

## GCr15 轴承钢线材冷拔工艺优化的实践

王莹莹 杨鹏远

(东北特钢集团大连特殊钢有限责任公司,大连 116105)

**摘要** 分析了 GCr15 轴承钢(1.01% C, 1.58% Cr)  $\Phi 11$  mm 线材的减面率、拉拔模角度和定径带长度,拉拔速率对拉拔应力和拉拔表面精度的影响。得出  $\Phi 11$  mm 盘条冷拉至  $\Phi 10.2$  mm 线材的优化工艺,即  $\Phi 11$  mm 线材(HB193)-等温球化退火(785  $^{\circ}\text{C}$  4.5 h  $\rightarrow$  750  $^{\circ}\text{C}$  3 h)-冷拔至  $\Phi 10.4$  mm 盘条-740  $^{\circ}\text{C}$  4.5 h 去应力退火-冷拔至  $\Phi 10.2$  mm 棒材成品(HB205);冷拔速度 35 m/min,油性润滑等工艺措施可获良好的表面质量。

**关键词** GCr15 轴承钢线材 联合拉拔机 冷拔 减面率 模具 应力 等温球化退火 润滑

## Practice of Cold Drawing Process Optimization of GCr15 Bearing Steel Rod

Wang Yingying and Yang Pengyuan

(Dalian Special Steel Co Ltd, Dongbei Special Steel Group, Dalian 116105)

**Abstract** The effect of draft, cone angle and length of sizing belt of drawing die, and drawing speed on drawing stress and drawing surface accuracy of bearing steel GCr15 (1.01% C, 1.58% Cr)  $\Phi 11$  mm rod coil has been analyzed. The optimization process for  $\Phi 11$  mm rod coil cold drawing to  $\Phi 10.2$  mm rod is obtained, i. e.  $\Phi 11$  mm rod coil (HB193)- isothermal spheroidizing annealing (at 785  $^{\circ}\text{C}$  for 4.5 h  $\rightarrow$  at 750  $^{\circ}\text{C}$  for 3 h)- cold drawing to 10.4 mm rod-de-stress annealing at 740  $^{\circ}\text{C}$  for 4.5 h- cold drawing to  $\Phi 10.2$  mm rod products (HB205); the nice surface quality is obtained by using the process measures including with cold speed 35 m/min and drawing oil lubricant.

**Material Index** Rod Products of GCr15 Bearing Steel, Combined Drawing Machine, Cold Drawing, Draft, Die, Stress, Isothermal Spheroidizing Annealing, Lubricating

引进的生产冷拉材设备的产品精度只有少数产品达到高精度要求,如果精度等级无法有进一步的突破,产品的市场地位将面临极大的挑战<sup>[1]</sup>,因而优化冷拔过程,提高产品精度,减少制品缺陷,提高拉拔模具的使用寿命等问题已成为亟需探索和解决的问题。

### 1 拉拔生产设备

拉拔实质上是对金属坯料施以拉力,使之通过模孔以获得与模孔截面尺寸、形状相同的制品塑性加工方法<sup>[2]</sup>。

在连续拉拔的设备中用于将盘圆拉拔成直条的设备称为联合拉拔机组,钢厂现使用联合拉拔机组主要参数见表 1。主要设备组成:CDS100/100 型联合拉拔机组(德国):主要包括可翻转放线盘、开卷机械手、轧尖机、卧式破鳞矫直机、立式预矫直机、喷丸机、压力推头机、拉拔机、立辊矫直机、表面涡流探伤机、卧式矫直机、飞剪、盘卷机、多管消音导向装置、两辊矫直抛光机、双向分选台、铣面倒棱机、成品称重台架和废品收集台架。

### 2 影响拉拔过程的主要因素

#### 2.1 钢材的强度

由于碳含量不同和加工过程中的冷作硬化,钢材的强度极限愈高,拉拔的应力愈大。在冶炼、轧制和热处理过程中,由于钢材结构或变形不均匀所引起的内应力,也会增加变形的阻力<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 减面率

减面率又称压缩率,在拉拔过程中所造成的冷加工硬化,使钢材的强度增加,屈服点提高,塑性下降。减面率愈大,冷硬的程度愈重,在这种情况下,拉拔应力就随着减面率的增加而加大,如表 2。

在实际生产中,为了避免冷拉变形不均匀和断头,在配置拉拔路线时,总是按拉拔道次的顺序逐步降低它的减面率(部分减面率),以与钢材拉拔过程

表 1 CDS100/100 型联合拉拔机组主要工艺参数

Table 1 Main technical parameters of combined drawing machine CDS100/100

| 设备名称         | 拉拔方式 | 成品规格/mm | 拉拔速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 最大拉拔力/kN | 成品长度/mm     | 润滑方式 |
|--------------|------|---------|--|----------|-------------|------|
| CDS100/100 型 | 盘-盘  | 6~25    | $\leq 100$                               | 100      | 2 500~8 000 | 湿式   |
| 联合拉拔机组       | 盘-棒  | 6~25    | $\leq 100$                               | 100      | 2 500~8 000 | 湿式   |

表2 冷拔减面率对 GCr15 线材硬度和抗拉强度的影响  
Table 2 Effect of cold drawing draft on hardness and tensile strength of GCr15 steel rod

| 线材直径/mm(工艺)          | 减面率/% | HB 硬度 | 抗拉强度/MPa |
|----------------------|-------|-------|----------|
| Φ11(球化退火后原料)         | -     | 193   | 680      |
| Φ10.2(Φ11 冷拉到 Φ10.2) | 14    | 249   | 805      |
| Φ10(Φ11 冷拉到 Φ10)     | 17    | 255   | 845      |
| Φ9.8(Φ11 冷拉到 Φ9.8)   | 21    | 269   | 865      |

的不断硬化(塑性不断下降)相适应。如果拉拔应力超过了钢材的强度,就会造成断头。以目前生产的直径在 Φ6~25 mm 的 GCr15 轴承钢冷拔材为例,拉拔减径尺寸一般仅为 0.5~2.0 mm,总减面率在 4%~20%,基本采用单道次拉拔即可实现。

### 2.3 拉拔模的角度

在一定的拉拔条件下,拉拔模必定存在一个合适的角度范围,使钢材在此角度范围内塑性变形时拉拔力最小,拉拔模的摩擦力最小。拉拔模的工作锥角(2α)对拉拔模的使用寿命起着主导作用<sup>[4]</sup>。

实践证明,在各种不同减面率下,都有一对应的最适宜的拉拔模角度,这时拉拔力最小,变形效率最高。在减面率不变的情况下,角度过小过大都会增大拉拔力,如图 1 所示。角度过小,钢材与模壁的接触面大,增加了摩擦的阻力,从而增大了拉拔力。角度过大,虽然钢材与模壁的接触面小,减轻了摩擦阻力,但是会使钢材的变形过于急剧,附加应力大增,金属组织的晶粒分布不均,造成机械性能下降,甚至断头。另外,在拉拔力不变的情况下,钢材与模壁之间由于接触面减小而增加了单位正压力。这种过大的单位正压力和由此而产生的摩擦高热,就会挤掉或烧坏润滑剂,恶化润滑状态,增大摩擦系数,并因此而增大拉拔力。德国的维斯特赖希从分析钢材塑性变形受力状况出发,提出的模孔工作区最佳角度

$$\text{计算公式, } \alpha = \sqrt{1.5f \ln \frac{d_0}{d_1}}$$

式中:α- 工作区半角;f- 摩擦系数;d<sub>0</sub>- 拉拔前直径/mm;d<sub>1</sub>- 拉拔后直径/mm。

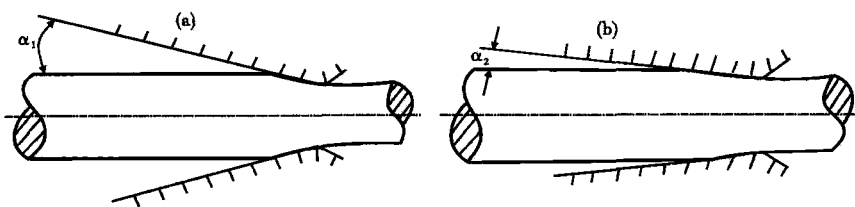


图1 过大(a)和过小(b)的模子角度示意图

Fig. 1 Schematics of too large (a) and too small (b) die angle

在实际生产中,模子的角度主要是随着减面率的增加而增加,随着减面率的减小而减小的(在一定范围内)。对于冷拔直径 Φ≥6.0 mm 钢材减面率在 20% 以下,模孔角度多选用 14°~16°。

### 2.4 拉拔模定径带的长度

在拉拔条件相同的情况下,模子定径带的长度愈大,拉拔力愈增大,至于增加的程度,则与减面率有关。当减面率较小时,钢材的出线直径与规定的线径尺寸几乎相等。此时钢材与定径带的摩擦阻力较大。当减面率相当大时,出线直径比规定的线径尺寸缩小,钢材与定径带的摩擦力较小。

拉拔减面率偏小,拉拔速度可适当加大,模子定径带的长度要增加,否则就不耐磨损;拉拔减面率偏大,拉拔速度可适当降低,模子定径带的长度反而可缩短一些。但要注意长短应适当,过短的定径带会影响钢材表面的光洁度和出线尺寸的稳定;过长的定径带会增加模子的摩擦热,并过多地挤刮润滑膜,对润滑不利。拔模适宜的定径带长度为 0.2~0.5 d (d 指模孔直径)<sup>[3]</sup>,拉拔模定径带长度与模孔直径间的关系见表 3。

### 2.5 拉拔速度

受拉拔过程温度影响最大的是润滑剂和拉拔模,温升过高会导致润滑剂失效(温度若超过特定界限值,就能引起润滑剂的化学分解和焦化,或使润滑膜破裂和消失,而使拉拔力急剧增大,摩擦系数也急剧升高,不均匀变形程度加剧,以至有拉断的危险),使拉拔模磨损和损坏。由于冷却条件改善有限,润滑剂能承受的温度也是有限的,因此拉拔速度也受到限制。当拉拔速度由 6 m/min 提高到 50 m/min 时,拉拔力可减少 30%~40%<sup>[5]</sup>,此后,再增加拉拔速度拉拔力降幅已大为减少,实践证明在拉拔 Φ≥6.0 mm 时轴承钢一般拉拔速度设定为 30~50 m/min,此时拉拔应力较低,冷却适当,能够较好满足钢材性能及表面质量要求。单道次拉拔减面率较大时(超 10%),拉拔速度应控制在下限。同等减面率情况下,热轧材因抗拉强度较大,拉拔时速度应小于退火材拉拔速度。

## 3 拉拔过程的优化

### 3.1 钢材强度

当 GCr15 轴承钢(表 4)从 Φ11 mm 盘条冷拉到 Φ10.2 mm 棒材时,客户要求成品硬度 ≤209 HB,如单次拉拔,硬度超标,需要进行两道次拉拔,

表 3 拉拔模子直径与模定径带长度间的关系 /mm  
Table 3 Relation between diameters of drawing die hole and length of sizing belt of drawing die /mm

| 模孔直径( <i>d</i> ) | 定径带长度   |
|------------------|---------|
| 5~15             | 3.5~5.0 |
| 15.1~25.0        | 4.5~6.5 |
| 25.1~40.0        | 6~8     |

表 4 GCr15 轴承钢的分析成分/%  
Table 4 Analysis of bearing steel GCr15 /%

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   | Al    | Cu   | Sn    |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| 1.01 | 0.22 | 0.33 | 0.015 | 0.003 | 1.58 | 0.06 | 0.03 | 0.008 | 0.12 | 0.026 |

表 5 GCr15 轴承钢退火工艺和减面率对 HB 硬度值的影响  
Table 5 Effect of annealing process and draft on hardness HB value of bearing steel GCr15

| 钢材直径/mm(工艺)          | 工艺参数        | HB 硬度 |
|----------------------|-------------|-------|
| Φ11(球化退火后)           | 退火温度 785 °C | 193   |
| Φ10.4(Φ11 冷拉到 Φ10.4) | 减面率 11%     | 241   |
| Φ10.4(去应力退火后)        | 退火温度 740 °C | 198   |
| Φ10.2(Φ11 冷拉到 Φ10.2) | 减面率 4%      | 205   |

中间进行一次去应力退火,生产工艺为:Φ11 mm 盘条→球化退火(785 °C,图 2a)→拉拔到 Φ10.4 mm 盘条→去应力退火(740 °C,图 2b)→拉拔到 Φ10.2 mm 棒材成品。GCr15 钢各阶段工艺参数与硬度对照关系如表 5。

### 3.2 减面率及拉拔道次

减少拉拔道次可以增加小时产量(在成品尺寸不变情况下),但是钢材容易断头,并且影响性能。增加拉拔道次会消耗模具并且产量下降。因此,减面率的确定,不但要保证拉拔的顺利进行和钢材的质量,而且还能合理地减少拉拔道次,增加产量,提高生产效率。对于主要要求性能的产品,在设备允许情况下选择合适的原料,可以一次出料;要求表面质量和性能的产品可以两道次出料,为降低变形不均匀,尽量适当降低最后一道次的减面率,经多次生产试验,表 5 工艺的减面率和拉拔道次是适宜的,产品质量和生产效率相对稳定。

### 3.3 拉拔模

拉拔模是直接和冷拔钢材接触并使其发生变形的工具,是影响拉拔精度的最关键因素之一。因此应在统一模具尺寸的前提下,根据产品拉拔道次的要求不同,将半成品用模具与成品模具进行分类管理。一般半成品拉拔变形量比较大,对

模具造成的损耗较大,经过半成品拉拔后的模具表面容易出现粗糙、环形沟槽和开裂等缺陷,这些模具如一般修磨后再用于拉拔成品,则成品的表面精度难以保证,可将此类有缺陷的模具挑选出来专门用于半成品的拉拔。精心挑选高精度(椭圆度 ≤ 0.005 mm)、表面无砂眼、划伤、凹坑、环形沟槽的模具用专业研磨膏进行精抛,使其表面光洁度达到镜面要求<sup>[1]</sup>,以便用于成品的拉拔。对于单道次减面率小于 5% 的轻拉产品,可适当缩小模具锥角,延长定径带长度,有利于确保拉拔平直度。对于平直度要求不高,容易产生拉毛的工具钢如 9SiCr 可通过缩小模具锥角减少晃动,缩短定径带减少拉毛。

### 3.4 拉拔速度

CDS100/100 拉拔机拉拔速度为 10 ~ 100 m/min,在生产中对轴承钢 GCr15 从 Φ20 mm 拉拔到 Φ19.5 mm 和 Φ19 mm 拉拔到 Φ18 mm 进行拉拔速度逐渐提高试验,试验结果见表 6。拉拔过程中 GCr15 表面的粗糙度发生微小的变化,在拉拔速度大于 50 m/min 时,钢材表面粗糙度略有升高,随着拉拔速度的继续增大,表面粗糙度基本不发生变化。结合以上试验和拉拔速度对钢材力学性能的影响因素考虑,根据生产试验数据统计和长期生产实践积累,在生产直径 Φ ≥ 6.0 mm 冷拔轴承钢时采用拉拔速度 35 m/min,拉拔后钢材表面粗糙度最佳。

表 6 拉拔速度对轴承钢 GCr15 线材表面粗糙度的影响  
Table 6 Effect of drawing speed on roughness of surface of bearing steel GCr15 rod

| 拉拔速度/<br>(m · min <sup>-1</sup> ) | 粗糙度/(Ra · μm <sup>-1</sup> ) |                 |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------------|
|                                   | Φ20 mm → Φ19.5 mm            | Φ19 mm → Φ18 mm |
| 20                                | 1.230                        | 1.015           |
| 30                                | 1.241                        | 0.983           |
| 35                                | 1.235                        | 0.976           |
| 40                                | 1.238                        | 0.980           |
| 45                                | 1.240                        | 1.028           |
| 50                                | 1.257                        | 1.008           |
| 60                                | 1.240                        | 1.012           |

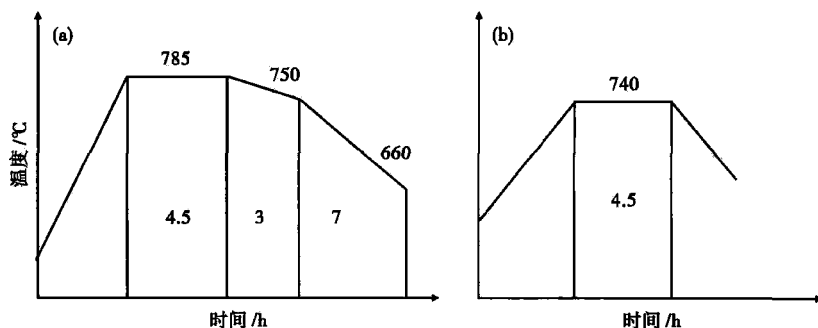


图 2 GCr15 轴承钢球化退火(a)和去应力退火(b)工艺曲线

Fig. 2 Curves of isothermal spheroidizing annealing process (a) and de-stress annealing process (b)

### 3.5 其他拉拔条件

为了减少拉拔过程中的摩擦,提高拉拔材表面质量,使用合理的润滑剂和润滑方式具有十分重要的意义。润滑剂的选择,直接关系到拉拔速度、钢材的表面质量、力学性能、设备利用率<sup>[6]</sup>。连续拉拔的设备中,更显重要。好的润滑剂附着性好、摩擦系数低、抗高压高温,可能满足高速拉拔的需要。

拉拔润滑剂分为干式、湿式两大类。湿式润滑剂又分为水剂和油剂两种。选择润滑剂应考虑产品形状和利于后续加工。

干式拉拔润滑剂主要是金属皂类,拉拔高强度钢丝时则加入二硫化钼和少量添加剂。干式润滑剂为粉末状,使用时不用水或油调合,冷却效果差,在拉拔过程中常辅以机械方法进行冷却。干式拉拔主要用于钢丝和铁丝的拉拔,在拉拔过程中粉尘很大,对操作人员健康不利。

水性拉拔润滑剂是将润滑剂分散于水中形成乳化液,乳化液中的水分因受热而变成蒸汽蒸发,带走了热量,油的组分则留下来吸附在金属表面起润滑作用。

CDS100/100 拉拔机采用油性润滑,其使用的是大连某公司生产的特种拉拔油,其产品性能检测结果如表 7,拉拔油常用的添加剂主要有极压抗磨剂和油性剂。极压抗磨剂主要是含有活性元素 S、Cl 和 P 的有机化合物,在拉拔过程中形成化学吸附膜把金属与模具表面隔开,从而防止金属磨损和烧结。油性剂在摩擦表面形成物理吸附膜,从而降低摩擦起到润滑作用,增强油膜的能力。油性剂主要包括脂肪酸、脂肪醇和脂肪酸酯<sup>[7]</sup>。

对于拉拔难度较大的工具六角钢,经过酸洗表面光滑,如直接采用润滑油拉拔,表面油膜不牢固,拉拔过程易破裂,导致模具和钢材直接接触,使钢材表面起毛,模具磨损加剧。在这种情况下,改用干式

润滑和湿式润滑相结合的措施可以收到满意的效果,先在钢材表面润滑涂层,经干燥后,再进行润滑油拉拔,起到良好的润滑作用,可有效改善六角材拉拔的润滑条件,提高模具使用寿命和生产效率<sup>[1]</sup>。

## 4 结论

(1)必要时选用适宜的热处理工艺配合冷拉路线,可获得适宜的冷拉性能。

(2)总减面率的选择不仅要考虑产品强度要求,而且要考虑产品韧性指标要求。对于主要要求性能的产品,在设备允许情况下选择合适的原料,可以一次出料;要求表面质量和性能的产品,可以两道次出料,第一道次拉拔探伤确定表面缺陷并为第二道次拉拔留一定余量,处理后再拉拔成品。

(3)半成品和成品模具分类管理,对高精度模具用专用研磨膏精抛使其表面光洁,使冷拔材公差精度得到保证。可适当调节模具锥角和定径带长度,保证冷拔材平直度和表面质量。

(4)拉拔速度在 30 ~ 50 m/min,能够较好满足钢材性能及表面质量要求。生产直径  $\geq 6$  mm 的冷拔 GCr15 轴承钢的最佳冷拔速度为 35 m/min。

(5)使用附着性好、摩擦系数低、抗高压高温的优质拉拔专用油,可以满足高速拉拔的需要,获得好的成品质量。

(6)采用干湿润滑相结合可改善异型冷拔及大减面冷拔润滑条件,提高模具寿命和生产效率。

### 参考文献

- [1] 温景林. 金属挤压与拉拔工艺学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1996: 151.
- [2] 江运宏, 周靖, 汤飞. 高精度冷拉材优化拉拔条件的探索与实践[J]. 上海钢研, 2006(2): 19-22.
- [3] 蒋克昌. 钢丝拉拔技术[M]. 北京: 轻工业出版社, 1982: 263-264.
- [4] 汤飞. 特殊钢钢丝拉丝模的工作锥角度[J]. 特殊钢, 1995, 16(4): 49-51.
- [5] 徐效廉, 明绍芬. 特殊钢钢丝[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 35.
- [6] 金庆波, 李洪亮. 高碳钢丝的拉拔条件[J]. 天津冶金, 1999(1): 13-14.
- [7] 屈智煜, 秦鹤年. 钢材拉拔润滑剂的应用与发展[J]. 润滑与密封, 2008(6): 107-110.

王莹莹(1983-), 女, 工程师, 2006年辽宁科技大学(本科)毕业, 金属材料及热处理研究。  
E-mail: wyy8528820@163.com

收稿日期: 2015-06-02

表 7 拉拔油性能测试结果

Table 7 Measure results of drawing oil performance

| 测试项目   | 测试标准               | 测试结果  |
|--|--------------------|-------|
| 粘度, 40 °C / (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ) | GB/T265-1988       | 300   |
| 闪点(开闪)/°C  | GB/T3536-2008      | 250   |
| 凝点/°C  | GB/T510-1983       | -10   |
| 腐蚀试验, 45#钢(100 °C, 3 h)                          | GB/T5096-1985      | 合格    |
| 四球试验   | P <sub>B</sub> (N) | 980   |
|  | P <sub>D</sub> (N) | 7 845 |
| 水分/%   | SH/T0604-2000      | ≤痕迹   |
| 机械杂质/%   | GB/T511-1988       | ≤0.05 |