

TC1 钛合金端盖零件热拉深成形工艺研究

张 志^{1,2,3}, 李鹏亮^{1,2,3}, 孙 宾^{1,2,3}, 李均红⁴

- (1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;
2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
3. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024;
4. 四川成发航空科技股份有限公司, 成都 610503)

[摘要] 针对 TC1 钛合金端盖零件的结构特点, 分析了零件的成形难点, 对热拉深工艺的模具材料、温度、压边间隙、拉深速度等对零件成形性能的影响进行了研究, 提出了合理的工艺参数。结果表明, 该工艺方法可实现薄壁、大拉深比的 TC1 钛合金零件的精确成形, 采用空气脱模的方式可获得平面度满足设计要求的零件, 为类似零件的取件提供了工艺参考。

关键词: TC1 钛合金; 热拉深工艺; 薄壁; 大拉深比; 空气脱模

Study on Thermal Deep-Drawing Process of TC1 Titanium Alloy Cover Part

ZHANG Zhi^{1,2,3}, LI Pengliang^{1,2,3}, SUN Bin^{1,2,3}, LI Junhong⁴

- (1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China;
3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)
4. Sichuan Chengfa Aero Science & Technology Co., Ltd., Chengdu 610503, China)

[ABSTRACT] According to the feature of TC1 titanium alloy cover part, the processing property of the part is analyzed. The influence of some factors such as mould material, temperature, blank holder gap and drawing rate on the drawing formability of TC1 titanium alloy cover part are discussed, meanwhile the appropriate parameters are optimized. The results indicate that the proposed technological method is feasible for the integral forming of thin-walled TC1 titanium alloy with large drawing ratios. Moreover, parts with high quality of flatness can be successfully formed by using air-demoulding method. It provides a technical reference for picking off the similar parts.

Keywords: TC1 titanium alloy; Thermal deep drawing technology; Thin-wall; Large drawing ratio; Air-demould

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.08.079

钛合金板材常温下屈强比 ($\sigma_{0.2} / \sigma_b$) 大, 弹性模量小, 成形时其塑性变形范围窄, 回弹大, 表现为易开裂、零件尺寸精度难于控制。通常需要在 550~750℃ 的高温下成形 (简称热成形)^[1]。热成形是利用金属材料加热软化, 以降低板料的变形抗力, 提高板料在成形过程中所能达到的变形程度, 减少弹性回弹, 提高零件的成形精度^[2]。目前, 国外航空航天工业中, 钛合金钣金件 90% 以上是用热成形工艺制造的^[3]。

Luo^[4] 和 Yin^[5] 等采用数值模拟技术探讨了压边力、温度和成形速度等对 TC1 钛合金薄板热拉深成形工艺的影响; 张凌云等^[6] 对 TC1M 钛合金板材 600℃ 温度下杯形件拉深成形及回弹过程进行了研究, 结果显示热

拉深能有效地抑制卸载回弹; 郭天文^[7] 采用数值模拟和试验研究了温度、应变速率、压边间隙和摩擦系数对 TC4 钛合金板材热拉深的影响; 徐萌萌^[8] 在此基础上对 TC1、TA15 钛合金板材的成形性能进行了详细的研究。本文根据某型 TC1 钛合金端盖零件薄壁、大拉深比的结构特点, 基于试验研究, 分析影响其成形过程和成形质量的关键因素, 为解决类似零件的成形起到一定的指导作用。

1 试验方法

1.1 零件结构及工艺难点

端盖零件的形状及基本尺寸如图 1 所示, 材料为

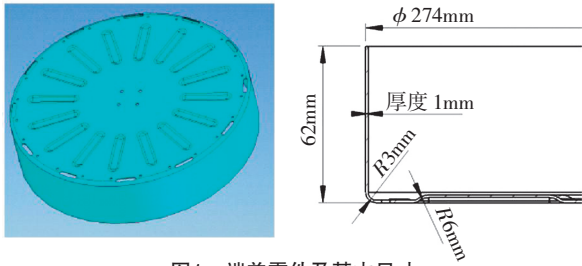


图1 端盖零件及基本尺寸

Fig.1 Structure of the part and its dimensions

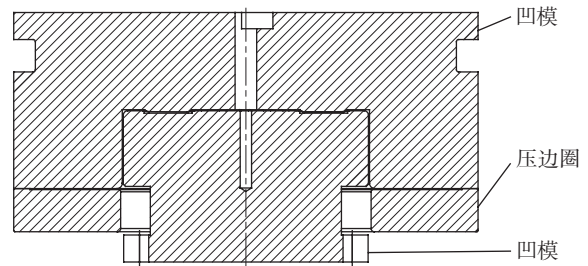


图2 模具结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the mould structure

TC1 钛合金,厚度为1.0mm,要求零件外观光亮,无划伤、起皱及氧化现象;同时,由于零件的圆周及底部需焊接零件,对成形后零件的尺寸公差和位置精度要求较高。如果采用棒料或管材车削加工,零件壁厚太小,加工过程容易变形。采用板材热拉深时外观质量差且尺寸难以保证,因此需要对端盖零件的热成形工艺进行研究。

从零件几何特点分析,热成形过程实际为板料在热状态下的拉深成形,其成形难点在于,首先是材料厚度为1.0mm,底部圆角为 $R=3\text{mm}$,弯曲半径为3倍料厚,航空材料手册要求弯曲半径不小于4倍料厚;其次,端盖零件属于深拉深件,零件直径为274mm,高度为62mm。考虑到热拉深工艺的特点,要保证零件的最终高度同时考虑到后续工序留工艺余量,半成品的拉深高度应大于80mm,经计算拉深系数为1.62,已接近所用材料的拉深极限,属于大拉深比零件,在成形过程中容易在圆角处产生破裂现象。

此外端盖零件底部需要焊接加强框零件,对底部的平面度要求较高。在以往的生产过程中,钛合金拉深零件与模具之间存在摩擦力,采用手工撬取的方法会导致零件底面在脱模过程容易产生翘曲变形,造成平面度不符合设计要求。

1.2 试验材料

TC1 (Ti-2Al-1.5Mn) 钛合金是一种低合金化的($\alpha + \beta$)两相组织钛合金,主要合金元素为 α 相稳定元素Al和 β 相稳定元素Mn,具有良好的成形性能、焊接性能和工艺性能^[9]。试验选用的退火态的TC1板材,实测厚度为1.05~1.06mm,其化学成分见表1。

表1 TC1钛合金的化学成分(质量分数) %

合金元素		杂质				
Al	Mn	Fe	C	N	H	O
1.50	1.48	0.22	0.08	0.0044	0.006	0.08

1.3 试验装置

采用带压边圈的拉深模具在RX-1上进行拉深试验,模具材料选择不锈钢1Cr18Ni9Ti,拉深模具采用倒

装式结构(图2),通过调节压边圈与凹模之间的间隙来调节拉深过程的压边力,利用油压顶紧凹模与压边圈,通过调节上下缸的油压实现不同速度的拉深。

2 结果与讨论

2.1 模具材料的影响

热成形模具应根据零件的特点、要求和批量来选用不同的材料。前期的研究表明,不锈钢1Cr18Ni9Ti在高温下抗氧化性能好,并且高温下的屈服强度仍可满足压力加工的需求^[10],因此本文选择了不锈钢1Cr18Ni9Ti作为模具材料。在前期工艺试验中,当拉深高度接近拉深极限时,筒壁会出现拉伤(图3(a)),后期虽经简单打磨处理但拉伤严重部位仍无法消除(图3(b));若通过打磨完全去除拉伤部分,零件的最小壁厚已低于0.85mm,无法满足设计要求。经查阅相关文献^[11],1Cr18Ni9Ti在高温下易与TC1发生焊合作用而导致零件擦伤,进而导致零件报废;此外,1Cr18Ni9Ti材质较软,零件拉深过程中易变形而导致压边力不均匀造成零件起皱。因此,1Cr18Ni9Ti适合浅拉深零件,对深拉深不利。

最终改用中硅钼球墨铸铁作为模具材料。该种材料在中硅球铁中加入合金元素钼后,钼固溶于铁素体中,其固溶强化作用,同时可以促进石墨化,细化石墨和

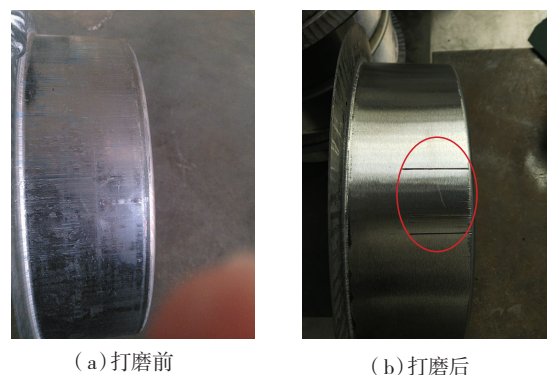


图3 零件侧壁出现拉伤

Fig.3 Abrasive damage of the part

基体组织,这可以提高铸铁的常温机械性能,特别是提高了高温机械性能(即红硬性)。同时,相对于昂贵的耐热合金,中硅钼球墨铸铁加工容易,模具的成本和周期均适应成形温度不高、小批量零件的生产。模具材料采用中硅钼球墨铸铁,成形后的零件经过简单打磨,在壁厚满足要求的前提下,外观质量合格(图4)。

2.2 成形温度的影响

温度是影响钛合金成形性能的主要因素,随着温度的升高,钛合金板料的塑性成形能力增强,有利于提高拉深系数;但同时材料的厚向异性指数减小,板材在厚度方向的变形越来越容易,拉深过程中危险截面处减薄量增加,圆角处易于破裂。因而钛合金的成形温度并非越高越好,应综合考虑上述因素。

试验过程中首先固定工艺参数(压边间隙为1.15mm,拉深速度为30mm/min),来研究不同温度对拉深结果的影响。试验表明,在600~700℃之间均可拉深出表面质量合格的端盖零件,但零件的减薄位置由凸模圆角区过渡到凹模圆角与筒壁连接处,零件的最小壁厚也是不断变化的。为此本文选用了600℃、625℃、650℃、675、700℃进行拉深试验,使用超声测厚仪测量了成形后端盖零件各部位的壁厚(图5),取最小值进行对比,如图6所示。

可见零件的最小壁厚数值随着温度的升高先增大后减小,最大值出现在625℃,此时最小壁厚为1.02mm,



图4 打磨完表面合格的零件

Fig.4 Part with good surface quality after sanding

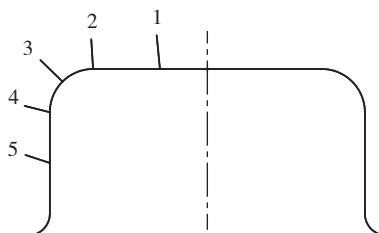


图5 零件各处壁厚检测示意图

Fig.5 Scheme of the part wall thickness measurement

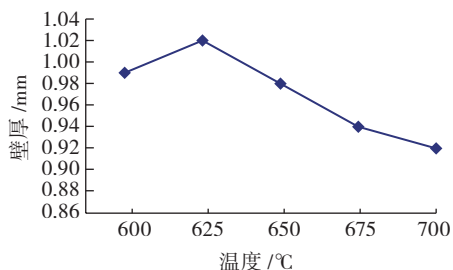


图6 不同温度下零件最小壁厚

Fig.6 Wall thickness at elevated temperatures

最接近原始板材厚度(1.05~1.06mm),完全满足设计要求。这是因为在该温度下,TC1的延伸率约为140%,但抗拉强度仍有183MPa,在拉深过程中可以有效地抵抗径向变形,从而防止危险截面严重破坏。因此,最终选用的成形温度为 (620 ± 10) ℃。

2.3 压边间隙的影响

在钛合金拉深成形过程中,压边间隙对成形质量有一定的影响。如果间隙过小,材料与模具之间的摩擦力增大从而增加筒壁的拉应力,引起零件筒壁的过度减薄,并且容易在成形件表面形成划痕,增加打磨处理工序;间隙过大会导致法兰部分易起皱,此时法兰部分材料不容易进入变形区,易导致圆角部分减薄。因此,本文选择在620℃,压边间隙依次为1.1mm、1.15mm、1.2mm、1.25mm、1.3mm进行了拉深试验,测试了不同压边间隙对零件最小壁厚的影响。

从图7可以看到,最小壁厚随着压边间隙的增大先变大后变小,当压边间隙为1.1mm和1.15mm时,最小壁厚从0.96mm增加到0.98mm,但成形件表面有严重划伤(图8(a)),经打磨处理后最小壁厚减小到0.92mm,无法满足后续旋压收口工序;当压边间隙在1.3mm时,法兰部分起皱比较严重(图8(b)),此时最小壁厚出现在测量点4(图5),数值为0.93mm,同样无法满足后续工序。但压边间隙选择1.2mm和1.25mm时,成形零件表面只有轻微的划伤(图8(c)),经打磨处理后最小壁厚约为1.0mm,完全满足后续加工要求。因此,选择压

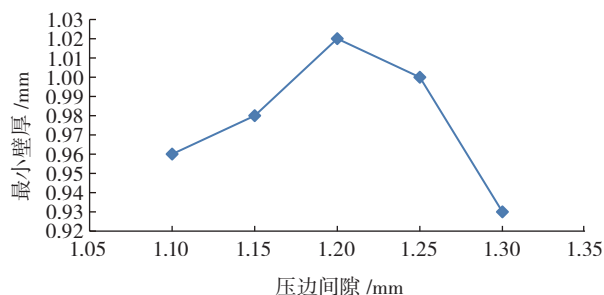


图7 不同压边间隙时零件圆角位置的最小壁厚

Fig.7 Minimum wall thickness of the corner area at different blank holder gaps

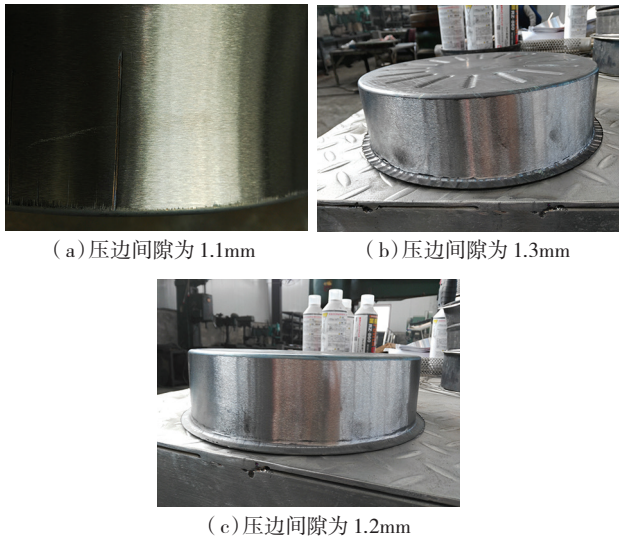


图8 不同压边间隙时零件
Fig.8 Parts at different blank holder gaps

板间隙为 1.2mm 和 1.25mm, 可以成形出质量较好的端盖零件。这是因为当压边间隙在 1.2mm 以下时, 板料法兰部位的材料在流向直筒变形区受阻, 塑性变形区主要集中在压边间隙处的材料, 凹模圆角处不能持续得到补充材料, 拉深过程中圆角部位材料会减薄; 当压边间隙在 1.25mm 以上时, 由于间隙较大, 法兰部位容易起皱, 当起皱较为严重时法兰部分材料不能进入筒形变形区, 同样圆角部位材料也会减薄。因此, 过大或者过小的压边间隙均不利于材料的热拉深成形。因此在压边间隙为 1.2mm 和 1.25mm 时, 板材的法兰部位材料流入变形区的阻力降低, 且压边力足够防止法兰部分材料起皱, 成形出的零件尺寸和表面质量较好。

2.4 拉深速率的影响

钛合金属于应变速率敏感材料, 应变速率越低, 越有利于板材的成形。但大的应变速率有利于提高生产效率。因此, 选择既能满足工艺要求又能提高生产效率的拉深速度至关重要。

试验过程固定其他工艺参数(温度为 $(620 \pm 10)^\circ\text{C}$, 压边间隙为 1.2mm), 设定拉深速度为 10mm/min、30mm/min、60mm/min、100mm/min。结果表明, 采用 10mm/min 和 30mm/min 进行拉深时, 可获得壁厚和表面质量均符合要求的零件; 采用 60mm/min 进行拉深时, 零件的最小壁厚约为 0.92mm, 考虑到后续工序, 可能无法满足最终零件壁厚不低于 0.90mm 的要求; 当拉深速率提高到 100mm/min 时, 当拉深进行到一半时便发生断裂, 拉深无法继续。因此, 综合考虑实际需求, 选择合理的拉深速度 $\leq 30\text{mm/min}$ 。

2.5 取件方式的影响

在拉深成形过程中, 由于模具材料与成形的金属板材之间的热膨胀系数差异, 材料成形完成后冷却过程中, 模具和成形的零件的收缩量不同, 导致模具和零件之间有一定的相互作用力, 在零件出模时产生了很大的摩擦力, 零件脱模困难, 通常是在模具型腔内部和板料表面涂润滑剂, 拉深成形后采用手工撬取的方法脱模。由于施加的力量过大, 过于集中, 往往导致零件变形, 表面划伤甚至报废。

为此对模具结构进行改造, 在凸模中心增加专用气道。通过设计的专用气道, 向模具腔体内通入持续的压缩空气, 在对模具或零件进行强制冷却的同时, 通过均匀分布在型腔内的气压产生向上的压力, 将零件吹出模具型腔。气压的作用可以产生向上的脱模力, 使零件发生弹性变形减少与模具的接触面积, 从而使零件与模具的摩擦力降到最低。通过这种气压脱模方法, 既可以降低脱模阻力, 又可以使零件受力均匀, 将零件变形降到最低。

结合上述改进措施, 采用图 9 所示的拉深模具, 热成形出了合格的进/出口端盖毛坯件零件底部平面度小于 0.05mm (图 10)。

3 结论

设计了一套带压边圈的拉深试验装置, 通过试验阐述了模具材料、温度、压边间隙、拉深速度等对成形性能

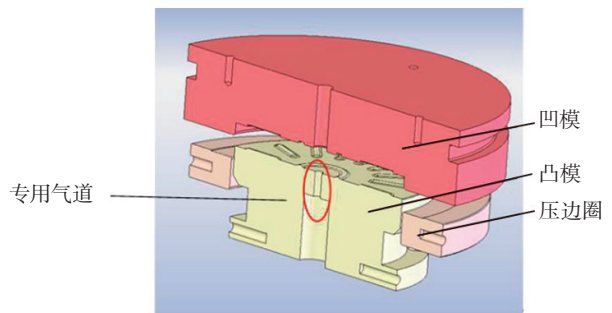


图9 改进后的拉深模具示意图
Fig.9 Schematic diagram of improved deep-drawing mould



图10 合格的端盖零件
Fig.10 Qualified part

的影响,解决了零件取件底部平面度不满足要求的问题,得出如下结论:

(1) 热拉深模具材料选择中硅钼球墨铸铁优于 1Cr18Ni9Ti,成形温度为 (620 ± 10) °C,压边间隙 1.20~1.25mm,拉深速度不大于 30mm/min,可以实现满意的拉深结果。

(2) 改进了模具结构,通过设计专用气道,采用空气脱模的方式可实现筒底平面度小于 0.05mm,为类似零件的取件提供了工艺参考。

参考文献

[1] 中华人民共和国航空工业部. 钛和钛合金的板材成形 [M]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1987.

Department of Aviation Industry. Forming technology for titanium and titanium alloys sheet[M]. Beijing: Department of Aviation Industry, 1987.

[2] 北京航空制造工程研究所. 航空制造技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.

AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Insititute. Aeronautical manufacturing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.

[3] 侯红亮,王耀奇,李晓华,等. 先进钣金成形技术在航空航天领域的应用(下)[J]. 金属加工, 2008(15):50-51.

HOU Hongliang, WANG Yaoqi, LI Xiaohua, et al. Application for advanced sheet-metal forming technology in aeronautics and astronautics field(II)[J]. Metal Forming, 2008(15): 50-51.

[4] LUO Y S, LIU F, YANG L, et al. The numerical simulation and mechanics analysis for deep-draw thermo-rheological forming of one Ti alloy rectification internal hood[J]. Key Engineering Materials, 2004, 274-276(7): 721-726.

[5] YIN Z, TU S T, XIE X H, et al. Research on the effect of entry angle and pressure-pad force on deep-draw thermo-rheological forming of a TC1 Ti-alloy sheet[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353-358(5): 635-638.

[6] 张凌云,鲁强,韩志仁,等. TC1M 钛合金板材拉深成形过程中的形状畸变 [J]. 金属学报, 2007, 43(8):875-878.

ZHANG Lingyun, LU Qiang, HAN Zhiren, et al. Shape distortion of TC1M titanium alloy sheets during drawing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(8): 875-878.

[7] 郭天文. TC4 钛合金板材热拉深成形数值模拟与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

GUO Tianwen. Hot drawing numerical simulation and experiment research of TC4 titanium alloy sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[8] 徐萌萌. TC1、TA15 钛合金板材成形性能及工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

XU Mengmeng. Research on the formability and process of TC1 and TA15 titanium alloy sheet metal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[9] 李鹏亮,张志. 钛合金热成形模具 [J]. 航空制造技术, 2012(21): 94-95.

LI Pengliang, ZHANG Zhi. Thermoforming mold for titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(21): 94-95

[10] 刘斐. TC1 钛合金薄板深拉热成形失效分析与对策研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2004.

LIU Fei. The failure analyses and countermeasure study for deep-draw thermal forming of TC1 Ti alloy thin plate[D]. Xiangtan: Xiang Tan University, 2004.

通讯作者: 张志, 工程师, 研究方向为钛合金成形, E-mail: zzhn_2000@163.com。

(责编 大漠)

(上接第78页)

TIAN Fujun, ZHANG Hongqi. Three-dimensional assembly process planning and simulation technology based on Tecnomatix[J]. Manufacturing Automation, 2013,35(8):11-16.

[3] 程振阳,周来水,赵恒. MBD 模式下机加工工艺执行可视化文件生成方法 [J]. 航空制造技术, 2014(5): 101-104.

CHENG Zhenyang, ZHOU Laishui, ZHAO Heng. Generation method of machining process immentation visualization file in MBD mode[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(5): 101-104.

[4] 王朋. 基于 Tecnomatix 的数字化装夹工艺规划及后处理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

WANG Peng. Digital assembly process planning based on tecnomatix and post processing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[5] 栾浩,何文松. 基于 Tecnomatix 的三维装配工艺规划研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(4):142-145.

LUAN Hao, HE Wensong. 3D assembly process planning research based on tecnomatix[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(4):142-145.

[6] 田富君,张红旗,张祥祥,等. 基于轻量化模型的三维装配工艺文件生成技术 [J]. 制造业自动化, 2013,35(5):46-50.

TIAN Fujun, ZHANG Hongqi, ZHANG Xiangxiang, et al. Three-dimensional assembly process file generate technology based on lightweight model [J]. Manufacturing Automation, 2013,35(5):46-50.

[7] 马士路,薛澄岐. 基于 3D PDF 技术的制造业 IETM 应用研究 [J]. 中国制造业信息化, 2009,38(19):22-25.

MA Shilu, XUE Chengqi. Application of product IETM based on 3D PDF technology[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2009,38(19):22-25.

[8] 李山山,宋正河. 农业机械底盘机械式变速箱虚拟装配 [J]. 农业机械学报, 2012(43):318-322.

LI Shanshan, SONG Zhenghe. Virtual assembly for mechanical gearbox of agricultural chassis[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012(43): 318-322.

[9] 姚展,李成. 装配仿真技术及其在飞机装配中的应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2015(6):130-132.

YAO Zhan, LI Cheng. Assembly simulation technology and its application in aircraft assembly [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2015(6):130-132.

[10] 张志贤,刘检华. 虚拟装配中基于多刚体动力学的物性装配过程仿真 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(5):90-98.

ZHANG Zhixian, LIU Jianhua. Physical assembly process simulation based on multi-rigid-body dynamics in virtual assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5):90-98.

通讯作者: 武权, 硕士研究生, 研究方向为数字化制造技术, E-mail: wuquannuaa@126.com。

(责编 大漠)