



GCr15 钢套圈模压淬火规律探讨

瓦房店轴承集团公司技术中心 (辽宁 116300) 邢振平 李作田 王江山

GCr15 钢在热处理过程中的尺寸变化与许多因素有关, 本文探讨的是该钢种在使用内压模淬火时的尺寸变化规律。由于 GCr15 钢轴承套圈淬火时的尺寸变化不同于渗碳钢, 其内压模淬火涉及到的尺寸变化及整形量设计目前尚处于探讨阶段, 未形成一个较完整的理论体系, 因此本文试图阐明其尺寸变化及整形量设计原理, 以期达到抛砖引玉的作用。

一、自由淬、回火状态下的轴承零件尺寸变化

1. 淬火过程轴承零件尺寸变化分析

据有关资料介绍, 不同壁厚的轴承零件在淬火过程中随着时间变化, 其尺寸变化是不同的。随时间变化的动力学曲线如图 1 所示。

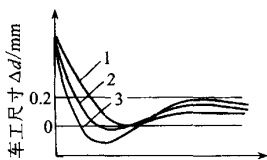


图 1 加热到 850℃ 的套圈在油中冷却过程动力学曲线
1—壁厚 10mm 2—壁厚 8mm 3—壁厚 4mm

试验显示, 零件在淬火时随着温度的降低首先是尺寸明显收缩, 壁厚越小, 收缩的程度越大, 到达的最低点值越小。尺寸收缩到一定程度后, 由于组织转变, 尺寸开始涨大, 我们称为尺寸反弹。零件厚度越小, 反弹越明显, 尺寸变化幅度越大。此试验结果揭示了不同厚度的套圈在相同温度加热, 在相同冷却过程中尺寸变化趋势及变化过程。

图 2 所示的是同一规格的薄壁套圈采用不同加

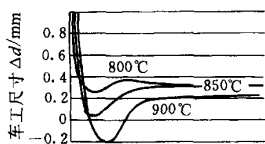


图 2 不同加热温度的套圈在油中冷却过程中的动力学曲线

热温度保温后在油中淬火过程中的尺寸变化。加热温度高低不同, 套圈在冷却过程中最小尺寸及尺寸变化规律是不同的。加热温度越高, 冷却过程中尺寸达到的最低点越小, 冷却后零件的尺寸越小。这是由于加热温度高时, 奥氏体中碳的饱和程度增加, 推迟了马氏体转变, 即马氏体转变使套圈体积增长较晚, 始于套圈冷却过程中尺寸较小时, 它虽然冷却最终尺寸最小, 但在组织转变时尺寸变化最大, 所以零件内部应力最大。

由图 1、图 2 可以看出, 零件在热处理过程中的尺寸变化主要取决于加热温度、零件的有效厚度, 同时与冷却条件有关。轴承套圈在冷却过程中尺寸的变化受诸多不定因素的影响。大致可以归纳为如下:

$$\begin{aligned} \text{总尺寸变化} = & \epsilon \text{ 马氏体} + \epsilon \text{ 抑制收缩变形} \\ & + \epsilon \text{ 奥氏体} + \epsilon \text{ 抑制增长} \end{aligned}$$

ϵ 马氏体: 马氏体转变因比体积的改变使套圈尺寸增大的分量; ϵ 抑制收缩变形: 由于套圈表面生成马氏体, 抑制心部奥氏体尺寸收缩变化的分量; ϵ 奥氏体: 冷却状态下, 由于奥氏体减少引起的尺寸变化分量; ϵ 抑制增长: 马氏体转变不断增加而使截面强度增加时, 抑制套圈内部马氏体转变尺寸增长的分量。

利用上述公式, 可以解释套圈在淬火过程中的各种现象。

(1) 零件在冷却强度大的水中冷却时, 截面的温度差较大, 平均温度高, 其表层急速冷却, 在形成马氏体时就开始阻碍套圈的热收缩, 即发生在奥氏体因温度降低使尺寸收缩还较小、套圈直径较大时。并且此时奥氏体的强度低, 不能抑制马氏体转变引起的尺寸增加, 其马氏体转变使套圈尺寸增加的分量起主导作用, 最终套圈的尺寸涨大量较大。

(2) 在油中冷却时, 零件内外温度差较小, 表层马氏体组织转变抑制零件的热收缩, 开始于其心部温度较低时, 即尺寸增长是在套圈收缩到一定程度的情况下开始的, 淬火后尺寸较小。采用旋转淬火机冷却时, 加速了组织转变过程的热交换, 表面



马氏体强度增加，抑制套圈内部马氏体转变尺寸增长，最终套圈尺寸较普通淬火方式小，并在表层形成的拉应力较大。

从室温加热开始，直到淬火冷却又回到室温，整个过程中零件尺寸变化如图3、图4所示。我们以套圈内径为例，基于下表中给出的数据，对于图中的各点作如下解释。

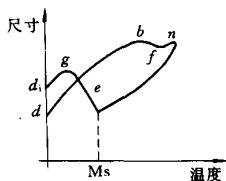


图3 厚壁套圈自由淬火条件下的尺寸变化过程示意图

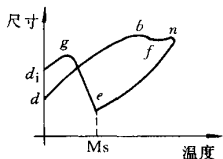


图4 薄壁套圈自由淬火条件的尺寸变化过程示意图

①套圈内径原始车工尺寸，即热处理过程尺寸变化的起始点。

②套圈加热到奥氏体化温度，开始发生珠光体到奥氏体的组织转变点。

③珠光体到奥氏体转变基本结束点。

④保温过程结束，开始出炉冷却时套圈尺寸的最大点。

⑤套圈淬火冷却到 Ms 点温度的尺寸点，从此点开始发生过冷奥氏体到马氏体的组织转变，e 点温度要低于 Ms，即我们所讲的冷却过程中的过冷度。

⑥套圈淬火完成后的内径尺寸。

热处理状态或组织	密度 / $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	比体积 / $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	线膨胀系数 ($\text{mm}/\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}$)
790~800℃退火	7.812	1.28×10^{-4}	12×10^{-6}
865℃淬火	7.6805	1.302×10^{-4}	—
865℃淬火、150℃回火	7.8006	1.282×10^{-4}	—
奥氏体	8.032	1.245×10^{-4}	$16 \sim 17 \times 10^{-6}$

注：每种资料介绍的数据由于受试验条件及原始状态、化学成分的影响而有一些差别。

从 d 点起，套圈受外来热量的作用，温度开

始升高，珠光体组织按一定的膨胀系数体积发生变化，套圈内径尺寸增加。由于尺寸变化的量与温度不成正比，在开始阶段变化较大，后来较慢，所以 db 线为曲线而不是直线。套圈温度到达 b 点奥氏体转变温度时，开始发生奥氏体转变，由于奥氏体比体积最小，体积收缩，抵消热胀冷缩作用后，使套圈的尺寸沿 bf 线缩小。一定时间后到 f 点，奥氏体组织转变基本结束。从 f 点开始受热的作用，奥氏体体积按一定的膨胀系数涨大，表现在套圈的内径上是内径尺寸沿 fn 线增加，保温结束时套圈尺寸到达 n 点。

套圈经加热、保温后，在冷却过程中尺寸变化由 n 点开始，受淬火介质的作用，热量急剧散失，奥氏体按热胀冷缩的原理体积变小，即套圈的内径尺寸沿 ne 线变小。在冷却开始阶段尺寸收缩的快，尔后慢，所以 ne 线是一个曲线，此过程一直持续到理论的 Ms 点以下的 e 点形成过冷奥氏体。

从 e 点开始，过冷奥氏体开始发生马氏体的组织转变，使套圈尺寸涨大；而另一方面，热量的损失使其尺寸缩小，但总体是从此点体积开始涨大，使套圈的内径尺寸增加到 g 点，这一过程是在很短的时间内完成的。套圈的尺寸变化在组织转变结束后直到室温有一个缩小的过程，是从 g 点开始沿 gd_i 线变化，室温下套圈尺寸为 d_i 点尺寸。

结合图1所示分析，零件厚度越大，冷却过程中的 e 点越高，在冷却到最小尺寸后反弹的量越小，零件的变形也小。由于零件的厚度不同，其曲线变化是不同的，e 相对 d 点的高度也不相同，主要是由一定冷却条件下零件的厚度决定的。

从理论上讲，套圈截面温度全部冷却到 240℃ 左右时，或零件有效厚度比较小而使截面温度差别不大时，因奥氏体的比体积小于珠光体的比体积，零件冷却到接近 Ms 时尺寸最小，e 点要低于 d 点，但由于套圈冷却时，不可能表层与心部同时到达同一温度，其温度差在普通企业及研究机构是无法检测到的，但资料表明，零件表层内马氏体转变前温度接近 Ms（即表面温度为 230~260℃ 时）时，厚度为 4mm 的薄层截面平均温度为 570℃，而厚度为 10mm 时，截面平均温度为 715℃，厚度越大，截面平均温度越高。



在零件表层温度到达马氏体转变温度时,发生马氏体转变,使套圈的体积胀大,心部奥氏体温度继续降低,使套圈的体积缩小,但马氏体转变到一定量时,由于形成了强度较好一个硬壳,抑制了心部奥氏体的尺寸收缩,同时马氏体转变使零件的体积增加。零件的厚度越大,马氏体组织转变抑制收缩的程度越大,即随着零件有效厚度增大, e 点增高。在普通淬火介质中冷却,当零件有效厚度超过10mm,零件冷却到 M_s 点发生马氏体转变时,零件尺寸大于其原始尺寸,即 e 点高于 d 点。

自由淬火状态下,轴承套圈在淬火后尺寸要比原始车工尺寸大,其胀大量 Δd 受加热温度、冷却条件、合金元素含量以及退火组织等诸多不定因素的影响,没有一个确定的公式进行计算。根据生产经验, $\Delta d = md$ (m 为胀大系数)。

有效厚度 H ,当 $H \leq 8\text{mm}$ 时, $m = 0.012 \sim 0.014\text{mm}$;当 $12\text{mm} > H \geq 9\text{mm}$ 时, $m = 0.012 \sim 0.01\text{mm}$;当 $H \geq 12\text{mm}$ 时, $m = 0.008 \sim 0.01\text{mm}$ 。

2. 回火过程中轴承零件尺寸变化分析

钢的回火转变是淬火马氏体与残余奥氏体向平衡组织的转变过程。一般情况下,钢在淬火后得到的是亚稳的高硬度、高强度的马氏体组织及少量残余奥氏体。为满足不同零件对性能的不同要求,将淬火零件重新加热到低于临界点的某一温度,保温一定时间,待亚稳的马氏体及残余奥氏体转变到一定程度时,再冷至室温,即可调整零件的性能。

其目的是调整组织和性能,减少或消除淬火产生的应力。

回火过程中的组织转变无论是碳化物的析出还是残余奥氏体的分解都会带来零件尺寸的变化,轴承零件淬火后基本属于低温回火。在回火温度小于 200°C 时,由于碳化物的析出,马氏体正方度下降,一般情况下会使零件在回火时的尺寸有缩小的趋势,但在高于 200°C 以上温度回火,由于残余奥氏体向马氏体的转变,会使零件的尺寸胀大。生产过程中利用这一原理解决外径磨量不足的问题。

自由淬火状态下,套圈的尺寸变化基本遵循以上规律,但由于影响套圈尺寸变化的因素较多,个别情况下会出现不符合规律的现象,甚至在同一批产品中,尺寸变化也会不一样,所以生产时要具体

分析对待。

二、采用模具淬火状态下的轴承零件尺寸变化

某些零件在热处理过程中,为了解决变形问题,需要进行压模处理。压模淬火的前提条件是压床要有足够的压力,模具具有高的精度及稳定性。基于GCr15和GCr15SiMn轴承钢淬火后尺寸胀大现象,原理上应采用外压模淬火,但外压模淬火装备、模具设计及制造难度较大,国内尚无先例而多采用内压模。就内压模而言,有固定模具和活动模具两种,每种模具具有不同的适用范围,采用不同模具,零件的整形量即车工留量也不相同。

采用压模热处理的目的是调整零件在热处理过程中的变形量及尺寸。为达到整形目的,尽量考虑大的整形量。其径厚比越大,整形量越大。由于在淬火冷却过程中零件尺寸与组织转变过程零件尺寸变化是一个相反的趋势,并且由零件的有效壁厚决定了零件总的尺寸变化趋势及大小,所以在模具设计及车工留量设计时,应适当考虑压模淬火整形量的问题。

1. 采用活动模具淬火时零件的尺寸变化及整形量确定

(1) 适用范围 适用于任何有效壁厚的套圈。

(2) 活动模具的工作原理 活动模具基本结构如图5所示,它由锥体、滑块、弹簧和调整垫等组成,锥体与滑块间的角度根据实际情况确定。

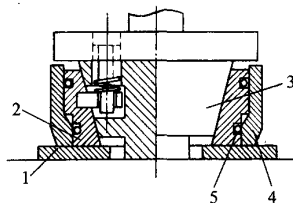


图5 活动模具压模淬火示意图

1. 调整垫 2. 滑块
3. 模具锥体 4. 零件 5. 弹簧

活动模具在使用过程上中其尺寸从最小到最大是不断变化的。模具抬起时,滑块在弹簧的作用下向锥体的小尺寸位置滑动,模具外径尺寸收缩到最小,直到滑块压到与调整垫靠拢,但与锥体相对位置不发生变化时仍保持这一尺寸,只有



模具锥体下滑、滑块向外移动时，模具的外径尺寸开始发生变化，锥体压在工作台面上滑块外径尺寸涨到最大。模具外径尺寸变化大小取决于模具锥体的角度及其行程。调整垫的厚度尺寸则改变压模尺寸。由此可知，工作时加热后的零件内径尺寸略大于模具最小尺寸时，模具就可以放入到零件内。

锥体下滑时，使零件内径尺寸涨大，直到锥体接触到工作台面，模具涨大到最大尺寸。模具尺寸变化的这一时间非常短，可以说是在瞬间完成的。由于零件从处于红热状态直到组织没有转变的这一过程中，依靠模具的力量使零件尺寸撑出是完全可能的，但会在零件内部形成拉应力，使零件紧紧束缚在模具上，此时零件内拉应力的与整形量大小成正比。

淬火介质冷却要求在模具涨到最大尺寸后进行，这在机床设计中要考虑到。

在淬火介质作用下零件温度降低，开始发生组织转变，由于组织比体积的变化，使零件尺寸有向外涨大的趋势。但由于零件内部在组织转变前存在拉应力，所以组织转变产生的体积变化首先要消除这一应力，才有真正的涨大现象发生。当整形量达到一定值时，零件冷却过程产生的内部应力，依靠组织转变虽然可基本消除，但最终却不能完全消除，零件依然束缚在模具上，模具的尺寸和形状就是零件的尺寸和形状而达到整形的目的。但要考虑的是，此状态下零件内部拉应力的存在，使零件在以后的回火过程中尺寸有收缩趋势，这在试验中已经得到证实，所以热处理时模具涨大后的外径尺寸即热处理淬火件尺寸，要比热处理完成品尺寸略大，以抵消回火时的收缩。回火的收缩量要根据不同零件的尺寸、形状和厚度等来确定。

零件的温度变化要使它冷却到组织转变前束缚在模具上，并要形成一定的应力，这一应力的存在要与组织转变将消除的应力大小相匹配。如果太小，零件在组织转变过程中与模具脱离，则起不到整形效果或效果不理想。太大时，零件可能产生开裂现象。而应力的存在主要取决于整形量，所以内径留量即整形量的大小非常重要，组织转变时尺寸涨大量越大的材料、规格，热处理时需要的整形量越大。

(3) 最大整形量的理论计算 模具加压涨大后的外径尺寸要比热处理完成品尺寸略大，我们称为 A 。未加压模具收缩到的最小尺寸我们称为 B (实验模具 $A - B = 3.2\text{mm}$)。因为是内压模淬火，所以我们按内径尺寸考虑热处理过程的整形量。

零件在加热后按图 3 的 dn 曲线，内径尺寸发生涨大现象，尺寸平均涨大系数为 z 。 z 的考虑范围因钢种、零件厚度和直径大小不同而不同。例如 GCr15 钢，加热到 850°C 时， z 一般为套圈成品内径的 1.1% 左右，50Mn 钢加热到 850°C 时， z 一般为套圈成品内径的 1.2% 左右，但要考虑生产实际情况，以实际测量结果为准。我们要求零件加热后的尺寸比 B 略大即可，便于模具方便地放入零件内。考虑范围因钢种、零件厚度和直径大小不同而不同，是一个非确定系数 y ， y 一般在 $0.3 \sim 0.8\text{mm}$ 之间。零件的有效厚度越大， y 越大，这样 $B + y$ 为零件加热后要求的尺寸。

最大整形量 $G = d_i - d$ (d_i 为热处理完成品尺寸， d 为车工尺寸) $= d_i - (B + y - zd_i)$ 。

需要说明的是： $d = (B + y - zd)$ ，为计算方便， $zd \approx z d_i$ 。

我们以图 6 所示零件为便，阐明最大整形量 G 的确定原则。

针对图 6 所示产品，模具按图 4 加工后，模具加压涨大后的外径尺寸要比未加压模具收缩到的最小尺寸大 3.2mm 。

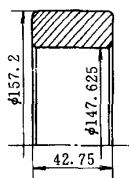


图 6 热处理完成品零件示意图

热处理完成品零件外径尺寸： $d_{i\text{外}} = 157.2\text{mm}$ ；内径尺寸： $d_i = 147.625\text{mm}$ ； $A = (147.625 + 0.20)\text{mm} = 147.825\text{mm}$ ； $B = (147.625 + 0.20 - 3.2)\text{mm} = 144.625\text{mm}$ 。

$y = 0.30\text{mm}$ ； $z = 1.1\%$ 。

则车工考虑的最大整形量：

$$\begin{aligned} G &= d_i - (B + y - z d_i) \\ &= 147.625 - (144.625 + 0.3 - 147.625 \times 0.011) (\text{mm}) \\ &= 4.326\text{mm} (\text{注：} z d_i = 1.623) \end{aligned}$$

加热后的内径直径尺寸涨量理论计算公式：

$$\Delta d = S' \times T \times d$$



式中 S' ——为材料从室温到奥氏体温度的平均线膨胀系数, 为 $14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 左右;

T ——为相对于缓慢加热时的加热温度, $^{\circ}\text{C}$;

d ——为零件的内径公称直径尺寸, mm 。

$$\Delta d = 14.2 \times 10^{-6} \times 840 \times 147.625 \text{ mm} \\ = 1.76 \text{ mm}$$

Δd 为理想状态下理论计算值, 但由于实际生产中受诸多不定因素的影响, 它与零件的实际涨大量略有差别, 要以实际检测值为准。针对图 6 所示产品, z 值与实际测量值基本接近。

2. 固定模具淬火状态下轴承零件尺寸变化

固定模具是指模具为一整体, 在使用过程中, 无论机床施加压力与否, 其外径尺寸是固定不变的。

(1) 固定模具淬火的适用范围 分析图 1, 我们可以看出, 零件在热处理过程中的尺寸变化主要取决于零件的有效厚度, 由于有效厚度较小的零件在冷却阶段产生的拉应力较小, 组织转变时因比体积变化引发的尺寸变化起到绝对作用, 零件尺寸在模具尺寸的基础上涨大的量比较大, 使零件与模具脱离严重, 达不到整形效果。所以有效厚度小于 10mm 的零件并不适合采用固定模具进行压模处理。

(2) 固定模具工作原理 图 7 为套圈不同车工尺寸下, 热处理过程中尺寸变化的理论分析图。在模具尺寸、热处理参数不发生变化的情况下, 改变零件的内径留量即热处理内压模整形量, 分析热处理过程中零件尺寸的变化。

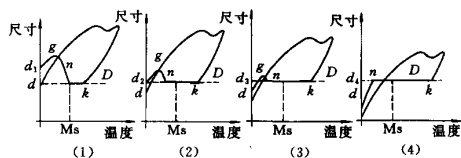


图 7 车工留量与热处理后尺寸关系示意图

D 为模具外径尺寸, 是一个保持不变的量。 d 为零件车加工的内径尺寸, 是一个变化的量, 从图 7 (1) ~ (4) 零件的内径尺寸逐渐减小, 即热处理内压模整形量不断增加。

d_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为零件热处理后脱模尺寸, 是随 d 的变化而变化的量。 n 为组织转变消除冷却应力后套圈尺寸开始变化点。利用固定模具

进行压模淬火时, 留量的设计原则不同于活动模具, 虽然也是利用零件温度降低时尺寸收缩使零件束缚在模具上, 组织转变时抵消包裹的应力而减少或不让模具与零件间存在距离, 但因模具尺寸不能发生变化, 零件加热后的尺寸要比模具尺寸略大而便于脱模, 冷却时产生的应力要小的多, 所以它不适合加工薄壁零件。

如图 7 所示, 整形量的增加会延迟零件因组织转变产生的尺寸涨大时间和减少涨大量, 这也是因组织转变造成的尺寸涨大倾向首先要消除束缚应力所致。

(3) 最大整形量的计算 为了便于在零件加热后模具下落过程中很方便的进入零件, 其加热后的内径尺寸要比模具尺寸大 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 左右。

模具尺寸要略小于热处理完成品要求尺寸 d_i , 即 $d_i - p$ 。

p 为热处理完成后零件内径尺寸与模具外径尺寸差, 是由组织转变引起的尺寸变化倾向在消除冷却过程产生的应力后得到的结果, 我们希望 p 值在 $0.1\text{mm} \sim 0.2\text{mm}$ 范围内最好, 零件与模具方便的脱离。当普通产品热处理 p 大于 0.20mm 时, 固定模具就起不到整形作用而失去使用价值。

加热后零件尺寸要求为 $d_i' = d_i - p - 0.3$ 。

车工尺寸 $d = d_i' - \Delta d$ ($\Delta d = S' \times T \times d$, 但最好以实际检测数值为准), 则最大整形量 $= d_i - d = \Delta d + p - 0.3$ 。

三、结语

(1) 不同材料的套圈在热处理时, 由于尺寸变化规律的不同, 模具的设计也是不同的。如果使用的材料在热处理淬火过程中总保持尺寸收缩的趋势, 利用固定模具进行压模淬火是非常经济、方便的。

(2) 固定模具与活动模具的使用范围是不同的, 当使用的材料发生组织转变使零件尺寸涨大时, 限制了固定模具的使用范围, 对于壁薄零件尽量使用活动模具进行压模淬火。

(3) 在整形量设计时, 应基本遵循理论计算结果, 在计算结果的基础上进行适当调整, 满足实际生产要求。热

(20040618)