

# 齿轮铸件的选材、结构与制造

哈尔滨电机厂有限责任公司 (黑龙江 150040) 王清宇

## 一、概述

齿轮是现代机械传动中的重要组成部分。从国防机械到民用机械,从重工业机械到轻工业机械,无不广泛地采用齿轮传动。

齿轮传动技术经历了长期的历史发展过程。公元前200~400年,中国古代就开始使用齿轮,在我国山西出土的青铜齿轮是迄今已发现的最古老齿轮,此外作为反映古代科学技术成就的指南车也是以齿轮机构为核心的机械装置。

齿轮传动是机械传动的主要形式。机械传动具有恒功率输出、承载能力大、效率高、寿命长、可靠性高及结构紧凑等优点,广泛用于各种机械设备和仪器仪表中。齿轮是机器的基础件,其质量、性能、寿命直接影响整机的技术经济指标。齿轮因其形状复杂、技术问题多、制造难度较大,所以齿轮制造水平在很大程度上反映一个国家机械工业的水平。

## 二、齿轮铸件材料的选择原则

齿轮材料对齿轮的承载能力和结构尺寸影响很大,合理选择齿轮材料是设计的重要内容之一。齿轮的工作条件不同,轮齿的破坏形式也不同。选取齿轮材料时,除考虑齿轮工作条件外,还应考虑齿轮的结构形状、生产数量、制造成本和材料来源等因素。一般应满足下列几个基本要求:

- (1) 轮齿表面层要有足够的硬度和耐磨性。
- (2) 对于承受交变载荷和冲击载荷的齿轮,基体要有足够的抗弯强度与韧性。
- (3) 要有良好的工艺性,不但易于切削加工,且热处理性能好。
- (4) 在满足使用性能的前提下,选用齿轮材料还应注意尽量降低零件的总成本。

(5) 从金属资源和供应情况来看,应尽可能减少进口材料及价格昂贵材料的使用量。

制造齿轮材料以锻钢(包括轧制钢材)为主,其次是铸钢、铸铁,还包括有色金属和非金属材料等。从材料本身价格来考虑,碳钢和铸铁的价格是比较低廉的,因此在满足零件力学性能的前提下选用碳钢和铸铁,不仅具有较好的加工工艺性能,而且可降低成本。

## 三、铸造齿坯的特点

铸造齿坯是液态成形,易于按设计者构思制成具有合理外形和内部轮廓的零件,刚性好、形状复杂且应力集中不显著。另外机械加工面和余量小,金属的利用率高。铸造齿坯一般采用中碳铸钢或低合金铸钢,其综合力学性能优于其他铸造合金。

### 1. 与锻造齿坯的比较

由于铸钢件浇注温度比钢锭高,铸件形状复杂,其凝固过程的控制比钢锭困难得多,而且此后又不经锻造加工,一般情况下结晶比较粗大,热节处和枝晶向的疏松难以避免,因此铸钢的性能比成分相近的锻钢件差。如果铸钢件的工艺设计较好,凝固过程控制得当,再配以适当的热处理,则铸钢的性能接近于锻钢。

铸钢在力学性能的各向异性并不显著,这是优于锻钢的一个方面。研究工作表明,轧制钢材纵向力学性能通常略高于同牌号的铸钢,横向性能则稍逊于铸钢,其平均性能与质量良好的铸钢大致相同。

### 2. 与焊接齿坯比较

焊接齿坯不需要制造模型,生产周期短且表面质量好,内部没有锻造缺陷,但焊接过程中易于变形,焊接构件中内应力较高,施焊坡口影响外观。就我国目前的发展看,焊接齿坯多用于中小齿坯,而重型矿山设备中的大型齿轮和蜗轮主要还是用铸造齿坯。

#### 四、齿轮铸件常用材料

目前,工业制造领域的齿轮选材主要以钢为主,包括各种低碳钢、中碳钢、高碳钢和合金钢。而铝、镁、钛、铜合金、铸铁,甚至塑料和木材等都可用于制作齿轮。

齿轮毛坯形式主要有棒料、锻件、铸件。棒料用于小尺寸、结构简单且对强度要求低的齿轮。锻件多用于齿轮要求强度高、耐冲击和耐磨。当齿轮直径>400~600mm时,常用铸造方法铸造齿坯。

铸造是机械零件生产中最古老、也是最直接的生产工艺方式。为了减少机械加工量,对大尺寸、低精度齿轮,可以直接铸出轮齿;压力铸造、精密铸造、粉末冶金、热轧和冷挤等新工艺,可制造出具有轮齿的齿坯,以提高劳动生产率,节约原材料。

##### 1. 铸钢

齿轮用钢多为合金钢,少数为碳钢。铸钢的力学性能稍低于锻钢。当齿轮尺寸较大、结构复杂,可采用铸钢。齿轮用铸钢多为碳钢和低合金钢,切齿前需经退火、正火及调质处理,以提高其强度和硬度。表1为齿轮用铸钢的牌号、特性与用途。

表1 齿轮用铸钢的牌号、特性与用途

牌号	特性与用途
铸造碳钢	ZG310—570 有较高强度,可切削性良好,塑性、韧性较低;铸造性能较好,焊接性能较差;用于负荷较高的零件,如大齿轮、缸体、制动轮和辘子等
	ZG340—640 有高的强度、硬度和耐磨性,可切削性中等,焊接性较差,流动性好,裂纹敏感性较大,用作齿轮、棘轮等
低合金铸钢	ZG40Mn 铸造性能较好,焊接性能较差,用于承受摩擦的零件,如齿轮等
	ZG40Mn2 齿轮、滑板等
	ZG30SiMn 齿轮、车轮等
	ZG50SiMn 齿轮、车轮等
	ZG30CrMnSi 受冲击及磨损零件,如齿轮、滚轮等
	ZG35CrMnSi 链轮、电铲支轮、轴套等
	ZG50Mn2 高强度零件,如齿轮、齿圈等
	ZG35CrMnSi 承受冲击、磨损的零件,如齿轮、滚轮等
	ZG40Cr1 高强度内轮
	ZG32Cr2Ni2Mo 特殊要求的零件,如锥齿轮、小齿轮、吊车行走轮及轴等
	ZG20Cr1Mo 齿轮、锥齿轮及高压缸零件等
	ZG34Cr1Mo 齿轮、电炉支承轮轴套、齿圈等
	ZG42Cr1Mo 高负荷零件、齿轮、锥齿轮等
	ZG50Cr1Mo 减速器零件、齿轮、小齿轮等
	ZG28NiCrMo 承受冲击载荷的齿轮,适用于直径>300mm的齿轮铸件
ZG30NiCrMo	
ZG30CrNi2Mo	
ZG35NiCrMo	

##### 2. 铸铁

因为铸铁中存在的游离石墨和多孔性结构,所以齿轮的耐磨性良好、噪声小、成本低,可广泛应用于各类齿轮传动。由于铸铁具有良好的滑动特性,因此在许多负荷不大、工作条件不苛刻的涡轮传动中可用铸铁涡轮替换铜合金涡轮。常用的铸铁主要包括:灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和合金铸铁等4种。与钢相比较,铸铁的合金成分较低,加工性能更好。最常用的是灰铸铁和球墨铸铁。

灰铸铁的抗弯及耐冲击能力都很差,但它易铸造、易切削,具有良好的耐磨性和消震性,成本低廉。可用于低速、载荷不大的开式齿轮传动。

球墨铸铁的性能介于钢和灰铸铁之间,是很有发展前途的齿轮材料。球墨铸铁的强度比灰铸铁高很多,具有良好的韧性和塑性,在冲击不大的情况下,可代替钢制齿轮。主要使用珠光体和贝氏体球墨铸铁,牌号在QT500以上,热处理一般采用正火+回火。

铸铁齿轮与钢制齿轮相比,具有加工性能、耐磨性好,噪声低及价格便宜等优点。总而言之,铸铁是经济适用的齿轮材料。

##### 3. 有色金属材料

有色金属(如铜合金、铝合金)用于有特殊要求的齿轮传动。齿轮工业中应用最多的有色金属是铜和铜合金。其中常用的是锡青铜和铝青铜,大多数用于制造涡轮。但含硫添加剂对铜具有腐蚀作用,应尽量慎用。另外,强度较高和机械加工性能较好的铸造铝合金适合制作齿轮或涡轮,但滑动性和抗磨性能稍差,因此仅可用于中小负荷和中低转速齿轮。齿轮常用铸造铜合金主要特性及用途见表2。

#### 五、铸造齿坯的结构设计

通过齿轮传动的强度计算,只能确定出齿轮的主要尺寸,如齿数、模数、齿宽、螺旋角和分度圆直径等,而齿圈、轮辐及轮毂的结构形式及尺寸大小,通常都由结构设计而定。

齿轮的结构设计与齿轮的几何尺寸、毛坯、材料、加工方法、使用要求及经济性等因素有关。进行齿轮的结构设计时,必须综合考虑上述各方面的因素。通常是先按齿轮的直径大小选定合适的结构形式,然后再根据荐用的经验数据进行结构设计。铸造齿坯的结构形式主要有四种。

表2 齿轮常用铸造铜合金的主要特性及用途

	牌号	特性	用途
铸造黄铜	ZCuZn25Al6Fe3Mn3	有很高的的力学性能, 铸造性能良好, 耐腐蚀性好, 有应力腐蚀开裂倾向, 可以焊接	蜗轮
	ZCuZn40Pb2	有好的铸造性能和耐磨性, 加工性好, 耐蚀性较好, 在海水中有力应力腐蚀倾向	齿轮
	ZCuZn38Mn2Pb2	有较高的力学性能和耐蚀性, 耐磨性较好, 可加工性较好	蜗轮
铸锡青铜	ZCuSn5Pb5Zn5	耐磨性、耐蚀性及减摩性好, 能承受冲击载荷, 易加工, 铸造性能和气密性较好	较高负荷、中等滑速度下工作的蜗轮
	ZCuSn10Pb1	硬度高, 耐磨性极好, 有较好的铸造性能和可加工性, 在大气和淡水中有良好的耐蚀性	高负荷、耐冲击和高滑动速度(8m/s)下的齿轮、蜗轮
	ZCuSn10Zn2	耐蚀性、耐磨性和可加工性好, 铸造性能好, 铸件气密性较好	中等及较多负荷和低滑动速度的齿轮、蜗轮
铸铝青铜	ZCuAl9Mn2	高的力学性能, 耐磨性、铸造性能好, 在大气、淡水和海水中耐蚀性好, 组织紧密, 可以焊接, 不易钎焊	耐蚀、耐磨的齿轮、蜗轮
	ZCuAl10Fe3	高的力学性能, 耐磨性和耐蚀性好, 可以焊接, 不易钎焊, 大型铸件自700℃空冷可以防止变脆	高负荷大型齿轮、蜗轮
	ZCuAl10Fe3Mn2	高的力学性能, 耐磨性好, 可热处理, 高温下耐蚀性和抗氧化性好, 在大气、淡水和海水中耐蚀性好, 可焊接, 不易钎焊, 大型铸件自700℃空冷可以防止变脆	高温、高负荷、耐蚀齿轮、蜗轮
	ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	很高的力学性能, 耐蚀性好, 应力腐蚀疲劳强度高, 合金组织致密, 气密性好, 可以焊接, 不易钎焊, 铸造性能好	高强度、耐腐蚀重要齿轮、蜗轮
	ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	很高的力学性能, 耐磨性良好, 耐蚀性好, 可热处理, 应力腐蚀疲劳强度高, 在400℃以下具有耐热性, 焊接性能好, 不易钎焊, 铸造性能尚好	要求高强度、耐蚀性好, 适应于工作温度400℃以下的重要齿轮、蜗轮

1. 实心式齿轮

当齿顶圆直径 $\leq 160\text{mm}$ 时, 可以做成实心结构的齿轮(见图1)。但航空产品中的齿轮, 为了整体的轻量化, 也有做成辐板式的。

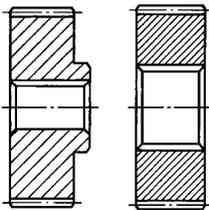


图1 实心结构的齿轮

2. 辐板式齿轮

当齿顶圆直径 $< 500\text{mm}$ 时, 可做成辐板式结构(见图2), 辐板上开孔的数目按结构尺寸大小及需要而定。齿顶圆直径 $> 300\text{mm}$ 的铸造圆锥齿轮, 可做成带加强筋的辐板式结构, 加强筋的厚度为辐板厚度的0.8倍, 其他结构尺寸与辐板式相同。

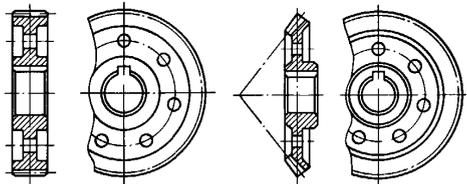


图2 辐板居中的单辐板齿轮

辐板居中的单辐板齿轮应用量广泛, 一般用于直径 $\leq 300\text{mm}$ 、宽度 $\leq 400\text{mm}$ 的中小型齿轮, 对于齿轮直径 $400\sim 1000\text{mm}$ 时, 可采用轮辐式结构。辐条的剖面形状可以采用椭圆形(轻载)、十字形(中载, 见图3)及工字形(重载)等。

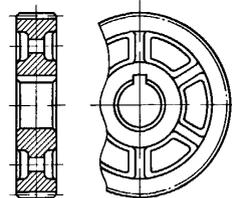


图3 轮辐截面为“十字形”的齿轮

为了铸造方便,辐板的位置也可以不居中(见图4),铸造时可将偏向一侧的面朝上,这样轮缘和轮辐连接处的热节上移,便于冒口补缩,提高铸件收得率。这种形式的齿坯主要用于两方面:一种用于大型桥式起重机卷筒齿轮;另一种用于小型减速机的小型齿轮。

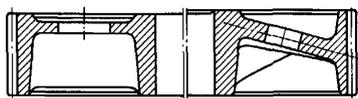


图4 辐板不居中的单辐板齿轮

双辐板结构(见图5)的齿坯用于宽度 $>400\text{mm}$ 的大型齿轮,以及大型轧钢机的人字齿轮。

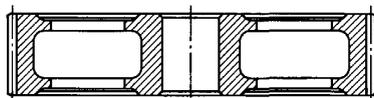


图5 双辐板齿轮

### 3. 齿圈

齿圈主要用于重型矿山设备和蜗轮机构。为了节约贵重金属或解决工艺问题,对于尺寸较大的圆柱齿轮,可做成组装齿圈式的结构(见图6)。齿圈用钢或铜合金制成,而轮芯则用铸铁或铸钢。

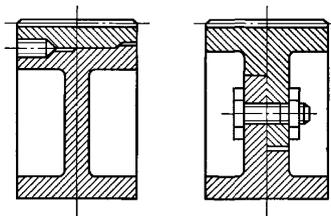


图6 组装式齿圈

### 4. 蜗轮

常用的蜗轮结构形式(见图7)有以下几种:

(1) 齿圈式(见图7a) 这种结构由青铜齿圈及铸铁轮芯组成,多用于尺寸不太大或工作温度变化较小的地方,以免热胀冷缩影响配合质量。

(2) 螺栓联接式(见图7b) 可用普通螺栓联接,或用铰制孔螺栓联接。这种结构拆装比较方便,多用于尺寸较大或易磨损的蜗轮。

(3) 整体浇注式(见图7c) 主要用于铸铁蜗轮或尺寸很小的青铜蜗轮。

(4) 拼铸式(见图7d) 这是在铸铁轮芯上加铸青铜齿圈,然后切齿。只用于成批制造的蜗轮。

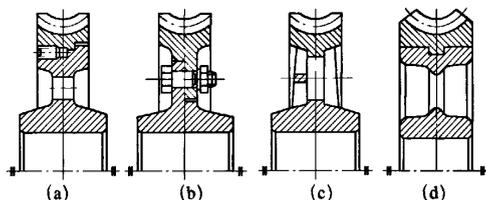


图7 蜗轮的结构形式

## 六、铸造齿坯的结构要求

铸造齿坯结构合理会避免很多缺陷,易于保证铸件品质,简化铸造工艺过程和降低成本。铸造齿坯的结构应符合使用和铸造生产的要求,铸件结构应从以下几个方面进行考虑和优化。

### 1. 铸件应有合适的壁厚

为了避免浇不到、冷隔等缺陷,铸件不应太薄,但也不应设计得太厚。超过临界壁厚的铸件,中心部分晶粒粗大,常出现缩孔、缩松等缺陷,导致力学性能降低。

在砂型铸造工艺条件下,各种合金铸件的临界壁厚可按最小壁厚的3倍来考虑。铸件壁厚应随铸件尺寸增大而相应增大,在适宜壁厚的条件下,既方便铸造又能充分发挥材料的力学性能。

此外,由于铸件内外壁冷却条件不同,将铸件的内壁厚度设计得比外壁薄,以实现内外均匀冷却,减少内应力和防止热裂纹。

### 2. 铸件壁的连接应当逐渐过渡

壁的相互连接处往往形成热节,成为容易出现收缩类缺陷的部位。因此,为使铸件壁厚尽可能地接近一致,以达到较均匀的冷却,应使壁厚发生变化的部位逐渐过渡,而且交叉肋要尽可能错开布置,以避免或减小热节。但是也要避免出现“尖砂”,因为其散热慢,也容易产生缺陷。

### 3. 合适的铸造圆角

一般情况下,铸件转角处都应设计成合适的圆角,可以减少该处产生缩孔、缩松及裂纹等缺陷。

### 4. 防止铸件出现裂纹和变形

铸件往往由于内应力而发生变形或产生裂纹。通常用加强筋增加铸件刚性或用反曲率的模样来解决这类

问题。为了防止铸造齿坯收缩受阻而产生裂纹，还应注意辐板和辐条的结构。如图8所示，对称辐条应力大，弯曲辐条可松弛应力，带孔辐板防止断裂，单数辐条产生的应力比对称辐条的小。

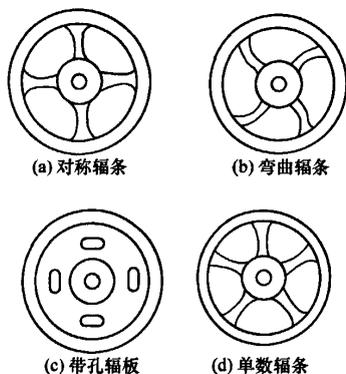


图8 防止收缩受阻而产生裂纹

### 5. 分体铸造

为了方便制造，降低成本，有时可将大而复杂的铸件先分块铸造，再利用焊接或螺柱固结成一个整体。

## 七、齿坯的铸造工艺

齿坯铸造工艺的关键是提高铸坯的致密度，防止缩孔、疏松、裂纹、气孔和砂眼的产生。

铸造工艺方案设计的主要内容有：铸造工艺方法的选择，浇注位置和分型面的选择，以及型芯设计等。

小型齿轮也可采用熔模铸造、金属型铸造、低压铸造等精密铸造方法。齿圈和蜗轮的轮缘一般采用铜合金离心铸造，轮芯采用砂型铸造。下面以铸钢齿坯的砂型铸造为例介绍一下铸造工艺的制定原则。

#### 1. 浇注位置

浇注位置应立浇，齿形部分不得朝上，因为浇注时钢液中的气体、浮砂等夹杂物易上浮于顶面。

#### 2. 冒口设计

获得致密铸坯的基本条件是顺序凝固，冒口应储备足够的钢液，使铸坯在凝固过程中能不断从冒口中获得钢液进行补缩，以消除铸坯中的缩孔、疏松，或使缩孔、疏松移入冒口之中。

冒口设计方法主要有模数法和比例法。形状复杂、缺少经验数据资料的铸件一般用模数法。像齿坯这样积累较多经验数据的铸件，采用比例法比较简便。

以单辐板齿轮为例，冒口计算如下：

(1) 轮缘冒口 轮缘直径 $\leq 2000\text{mm}$ ，采用暗冒口，轮缘直径 $\geq 2000\text{mm}$ ，采用明冒口。

(2) 轮毂冒口 当轮毂直径 $\leq 300\text{mm}$ ，采用整圆冒口，当轮毂直径 $\geq 300\text{mm}$ ，采用多半圆冒口。

### 3. 浇注系统设计

铸钢齿坯浇注系统设计注意以下两点：

(1) 底反浇口 为使钢液平稳地充满铸型，气体和夹杂物易于上浮，内浇道应底反，位于轮缘和轮毂的底面冒口下方，切向进入。

(2) 采用低温快浇 浇注温度应按钢种和轮缘厚度选定。过高的浇注温度会使缩孔、缩松倾向增大，晶粒粗大，易于产生热裂和粘砂。快速充型，避免烤掉砂和上下部温差过大。

### 4. 防裂措施

齿坯在铸后停放、搬运、热处理过程中，因为铸件的轮缘、轮毂和轮辐间的厚度相差悬殊，且浇注后冷却条件不同，齿坯内易形成较大的残余应力，在受到激冷或震击时易产生冷裂纹。防止措施如下：

(1) 轮缘的散热条件好，冷却较快，而轮毂散热差。为加速冷却，可在轮毂的下半部放置内冷铁。

(2) 辐板间由砂芯形成，在保证砂芯强度条件下，控制面砂厚度，中间填锯末干砂，以减少收缩阻力。

(3) 防止砂箱带阻碍冒口收缩。

(4) 浇注后应在砂型中缓慢冷却至 $150^\circ\text{C}$ 以下时，才可打箱落砂。

### 5. 铸件热处理和冒口切割

铸坯需进行退火处理，也可进行正火+回火处理。冒口切割应在退火或正火+回火后带温切割，并于切割后进炉缓冷。

## 八、结语

综上所述，在选择齿轮材料、齿轮结构、齿坯制造及加工时，必须了解工业发展形势，结合我国资源和生产条件，从各自的实际出发，全面考虑材料来源、力学性能、工艺性能和经济性，以及生产批量、使用状况等方面的问题，只有选材、结构、制造工艺合理才能保证齿轮质量，降低产品成本，从而提高市场竞争力，从而更好、更快地提高我国机械工业的水平。MW

(20090806)