

# 模锻连杆脱碳层和表面强化控制技术研究

孙 勇, 杨峰华, 刘小东

(河南柴油机重工集团公司, 河南 洛阳 471039)

**摘 要:** 柴油机锻造连杆表面的脱碳层深度是影响连杆疲劳性能的一个关键参数。分析了脱碳层的形成和危害, 提出了有关脱碳层控制的工艺措施, 以及在消除连杆杆身表面脱碳层的前提下, 提高表层抗力的强化技术。

**关键词:** 连杆; 锻造; 脱碳层; 表面强化

**中图分类号:** TK423.3<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2015)06-0040-03

## Research on Die Forging Connecting Rod Decarburized Layer Surface Strengthening and Controlling Technology

Sun Yong, Yang Fenghua, Liu Xiaodong

(Henan Diesel Engine Industry Co., Ltd., Henan Luoyang 471039)

**Abstract:** The depth of decarburized layer of diesel engine die forging connecting rod is a key parameter influenced the connecting rod's fatigue performance. The formation of decarburized layer and its damages were researched, the technical solutions were given on the control of decarburized layer, as well as the strengthening technology on how to improve the surface resistance on the premise of eliminating decarburized layer of connecting rod surface.

**Key words:** connecting rod; forging; decarburized layer; surface strengthening

## 0 引 言

柴油机连杆组件在工作中承受交变的拉压应力, 因此, 对连杆的抗疲劳性能要求极高。当连杆受燃气压力时, 要求连杆设计趋向承载更重; 而当连杆承受超自重上千倍惯性负荷时, 又要求连杆结构轻巧。因此, 连杆设计的重要原则是, 既要结构轻巧又要保证足够的刚度和韧性。其设计制造的重点为: 选用高强度的材料; 结构形状和尺寸设计合理; 采取提高强度的工艺措施。

## 1 连杆锻件结构和材料特点

连杆的刚度和强度要求在尽可能紧凑和轻巧的结构下实现, 杆身断面的形状应使连杆不仅具有足够的拉压强度, 而且具有足够的抗弯刚度, 同时要

求尽可能消除产生应力集中的因素, 所以连杆杆身断面采用工字形。

几乎所有的连杆都用高强度钢锻造制成, 其变形量(拉伸和压缩)大约为0.05%, 即300 mm长的连杆允许变形为0.15 mm。连杆锻件在机械加工前应经调质处理(淬火后高温回火), 硬度达220~290 HB, 使其具有较高的强度, 足够的塑性、韧性以及相应的抗疲劳性等综合机械性能。连杆纵向断面内宏观金相组织要求: 显示的金属纤维方向与连杆外形相符, 纤维无环曲及中断现象。连杆长度的偏差直接影响柴油机的压缩比和装配关系, 所以其制造公差要保持在 $\pm 0.05 \sim \pm 0.1$  mm的范围内。

连杆一般选用45#钢, 强化程度比较高的柴油机选用40Cr合金钢, 采用精密模锻工艺。在锻造过程中钢材会因为温度过高而表面脱碳, 影响锻件

的强度, 尤其影响和表面质量关系最大的疲劳性能。采用脱碳层控制技术和表面强化技术是有效的措施。

## 2 连杆锻件脱碳层控制技术研究

### 2.1 脱碳层的形成与危害

连杆锻件在热压力加工和退火时, 由于加热温度过高, 保温时间过长, 会造成钢材表面的碳与介质中的氧、氢、二氧化碳等发生反应, 降低表面的碳浓度, 形成脱碳层。

钢的表面脱碳以后, 由于表层与芯部的组织不同和线膨胀系数不同, 因此淬火时所发生的不同组织转变及体积变化将引起很大的内应力。这些内应力极易使表面被拉裂呈网状。但是当表层完全脱碳时, 淬火后表层为铁素体, 因铁素体塑性好, 易变形, 可使应力松弛, 则不易形成网状裂纹。如果零件加工面上脱碳层的深度在加工余量范围内, 则可以做切削处理; 反之, 脱碳层将保留下来, 并将导致性能下降。有时因为锻造工艺不当使脱碳层局部堆积, 机加工时又不能完全去掉, 则引起性能不均, 严重时造成零件报废。所以, 脱碳严重影响工件的力学性能, 降低工件表层的强度、硬度和疲劳强度, 最终导致连杆在使用中过早地发生疲劳失效损坏。

### 2.2 脱碳层深度控制要求

脱碳会降低材料的疲劳强度, 作为预备热处理, 只要脱碳层小于切削余量是允许的, 但是在最终热处理阶段应控制脱碳层。

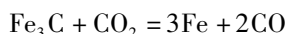
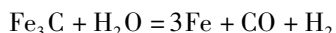
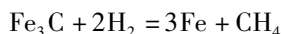
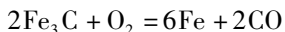
热处理表面脱碳层应该根据航标 HB5354 的规定: 不加工表面的脱碳层厚度不允许超过 0.07 mm。脱碳层使得零件的机械性能降低, 所以越薄越好, 否则易产生疲劳断裂。

对于气缸直径  $\leq 200$  mm 的往复式内燃机的锻钢连杆, 机械行业标准 JB/T6721-1993《内燃机连杆技术条件》3.2.4 中明确规定: “连杆的显微组织应符合 GB/T13320 中的 1~4 级, 连杆脱碳层深度按产品图样的规定。”也就是说, 连杆的脱碳层深度应根据柴油机的用途和强度来确定。

### 2.3 脱碳层的控制

#### 2.3.1 脱碳层形成机理

脱碳的过程是: 钢中的碳在高温下与氢或氧发生作用, 生成甲烷或一氧化碳。其化学方程式如下:



这些反应是可逆的, 即氢、氧和二氧化碳使钢脱碳, 而甲烷和一氧化碳则使钢增碳。脱碳是扩散作用的结果, 脱碳时一方面是氧向钢内扩散, 另一方面钢中的碳向外扩散, 最后的脱碳层仅在脱碳速度超过氧化速度时才能形成。当氧化速度很大时, 可以不发生明显的脱碳现象, 即脱碳层产生后即被氧化而成氧化皮。

#### 2.3.2 影响脱碳的因素

##### (1) 钢料的化学成分对脱碳的影响

钢中含碳量愈高则脱碳倾向愈大, W、Al、Si、Co 等元素都使钢脱碳倾向增加; 钢中的 Si 含量越高, 越容易脱碳; 而 Cr、Mn 等元素能阻止钢脱碳。

##### (2) 加热温度的影响

加热温度的提高使脱碳层的深度不断增加。随着加热温度的升高, 钢的脱碳层深度会出现拐点, 在低温加热时, 钢的脱碳速度大于氧化速度, 而在高温加热时, 钢的氧化速度变快而超过脱碳速度, 脱碳层会随氧化皮的剥落而变浅 (见图 1)。

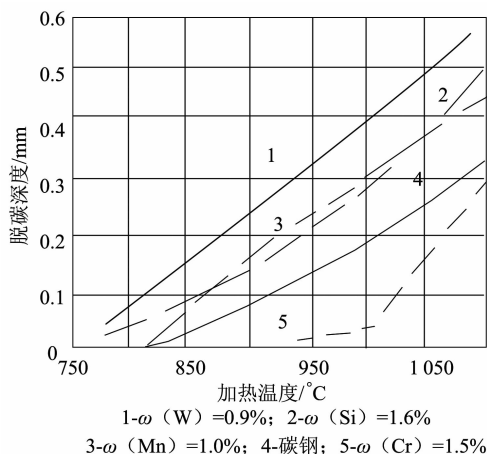


图 1 钢的脱碳层深度与化学成分和加热温度的关系

##### (3) 保温时间和加热次数的影响

加热时间越长, 加热火次愈多, 则脱碳层愈深, 但脱碳层并不与时间成正比增加。例如高速钢的脱碳层在 1 000℃ 加热 0.5 h, 深度达 0.4 mm; 加热 4 h 达 1.0 mm; 加热 12 h 后达 1.2 mm。加热时间越长, 脱碳层深度越大。

##### (4) 炉内气氛对脱碳的影响

炉内气氛中脱碳能力最强的介质是  $\text{H}_2\text{O}$  (汽), 其次是  $\text{CO}_2$  与  $\text{O}_2$ , 最后是  $\text{H}_2$ ; 而有些气氛则使钢增碳, 如  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$ 。炉内空气过剩系数  $\alpha$  大小对脱碳也有重要的影响: 当  $\alpha$  过小时, 燃烧产物中出现  $\text{H}_2$ , 在潮湿的氢气内, 脱碳速度随着含水量的增加而增加。因此, 在煤气无氧化加热炉

中加热,当炉气中含  $H_2O$  较多时,会引起脱碳。当  $\alpha$  过大时,由于形成的氧化皮多,阻碍碳的扩散,故可减小脱碳层的深度。在中性介质中加热,可使脱碳最少。燃烧气氛对钢的脱碳也有影响,一般认为还原性气氛有利于改善钢的脱碳。

钢件在空气或含  $CO_2$  和  $H_2O$  的氧化性气氛中加热会发生脱碳,对加热淬火应用  $CO-CO_2$ 、 $N_2-CO-CO_2-H_2-H_2O$  混合气氛,炉气的碳势须与工件表面含碳量一致;对中高碳钢的加热,必须对炉气实行碳势控制。对应用真空加热时,真空度达到不氧化时,也就不会发生脱碳。

### 2.3.3 脱碳层的控制和补救措施

脱碳层的控制主要从设计初期的材料选择和锻造时的脱碳层控制两方面来进行,具体如下。

#### (1) 选用合适的材料

脱碳层的产生与材料的关系密切,通过选用合适的连杆材料,可减弱脱碳层的产生。优质中碳结构钢、40Cr 合金钢等较 45# 钢不容易脱碳,强化程度也较好。

#### (2) 控制适当的加热时间和温度

尽可能地降低加热温度及在高温下的停留时间;合理地选择加热速度以缩短加热总时间;除严格控制加热温度外,还要确定正确的保温时间。

#### (3) 控制适当的加热的热气氛

使呈现中性或采用保护性气体加热的方法适用于连杆;在脱氧良好的盐浴炉中加热要比普通箱式炉中的脱碳倾向小;高温加热时,钢的表面用覆盖物及涂料加以保护,以防止氧化和脱碳,或采用气氛保护,加入氮气介质等。

#### (4) 表面涂覆防脱碳涂料

对于单件小批量连杆脱碳层的控制可以采用表面涂覆的方法,使连杆本体加热时与炉内氧化性气氛隔绝,从而避免脱碳层的产生。

采取以上措施后,可以实现脱碳层的有效控制。对于偶有脱碳的连杆,可以在后续热处理加热过程中采取一定的含碳性保护性气氛,使脱碳层实现复碳的补救措施,这要有相应的专业设备来实现,例如 IPSEN 多用炉等。热处理操作时应根据连杆材质的含碳量和机械性能等要求设置热处理工艺参数,包括炉内加热温度、保温时间、冷却介质、炉内气氛碳势等。

## 3 连杆锻件表面强化技术研究

防止热处理时脱碳的过程在质量管理中属于特殊过程,这种特殊过程必须在事前对过程能力进行

确认。所以,实现模锻连杆杆身不加工的关键是对锻造和后续热处理过程的确认。而对过程的评审和批准的准则,即设备的鉴定和人员资格的认可,使用特定的程序和方法,记录的要求和再确认的评审和批准过程等,是柴油机设计者、冶金专家和工艺师智慧的集成。

连杆锻件表面浅薄的脱碳层用喷丸进行消除的做法值得商榷。这里有一个脱碳层深度和喷丸强度的矛盾处理问题,应该按柴油机的强度来确定。具体喷丸实施也涉及到过程确认,船用柴油机连杆锻件应在消除脱碳层的前提下,再考虑强化连杆杆身的措施,此时采用喷丸可使连杆杆身的抗疲劳强度提高 10% 左右。

为提高零件疲劳强度,对高速强化柴油机连杆进行喷丸强化处理工艺,并严格控制喷丸过程中的每个工艺参数,因为任何工艺参数的变化均会影响喷丸强化的质量。在工艺上,对喷丸的设备、喷丸强度、喷丸试片、喷丸覆盖率等均做了严格的规定,符合规范 GB/T20015-2005 金属和其它无机覆盖层电镀镍、自催化镀镍、电催化镀镍、电镀罗铬及最后精饰、自动控制喷丸强化前处理,及 JB/T10774-2008 钢铁零件强化喷丸的质量检验方法。连杆喷丸过程见图 2。



图 2 连杆喷丸过程

## 4 结 论

船用柴油机连杆制造过程中,要特别强调材料和工艺相互制约和相互补充的关系,并致力于连杆表面强化工艺技术的研究,连杆锻件的脱碳层和强度的关系处理充分说明了这点。

通过采取以下脱碳层控制措施,可以实现对脱碳层的有效控制,提高连杆的疲劳寿命及柴油机的安全可靠性能。

(1) 保留优良的锻造纤维组织,确保锻件纤维方向沿着连杆中心线并与外形相符,不得有紊乱及间断;实现连杆杆身部位不加工的关键是脱碳层的控制。

(下转第 54 页)

杆全部顶弯；活塞销座上全部变形，下部有裂纹；缸套上部的内侧有一直径约 12 ~ 13 cm 的破洞，下部密封环处全部被砸掉；曲柄箱检查发现，孔盖损坏；连杆下头部碰伤；气缸盖阀座部分被顶出凹坑且破裂，冷却水喷出。

### 1.2.3 原因分析

(1) 在两次起动不成功时，没有吹车，气缸内集油太多，起动后造成飞车。

(2) 处置不当，发生飞车后柴油机还没有完全停机，就扳动复位手柄复位，造成二次飞车，加大了损坏程度。

## 1.3 MB820 型柴油机飞车

### 1.3.1 故障现象

某船主机 MB820 型柴油机（12 缸，缸径 175 mm），在工作时冒黑烟，停靠码头时检查高压泵的供油始点并做调整。调整时，人工将高压油泵的油量控制杆拉出，并用螺丝刀柄垫在下面，当拆下 A 排两缸和 B 排一缸的高压油管接头分别检查时，发现各缸供油始点相差很大。经分析认为是高压油泵内有空气，因而造成检查不准。于是使用低压输油泵（电动预供油泵）打油来排除空气，但仍不能彻底排除空气，最后决定采用压缩空气（该柴油机采用压缩空气起动）吹车的办法来排除空气，吹车的同时也打油，打开气瓶后，把空气压力调整到 20 (kg · cm<sup>2</sup>)，第一次打开空气开关后，立即关上，曲轴转了数转；第二次重复以上动作；第三次空气开关一打开，主机立即起动起来，且转速急剧上升，按紧急停车按钮不能停车，取下螺丝刀柄，按紧急停车按钮，才将机器停下。

### 1.3.2 检查结果

B 排第 4、5 缸两排气阀和两根气阀推杆顶弯，两个气阀推杆从动部打碎，摇臂球形头损坏，两缸

活塞顶均严重打伤，缸套均拉毛。

### 1.3.3 原因分析

(1) 轮机员工作粗心，只想到吹车，没有想到柴油机可能起动；

(2) 柴油机飞车后，处置不及时，未能及时取出螺丝刀。因为，在拉杆下面垫螺丝刀后，高压油泵齿杆处在最大供油位置，按紧急停机按钮后，齿杆无法移动到零供油位置，无法停机，取出螺丝刀后，紧急停机按钮才能起作用。

## 2 经验总结

### (1) 违反操作规程造成飞车

12VE230 柴油机操作规程规定：在柴油机起动不成功时，再次起动前应该吹车。而在实际工作中，往往图省事，没有吹车就起动造成飞车故障。因此，必须严格要求按照操作规程操作。

### (2) 柴油机飞车后处置不当

一旦柴油机飞车，要求立即停机。柴油机如果有飞车保护装置，可以自动停机，如果没有飞车保护装置，在出现飞车故障时，要求人工迅速切断油路或气路，紧急停机。案例 3 中齿杆下面垫的螺丝刀柄未能及时拿出；案例 2 中出现柴油机飞车后，飞车保护装置已经使柴油机转速降低，但人为扳动恢复手柄，造成再次飞车，属处置不当，造成故障扩大。因此，柴油机飞车时必须正确处置。

### (3) 业务能力不强

三次飞车故障反映出轮机员的业务能力不强，工作不够细心，不能全面思考问题，顾此失彼，缺乏按章办事的意识。因此，应该加强业务培训，形成良好的职业素养，精通专业知识，提高工作能力，以保障船舶动力安全运行。

(上接第 42 页)

(2) 船用柴油机连杆表面不允许有脱碳层，目前主要采用对连杆锻件直接进行保护气氛加热调质处理的办法进行控制。当含碳量 0.48% 时，应根据每批连杆的化学成份，制定不同的加热温度。

(3) 采用合适的强化措施，在满足消除脱碳层的前提下，方可进一步实施连杆杆身强化措施。优化喷丸工艺，可使连杆杆身的抗疲劳强度在原来的基础上提高 10% 左右，取得比改变材料成分更有效的结果。

## 参考文献

- [1] 高希复. 柴油机强度 [M]. 武汉：海军工程学院出版社，1988.
- [2] 候天理. 柴油机手册 [M]. 上海：上海交通大学出版社，1993.
- [3] 赵士林. 九十年代内燃机 [M]. 上海：上海交通大学出版社，1992.
- [4] 中国机械工程学会热处理专业分会、《热处理手册》编委会. 热处理手册（第 1 卷工艺基础）[M]. 北京：机械工业出版社，2001.