

文章编号:1671-5497(2004)01-0085-06

# 发动机连杆裂解加工及其关键技术

寇淑清, 杨慎华, 赵勇, 赵庆华

(吉林大学 锻工工艺研究所, 吉林 长春 130025)

**摘要:**分析了断裂的剖分机理和发生条件,并对裂解连杆材料、预制初始裂纹槽、定向裂解、定扭矩装配螺栓等连杆裂解加工的关键技术与核心工艺进行了探讨。研究开发了具有“背压”裂解功能的定向裂解机床,并对轿车发动机连杆裂解加工过程进行了数值分析与试验探索。结果表明:合理设计裂纹槽位置与几何参数并保证加工精度,可有效降低裂解加工载荷。背压裂解加工方法有利于提高裂解加工质量,在瞬时加载条件下,合理调节背压力与裂解力比值,可获得性能优良的断裂面。

**关键词:**连杆;裂解加工;关键技术;裂纹槽

**中图分类号:**TH16 **文献标识码:**A

## Fracture-splitting process of engine connecting rod and its key techniques

KOU Shu-qing, YANG Shen-hua, ZHAO Yong, ZHAO Qing-hua

(Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The fracture-splitting mechanism and conditions were discussed and the key techniques and working procedures such as the material selection, machining of cracking notches, directed fracture separating and assembling bolts in required torque were presented. A fracture-splitting machine that can provide backpressure in cap of connecting rod was developed and fracture-splitting processing for car engine connecting rods was investigated numerically and experimentally. The results show that the right design in notch location and geometry and the satisfactory precision for notching reduces fracture loads effectively, the backpressure is of benefit to splitting quality, a right ratio of splitting force to backpressure force brings a perfect fracture face in the case of applying instantaneous load to hole in the big end of connecting rod.

**Key words:** connecting rod; fracture splitting; key technique; cracking notch

连杆主要用来连接活塞和曲轴,其运动状态复杂,且承受着压缩、拉伸、弯曲等交变载荷的作用,因此对其制造精度与机械性能要求很高。其传统制造工艺不仅需对连杆体和连杆盖的接合面进行拉削、铣削和磨削,还要钻、铰连杆盖上的定位销孔和连杆体的螺栓孔,以便实现连杆本体与连杆盖的精确合装,加工工序繁多。由于螺栓定位孔精度要求高、加工难度大,致使废品率较高。连杆裂解加工新技术构思新颖、操作简便、效益显著,是对传统连杆加工技术的一次重大变革<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2003-06-29.

基金项目:“863”国家计划资助项目(2002AA421140);国家自然科学基金资助项目(50375066).

作者简介:寇淑清(1962-),女,黑龙江肇源人,教授.E-mail:kousq@vip.sina.com

## 1 连杆裂解加工原理

连杆裂解加工技术的基础是断裂理论。根据断裂力学原理,裂纹表面通常有张开型、前后滑移型和平面剪切型三种位移形式。当物体受到垂直于断裂平面的正应力作用时,发生低应力脆性断裂,即张开型断裂。其特点是断裂时承受的工作应力较低,通常远远低于材料的屈服强度,塑性变形小,断口方向与正应力垂直<sup>[2]</sup>。

连杆裂解加工的原理是通过在大头适当位置设计并预制缺口,形成应力集中,再主动施加垂直于预定断裂面的载荷进行引裂。当满足发生脆性断裂的条件时,在几乎不发生塑性变形的情况下,在缺口处规则断裂,实现连杆体与连杆盖的无屑断裂剖分。其加工原理如图 1 所示。由于断裂面呈犬牙交错自然形态,具有极高的配合精度,无需再加工。在后续的大头孔精加工及装配过程中,以断裂剖分的三维曲面定位,分离后的连杆盖与连杆体在断裂面处自然啮合、精确合装。

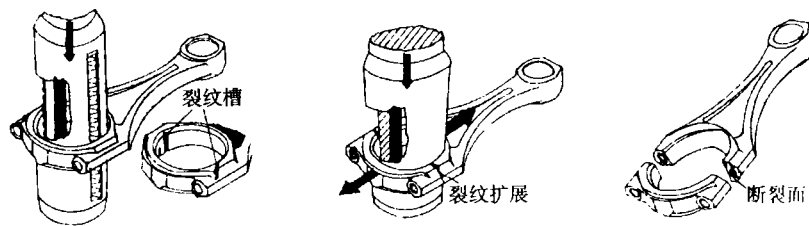


图 1 裂解加工原理

Fig. 1 Principle of fracture-splitting process

连杆裂解加工属于精密加工技术。断裂剖分后大头孔仅需精镗,因此在定向裂解过程中,大头孔不能有较大的失圆与变形,以免造成后续精加工的余量不足;由于断裂面将作为后续加工及装配的基准,所以要求断裂面具有较好的三维凹凸曲面形态,以满足精确啮合的要求;同时,连杆作为发动机的重要零件,工作状态恶劣,在高温环境下承受交变载荷的作用,运动速度极高,因此要求断裂面(接触面)强度高、承载能力强。

## 2 裂解加工关键技术

### 2.1 连杆材料

连杆的材料及金相组织不仅决定连杆产品的性能和切削性,而且影响裂解加工质量。裂解加工工艺要求大头孔不能产生明显的塑性变形,以保证精加工后大头孔的圆度要求。因此在保证连杆强韧综合性能指标的前提下,限制连杆的韧性指标,使断口呈现脆性断裂特性,以便具有良好的啮合性。目前连杆材料主要有粉末冶金、高碳钢、球墨铸铁和可锻铸铁。

粉末冶金材料具有良好的脆性断裂性能,用裂解方法加工连杆广泛采用此种材料。其优点是锻造毛坯的精确度高,可取消连杆毛坯粗加工,减少了材料费用和加工工序。粉末冶金锻造连杆甚至在烧结成型时就可预压出裂纹槽,从而可取消缺口加工工序。粉末冶金技术的发展使获得高密度、高强度的粉末冶金材料变得更容易也更廉价,促进了连杆裂解加工技术的发展和适用范围<sup>[3]</sup>。铸造连杆的低塑性和易脆断极适宜裂解加工技术的应用。但铸造连杆重量偏差大,机械性能较差,其使用受到限制。

锻钢连杆尺寸精度高,组织结构与力学性能好,在传统连杆制造业中应用最为广泛,尤其用于负荷大、转速高的发动机以及要求连杆具有高疲劳强度和可靠性的场合。目前广泛用于制造轿车连杆的 C70S6 高碳微合金非调质钢,锻造后直接空冷机械性能即可达到要求,可取消常规热处理以及校直和消除应力的工序,尤其是可裂性好,极适合裂解加工<sup>[4]</sup>。新型锻钢 SPLITASCO70 ~ 38 系列<sup>[5]</sup>中, SPLITASO70 钢与 C70S6 钢化学成分相同,但为了提高其机械性能,熔炼工艺中需控制钢的中间相。

SPLITASCO50 钢 C 的质量分数降为 0.5% 左右,其屈服强度有所提高,尤其当硫的质量分数大于 0.15% 时,其机械加工性优于其他钢种,可用于小型发动机连杆。此外日本也研究开发了用于裂解加工连杆的中碳微合金非调质钢<sup>[6]</sup>。

## 2.2 缺口设计与裂纹槽预制

预制裂纹槽的目的是制造缺口效应,提高应力集中系数,满足张开型断裂条件,保证断裂发生在预定位置,并有效降低裂解加工载荷,保证裂解加工质量要求。裂纹槽的设计和制造是裂解加工技术的关键,也是裂解加工的核心与首要工序。迄今为止,国内外尚未开展这方面的研究工作。

### (1) 裂纹槽的位置设计

连杆体与连杆盖接合面位置决定了缺口位置。图 2 给出了不同位置的初始裂纹槽。图 2(a)为沿大头孔柱面与轴孔中心线平行设计的对称缺口;图 2(b)为在连杆大头上下端面与连杆主轴线垂直的直径方向加工的对称缺口。

大量实践表明,沿大头孔柱面加工缺口,易于实现裂解,且更容易控制断裂方向,可保证安装轴瓦时不破坏断裂面内侧角,同时保证轴瓦不被损坏。大头端面加工缺口,断裂时包含剪切断裂,可造成断裂面相互摩擦,影响装配时的啮合精度。由于连杆大头端面并非平面,若要保证准确的断裂位置与断裂方向,需将初始裂纹槽尽可能地向两侧延伸,槽深必然加大,从而减少了连杆体与连杆盖端的接触面积,降低了承载能力。此外,连杆锻件的主要外轮廓就是连杆产品的最终形状,只有大、小头孔及端面需少量机械加工,裂解后的端面缺口在后续机械加工中无法被消除,将被保留到连杆的最终装配中,影响连杆的使用性能与寿命。

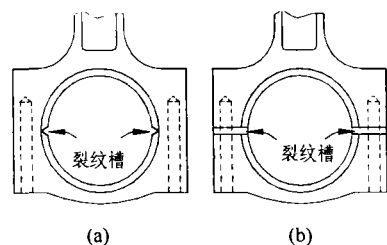


图 2 初始裂纹槽位置

Fig. 2 Location of cracking notch

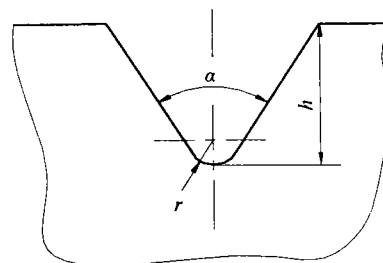


图 3 裂纹槽几何参数

Fig. 3 Geometrical parameters of cracking notch

### (2) 裂纹槽的几何尺寸

预制裂纹槽的几何尺寸直接影响连杆裂解力的大小与裂解质量,对连杆裂解加工工艺有举足轻重的影响。合理设计初始裂纹槽尺寸,可有效提高缺口效应与应力集中系数,降低裂解力,提高断裂效率与质量。裂纹槽几何尺寸由 4 个参数决定,即张角  $\alpha$ 、曲率半径  $r$ 、槽深  $h$ 、槽长  $L$ ,如图 3 所示。鉴于图 2(a)所示的缺口最佳位置,槽长  $L$  就是大头孔柱面高度,不需再作为设计参数进行优化,仅考虑其余 3 个参数即可。

以捷达轿车连杆 C70S6 材料为例,对各种形状的裂纹槽进行了断裂剖分试验,并采用 MSC. Marc 软件进行了裂解过程数值分析。图 4 为大头孔柱面上不同形状参数的缺口形貌。图 5 为捷达轿车连杆大头端 1/2 部分的三维模型、有限元剖分网格以及数值模拟结果。从图 5(c)可以看出,由于缺口的存在,扰乱了连杆局部区域的应力分布,在预制裂纹附近产生了很大的应力集中,从而使连杆能够在远低于抗拉强度的情况下断裂。

结果表明:当  $h$  大于某临界值时,初始裂纹槽失稳, $h$  与裂解力成反比; $\alpha = 0^\circ$  时连杆所需的裂解力最小,随着  $\alpha$  增加,裂解力随之略有增加,但增幅较小,影响不显著; $r$  减小裂解力也随之减小,但二者不呈线性关系。从各参数对裂解力的影响规律可以看出,如果加工条件允许,初始裂纹槽设计成尖角(很小的曲率半径)、深槽较理想。但减少曲率半径会提高加工成本;槽深也不能太大,裂解后要进行连杆大头孔的精加工,需要考虑大头孔精镗、珩磨余量。因此需综合考虑断裂效率、裂解加工质量、加工的可行

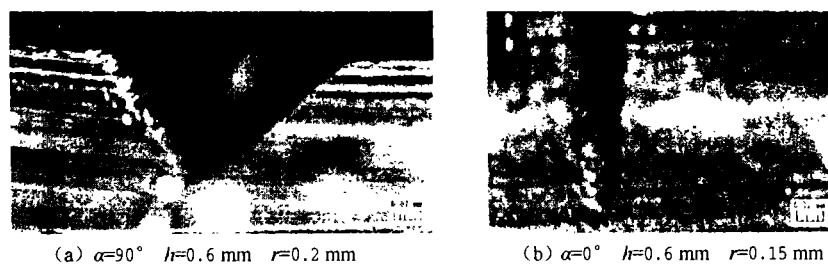


图 4 连杆预制裂纹槽( $\times 50$ )

Fig. 4 Fracture-splitting starter notches precut on connecting rod ( $\times 50$ )

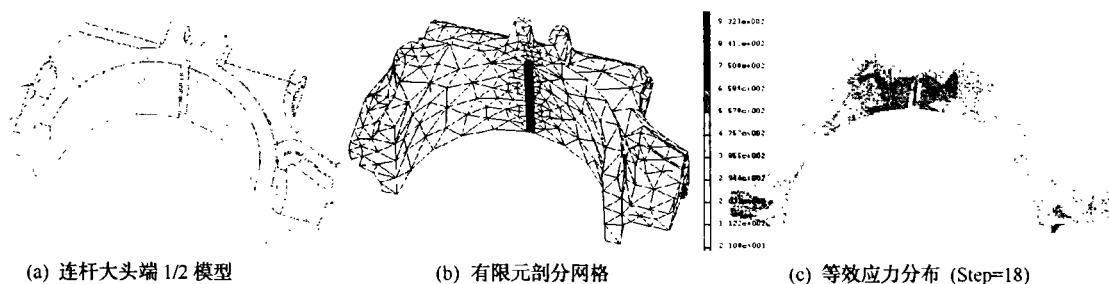


图 5 轿车连杆模型及计算结果( $\alpha = 90^\circ$ ,  $h = 0.6 \text{ mm}$ ,  $r = 0.2 \text{ mm}$ )

Fig. 5 Model of car engine connecting rod and calculation result ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $h = 0.6 \text{ mm}$ ,  $r = 0.2 \text{ mm}$ )

性与经济性来优化设计各几何参量,此方面的详细内容将另文探讨。

### (3) 裂纹槽的加工方法

裂纹槽的加工不仅要保证适当的槽深、曲率半径,而且应保证大头孔中心两侧的裂纹槽位置对称、槽深一致,减少槽深偏差,以便同时获得 2 个高质量的断裂剖面。

裂纹槽的加工工艺主要有机械拉削与激光加工。机械拉削“V 型”裂纹槽时,由于 C70S6 材料屈服强度较低,硬度偏高,因此刀具磨损较快,加工过程中拉刀容易变钝,使裂纹槽曲率半径逐渐增大,裂解缺陷率将有所提高。为此,在生产中应根据拉刀磨损情况不断换刀,或采用专用修刀仪对拉刀进行修整。激光加工具有切缝窄、速度快、无刀磨损、易裂解、重复精度高的特点。但裂纹槽属于窄缝盲槽,一般的二氧化碳激光器无法满足裂纹槽的加工要求。本文的实验结果证明,YAG 固体激光加工裂纹槽独具优势。

### 2.3 定向裂解

定向裂解是该项新技术的核心工序。不仅要以一定的加载速度施加载荷,对预制裂纹槽充分引裂和催裂,使裂纹定向扩展直至连杆盖与连杆本体分离,而且裂解分离后的连杆盖必须精确复位,与连杆本体在断裂面处完全啮合,以进行后续加工。在定向裂解过程中,必须限制大头孔变形,防止单边断裂或撕裂,保证断面啮合性。设计合理的断裂剖分机床是实施断裂剖分的关键环节。裂解机床需实现连杆定位、压紧、裂解、连杆体和连杆盖精确复位的功能。在裂解过程中,连杆体、盖只能发生反向直线运动,连杆体、盖之间的任何相对转动都会引起不必要的塑性变形而导致连杆体、盖无法进行正常的合装。此外,液压系统及执行机构的设计需充分考虑满足裂解速度的要求。

图 6 为自行研究开发的具有“背压”裂解功能的连

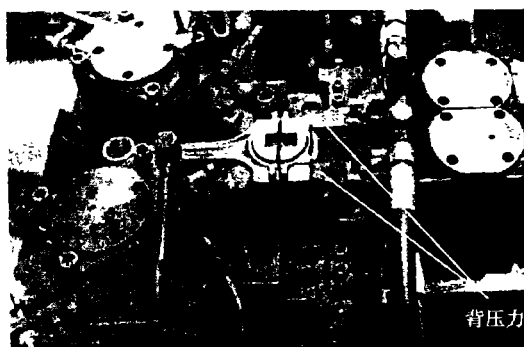


图 6 定向裂解机床

Fig. 6 Machine of directed fracture processing

杆定向裂解机床<sup>[6]</sup>。连杆定向裂解机床采用下拉式楔形裂解机构,通过由液压缸驱动的楔形拉杆沿轴向直线运动,靠楔形的作用迫使专门设计的胀断移动套水平运动,对连杆大头孔施加水平作用力。在瞬时阶跃载荷的作用下完成连杆大头的高精度、高质量、快速裂解过程。

为保证裂解质量,作者提出“背压”裂解加工方法。裂解前向连杆盖端螺栓孔施加背压力  $P$ ,通过控制、调整背压力  $P$  与裂解主动载荷  $F$  的大小比例关系,可获得性态优良的断裂面。试验研究表明,背压力与裂解力的大小比例关系为  $1:3 \sim 1:4$  为宜。

#### 2.4 螺栓预装配与定扭矩装配

为了后续的机械加工,连杆裂解后需对连杆体、盖进行合装。在装配过程中,为保证裂解后的连杆体与盖完全啮合、不松动、无错位,并使扭矩达到规定值,必须用夹紧机构以及扭力扳手。

装配螺栓一般应该进行螺栓预装配及定扭矩装配两个工序。螺栓预装配的目的是强化断裂面、清渣。预紧力一般为最终扭矩值的  $1/4 \sim 1/5$ 。预装配后将螺栓主动松脱,减少扭力,使连杆体和盖分离,对断裂面进行吸尘清渣。然后再重新上紧连杆螺栓,按连杆产品的技术要求装配,使扭矩达到规定值。

#### 2.5 其他

连杆裂解加工对加工工艺、机床结构、性能以及工装卡具要求较高。关键运动部件需保持较高的可靠性和往复运动精度,裂解力施加机构应保证较高的强度与耐磨性。裂解后,应该采用定位精度较高的自动传送机械手将连杆由定向裂解工序传送到装配螺栓工序,以保证在两工序间准确地传送工件。

### 3 裂解加工经济性分析

连杆传统制造工艺为:连杆整体锻造→大头切断分离→加工连杆体、盖接合面→加工大、小头孔→加工连杆体、盖螺栓孔→装配。裂解加工工艺简化了连杆的制造工序,使连杆由分体加工变为整体加工,可取消连杆体、连杆盖结合面的拉削与磨削等工序。断裂剖分面作为接合面,配合精度很高,大大降低了螺栓孔的加工精度要求。由于传统加工工艺中螺栓孔分为定位光孔和紧固螺纹两部分,定位孔的尺寸精度要求很高,需要铰或镗等精加工,其加工精度与装配质量难以控制,生产效率低、制造成本高、废品率高、装拆也不方便。裂解加工技术采用定位精度极高的断裂剖分面进行定位,连杆螺栓仅仅起联结作用,不再有任何定位要求,从而简化了螺栓孔的结构设计和整体加工工艺,降低了螺栓孔的加工精度和加工成本。文献[1]给出了轿车连杆传统制造工艺与裂解加工工艺的流程比较。图 7 给出了两种加工方法在螺栓孔结构设计和加工方法上的差别。

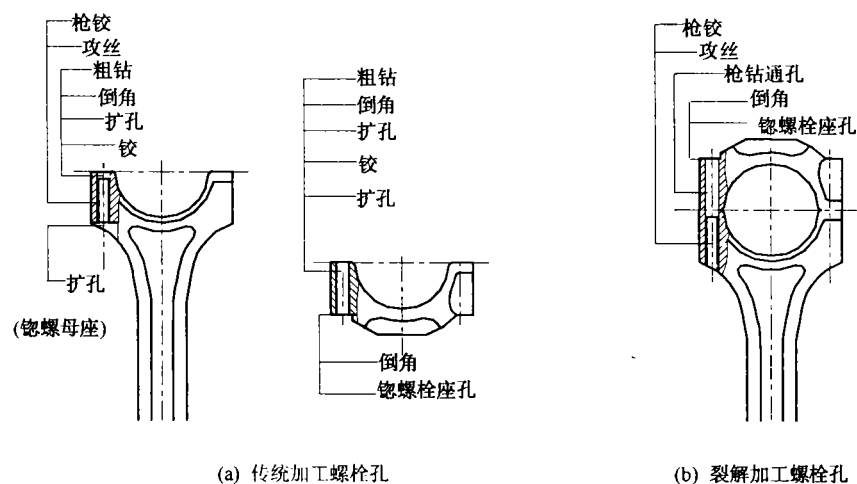


图 7 螺栓孔结构设计和加工工艺的比较

Fig. 7 Comparison between two methods in designing and machining bolt holes

与传统加工方法相比,裂解加工工艺可使机械加工工序减少60%,设备投资节省25%,刀具费用减少35%,能源节省40%,生产成本降低15%~20%,其经济效益和社会效益十分显著。此外,由于剖分接合面为三维凸凹曲面,增大了接触面积,可使连杆承载能力、抗剪能力、杆与盖的定位精度、装配质量大幅度提高,对提高发动机整体生产技术水平具有重要作用。

## 4 结 论

(1) 裂解加工技术具有加工工序少、生产效率高、设备投资小、制造成本低、产品质量好、装配精度高、承载能力强等诸多优点,是一种极具竞争力和发展潜力的连杆加工新技术。

(2) 裂解加工工艺要求连杆材料应该在保证强韧综合性能指标的前提下,呈现脆性断裂特征,断裂面具有良好的啮合特性。

(3) 预制裂纹槽、定向裂解、定扭矩装配螺栓构成连杆裂解加工的关键技术与核心工序。数值分析与实验表明,合理设计缺口位置与裂纹槽形状尺寸、保证加工精度,可有效降低裂解加工载荷。

(4) “背压”裂解方法对提高裂解加工质量较有效,在瞬时阶跃载荷作用下,合理调整背压力与裂解力比值,可获得性态优良的断裂面。

(5) 作为一种精密加工技术,连杆裂解工艺对于机床结构与性能、工装夹具、工件的定位、工序间传送及定位精度的要求较高,其中定向裂解机床的合理设计是实施断裂剖分的关键因素。尤其是液压系统及执行机构的设计需充分考虑满足裂解载荷与加载速度的要求。

### 参考文献:

- [1] 寇淑清,杨慎华,邓春萍. 裂解工艺——发动机连杆制造最新技术[J]. 中国机械工程,2001,12:839-841.
- [2] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京:北京理工大学出版社,1990.
- [3] WHITTAKER D. The competition for automotive connecting rod markets[J]. Metal Powder Report,2001,56(5):32-37.
- [4] 曹正,史万富,王敢利. 高碳微合金非调质钢连杆研究[J]. 汽车工艺与材料,2000,12:24-27.
- [5] DANIEL R. Steels for connecting rod forgings with optimum splittability[Z]. The 16<sup>th</sup> International Forging Congress, Beijing, China, 1999.
- [6] FUKUDA S, ETO H. Development of fracture splitting connecting rod[J]. JSAE Review,2002,23(1):101-104.
- [7] 杨慎华,寇淑清,金文明. 发动机连杆裂解加工装置[P]. 中国专利:01271935.8,2002-09-18.