRC。

注 1: 合适的硬化层深度,见 5.6.2。

注 2: 见 6.6。

图 10 渗碳锻钢的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 5)



标引序号说明：

$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

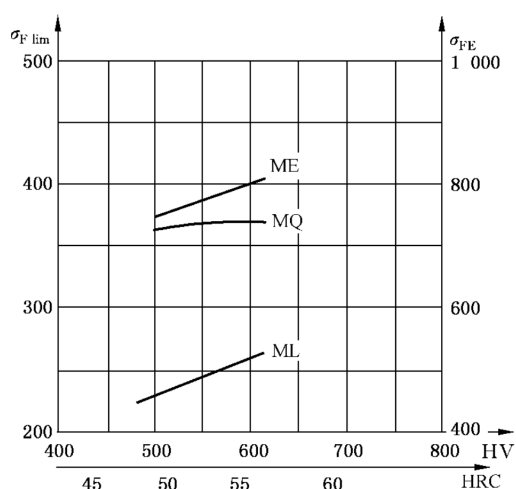
HRC —— 表面硬度；

HV —— 表面硬度。

注：要求有合适的硬化层深度,硬化层深度可根据经验确定。

图 11 火焰或感应淬火锻钢和铸钢的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见表 6)





标引序号说明:

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

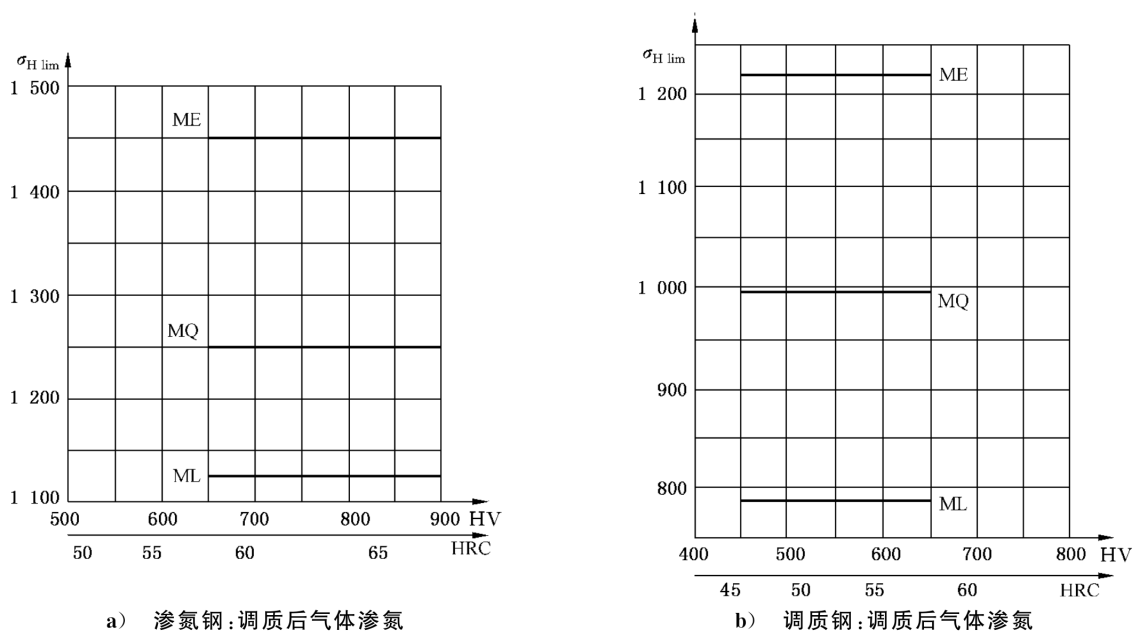
$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HRC —— 表面硬度;

HV —— 表面硬度。

注: 仅适用于齿根圆角处硬化的齿轮,应有适当的硬化层深度。齿根圆角处未硬化的数据未提供。

图 12 火焰或感应淬火锻钢和铸钢的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 6)



标引序号说明:

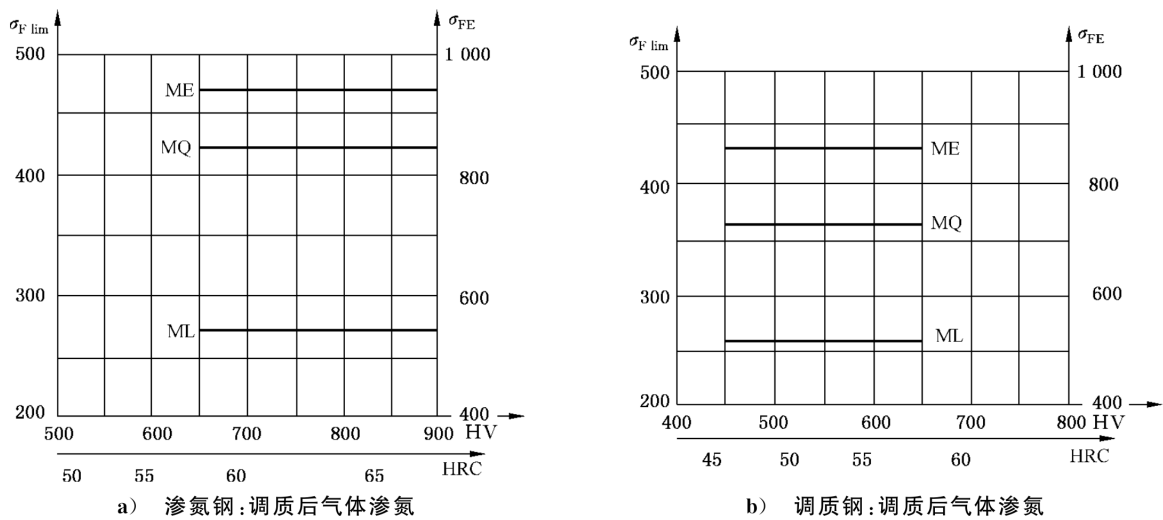
$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HRC —— 表面硬度;

HV —— 表面硬度。

注: 应有适当的硬化层深度,见 5.6.3。

图 13 渗氮钢和渗氮调质钢(锻钢)的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见表 7)



标引序号说明:

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方毫米(N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方毫米(N/mm<sup>2</sup>);

HRC —— 表面硬度;

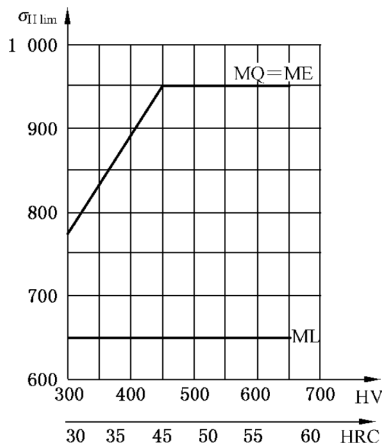
HV —— 表面硬度。

注 1: 仅适用于图 a);对于齿面硬度>750 HV1,当白亮层厚度超过 10  $\mu$ m 时,由于脆性  $\sigma_{FE}$  会减低。要求有合适的硬化层深度,见 5.6.3。

注 2: 仅适用于图 a);含 Al 渗氮钢 Nitralloy N, Nitralloy 135 等类似钢材,只能用于 ML 及 MQ 级,齿根弯曲疲劳极限  $\sigma_{F \lim}$  的最大值为 250 N/mm<sup>2</sup> (ML)和 340 N/mm<sup>2</sup> (MQ);

注 3: 仅适用于图 b):应有适当的硬化层深度,见 5.6.3。

图 14 渗氮钢和渗氮调质钢(锻钢)的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 7)



标引序号说明:

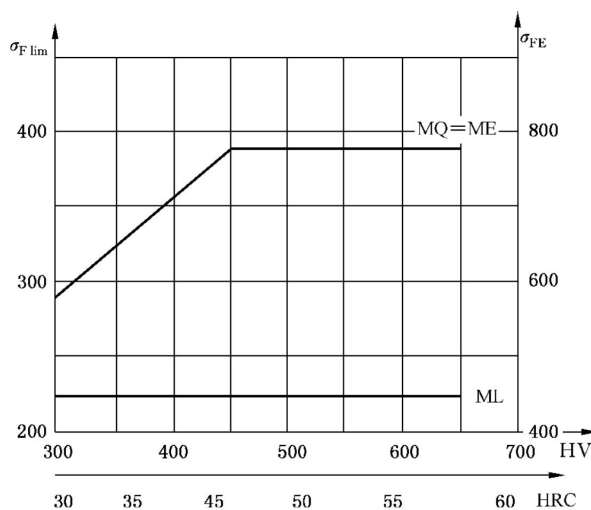
$\sigma_{H \lim}$  —— 接触疲劳极限,单位为牛顿每平方毫米(N/mm<sup>2</sup>);

HRC —— 表面硬度;

HV —— 表面硬度。

注: 要求有适当的硬化层深度,见 5.6.3。

图 15 氮碳共渗锻钢的  $\sigma_{H \lim}$  (质量要求见表 8)



标引序号说明:

$\sigma_{F \lim}$  —— 试验齿轮的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$\sigma_{FE}$  —— 齿轮材料的弯曲疲劳极限,单位为牛顿每平方米( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

HRC —— 表面硬度;

HV —— 表面硬度。

注: 要求有适当的硬化层深度,见 5.6.3。

图 16 氮碳共渗锻钢的  $\sigma_{F \lim}$  和  $\sigma_{FE}$  (质量要求见表 8)

## 5.6 表面硬化齿轮的渗层深度

### 5.6.1 总则

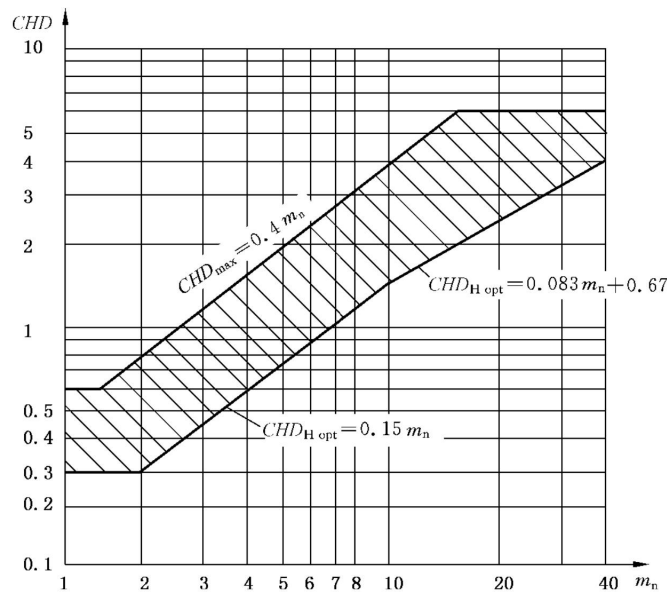
表面硬化齿轮的轮齿需要适当的硬化层深度以承受外加载荷,该深度的最小值和最大值都应在图纸上标明。在确定最小硬化层深度时,要注意弯曲强度与接触强度对应的最佳硬化层深度值应分别计算,且没必要相同。规定的最大硬化层深度值不应被超过,否则齿顶有脆裂的危险,且弯曲强度也会降低<sup>3)</sup>。

### 5.6.2 渗碳淬火齿轮的硬化层深度<sup>4)</sup>

- a) 防止点蚀失效的硬化层深度推荐值  $CHD_{H \text{ opt}}$ :如图 17 所示, $CHD_{H \text{ opt}}$  是磨齿后分度圆上的最佳硬化层深度,在许用接触应力下齿轮能够达到长寿命。

3) 5.6 的数据不适用于锥齿轮。

4) 硬化层深度的定义见表 5 第 9 项。



标引序号说明:

$CHD$  ——硬化层深度,单位为毫米(mm);

$m_n$  ——法向模数,单位为毫米(mm)。

图 17 仅考虑表面承载能力的最佳硬化层深度推荐值  $CHD_{H\ opt}$  和  
综合考虑弯曲强度和表面承载能力的最大硬化层深度  $CHD_{max}$

- b) 防止断齿失效的硬化层深度推荐值  $CHD_{F\ opt}$ :  $CHD_{F\ opt}$  是磨齿后在许用弯曲应力下能达到长寿命的最佳硬化层深度,检测位置在齿宽中部齿根圆角处  $30^\circ$  切线(外齿)或  $60^\circ$  切线(内齿)的垂直方向上。

$$0.1m_n \leq CHD_{F\ opt} \leq 0.2m_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

- c) 防止齿面剥落的硬化层深度推荐值  $CHD_C$ :  $CHD_C$  是磨齿后分度圆上基于接触载荷引起的最大剪应力深度而确定的最小有效硬化层深度。

注: 对于齿面剥落,目前尚无标准计算方法。

作为预防剥落破坏的指导性推荐值,  $CHD_C$  可由如下公式计算。不过,当接触应力值  $\sigma_H > 1\,400\text{ N/mm}^2$  时以下公式尚未被验证。

$$CHD_C = \frac{\sigma_H \cdot d_{w1} \cdot \sin\alpha_{wt}}{U_H \cdot \cos\beta_b} \frac{z_2}{z_1 + z_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$d_{w1}$  ——小轮节圆直径,单位为毫米(mm);

$\alpha_{wt}$  ——端面节圆压力角,单位为度( $^\circ$ );

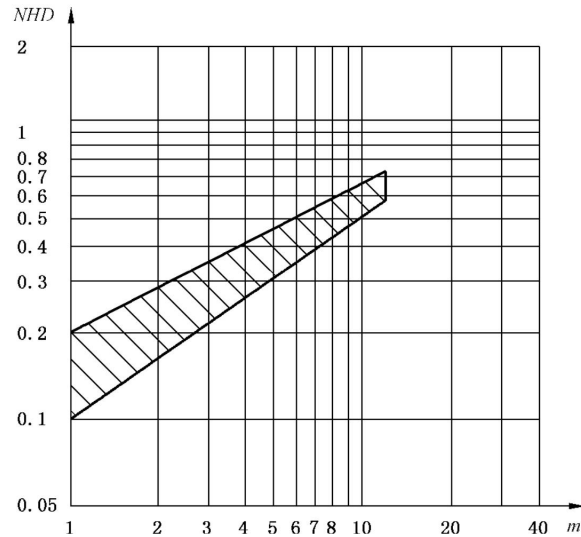
$U_H = 66\,000\text{ N/mm}^2$  (对于质量等级 MQ 和 ME);

$U_H = 44\,000\text{ N/mm}^2$  (对于质量等级 ML)。

- d) 有效硬化层深度最小极限值和最大极限值:  $CHD_{min/max}$  是磨齿后分度圆上的有效硬化层深度的最小/最大值(见图 17):  $CHD_{min} \geq 0.3\text{ mm}$ ,  $CHD_{max} \leq 0.4m_n (\leq 6\text{ mm})$ 。

5.6.3 渗氮齿轮的硬化层深度<sup>5)</sup>

a) 渗氮层深度推荐值  $NHD$ : 见图 18。



标引序号说明:

$NHD$  —— 渗氮层深度, 单位为毫米 (mm);

$m$  —— 模数, 单位为毫米 (mm)。

注: 钢材种类应与渗氮层深度推荐值  $NHD$  相匹配, 该值最大不应超过 0.8 mm。

图 18 渗氮层深度推荐值  $NHD$

b) 防止齿面剥落的渗氮层深度推荐值  $NHD_c$ :  $NHD_c$  指渗氮齿轮硬化层深度的最小值, 是基于接触载荷引起的最大剪切应力深度。如果  $NHD_c$  值小于图 18 中的渗氮层深度  $NHD$ , 则采用图 18 中所示的最小值。

注: 对于齿面剥落, 目前尚无标准计算方法。

$$NHD_c = \frac{U_c \cdot \sigma_H \cdot d_{w1} \cdot \sin \alpha_{wt}}{1.14 \times 10^5 \cdot \cos \beta_b} \frac{z_2}{z_1 + z_2} \dots\dots\dots (5)$$

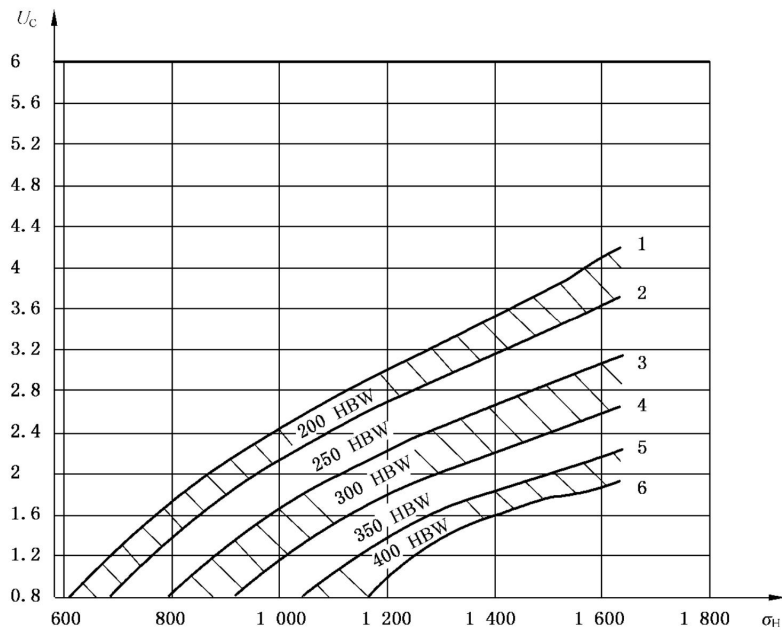
式中:

$U_c$  —— 心部硬度系数,

$$U_c = a + b \cdot \sigma_H + c \cdot \sigma_H^2 + d \cdot \sigma_H^3 \dots\dots\dots (6)$$

见图 19。

5) 渗氮层深度的定义按照表 7 第 7 项。



标引序号说明:

$U_c$  ——心部硬度系数;

$\sigma_H$  ——接触应力,单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>);

1~6 ——曲线编号,系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  的值见表 B.1。

注:对于一般设计,采用心部硬度带的上区,可以获得较深的硬化层;而对于高质量材料,可采用下区。

图 19 渗氮齿轮的心部硬度系数  $U_c$

## 6 材料质量及热处理工艺要求

### 6.1 一般原则

图 1 至图 16 中所示的 ML、MQ 和 ME 三个材料质量等级是按照 B 法<sup>6)</sup> 确定的疲劳极限值来区分的,见 4.3、5.2 及 5.3。

——ML 表示对齿轮加工的材料和热处理工艺的一般质量要求;

——MQ 表示对有经验的制造者在一般成本控制下能够达到的质量等级;

——ME 表示应经过高可靠度的制造过程控制才能够达到的质量等级。

注:本文件中的疲劳极限图不允许外延。

通常,采用特殊质量的材料,如用真空感应冶炼(VIM)和真空电弧重熔(VAR)冶炼,来保证高可靠性或高承载能力。

当采用常规焊接工艺拼焊齿轮,拼焊后应做消除应力处理。

6.2 至 6.4 所给出的内容已经过实用验证,可用作指导性文件。当采用这些应力极限值时,材料等级的各项要求应得到保证<sup>7)</sup>。如果表中没有规定,必要时可以通过对每个要求进行专门的认证,或者通过实践来提出符合实际的要求。本文件并不要求所有质量项目都一一检验,应按照生产实际的可控性制定检验方案来对产品质量进行检验。由于相对标准值的偏差对性能的影响不易评估,因而未给出中

6) ISO 6336-5:1995 中曾经描述的材料 MX 质量等级已在 ISO 6336-5:2003 中修改为 ME。

7) 选材时既可按照 ISO 683-1、ISO 683-2、ISO 683-3、ISO 683-4 给出的相关等级选择,也可按照 ISO 683-5(推荐)或根据适当的国家标准或国际标准确定。

间值。对于零件齿顶圆以下一定范围内的轮齿材料质量要求,见表 2~表 7。当然生产者也可根据各自的经验,采用其他的方法或数据。供需双方对细节应达成协议,尤其是针对大型齿轮。另外,对于未能达到所有条款要求的缺陷产品,供需双方应就让步接收或返修达成一致。

## 6.2 正火低碳锻钢或铸钢、普通碳素钢(见图 1 和图 2)

由于这些钢材对化学成分没有规定,冶炼方法也不明确,因此 MQ 线位置较低,与 ML 线重合。正火低碳钢只用于轻载齿轮和非关键齿轮。当钢材质量很高或经过实践验证时,亦可按照 ME 等级应用。

## 6.3 黑心可锻铸铁[见图 3a)和图 4a)]

热处理工艺控制得当时,可以得到高质量材料;但是由于这种材料通常用于小型轻载齿轮,从可靠性考虑,MQ 线位置较低,与 ML 线重合。若经过实践验证,亦可按照 ME 等级应用。

## 6.4 其他材料[见图 3b)、图 3c)、图 4b)、图 4c)和图 5~图 16]

其他材料的质量及热处理工艺要求列于表 2~表 8。

表 2 铸铁材料(灰口与球墨铸铁)

序号	项目	灰口铸铁(见图 3、图 4)		球墨铸铁(见图 3、图 4)	
		ML/MQ	ME	ML/MQ	ME
1	化学分析	不复检	100%复检 铸造合格证	不复检	100%复检 铸造合格证
2	冶炼工艺	不要求	电炉或相当工艺	不作规定	电炉或相当工艺
3	力学性能	只检 HBW	$R_m$ 对同一铸锭分离的试样做 $R_m$ 试验	只检 HBW	$R_m$ 、 $R_{p0.2}$ 、 $A$ 、 $Z$ 、 $KU(KV)$ 从齿轮毛坯上取出代表性试样,随工件在切齿前进行预热处理,按照 ISO 10474 出具力学试验专业检验报告。 硬度测试应该在齿部或贴近工作位置
4	组织:石墨形态	有规定,但不复检	限制	不复检	限制
	基体组织 <sup>a</sup>	不要求(对合金灰铁,铁素体 F 少于 5%)	铁素体 $F \leq 5\%$	不作规定	
5	内部缺陷(裂纹):供需双方确定验收标准	不检验	检验疏松、裂纹、气孔,并有数量限制	不检验	检验疏松、裂纹、气孔,并有数量限制
6	去应力	不要求	推荐(500℃~530℃)×2h,对合金灰铁(530℃~560℃)×2h	不要求	推荐(500℃~560℃)×2h

表 2 铸铁材料(灰口与球墨铸铁)(续)

序号	项目	灰口铸铁(见图 3、图 4)		球墨铸铁(见图 3、图 4)	
		ML/MQ	ME	ML/MQ	ME
7	补焊	轮齿部位不准许补焊,补焊工艺需经认可		轮齿部位不准许补焊,补焊工艺需经认可	
8	表面裂纹检验	不检验	目测。双方约定时可着色探伤	不检验	不准许存在裂纹。100%磁粉或荧光磁粉或着色探伤,对于大批量产品,可按照统计法抽检
<sup>a</sup> 可用同一炉号的代表性试样检验。					

表 3 非表面硬化调质锻钢(锻造或轧制钢材)(见图 5 和图 6)

序号	项目	ML	MQ	ME <sup>a</sup>											
1	化学分析 <sup>a,b</sup>	不复检	专业检验报告按照 ISO 10474,应 100%可追溯原始炉号												
2	热处理后的力学性能	HBW	宜:HBW+力学性能或淬透性试验	取自同炉号并经同样热处理的试样试验 $R_m$ 、 $R_{p0.2}$ 、A、Z、KU(KV),专业检验报告按照 ISO 10474。对直径大于 250 mm 的锻件或轧制件,应全部复检 HBW,控制截面示例见附录 A											
3	冶炼工艺	不要求	应经钢包脱氧和精炼处理,并经真空脱气使 $H \leq 0.000\ 25\%$ 。浇注时应有防氧化措施,为改善铸造性能可添加 Ca 元素,但应有记录,且最大值见本表 3.3												
3.1	纯净度(非金属夹杂) <sup>c</sup>	不要求	按照 ISO 4967 中 A 法检验纯净度,检验面积约 200mm <sup>2</sup> ,合格标准如下表,也可按照尺度类似的其他标准。检验报告按照 ISO 10474。对于 MQ 和 ME 级,S 含量 $\leq 0.04\%$												
				A		B		C		D		Ds			
				细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系				
				MQ	3.0	3.0	2.5	1.5	2.5	1.5	2.0	1.5			
ME	2.5	1.5	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0						
3.2	O 含量	不要求	$\leq 0.002\ 5\%$			$\leq 0.002\ 5\%$									
3.3	Ca 含量	不要求	$\leq 0.002\ 5\%$			$\leq 0.001\ 0\%$									
4	晶粒度:按照ISO 643:2012 表 C.1 <sup>f</sup>	不要求	细晶组织。90%以上区域应细于 5 级,且没有粗于 3 级的晶粒。检验报告按照 ISO 10474												
5	无损检测														



表 3 非表面硬化调质锻钢(锻造或轧制钢材)(见图 5 和图 6)(续)

序号	项目	ML	MQ	ME <sup>a</sup>
5.1	粗车后超声波探伤 <sup>c</sup>	不要求	应做检验,允许抽样。 锻造后检测。专业检验报告按照 ISO 10474。大直径的零件,宜在切齿之前检测。按照 ASTM A 388、EN 10228-3 或 EN 10308,检测可以使用底面反射法,也可采用按照 ASTM E428 中 8-0400 制作的试块上直径 3.2 mm 平底孔的反射信号。不使用 DAC 曲线。在保证相同质量评价的水平下,其他 UT(超声波探伤)方法也可以使用。 合格标准如下: 显示符合 EN 10228-3 的 4 级或 EN 10308:2001 的 4 级。按照 EN 标准,非密集型缺陷大于 2 mm 应记录,不准许超过 3 mm 当量平底孔直径	
5.2	成品(喷丸前)表面裂纹检测	不准许有裂纹。磨削齿轮需要检测表面裂纹。检验方法按照 ASTM E1444 中的荧光磁粉或 ASTM E1417 中的着色渗透检测	不准许有裂纹。磨削齿轮需要检测表面裂纹。检验方法按照 ASTM E1444 中的荧光磁粉或 ASTM E1417 中的着色渗透检测。 首选荧光磁粉检测	
6	锻造比	不要求	锻造(轧制)比 <sup>d</sup> :采用模铸锭时 $\geq 3:1$ ,采用连铸坯时 $\geq 5:1$ ,通过热成形加工应保证全截面都达到最小的锻造比要求	
7	金相组织	不要求	不规定。对强度 $> 800 \text{ N/mm}^2$ (240 HBW)材料,应经淬火、回火处理	回火温度 $\geq 480^\circ\text{C}$ ,齿根硬度应符合图纸技术要求,轮缘部分金相组织以回火马氏体为主 <sup>e</sup>
参照表 1 数据,小齿轮与大齿轮的硬度宜相差 40 HV 以上。				
<p><sup>a</sup> 本文件第 1 版(1995 年版)曾经采用的材料等级 MX,在 2003 年版本中已修改为 ME。</p> <p><sup>b</sup> 注意:对于 <math>0^\circ\text{C}</math> 以下工作的齿轮:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>——考虑低温夏比(冲击)性能的测试;</li> <li>——考虑断口形貌转变或脆性转变温度;</li> <li>——考虑采用高镍合金钢;</li> <li>——考虑将碳含量降至 0.4% 以下;</li> <li>——考虑采用加热元件提高润滑剂温度。</li> </ul> <p><sup>c</sup> 纯净度等级和超声波检测要求,只适用于最终齿顶圆到至少 2 倍全齿高的深度。齿轮生产厂家应向铸钢厂或锻造厂提出具体的检测位置要求。</p> <p><sup>d</sup> 采用铸坯制备锻件时的压缩比不考虑锻造工艺,只和数值有关。对于下列情况,锻造比可介于 3~5:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 需进一步热成形的轧棒;</li> <li>2) 中心部分去除的坯料;</li> <li>3) 由于齿轮的结构尺寸原因锻造比未达到 5。</li> </ol> <p><sup>e</sup> 在齿轮截面上,齿顶至 1.2 倍齿高深处的显微组织以回火马氏体为主,允许少量上区转变产物(先共析铁素体、上贝氏体、细小珠光体),但不应存在未溶块状铁素体。对于控制截面<math>\leq 250 \text{ mm}</math> 的齿轮,非马氏体相变产物(上区转变产物)不应超过 10%;对于控制截面<math>&gt; 250 \text{ mm}</math> 的齿轮,非马氏体相变产物不应超过 20%。</p> <p><sup>f</sup> 晶粒度检测应在零件最有可能发生失效的相关区域,检测面积 <math>3.0 \text{ mm}^2</math>。试样可取自同一铸坯,应具有相同的锻造比和热处理工艺。</p>				

表 4 非表面硬化调质铸钢(见图 7 和图 8)

序号	项目	ML/MQ	ME
1	化学分析	不复检	专业检验报告按照 ISO 10474,100%可追溯原始炉号
2	热处理后的力学性能	HBW	试验 $R_m$ 、 $R_{p0.2}$ 、 $A$ 、 $Z$ 、 $KU(KV)$ 和 HBW,专业检验报告按照 ISO 10474。应 100%可追溯原始炉号。复检 HBW 时,可采用统计法抽检
3	按照 ISO 643 检验晶粒度 <sup>a</sup>	不要求	细晶组织。90%以上区域应细于 5 级,且没有粗于 3 级的晶粒。检验报告按照 ISO 10474
4	无损检测		
4.1	粗车后超声波检测:按照 ISO 9443	不要求	只检齿部和齿根位置,专业检验报告按照 ISO 10474。推荐但不强制。对于大直径产品,则宜在切齿前检测。 合格标准:1 区(外圆至齿根以下 25 mm 范围)应符合 ASTM A609 标准 1 级;2 区(轮缘其余部分)使用 3.2 mm 的平底孔,或经批准的具有相同灵敏度的底波反射法
4.2	成品(未喷丸)表面裂纹	不应存在裂纹。 按照 ASTM E1444 的荧光磁粉检测或着色渗透检测,检验比例 100%。大批量产品时,可以使用抽样检验	
5	补焊	按照客户认可工艺补焊	只允许粗车状态时(热前)按照客户认可工艺进行,而切齿后不准许补焊
<p>当铸钢件质量达到锻钢件(锻造或轧制)质量标准时,对与锻钢小齿轮配对的铸钢齿轮,也可采用锻钢的许用应力值计算其承载能力,但这种情况应经试验数据或应用实例验证。</p> <p>锻钢纯度及锻造比标准不应用于铸钢,夹杂物含量与形状应控制应以球状硫化锰夹杂物(I 型)为主,不准许存在晶界硫化锰夹杂物(II 型)。</p>			
<p><sup>a</sup> 晶粒度检验应在零件最有可能发生失效的相关区域,检验面积 3.0 mm<sup>2</sup>。试样可取自同一铸坯,具有相同的锻造比和热处理工艺。</p>			

表 5 渗碳淬火锻钢(锻造或轧制)(见图 9 和图 10)

序号	项目	ML	MQ	ME
1	化学分析 <sup>a</sup>	不复检	专业检验报告按照 ISO 10474,100%可追溯原始炉号	从同一铸锭或铸坯上截取代表性试样,专业检验报告按照 ISO 10474
2	淬透性:按照 ISO 642 端淬法检验	不复检	专业检验报告按照 ISO 10474,100%可追溯原始炉号,允许采用计算淬透性值,计算方法应记录存档。试验法优先于计算法	从同一铸锭或铸坯上截取代表性试样,检验报告按照 ISO 10474
3	冶炼方法	不要求	应经钢包脱氧及精炼处理,并经真空脱气使 $H \leq 0.00025\%$ ,浇注时应有防氧化措施,为改善铸造性能可添加 Ca 元素,但应有记录,且最大值见本表第 3.3 项	

表 5 渗碳淬火锻钢(锻造或轧制)(见图 9 和图 10)(续)

序号	项目	ML	MQ				ME					
3.1	纯净度 <sup>b</sup>	不要求	按照 ISO 4967 中 A 法检验纯净度,检验面积约 200 mm <sup>2</sup> ,合格标准如下表,也可按照类似要求的其他标准。检验报告按照 ISO 10474,对 MQ 和 ME 级,S 含量≤0.04%									
				A		B		C		D		Ds
				细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
			MQ	3.0	3.0	2.5	1.5	2.5	1.5	2.0	1.5	
			ME	2.5	1.5	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0
3.2	O 含量	不要求	≤0.002 5%				≤0.002 5%					
3.3	Ca 含量	不要求	≤0.002 5%				≤0.001 0%					
4	锻造比 <sup>c</sup>	不要求	锻造(轧制)比:采用模铸锭时≥3:1,采用连铸坯时≥5:1,为确保全截面可靠工作,应通过热加工达到锻造比要求									
5	热处理前晶粒度(按照 ISO 643:2012 表 C.1 <sup>k</sup> )	不要求	细晶组织。90%以上区域应细于 5 级,且没有粗于 3 级的晶粒,检验报告按照 ISO 10474(也见本表第 10.6 项)									
6	热处理前无损检测											
6.1	粗车状态超声波探伤	不要求	要求探伤,可统计法抽检。 按照 ASTM A388,EN 10228-3 或 EN 10308,采用背反射或 8-0400 标块,或按照 ASTM E428 中 3.2 mm 平底孔法,不要求距离振幅修正曲线。也可采用其他类似精度的检验方法。 合格标准为:痕迹大小按照 EN 10228-3 中的 4 级或 EN 10308:2001 中的 4 级。FBH(平底孔)门槛值 3 mm,按照上述 EN 标准的记录灵敏度≥2.0 mm									
7	表面硬度											
7.1	成品代表性部位表面硬度 <sup>d</sup> (ISO 18265 维-洛硬度换算表)	≥600 HV 或 ≥55 HRC,统计法抽检	660 HV~800 HV 或 58 HRC ~ 64 HRC。统计法抽检				660 HV~800 HV 或 58 HRC ~ 64 HRC,批量 5 件以下时全检,量大时可抽检。根据齿轮大小选择硬度检验方法					
7.2	齿宽中部齿根表面硬度(模数大于 12 时 <sup>d</sup> )	不要求	符合图纸要求,统计法抽检或在代表性试样上检测				符合图纸要求,对大、小齿轮或代表性试样全检					
8	齿宽中部的心部硬度:垂直于齿根 30°切线向内 5 倍于硬化层深度但不少于 1 倍模数,或按照 6.5 检测代表性试样	≥21 HRC,有要求,不复检。	≥25 HRC,按照 6.5b)检测代表性试样,或按照淬火冷却速度和淬透性曲线计算				≥30 HRC,检测试样或代表性试棒(见 6.5)					

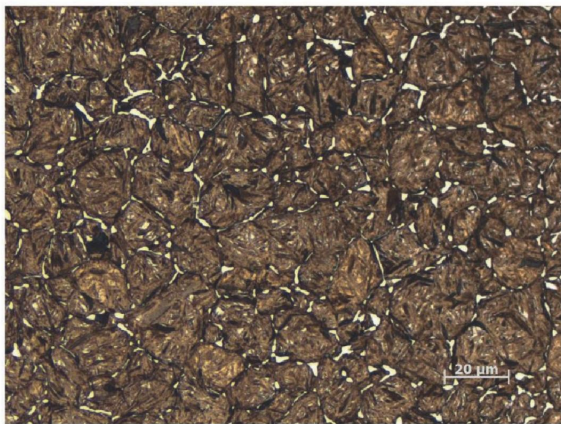
表 5 渗碳淬火锻钢(锻造或轧制)(见图 9 和图 10)(续)

序号	项目	ML	MQ		ME	
9	成品硬化层深度(按照 ISO 2639 检验):按照 6.5 检验代表性试样或检验齿宽中部 1/2 齿高处	硬化层深度是指表面到 550 HV 或 52 HRC 硬度处的垂直距离。 图纸技术要求中应规定出其上、下限值。在规定该值时,注意弯曲和接触强度所对应的最佳值并不一致。5.6 给出了硬化层深度推荐值 <sup>e</sup>				
10	金相组织:可按照 6.5 检测试样,根据成品状态确定检测点的深度。MQ 级宜检测,ME 级应检测,而 ML 级不作规定					
10.1	表面碳含量	不要求	对于合金元素总量≤1.5%的低合金钢:推荐 0.65%~1.0%; 对于合金元素总量>1.5%的高合金钢:推荐 0.60%~0.9%			
10.2	表层组织:金相法检测,贝氏体应少于 10%	不要求	宜检测。以细针状马氏体为主,检测代表性试样		应检测。细针状马氏体,检测代表性试样	
10.3	碳化物	代表性试样。允许存在按照图 20a)的半连续网状碳化物	按照图 20b)允许非连续状碳化物存在。其与半连续网状碳化物的区别在于:晶粒(晶界)轮廓尚未显现,且碳化物长度≤0.02 mm,可检测代表性试样		按照图 20c),允许存在弥散分布的碳化物,碳化物尺寸≤0.01 mm,按照 6.5 检测代表性试样	
10.4	残余奥氏体:金相法检测 <sup>h</sup>	不要求	检测同炉试样,不超过 30%		按照 6.5 检测代表性试样。不超过 30%,且细小弥散分布	
			如果超过上述规定值,可通过控制喷丸(见 6.7)或其他措施修复处理			
10.5	未磨削面晶间氧化 IGO: 可对未腐蚀试样采用金相法检测,其界限值与实测硬化层深度 $e$ 有关。 在磨削面上,不应有可见的 IGO 或非马组织 <sup>i</sup>	不要求	硬化层深度 $e$ mm	IGO $\mu\text{m}$	硬化层深度 $e$ mm	IGO $\mu\text{m}$
			$e<0.75$	17	$e<0.75$	12
			$0.75\leq e<1.50$	25	$0.75\leq e<1.50$	20
			$1.50\leq e<2.25$	35	$1.50\leq e<2.25$	20
			$2.25\leq e<3.00$	45	$2.25\leq e<3.00$	25
			$3.00\leq e<5.00$	50	$3.00\leq e<5.00$	30
			$e\geq 5.00$	60	$e\geq 5.00$	35
			如果超出上述规定值,可通过控制喷丸(见 6.7)或其他措施修复处理,但应征得客户同意			
10.6	最终热处理后晶粒度:按照 ISO 643 <sup>k</sup>	不要求	细晶组织。90%以上区域应细于 5 级,且无粗于 3 级的晶粒,检验报告宜按照 ISO 10474 执行		细晶组织。90%以上区域应细于 5 级,且无粗于 3 级的晶粒,检验报告应按照 ISO 10474	

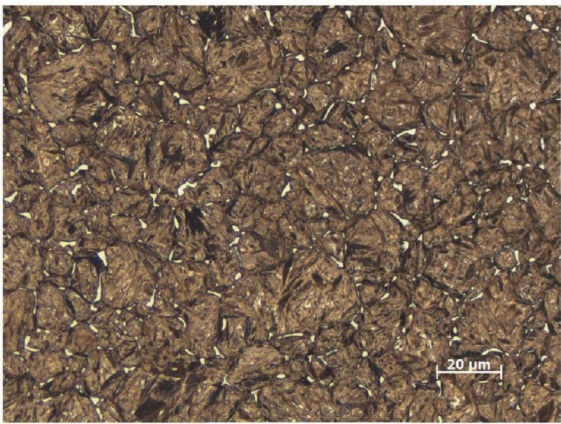


表 5 渗碳淬火锻钢(锻造或轧制)(见图 9 和图 10)(续)

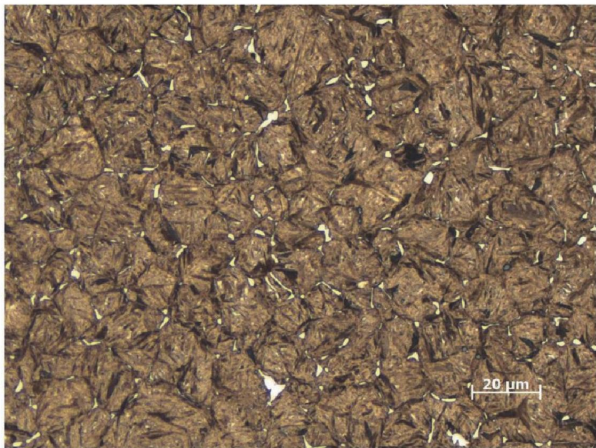
序号	项目	ML	MQ	ME
11	心部组织(检测位置同本表第 8 项)	不要求	马氏体为主,允许有细条状铁素体或贝氏体,不应有(未溶)块状铁素体,见本表第 8 项	马氏体为主,允许有细条状铁素体或贝氏体,不应有(未溶)块状铁素体,按照 6.5 检验代表性试样
12	表面裂纹 <sup>i</sup>	不应有裂纹。 检验方法:磁粉检测、荧光磁粉检测、着色渗透检测。 抽样检验	不应有裂纹。 检验比例:50%。 检 验 方 法: ASTM E1444 或 EN 10228-1 可根据批量大小进行抽样检验	不应有裂纹。 检验比例:100%。 检 验 方 法: ASTM E1444 或 EN 10228-1
13	磨削烧伤检测:按照 ISO 14104 酸蚀法 <sup>j</sup>	所有工作面上允许有 B 级烧伤(FB3)。宜按照统计法抽检,但不强制	10%工作面上允许有 B 级烧伤(FB1)。按照统计法抽检	工作面上不应有烧伤(FA),按照 ISO 14104 要求 100%检测
			如果超出上述规定,可通过受控的喷丸工艺(见 6.7)来处理。还可能需精修才能达到表面粗糙度和几何要求	
注:本文件对碳氮共渗钢未作规定,见 6.6 和 6.7。				
<div><div><sup>a</sup> 材料的选择按照 ISO 683-1、ISO 683-2、ISO 683-3、ISO 683-4 及 ISO 683-5(推荐)或相应的国家、国际标准。</div><div><sup>b</sup> 纯净度要求只针对齿坯的两倍齿高区域内。对于外齿轮,该区域一般小于半径的 25%。</div><div><sup>c</sup> 总锻造比可以是多次热成形的总量,对于下列情况,锻造比可小于 5:1,但不应小于 3:1; 1) 轧制棒材还要经过进一步的热成形加工; 2) 坯料中心部位已加工掉,且 3) 因齿轮产品尺寸限制而达不到 5:1。</div><div><sup>d</sup> 受齿轮尺寸及热处理工艺影响,齿根部位硬度可能会略低于齿面硬度,其允许值可由供需双方约定,但不应低于 55 HRC。</div><div><sup>e</sup> 其他硬化层深度要求,例如,见参考文献[13]。</div><div><sup>h</sup> 亦可采用 X-射线分析方法,其残余奥氏体含量的限值应由供需双方约定。</div><div><sup>i</sup> 任何级别成品齿轮的轮齿部位都不能存在裂纹、破损、疤痕及皱皮。探伤磁痕每 25 mm 齿宽上最多只能有 1 个,每个齿面不能超过 5 个;工作齿高 1/2 以下部位不准许存在磁痕;对于超标准缺陷,在不影响齿轮完整性并征得用户同意情况下可以去除。</div><div><sup>j</sup> 经供需双方同意,可采用其他磨削回火控制方法。</div><div><sup>k</sup> 晶粒度检测应在零件最有可能发生早期失效的区域,检测面积 3.0mm<sup>2</sup>。</div><div><sup>l</sup> 由于 IGO 深度与非马组织、脱碳层密切相关,IGO 检测可与表面硬度(本表第 7.2 项)及金相组织(本表第 10.2 项)检验结合起来。</div></div>				



a) 半连续网状碳化物,ML 级允许



b) 非连续碳化物,ML 和 MQ 级允许



c) 弥散分布碳化物,ML、MQ 和 ME 级允许

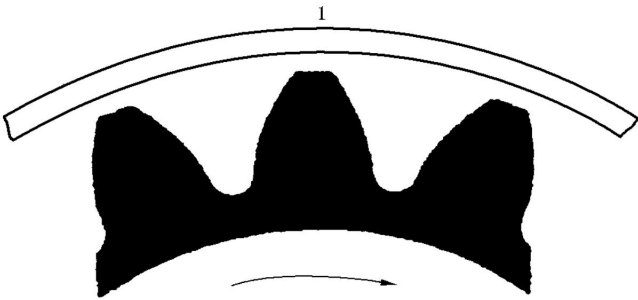
图 20 渗碳齿轮表层碳化物检验图谱(5%硝酸酒精溶液腐蚀,放大倍数 400×)

表 6 火焰或感应淬火锻钢和铸钢(见图 11 和图 12)

序号	项目	ML	MQ	ME
1	化学分析	不要求	参照表 3 中调质锻钢第 1 项~第 6 项;或表 4 中调质铸钢第 1 项~第 3 项	
2	热处理后力学性能			
3	纯净度			
4	晶粒度			
5	超声波探伤			
6	锻造比			
7	表面硬度	所有感应淬火齿轮均应炉内回火 <sup>a</sup> , 485 HV~615 HV(48 HRC~56 HRC)	所有感应淬火齿轮均应炉内回火 <sup>a</sup> , 500 HV~615 HV(50 HRC~56 HRC)	所有感应淬火齿轮均应炉内回火,500 HV~615 HV(50 HRC~56 HRC)
8	硬化层深度 <sup>b</sup> : 按照 ISO 3754	硬化层深度是指从表面到硬度值相当于表面硬度规定值的 80%位置的垂直距离。每种产品硬化层深度的要求由经验确定。硬化层深度 SHD 的检测位置应在图纸上注明		

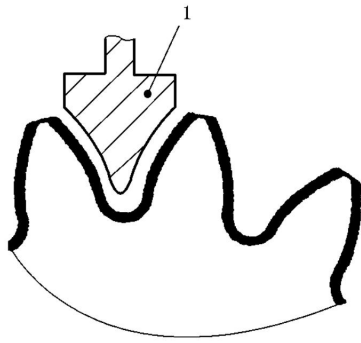
表 6 火焰或感应淬火锻钢和铸钢(见图 11 和图 12) (续)

序号	项目	ML	MQ	ME	
9	表层金相组织	不要求	统计法抽检,以细针状马氏体为主	严格抽检,以细针状马氏体为主,非马氏体≤10%,不准许存在游离态铁素体	
10	无损检测				
10.1	表面裂纹: 不准许 (ASTM E1444)	首批次检验(磁粉检测、荧光磁粉检测或着色渗透检测)	首批次检验(磁粉检测、荧光磁粉检测或着色渗透检测)	100%检测(磁粉检测、荧光磁粉检测或着色渗透检测)	
10.2	齿部磁粉探伤 <sup>c</sup> :按照 ASTM E1444	不要求		模数 mm	最大痕迹 mm
				≤2.5	1.6
				>2.5~8	2.4
				>8	3.0
11	预备组织	淬火加回火			
12	过热,尤其在齿顶	避免	严格预防(<1 000 ℃)		
注: 本表适用于套圈式感应或火焰加热淬火,以及逐齿感应加热淬火且齿根硬化,硬化层形状见图 21 和图 22。					
<p><sup>a</sup> 首选炉内回火,提示:免回火或感应回火存在一定风险。</p> <p><sup>b</sup> 为了得到稳定的硬化效果,硬度分布、硬化层深、设备参数及工艺方法应该建档,并定时检查。另外用 1 个与工件形状及材料相同的代表性试样来修正工艺。设备及工艺参数应足以保证硬化效果的良好复现性,硬化层应布满全齿宽和齿廓,包括双侧齿面、双侧齿根和齿根拐角。</p> <p><sup>c</sup> 任何级别成品齿轮的轮齿部位都不能存在裂纹、破损、疤痕及皱皮。探伤磁痕每 25 mm 齿宽最多只能 1 个,每个齿面不能超过 5 个;工作齿高 1/2 的以下部分不准许存在磁痕;对于超标缺陷,在不影响齿轮完整性并征得用户同意情况下可以去除。</p>					



标引序号说明:  
1——感应圈或火焰喷射圈。

图 21 套圈式加热及淬火示意图



标引序号说明：  
1——感应器或火焰喷嘴。

图 22 逐齿加热及淬火示意图

表 7 渗氮钢和渗氮调质钢(锻钢)(见图 13 和图 14)

序号	项目	ML	MQ	ME
1	化学分析	参照表 3 中调质锻钢第 1 项~第 6 项		
2	热处理后的力学性能			
3	纯净度			
4	晶粒度			
5	超声波探伤			
6	锻造比			
7	渗氮硬化层深度	规定的最小值 有效硬化层深度指表面到 400 HV 或 40.8 HRC 硬度处的垂直距离。如果心部硬度超过了 380 HV,可以“心部硬度+50HV”作为界限硬度值。 渗氮硬化层深度 <i>NHD</i> 的推荐值见 5.6		
8	表面硬度			
8.1	渗氮钢 <sup>a,b,c</sup>	650 HV~900 HV <sup>d</sup>		
8.2	调质钢 <sup>a</sup>	≥450 HV		
9	预备热处理 <sup>e</sup>	淬火及回火(调质)处理,表面无脱碳。回火温度应高于后续渗氮温度一定幅度,以防止渗氮时的硬度降低		
10	表面化合物层(白亮层)	≤25 μm	白亮层≤25 μm	白亮层≤25 μm,且 γ'/ε>8
11	心部性能	<i>R<sub>m</sub></i> 不复检	<i>R<sub>m</sub></i> >900 N/mm <sup>2</sup> (一般讲,铁素体<5%)	
12	渗氮后续加工	—	特殊情况下可磨削,但有可能降低齿面接触疲劳性能。如果经过磨齿,宜按照 ASTM E1444 或 EN 10228-1进行磁粉探伤	特殊情况下可磨削,但有可能降低齿面接触疲劳性能。如果经过磨齿,应按照 ASTM E1444 或 EN 10228-1进行磁粉探伤



表 7 渗氮钢和渗氮调质钢(锻钢)(见图 13 和图 14)(续)

序号	项目	ML	MQ	ME
<p>许多渗氮齿轮的抗过载能力较差,S-N 曲线比较扁平,因此齿轮设计时应先研究其冲击载荷的敏感性。</p> <p><sup>a</sup> 测量表面硬度时应注意垂直于表面,截面测量值有可能偏高。试验载荷应同渗层深度及硬度相称。</p> <p><sup>b</sup> 对于含铝的合金钢,当渗氮周期较长时,在晶界有形成连续网状渗氮物的危险,因此,对这类钢材的渗氮工艺应特别谨慎。</p> <p><sup>c</sup> 含 Al 渗氮钢 Nitralloy N、Nitralloy135 及类似钢材,只限于 ML 和 MQ 级,其疲劳强度值可见图 14 的注。</p> <p><sup>d</sup> 当高硬度时,由于白亮层(&gt;10 μm)的脆性原因,疲劳极限会下降。</p> <p><sup>e</sup> 随炉试样也应进行预备热处理。</p>				

表 8 氮碳共渗锻钢(见图 15 和图 16)

序号	项目	ML	MQ	ME
1	化学分析	参照表 3 中调质锻钢第 1 项～第 6 项		
2	热处理后的力学性能			
3	纯净度			
4	晶粒度			
5	超声波探伤			
6	锻造比			
7	渗氮硬化层深度	规定的最小值 有效硬化层深度是指表面到 400 HV 或 40.8 HRC 硬度处的垂直距离。如果心部硬度超过了 380 HV,可以“心部硬度+50 HV”作为界限硬度值。 渗氮硬化层深度 <i>NHD</i> 的推荐值见 5.6		
8	表面硬度			
8.1	合金钢 <sup>a</sup>	>500 HV		
8.2	非合金钢 <sup>a,b</sup>	>300 HV		
9	预备热处理	淬火及回火(调质)处理,表面无脱碳。回火温度应高于后续软渗氮工艺温度		
10	表面化合物层(白亮层)	具体检验不强制	白亮层 5 μm～30 μm,基本上为 ε 相	
11	氮碳共渗设备(如盐浴炉)	含 Ti 耐热钢炉膛或惰性炉衬,具备循环风扇。液体氮碳共渗时熔于盐中的铁元素对氮碳共渗有抑制作用,而气体氮碳共渗不存在此问题		
<sup>a</sup> 测量表面硬度时应注意垂直于表面,截面测量值有可能偏高。试验载荷应与渗层深度及硬度相称。				
<sup>b</sup> 由于非合金钢表面硬度较低,因此氮碳共渗只用作表面耐磨性的改善。				

## 6.5 试样

试样应由同等质量级别材料制成。锻钢或铸钢试样的选择应基于其所代表的齿轮和工艺。试样应按照表 2、表 3、表 4、表 5、表 6 或表 7 所述随工件经过所有热处理工序。试样的选用应能够监测热处理工艺,并能够在一定程度上衡量工件的性能。结合已有经验,标准化试样的特性可用于推测工件的金相组织和性能。

关于试样加工的细节,可由供需双方约定。

推荐两种试样形式:

- a) 过程控制试棒:可以是任何合金材料和形状,用于检测热处理工艺的稳定性,其显微组织并不代表产品齿轮的显微组织,但可根据实际经验来推断产品齿轮的状态,这种推断应存档备查。
- b) 代表性试棒:主要考虑能反映产品齿轮的冷却速度,试样心部硬度和显微组织应接近表 5 中第 8 项、第 11 项规定的指标,其推荐尺寸为:
  - 1) 最小直径:3 倍模数;
  - 2) 最小长度:6 倍模数。

试样尺寸和(或)形状的改变应征得用户同意。

如果已掌握试样与工件的关系,也可采用某种固定尺寸的试样。

另外,试样材料在化学成分及淬透性方面应当与工件相当,但不一定取自同一炉号。

## 6.6 抛丸机械清理

机械清理主要是去除热处理后的残渣或涂层。常选用铸钢丸、钢丝切丸、氧化铝石英砂、河砂或玻璃珠等清理介质。清理工件表面还可对残余应力产生影响,其中铸钢丸、钢丝切丸的作用更大。残余应力的变化会影响到弯曲强度及后续加工。图 10 中 MQ 弯曲强度就是在进行了适当的机械清理后测得的,而非热处理工艺的单一作用结果。

清理抛丸后还可进行切削加工、热处理或压装等工序,但有可能改变残余压应力以及弯曲疲劳强度。

## 6.7 强化喷丸

### 6.7.1 总则

喷丸是用小尺寸丸粒轰击工件表面的冷作工艺,可在工件表面形成高幅值残余压应力薄层。喷丸的典型应用将在 6.7.2 和 6.7.3 中讨论,这里的喷丸与 6.6 中的机械清理不能混为一谈。

喷丸工艺应可控,宜基于 SAE AMS 2430<sup>[7]</sup>, SAE AMS 2432<sup>[8]</sup> 或 SAE J2241<sup>[9]</sup> 的规定进行最低程度的控制。如果喷丸后没有精加工工序,应对磨削表面采取保护措施,避免喷丸损伤。

### 6.7.2 提高强度

喷丸产生的残余压应力可以改善齿轮齿根的弯曲疲劳强度。对于渗碳淬火齿轮,喷丸对弯曲疲劳强度的提高幅度如下:

- 对 ML 级,提高弯曲疲劳极限  $\sigma_{FE}$  作用不大;
- 对 MQ 级,可使弯曲疲劳极限  $\sigma_{FE}$  提高 10% 左右;
- 对 ME 级,可使弯曲疲劳极限  $\sigma_{FE}$  提高 5% 左右。

由于喷丸增加了齿面粗糙度,因而会削弱齿面的接触疲劳强度(抗点蚀能力)。因此,需通过齿面精整来达到规定的表面粗糙度和纹理要求。

喷丸后可进行切削加工、热处理或压装等工序,但可能会改变残余压应力以及弯曲疲劳强度。

### 6.7.3 返修

在征得需方同意的情况下,喷丸可以作为渗碳淬火齿轮的残余奥氏体、晶间氧化 IGO 及磨削烧伤等缺陷的返修、补救工艺,如表 5 所示。如果已磨削表面被喷丸,就应该评估因丸粒打击引起齿面粗糙度和硬度的变化,以及大、小齿轮表面粗糙度和硬度梯度差异。可以通过精整来达到齿面粗糙度、纹理及精度要求。

## 附录 A

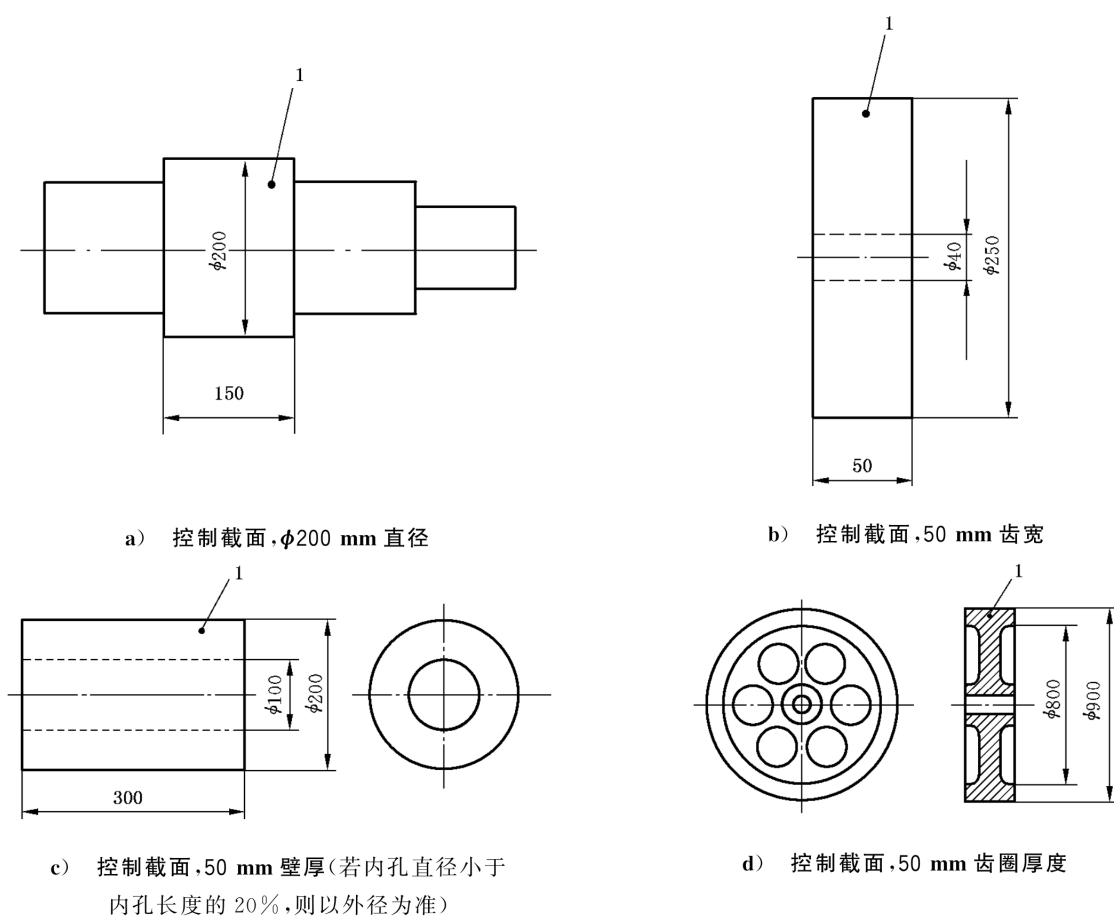
(资料性)

## 调质齿轮控制截面尺寸的确定

本附录介绍了调质(淬火加回火)齿轮近似的最大控制截面尺寸,以及影响最大控制截面尺寸的因素。图示说明了确定最大控制截面尺寸的方法,以及部分低合金钢件推荐的最大控制截面尺寸。

工件的控制截面是指在淬火过程中有工件力学性能(硬度)要求的区域内对冷却速度有决定性影响的截面。某种钢材的最大控制截面尺寸主要取决于其淬透性,规定硬度、要求硬化层深及淬、回火温度等因素。

图 A.1 表示几种热处理后切齿的淬火齿坯控制截面。



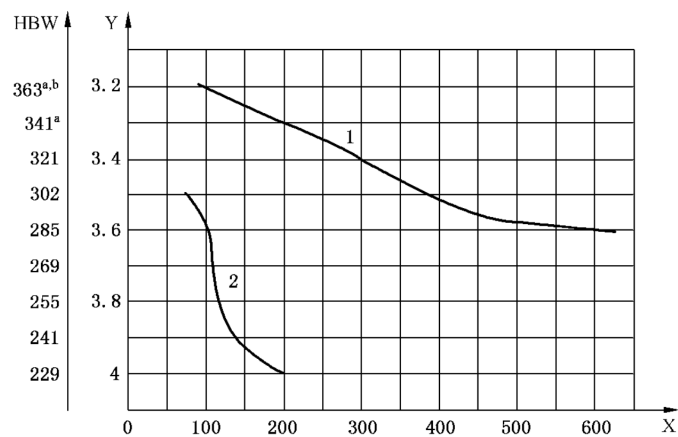
标引序号说明:

1——齿部。

图 A.1 控制截面尺寸示例

当为了合理选材和(或)规定硬度而考虑控制截面尺寸时,无需考虑正常的粗加工余量,而其他加工余量(如为了减小热处理变形而留余量)则应考虑。

图 A.2 表示油淬(淬火烈度  $H=0.5$ )及回火的两种低合金钢的推荐最大控制截面尺寸,主要考虑硬度要求范围、淬火前的正常加工余量以及为得到最低齿根硬度而采取的最低 480 °C 回火温度。



标引序号说明:

HBW —— 最小布氏硬度;

X —— 推荐控制截面尺寸;

Y —— 布氏硬度压痕直径,单位为毫米(mm);

1 —— J50 mm=44HRC 的 AISI E4340H 钢;

2 —— J18 mm=40HRC 的 AISI E4140H 钢。

注:如果有热处理试验数据相佐证,也可以采用高于上述推荐值的最大控制截面尺寸。

<sup>a</sup> 为达到硬度规定值,可要求不低于 480℃ 回火温度。

<sup>b</sup> 某些特殊齿轮可以要求更高的硬度范围,例如 375 HBW~415 HBW,388 HBW~421 HBW 及 401 HBW~444 HBW,但由于加工性变差而导致成本上升,应予以考虑。

图 A.2 两种 0.40%C 合金钢的控制截面尺寸

对于  $\phi 200$  mm 以下棒材的最大控制截面尺寸与截面硬度要求的对应关系,见参考文献[14]中“淬火圆棒横截面硬度值预测图”及其他已发表的回火效应和淬透性数据。

对于  $\phi 200$  mm 以上棒材的最大控制截面尺寸,一般要求先对大截面试件进行热处理试验,然后进行解剖及横截面硬度检测。

有些大尺寸齿轮结构不准许液体淬火处理而要求正火及回火处理,也要考虑最大控制截面尺寸。但是在同样材质(淬透性)条件下所能达到的硬度值就很低,因此需要改用更高淬透性的钢材,而且要求现场进行正火、回火处理试验及硬度检测。

**附 录 B**  
(资料性)  
**心部硬度系数**

心部硬度系数  $U_C$  的曲线见图 19, 其中每条曲线相关系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  的值见表 B.1。

**表 B.1 图 19 中  $U_C$  曲线系数值**

序号	$U_C = a + b \cdot \sigma_H + c \cdot \sigma_H^2 + d \cdot \sigma_H^3$			
	$a$	$b$	$c$	$d$
1	-4.599 297	$1.315\ 460 \cdot 10^{-2}$	$-8.291\ 160 \cdot 10^{-6}$	$2.169\ 010 \cdot 10^{-9}$
2	-5.542 507	$1.425\ 472 \cdot 10^{-2}$	$-8.658\ 576 \cdot 10^{-6}$	$2.080\ 616 \cdot 10^{-9}$
3	-7.598 668	$1.773\ 498 \cdot 10^{-2}$	$-1.104\ 475 \cdot 10^{-5}$	$2.577\ 360 \cdot 10^{-9}$
4	-9.391 585	$2.009\ 680 \cdot 10^{-2}$	$-1.230\ 944 \cdot 10^{-5}$	$2.766\ 216 \cdot 10^{-9}$
5	-16.021 320	$3.247\ 710 \cdot 10^{-2}$	$-2.035\ 296 \cdot 10^{-5}$	$4.474\ 0\ 37 \cdot 10^{-9}$
6	-40.644 860	$8.094\ 566 \cdot 10^{-2}$	$-5.221\ 782 \cdot 10^{-5}$	$1.139\ 691 \cdot 10^{-8}$

## 参 考 文 献

- [1] ISO 6336-6 Calculation of load capacity of spur and helical gears—Part 6: Calculation of service life under variable load
  - [2] ISO 6506-1 Metallic materials—Brinell hardness test—Part 1: Test method
  - [3] ISO 6507-1 Metallic materials—Vickers hardness test—Part 1: Test method
  - [4] ISO 6508-1 Metallic materials—Rockwell hardness test—Part 1: Test method
  - [5] ISO 10300-1 Calculation of load capacity of bevel gears—Part 1: Introduction and general influence factors
  - [6] ISO 10300-2 Calculation of load capacity of bevel gears—Part 2: Calculation of surface durability (pitting)
  - [7] ISO 10300-3 Calculation of load capacity of bevel gears—Part 3: Calculation of tooth root strength
  - [8] ISO/TR 10300-30 Calculation of load capacity of bevel gears—Part 30: ISO rating system for bevel and hypoid gears—Sample calculations
  - [9] ISO 12107 Metallic materials—Fatigue testing—Statistical planning and analysis of data
  - [10] SAE AMS 2430S Shot Peening, Automatic, July 2012
  - [11] SAE AMS 2432D Shot Peening, Computer Monitored, June 2013
  - [12] SAEJ 2441 Shot Peening, November 2008
  - [13] FVA-Arbeitsblatt Nr.8/1: Härtetiefe, Forschungsvereinigung Antriebstechnik, V., Dezember 1976
  - [14] PRACTICAL DATA FOR METALLURGISTS. The Timken Steel Co. Canton; Seventeenth Edition, 2011
-



中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
直齿轮和斜齿轮承载能力计算  
第 5 部分:材料的强度和质量

GB/T 3480.5—2021/ISO 6336-5:2016

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)  
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.org.cn

服务热线:400-168-0010

2021 年 5 月第一版

\*

书号:155066·1-67664

版权专有 侵权必究



GB/T 3480.5-2021



码上扫一扫 正版服务到