

文章编号 1004-924X(2010)07-1586-09

裂解连杆螺栓装配机床的动力学仿真及试验

郑黎明, 杨慎华, 寇淑清, 邓春萍

(吉林大学 辊锻工艺研究所, 长春 吉林 130022)

摘要: 由于传统的螺栓拧紧方法不能满足裂解加工要求, 本文开发研究了裂解连杆螺栓装配机床并进行了仿真试验。介绍了螺栓拧紧机床的基本结构和自动螺栓装配过程, 建立了该机床的虚拟样机模型, 对装配螺栓过程进行了动态仿真; 进行了机床的扭矩/转角试验, 确定了某轿车连杆的螺栓拧紧工艺参数为 $20\text{N}\cdot\text{m}+95^\circ$, 采用该工艺能满足该连杆的螺栓装配要求; 最后, 讨论了定扭矩装配螺栓工序可能出现的质量缺陷, 并提出了相应缺陷的解决方案。仿真结果表明, 螺栓能准确穿入到连杆螺栓孔内并装配到连杆上。扭矩/转角试验表明, 根据螺栓在装配过程中的伸长变形量可判断螺栓装配的轴向力是否符合要求, 进而可确定连杆的定扭矩装配工艺。该项研究对螺栓拧紧机床的工程设计和裂解连杆工艺有指导意义。

关键词: 连杆; 裂解; 螺栓装配; 动力学仿真; 扭矩/转角法; 裂解质量

中图分类号: U464.133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1586

Dynamic simulations and experiments of assembling bolt machines for fracture splitting connecting rods

ZHENG Li-ming, YANG Shen-hua, KOU Shu-qing, DENG Chun-ping

(Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An assembling bolt machine for fracture splitting(FS) connecting rods was developed, for the traditional fixing procedure for bolts could not be suitable for the FS of connecting rods. The basic structure of the assembling bolt machine and bolt assembling process were briefly introduced. Then, a virtual prototyping model for the machine was constructed based on the computer virtual technology to dynamically simulate assembling bolt processes. Torque and angle experiments were also carried out, the parameter $20\text{N}\cdot\text{m}+95^\circ$ was chosen as the assembling techniques for the FS connecting rod of a particular car. Obtained results show that the assembling techniques can satisfy its assembling requirement. Finally, the quality defects during the fixing bolts were discussed, and the solvents towards these defects were given. Dynamic simulation results indicate that the bolts can be accurately transferred into bolt holes and assembled on connecting rods. Torque and angle experiments show that the distortion of bolts during the assembling process can judge whether the axis force of bolts can satisfy

收稿日期: 2009-09-30; 修订日期: 2009-12-03.

基金项目: “十五”科技攻关计划资助项目(No. 2004BA907A19); 国家自然科学基金资助项目(No. 50375066); 国家教育部博士点基金资助项目(No. 20060183066)

the requirements and can determine the assembling techniques of control torque for connecting rods. This paper provides a reliable basis for the design of the assembling bolt machines and the research of the FS connecting rod techniques.

Key words: connecting rod; fracture splitting; assembling bolts; Dynamics Simulation; Torque/angle method; Fracture splitting quality

1 引言

连杆裂解技术是近些年发展起来的一种连杆加工新技术,是对连杆传统机械加工技术的重大变革^[1-3]。和传统加工技术相比,连杆裂解加工技术具有加工质量好、装配精度高、生产效率高、生产成本低及拆装方便等优点。近十几年来,国外几家大型汽车公司、研究机构以及工具、设备制造公司相继研究开发了裂解连杆加工专用设备,其中有德国的 Alfin公司、Mauser 集团、日本的丰田公司等^[4-5]。我国连杆裂解技术的研究起步较晚,只有吉林大学锻工工艺研究所从事这方面的研究,并开发出了具有自主知识产权的裂解加工工艺及装备。

定扭矩装配螺栓工艺及设备是连杆裂解技术的三大关键工序(加工裂解槽、定向裂解、定扭矩装配螺栓)之一^[2,6],其对连杆裂解的整体质量控制起着至关重要的作用。裂解连杆螺栓装配要求较高,采用传统螺栓拧紧方法已不能满足裂解加工要求,急需新的设备来支持裂解技术的应用,因此,裂解连杆螺栓装配机床的设计开发具有重要的现实意义。

随着裂解技术深入的研究,裂解连杆产品的质量控制也是一个主要的研究方向。应用连杆裂解自动装配螺栓机床进行扭矩螺栓装配时,定扭矩装配螺栓工序中产生的质量缺陷,如夹渣、错口、轴向力不足、重装精度差等^[7]都会影响裂解连杆的加工质量,甚至会导致严重生产事故,所以研究这些缺陷产生的原因有助于改进连杆裂解质量,提高连杆加工的成品率。

考虑传统的螺栓拧紧方法不能满足裂解加工

的需求,本文基于计算机虚拟技术建立了裂解连杆螺栓装配机床的虚拟样机模型,对装配螺栓过程进行了动态仿真。应用裂解连杆螺栓装配机床对某轿车连杆完成了扭矩/转角实验,确定了它的螺栓拧紧工艺。讨论了定扭矩装配螺栓工艺可能出现的质量缺陷,提出了相应缺陷的解决方案。

2 定扭矩装配螺栓工艺及机床介绍

2.1 工艺介绍

定扭矩装配螺栓工艺由初拧紧工序和终拧紧工序组成,初拧紧工序是将裂解后的连杆身与连杆盖用螺栓装合,施加要求扭矩,整合断裂面,使未发生脱落的渣粒与连杆分离,为终拧紧吹渣做好准备,预装扭矩一般为最终扭矩值的 $1/5 \sim 1/4$ ^[8]。终拧紧工序首先将螺栓松开,对连杆盖与连杆身的接合面分离一小段距离,完成振动吹渣,并对断裂面进行吸尘处理,然后重新施加要求的扭矩值,在装配螺栓过程中需保证裂解后的连杆身、盖完全啮合、不发生错位,这就需要同时对两侧螺栓进行装配,并要求定位夹具有较高的设计、制造与装配精度。

在装配连杆螺栓时,为了保证螺栓联接的可靠性,要对螺栓轴向力进行精确控制,最常用的方法是扭矩法和扭矩/转角法^[9]。

2.2 机床结构介绍

该机床由自动上螺栓系统及定扭矩螺栓装配系统构成。

(1) 自动上螺栓系统

自动上螺栓系统主要由储料斗、振动料斗、振动输料轨道、分离机构、输料管等构成,自动上螺

栓系统的结构如图 1 所示。

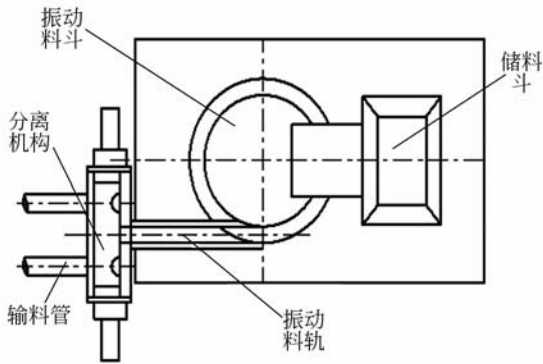


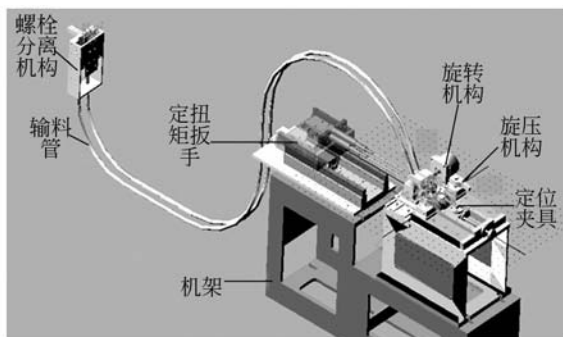
图 1 自动上螺栓系统简图

Fig.1 Sketch of automatic transferring bolt system

(2) 定扭矩螺栓装配系统

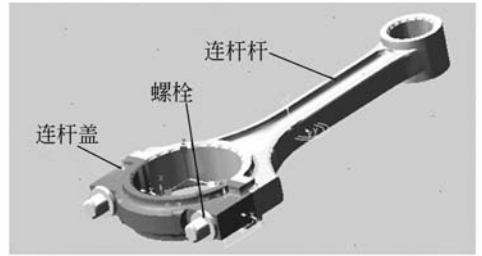
定扭矩螺栓装配系统包括连杆定位机构、压紧机构、定扭矩扳手、螺栓翻转机构、杆盖分离机构和螺栓导向机构等，具体结构如图 2(a) 所示，装配的某轿车裂解连杆及螺栓见图 2(b)。

螺栓装配过程：由振动料斗出料口出来的螺栓经输料轨道送至螺栓分离机构，该机构先后分离两个螺栓进入两个输料管，闭气门封闭，高压气体将输料管内的螺栓吹入螺栓旋转机构，螺栓旋转机构转至水平方向，定扭矩扳手送进，螺栓在扳手的推动下，沿导向机构进入连杆的两个螺纹孔内，最终完成螺栓装配。



(a) 裂解连杆螺栓装配机床模型

(a) Model of assembling bolt machine for FS connecting rod



(b) 某轿车裂解连杆及螺栓模型

(b) Model of FS connecting rod and bolt for a particular car

图 2 ADAMS 模型

Fig.2 ADAMS model

3 动力学仿真

3.1 模型建立

(1) 几何建模

建立 UG 三维图，经模型转换，将 UG 模型导入 MSC. ADAMS 软件中。

(2) 施加约束及驱动

应用的运动副主要有直线副、转动副和固定副 3 种。施加的驱动主要有直线驱动和转动驱动，应用 $\text{step}(\text{time}, t_1, x_1, t_2, x_2)$ 函数完成对运动副施加驱动，需施加的转动驱动有旋转压紧油缸、螺栓转动气缸，需施加的直线运动驱动有分离气缸、封闭气缸、定扭矩扳手送进油缸。

(3) 施加载荷及接触

定扭矩螺栓装配机床需施加液压作用力、气体作用力、弹簧作用力。本文用力矩载荷代替旋压液压缸作用力，用集中力载荷代替气体作用力，用拉压弹簧阻尼器代替弹簧作用力。同时需要在螺栓与其他部件之间施加 solid to solid 接触力^[10]。施加约束及载荷后的 ADAMS 模型如图 2(a) 所示。

3.2 螺栓装配过程仿真

螺栓装配过程如前所述，本文仿真螺栓装配的整个过程，了解该机床完成螺栓装配任务的可行性，分析装配过程中螺栓的受力情况。

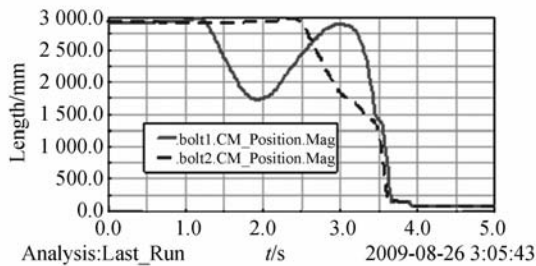
3.2.1 装配过程调整

机床设计过程中，连杆螺纹孔中心线高度与引入螺栓的导向机构中心线同高，但实际由于导

向机构自身重量所致,即便选用高刚度的拉伸弹簧,导向机构的中心线比连杆螺纹孔中心线略低,因此应垫高导向装置的高度。本文根据不同模型的仿真,最终确定将导向机构垫高 2 mm 最佳,物理样机根据仿真结果,将导向机构垫高 2 mm。在完成这一改善的基础上,物理样机能顺利完成螺栓装配任务。

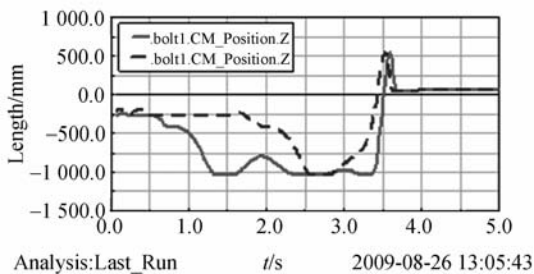
3.2.2 装配过程仿真

设定仿真时间为 5 s,仿真步骤为 200 step,进入后处理模块^[11],此时得到的仿真数据如图 3 所示。



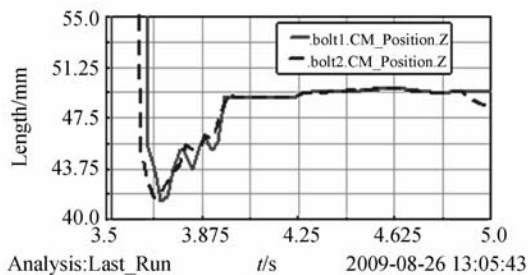
(a) 螺栓总体位移曲线

(a) Curves for displacement of bolts



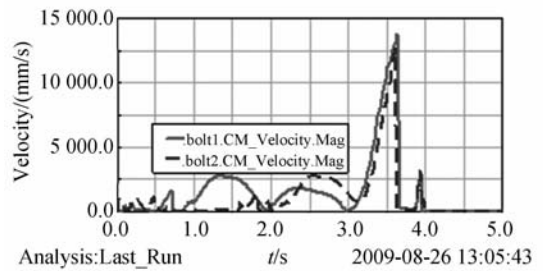
(b) 螺栓 Z 向位移变化曲线

(b) Curves for displacement of bolts towards Z orientation



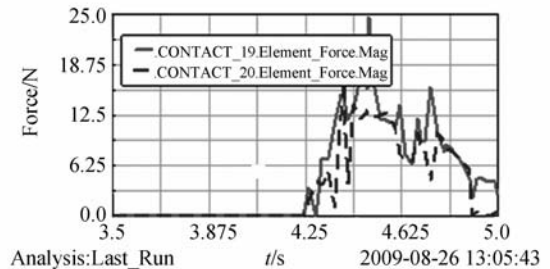
(c) 螺栓进入螺栓孔阶段 Z 向位移曲线

(c) Curves for displacement of bolts towards Z orientation while entering into threaded holes



(d) 螺栓速度变化曲线

(d) Curves for velocity of bolts



(f) 螺栓与连杆间接触力变化曲线

(f) Curves for contact force between bolts and connecting rod

图 3 装配螺栓过程仿真数据

Fig. 3 Simulation data during assembling bolt process

3.3 仿真结果分析

从螺栓的螺栓的总体位移(图 3(a))和 Z 向位移(图 3(b))可知,2 s 内螺栓经分离块完成分离,分别进入两个螺栓输送管,3.4 s 时封闭气缸封闭,进行吹气,3.6 s 螺栓经输送管进入翻转机构,3.9 s 完成翻转,经翻转机构进入导向机构,4.2 s 由导向机构导入连杆螺栓孔内。从图 3(c)及仿真结果可知,两个螺栓最终 Z 向轨迹几乎相同,表明螺栓顺利进入连杆螺纹孔内,完成了预定的螺栓装配任务,仿真结果说明该机床设计满足螺栓装配的基本要求。

螺栓的螺纹质量是影响装配扭矩的重要因素,当螺栓的螺纹不符合要求时,可能会引起重要的事故,因此装配过程中应保护螺纹不受破坏。螺栓吹入过程中,速度极大,速度过大会导致螺纹破坏,仿真过程中,作用在螺栓上的力为 2 N,螺栓的最大速度可达 13 m/s,见图 3(d)。物理样机试验中,应调整吹气的压力及流量,选用的气体压力为 0.4 MPa,流量系数约为 0.4,此时能满足吹

螺栓的基本要求,又不致破坏螺纹。螺栓在被导入螺纹孔过程中,仿真得到的螺栓受力曲线见图 3(f),从图中可知,两个螺栓所承受的最大接触力为 23 N 左右,平均接触力约为 10 N,在这种强度的载荷下,螺纹不会被破坏,实际螺栓装配过程验证了此结果。

4 扭矩/转角实验

为降低裂解连杆螺栓装配机床的生产节拍,根据定扭矩装配螺栓工艺,本文将裂解连杆螺栓装配机床的螺栓装配任务分配到两个工位上完成,设计了螺栓初拧紧机床和螺栓终拧紧机床,螺栓终拧紧机床结构如图 4 所示,该机床选用博世公司电动定扭矩扳手,扭矩/转角试验在终拧紧机床上完成。



图 4 定扭矩螺栓装配系统照片

Fig. 4 Photo of assembling bolt system of stable torque wrench fastening

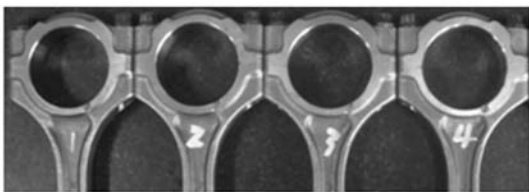


图 5 某轿车裂解连杆及螺栓照片

Fig. 5 Photo of FS connecting rod and bolt for a particular car

4.1 扭矩/转角实验描述

针对某轿车裂解连杆,应用电动定扭矩扳手,采用扭矩/转角法进行螺栓装配,图 5 为某轿车裂

解连杆及螺栓照片,螺栓规格及装配要求如下:

某轿车裂解连杆螺栓规格:

等级:10.9;螺纹规格:M8;材料:SCM435;

截面积:50.24 mm²;原始长度:47 mm;

某轿车连杆螺栓装配要求:

螺栓轴向预紧力:(30380±980) N;

螺栓夹紧方式:可塑区域夹紧;

根据螺栓拉伸试验,该轿车连杆螺栓变形量在 0.14~0.17 mm 之间时,能保证轴向预紧力均达到(30380±980) N,且非常稳定。本文采用扭矩/转角法监测螺栓的轴向预紧力,设置固定的扭矩值为 20 N·m,采用不同的转角值(分别为 90°,95°,100°和 110°)测量在各种转角作用下,螺栓发生的伸长变形,主要操作方法如下:

将试验用轿车的 8 只裂解连杆分成 I、II 两组,实验前分别测量每根连杆上的装配螺栓的原始长度,完成扭矩/转角装配实验后,拆卸连杆螺栓,分别测量螺栓长度,得出螺栓变形量。

4.2 扭矩/转角试验结果及分析

完成扭矩/转角实验后,得到的具体数值见表 1,将螺栓伸长变形量与扭矩转角值的变化关系绘成曲线,见图 6。从图中可知,随转角值增大,螺栓变形量也增大,但两者之间不成绝对线性关系。从图 6 可知,在拧紧工艺为 20 N·m+95°(先施加固定扭矩为 20 N·m,再将螺栓旋转 95°)条件下,螺栓的伸长变形量约为 0.16 mm,位于 0.14~0.17 mm,因此 20 N·m+95°为该轿车连杆较为理想的终拧紧工艺参数,在该工艺参数下,能保证连杆螺栓轴向预紧力满足装配要求。

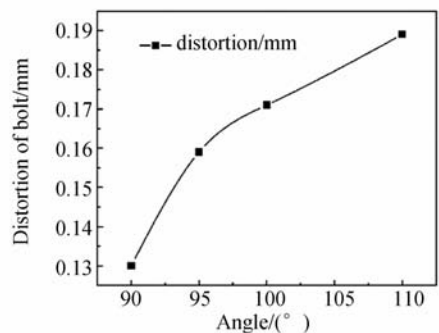


图 6 螺栓变形量与扭矩转角值曲线

Fig. 6 Relation curve between bolt distortion and angle

4.3 螺栓扭矩/转角监测

裂解连杆螺栓装配机床具有扭矩监测功能,

能够检测螺栓装配是否满足要求,同时可以调取扭矩/转角监测曲线。在扭矩为 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转角为 95° 条件下,调出扭矩/转角试验中螺栓的扭矩与转角关系曲线,其中扭矩对应为螺栓轴向力,转角对应螺栓伸长变形,得到的螺栓扭矩/转角关系曲线如图 7 所示。从图中可知,螺栓在转角约为

50° 时,扭矩值与转角不再呈线性关系,说明螺栓此时发生塑性变形,因此转角约为 50° 时,螺栓达到屈服点,转角为 95° 时,已超过屈服点,发生部分塑性变形,因此螺栓轴向力的夹紧方式为可塑区域内夹紧。

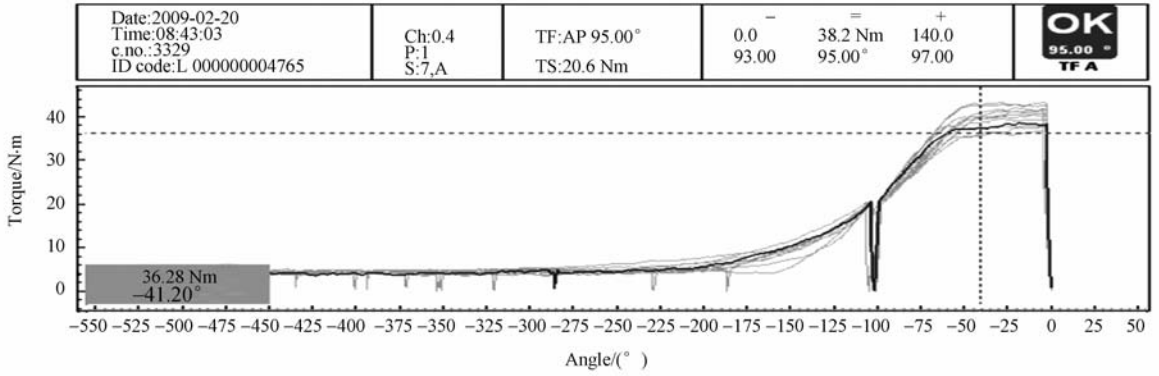


图 7 扭矩转角监测曲线

Fig. 7 Inspect curves of torques and angles

表 1 装配变形前和卸载后螺栓长度

Tab. 1 Lengths of bolts before assembling and after unloading

扭矩/转角		20 N·m+90°		20 N·m+95°		20 N·m+100°		20 N·m+110°	
		左	右	左	右	左	右	左	右
装配前螺栓长度/mm	I 组	47.036	46.888	47.097	46.929	46.909	47.005	47.121	47.109
	II 组	46.929	46.97	47.048	47.015	46.928	47.028	46.868	47.168
装配后螺栓长度/mm	I 组	47.164	47.025	47.256	47.097	47.094	47.17	47.299	47.291
	II 组	47.055	47.1	47.202	47.173	47.092	47.199	47.071	47.381
I 组变形量/mm		0.128	0.137	0.159	0.168	0.185	0.165	0.178	0.182
II 组变形量/mm		0.126	0.13	0.154	0.158	0.164	0.171	0.203	0.195
平均变形量/mm			0.130		0.159		0.171		0.189

5 加工质量的影响分析

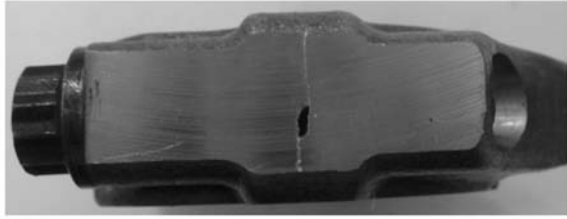
应用螺栓初拧紧机床及螺栓终拧紧机床,运用前文确定的螺栓装配工艺对该轿车连杆进行了大批量的定扭矩装配试验。试验发现,在定扭矩装配螺栓工序中,主要出现以下连杆加工质量问题,包括夹渣、错口、螺栓轴向力不满足要求、重装精度差等。

5.1 夹渣缺陷

在连杆裂解过程中,断裂面会有小的渣粒脱落,称为掉渣,若掉渣发生在连杆的外轮廓上,这时称为爆口,爆口缺陷如图 8(a)所示,若出现掉

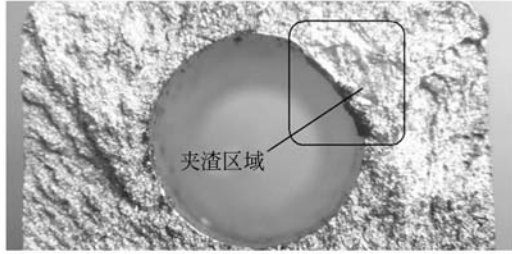
渣现象,且渣粒未脱离断裂面,经啮合、定扭矩装配螺栓时,则可能出现夹渣现象,在裂解缺陷中,夹渣是一种较严重的缺陷,夹渣缺陷根据夹渣的位置可分为内部夹渣和表面夹渣;内部夹渣如图 8(b)所示,从图中可知,连杆螺栓孔在夹渣区域已经发生变形,破坏了螺栓孔的圆度,会影响定扭矩装配螺栓;表面夹渣如图 8(c)所示,该缺陷会影响产品的美观。

夹渣缺陷的产生还会引起错口缺陷。错口缺陷指连杆裂解后,经定扭矩螺栓装配,杆端与盖端的断裂垂直面的平面度超出公差范围。该轿车连杆规定的错口的公差为 $0 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。夹渣连杆或由夹渣引起的错口连杆出现时,应将螺栓拆



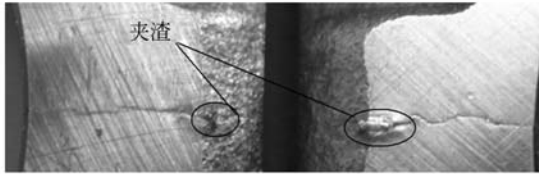
(a) 爆口缺陷

(a) Dropping granules



(b) 内部夹渣

(b) Inner nipping granules



(c) 表面夹渣

(c) Exterior nipping granules

图 8 爆口及夹渣缺陷

Fig. 8 Defects of dropping and nipping granules

卸,清理断裂啮合面,清除渣粒,然后更新螺栓,从新装配规定扭矩值。

影响连杆掉渣的主要因素是材料成分,上海大众汽车公司曾研究了 S 对掉渣的影响^[12],试验表明,连杆试样中 S 含量偏低是掉渣偏高的主要原因之一。连杆的材料硬度、外形、裂解槽深度和夹具也是引起掉渣现象的因素。掉渣现象是以上多种因素作用的结果,有时不可避免,当掉渣现象出现时,裂解连杆螺栓装配机床具有振动及吹渣装置,能有效地将渣粒从断裂表面清除,该机床还具有接渣槽及渣粒收集装置,防止未被吹走的渣粒落在外表面上,形成表面夹渣。

5.2 螺栓轴向力

该连杆对螺栓的轴向力有较精确的要求,轴向预紧力要求在 $(30\ 380 \pm 980)$ N,从扭矩/转角

试验可知,在正常工艺条件下,能保证轴向预紧力满足要求,但出现以下情况时,可能会影响螺栓轴向力,具体包括螺纹质量问题、润滑条件和附加力等因素。

在螺纹符合质量要求的条件下,轴向预紧力可转换为电动扳手监测的扭矩值,所以要想使预紧力满足要求,只需达到规定的扭矩值,但当螺纹质量有问题时,可能导致扭矩值满足要求,但螺栓的预紧力不足。引起螺纹质量问题的因素主要有加工连杆螺纹孔丝锥的磨损和吹螺栓过程导致螺栓螺纹破坏。当螺纹得到润滑时,摩擦系数下降,应用扭矩/转角法达到相应的扭矩值时,扳手转过的角度会比没有润滑时大许多,螺栓相应的变形量也会变大,致使轴向力不稳定。夹具安装精度差可能引起附加力,造成扭矩附加值,影响轴向力。

以上 3 种情况都会引起严重的事故。在定扭矩装配螺栓过程中,定扭矩螺栓装配机床具有扭矩斜率监测功能,当出现以上 3 种情况时,机床会发出报警信号,防止未满足螺栓轴向预紧力要求的连杆流入下一工序。

5.3 重装精度及断口错位

连杆大头孔重装精度是指完成机械加工后的连杆,将螺栓拆卸后,重新装配规定扭矩,连杆大头孔圆柱度偏差的最大值。

连杆的旋压机构是影响重装精度的因素之一,该机构主要是为防止杆、盖复位啮合时,不上下翘动,造成啮合复合不好,旋压机构由旋压油缸和压紧夹具构成。压紧面要求与连杆上平面的平行度在 0.015 mm 以内,且应保持 0.02~0.03 mm 的间隙,实验表明,若两平面之间没有间隙,旋压油缸完全压死在连杆上平面上,会对杆和盖的啮合产生影响,最终影响连杆大头孔的重装精度。连杆定位夹具的安装精度差可能导致断裂面啮合后出现错口现象,若错口较大,同样会导致连杆的重装精度差。

本文提出了改善连杆重装精度的加工工序,与传统机械加工方法对比如下。

传统连杆裂解加工工序:前序加工→裂解→初拧紧→终拧紧→后续加工。

试验过程中改进后工序:前序加工→裂解→初拧紧→半精镗→终拧紧→后续加工。

定扭矩螺栓装配试验表明,改进后的加工工

序可消除部分加工内应力,改善重装精度,基本可使该轿车连杆重装精度控制在0.006 mm以下。

6 结 论

本文建立了裂解连杆自动螺栓装配机床的虚拟样机模型,完成了自动装配螺栓过程动力学仿真。仿真结果表明:自动装配螺栓机构可行,能达到自动装配螺栓过程的基本要求,这在物理样机的自动装配螺栓过程中得到了验证。应用裂解连杆自动装配螺栓机床对某轿车连杆完成了扭矩/转角试验,根据螺栓装配要求确定了该连杆的终

拧紧装配工艺为 $20\text{ N}\cdot\text{m}+95^\circ$,在该工艺条件下,螺栓的轴向力预紧力满足设计要求,且在可塑性区域内夹紧。应用连杆裂解自动装配螺栓机床进行了定扭矩螺栓装配试验,讨论了试验中产生夹渣缺陷、螺栓轴向预紧力不足、重装精度差及断口错位等问题原因,并提出了相应的解决方案。

本文有效地指导了连杆裂解自动装配螺栓机床的工程设计,同时最终为裂解连杆产品的工艺探讨研究及提升产品质量打下基础。

致谢:本文物理样机试验得到了长春吉扬华欣科技有限责任公司的大力协助,作者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] FUKUDA S, ETO H. Development of fracture splitting connecting rod [J]. *JSAE Review*, 2002 (23):101-104.
- [2] 寇淑清,杨慎华,邓春萍,等. 裂解工艺—连杆制造最新技术[J]. *中国机械工程*, 2001, (7):839-841.
KOU S Q, YANG S H, DENG C P, *et al.*. Fracture splitting technology—the advanced method in manufacturing engine connecting rod [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2001, (7): 839-841. (in Chinese)
- [3] 林宝君,杨慎华,郑祺峰,等. 发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速控制[J]. *光学精密工程*. 2008, (10):1922-1927.
LIN B J, YANG S H, ZHENG Q F, *et al.*. Acceleration and deceleration controls of laser processing machine for connecting rod fracture splitting notch in engine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, (10): 1922-1927. (in Chinese)
- [4] GU Z, YANG S, KU S, *et al.*. Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod [J]. *Advanced Manuf Technol*, 2005, (25): 883-887.
- [5] 邓伟辉,张永俊. 连杆涨断加工技术现状与展望 [C]. 香港:第十届粤港机电工程技术与应用研讨会, 2008:66-70.
- [6] DENG W H, ZHANG Y J. Prospect of Cracking Technology of Engine Connecting Rod [C]. *Proceedings of the 10th Guangdong-Hongkong Mechanical and Electrical Engineering Technology and Application Seminar, Hongkong, P. R. China*. 2008:66-70. (in Chinese)
- [7] 杨慎华,寇淑清,郑奇峰,等. 发动机连杆裂解制造工艺及装备[J]. *汽车技术*. 2002, (2):29-32.
YANG S H, KOU S Q, ZHENG Q F, *et al.*. Splitting decomposition manufacture technology and facilities of engine connecting rods [J]. *Automobile Technology*, 2002, (2):29-32. (in Chinese)
- [8] 寇淑清,杨慎华,金明华. 发动机连杆裂解加工技术及其应用[J]. *机械强度*, 2004, (5):538-541.
KOU S Q, YANG S H, JIN M H. Fracture splitting technology and its application in manufacturing connecting rods of engine [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, (5):538-541. (in Chinese)
- [9] 寇淑清,杨慎华,赵勇,等. 发动机连杆裂解加工及其关键技术[J]. *吉林大学学报(工学版)*. 2004, (1): 85-90.
KOU S Q, YANG S H, ZHAO Y, *et al.*. Fracture-splitting process of engine connecting rod and its key techniques [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2004, (1):

85-90. (in Chinese)

- [9] 林湖, 朱正德, 陈强努, 等. 螺栓装配技术中扭矩法与转角法比较研究[J]. 汽车工艺与材料. 2003, (9): 41-44.

LIN H, ZHU Z D, CHEN Q N, *et al.*. Comparison between torque method and angle method in bolt assembly technology [J]. *Automobile Technology & Material*, 2003, (9): 41-44. (in Chinese)

- [10] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006, (8): 91-93.

LI Z G. *Introduction and Example of ADAMS* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006, (8): 91-93. (in Chinese)

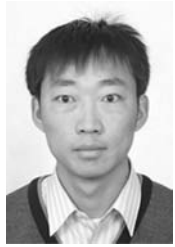
- [11] 郑建荣. 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005, (8): 93-108.

ZHENG J R. *Introduction and Advance of Virtual Prototype Technology* [M]. Beijing: Mechanical Engineering Press. 2005, (8): 93-108. (in Chinese)

- [12] 赵世琴, 颜炳祥. 胀断连杆爆口原因分析[J]. 上海汽车, 2003, (9): 32-34.

ZHAO S Q, YAN B X. Reason analysis for dropping granules of fracture splitting connecting rod [J]. *Shanghai Motors*, 2003, (9): 32-34. (in Chinese)

作者简介:



郑黎明(1983—), 男, 山东沂南人, 博士研究生, 2005年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事发动机关键部件先进加工技术与装备、多体动力学等方面的研究。E-mail: dayan_zlm@yahoo.com.cn



寇淑清(1962—), 女, 黑龙江大庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事 CAD/CAM/CAE 一体化模具工程、塑性加工过程数值仿真等方面的研究。E-mail: kousq@jlu.edu.cn

通信作者:



邓春萍(1950—), 女, 吉林长春人, 副教授, 主要从事精密加工技术与装备、发动机关键部件先进加工技术与装备等方面的研究。E-mail: dengcp@jlu.edu.cn

导师简介:



杨慎华(1949—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 吉林大学锻压工艺研究所副所长, 主要从事精密加工技术与装备、发动机关键部件先进加工技术与装备等方面的研究。E-mail: shenhua@jlu.edu.cn