

DOI: 10.7652/xjtuxb201603015

铆压重塑形工艺的铆钉优化与试验研究

陈超, 赵升吨, 崔敏超, 韩晓兰, 贲宁宇, 范淑琴

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决传统机械变形压力连接存在较高凸起的问题并增加连接强度,提出了一种采用特制铆钉的铆压重塑形工艺。该工艺在无铆连接工艺后将铆钉置于连接点的凹坑内,然后压缩凸起处使凸起高度降低。采用 DEFORM-2D 软件对铆压重塑形工艺进行有限元分析,得到了连接点的最大拉伸强度;采用正交试验方法对铆钉尺寸进行了设计优化,得到了能实现最大拉伸强度的铆钉尺寸。在铆压重塑形试验中,连接点的凸起高度从 1.6 mm 降低到了 1.1 mm;平均拉伸强度从 950.6 N 提高到 1 130.7 N,即重塑形后的拉伸强度比重塑形前提高了 18.9%;平均剪切强度从 1 168.6 N 提高到 2 636.1 N,即重塑形后的剪切强度比重塑形前提高了 125.6%。由此证明,铆压重塑形工艺可有效降低凸起高度,并且能提高连接点的强度。

关键词: 机械变形压力连接;重塑形;有限元分析;铆钉优化

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)03-0094-06

Rivet Optimization and Experimental Research on the Reshaping Method

CHEN Chao, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, HAN Xiaolan, BEN Ningyu, FAN Shuqin

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The application of conventional mechanical clinching in automotive industry is restricted because of the exterior protrusion. In order to reduce the protrusion height and increase the strength of clinched joint, a new rivet-reshaping process was proposed to reshape the clinched joint in this study. The rivet was embedded in the pit of the joint after the conventional mechanical clinching and then the protrusion was compressed to reduce the protrusion height. The maximum tensile strength of the clinched joint was obtained by finite element simulation using the software DEFORM-2D. The geometrical parameters of the reshaped rivet with maximum tensile strength were acquired by optimization using orthogonal design. In the experiment, the protrusion height of the reshaped joints was reduced from 1.6 to 1.1 mm. The average tensile strength of the reshaped joints was increased from 950.6 to 1 130.7 N, i. e. the average tensile strength was increased by 18.9% compared with the clinched joints before reshaping; and the average shear strength of the reshaped joints was increased from 1 168.6 to 2 636.1 N, i. e. the average shear strength was increased by 125.6% compared with the clinched joint before reshaping. It was proved that the reshaping method can reduce the protrusion height and increase the strength of clinched joint effectively.

Keywords: mechanical clinching; reshaping; finite element simulation; rivet optimization

收稿日期: 2015-09-15。 作者简介: 陈超(1990—),男,博士生;赵升吨(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51335009);国家自然科学基金资助项目(51305333);陕西省科学技术研究发展计划工业攻关计划资助项目(2014K07-23)。

网络出版时间: 2015-12-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151231.1129.002.html>

近年来,随着汽车行业的快速发展,汽车轻量化技术得到了广泛关注^[1]。为了实现车身的轻量化,铝合金板材被广泛应用于汽车车身。但是,传统的连接方式如点焊、铆接等在连接铝合金板材时有很多缺点,其中点焊会产生火花、烟雾等,污染环境,且在焊接异种材料时连接强度差,而铆接则会对板材表面产生损伤,影响使用效果。

机械变形压力连接技术采用专门的模具对连接板材进行冲压,利用金属的塑性变形能力在板件间产生内嵌从而实现连接。为了有效连接金属板材,科研人员在机械变形压力连接技术上做了很多研究工作,例如:Lambiasi 等人分别在模具尺寸对连接点的影响、机械变形连接有限元分析和连接点强度等方面进行了研究^[2-4];赵升吨等人探讨了机械变形压力连接机理和损伤演化机制^[5];何晓聪等人对异种板材连接、连接点强度性能和连接点微观组织等方面进行了很多研究^[6-8];石柏军等人开发了机械变形压力连接质量监控系统^[9]。

但是,机械变形压力连接也存在很多不足。如图1所示,机械变形压力连接点会存在一个较高的凸起,这严重影响了板材连接的表面质量。此外,压力连接点的静态强度仅是点焊的70%左右。因此,如何降低连接点凸起高度并增加连接点强度成为了机械变形压力连接的关键问题之一。本文在机械变形压力连接的基础上开发了铆压重塑形工艺,利用一种特制铆钉对连接点进行重新塑形,以此降低连接点高度并提高连接强度。



图1 机械变形压力连接点外观

1 机械变形压力连接和铆压重塑形原理

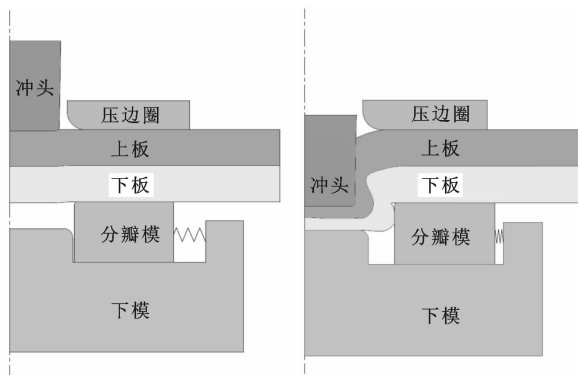
1.1 机械变形压力连接原理

如图2所示,将上板和下板置于冲头和下模之间,并用压边圈压紧。冲压时,冲头向下运动,使上板和下板沿冲头运动方向变形;分瓣模沿冲头运动方向的垂直方向滑动,使上板和下板的材料呈辐射状向外流动,从而使上板的材料内嵌入下板中,形成一个卡扣,实现机械变形压力连接。

1.2 铆压重塑形原理

如图3所示,将机械变形压力连接点倒扣在特制铆钉上,使铆钉置于连接点的凹坑内,连接点置于

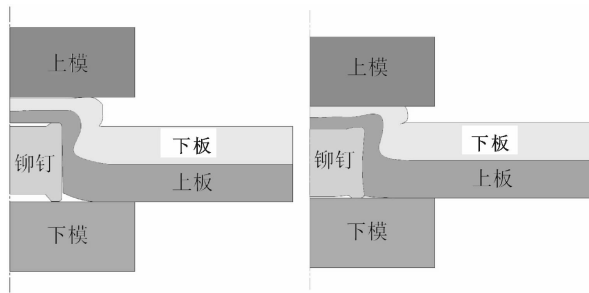
上模和下模之间。铆压重塑形工艺开始后,上模向下运动,在下模的配合下挤压连接点,降低连接点凸起高度。在挤压过程中铆钉发生塑性变形,嵌入到上板中,并压迫上板在连接点处进一步嵌入到下板中,使连接强度增加。



(a)压力连接前

(b)压力连接后

图2 机械变形压力连接示意图



(a)重塑形前

(b)重塑形后

图3 铆压重塑形示意图

2 有限元分析

有限元分析采用 DEFORM-2D 软件,分析侧重于成形后的形状尺寸及抗拉强度。整个分析过程分3步进行:①模拟采用分瓣式模具产生机械变形压力连接点;②在该连接点的基础上进一步进行铆压重塑形工艺;③进行连接点拉伸模拟以获得连接点的最大连接强度。在有限元模拟过程中,为了保证模拟条件的连续性,机械变形压力连接、铆压重塑形和拉伸模拟需要连续进行。

采用2 mm厚的AL6061板材作为连接件,AL6061的弹性模量为67.6 GPa,泊松比为0.33,屈服强度为207.9 GPa。AL6061的载荷-位移曲线如图4所示。

材料在变形过程中会产生硬化现象,这里采用Voce硬化方程来描述AL6061的变形行为

$$\sigma = A - (A - B)e^{-G\epsilon}$$

第三阶段是应用 DEFORM 软件进行拉伸模拟试验。连接点的强度包括拉伸强度和剪切强度,但其拉伸强度一般低于剪切强度。实际使用中连接点发生的损坏大多是因为拉伸强度不足,因此本文以拉伸强度作为评价连接点强度的指标。如图 10 所示,在铆压重塑形工艺之后,去掉模具,将下板的下底面固定,在上板的侧边上施加一个竖直向上的运动,通过测量向上运动所需要的最大力来获得连接点的最大连接强度,拉伸速度 v 设置为 2 mm/min。拉伸模拟试验的应变有限元分析结果如图 11 所示。

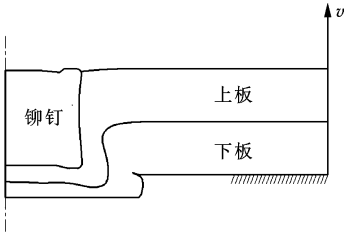


图 10 拉伸模拟示意图

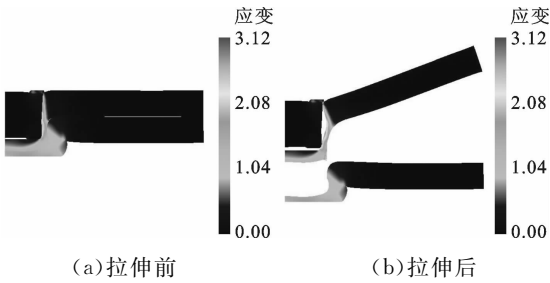


图 11 拉伸模拟试验的应变有限元分析结果

3 特制铆钉尺寸的优化设计

铆压重塑形工艺所采用的特制铆钉的尺寸是影响连接点强度的关键因素之一。铆钉尺寸的优化设计是一个多水平多因素问题,本文选择正交试验作为铆钉尺寸的优化设计方法,以最大拉伸强度作为评价标准。

特制铆钉的形状如图 12 所示。为了使铆钉能恰好置于连接点的凹坑里且能够对中,铆钉的直径和高度分别与连接点凹坑的直径(5.5 mm)和深度(4.2 mm)相等。在正交试验设计中,铆钉的主要尺寸包括上端面和下端面圆台形凹坑的直径(d)、锥角(α)和深度(l)。为了方便加工及试验,上端面和下端面的圆台形凹坑尺寸保持一致。由表 1 可见,铆钉尺寸优化是一个 3 水平 3 因素的正交问题,需要做 9 组有限元数值模拟以得到最优尺寸。对设计的 9 组尺寸组合分别进行有限元分析,得到最大拉伸强度($F_{\max}$),结果见表 2。

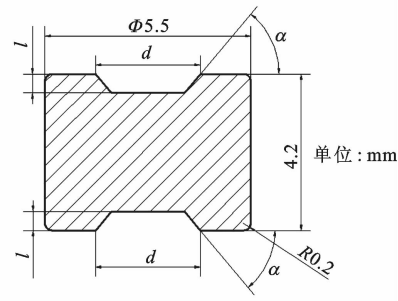


图 12 铆钉剖视图

表 1 铆钉尺寸组合

水平	因 素		
	d/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	l/mm
1	2.8	35	0.2
2	3.6	45	0.4
3	4.4	55	0.6

表 2 正交试验设计及有限元分析结果

序号	d/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	l/mm	$F_{\max}/\text{N}$
1	2.8	35	0.2	1 080.2
2	2.8	45	0.4	1 092.5
3	2.8	55	0.6	1 078.1
4	3.6	35	0.4	1 120.8
5	3.6	45	0.6	1 126.7
6	3.6	55	0.2	1 108.2
7	4.4	35	0.6	1 122.3
8	4.4	45	0.2	1 127.2
9	4.4	55	0.4	1 123.6

应用极差分析研究不同因素对拉伸强度的影响,极差越大,代表该因素对拉伸强度的影响越显著。从表 3 中可以看出,凹坑直径的极差最大,说明它对拉伸强度影响最大,其次是凹坑锥角,再次是凹坑深度。

为了研究数据的波动情况,本文又对数据进行了方差分析。如表 4 所示,在 3 个因素中,只有 d 的 F 值大于 19,即 $P>0.05$,表示 d 的数值波动较大,对拉伸强度有很大影响。 α 和 l 的 F 值均小于 19,即 $P<0.05$,表示 α 和 l 的数据波动较小,对拉伸强度影响也较小。

根据极差分析和方差分析的结果,凹坑直径对拉伸强度的影响最大,其次分别是凹坑锥角和凹坑深度。因此,铆钉尺寸的最优组合是: $d=4.4\text{ mm}$; $\alpha=45^\circ$; $l=0.4\text{ mm}$ 。

表 3 极差分析结果

因素	d	α	l
K_1/N	3 250.8	3 323.3	3 315.6
K_2/N	3 355.7	3 346.4	3 336.9
K_3/N	3 373.1	3 309.9	3 327.1
k_1/N	1 083.6	1 107.8	1 105.2
k_2/N	1 118.6	1 115.5	1 112.3
k_3/N	1 124.4	1 103.3	1 109.0
R/N	40.8	12.2	7.1
排序	1	2	3

$K_i(i=1,2,3)$:每个因素在 i 水平的拉伸强度总和; $k_i(i=1,2,3)$:每个因素在 i 水平的拉伸强度平均值; R :每个因素平均拉伸强度的极差。

表 4 方差分析($F_{0.05}=19$)

因素	方差和	自由度	均方差	F 值
d	2 923.32	2	1 461.66	38.59
α	228.42	2	114.21	3.02
l	75.75	2	37.88	1.00

4 铆压重塑形试验

4.1 试验步骤

制备 80 mm×25 mm×2 mm 的 AL6061 板作为连接件,整个试验过程分 2 步进行:首先对 2 块 AL6061 板进行机械变形压力连接,产生压力连接点;再在该连接点的基础上进行铆压重塑形。

机械变形压力连接所采用的分瓣式模具如图 13 所示,模具尺寸、冲头冲压速度及停止位置与前述有限元分析中的设置保持一致。冲压后得到的连接点的外观和剖面如图 14 所示。

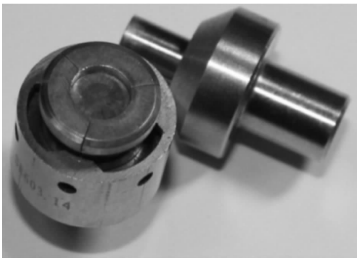


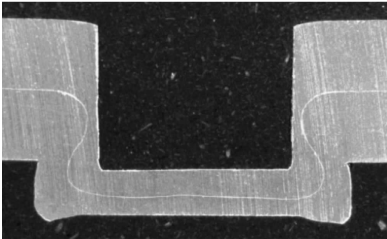
图 13 分瓣式模具

铆压重塑形所采用的模具如图 15 所示,模具尺寸、上模具下行速度及停止位置与前述有限元分析中的设置保持一致。优化设计后制造的特制铆钉如图 16 所示,重塑形后得到的连接点的外观和剖面如图 17 所示。

对重塑形前和重塑形后的连接板在 Instron 5982



(a)连接点外观



(b)连接点剖面

图 14 机械变形压力连接的连接点外观和剖面



图 15 铆压重塑形模具

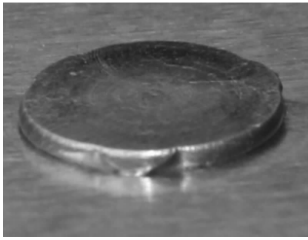


图 16 特制铆钉

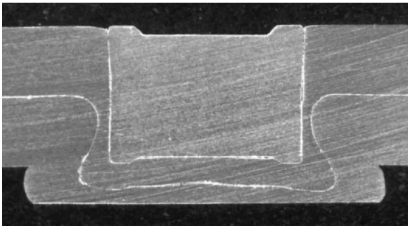
材料性能试验机上进行拉伸试验和剪切试验,相应的板材试样形状分别如图 18 和图 19 所示,拉伸试验和剪切试验的速度设置为 2 mm/min。

4.2 试验结果

对重塑形前和重塑形后的试样分别进行 5 组拉伸试验和剪切试验,得到平均拉伸强度($\bar{F}$)和平均剪切强度($\bar{T}$),见表 5。从表 5 中可以发现:模拟数据和试验数据非常接近,重塑形前的误差为 1.15%,重塑形后的误差为 0.46%;重塑形前的平均拉伸强度为 950.6 N,重塑形后的平均拉伸强度为 1 130.7 N,



(a)连接点外观



(b)连接点剖面

图 17 重塑形后的连接点外观和剖面

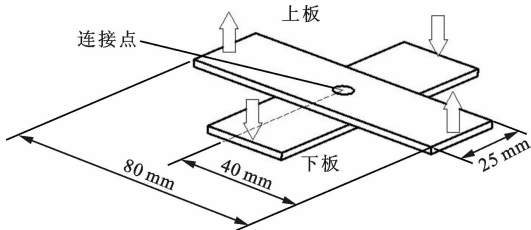


图 18 拉伸试验用的试样

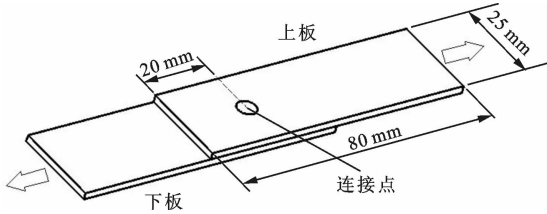


图 19 剪切试验用的试样

即重塑形后的拉伸强度比重塑形前提高了 18.9%；重塑形前的平均剪切强度为 1 168.6 N, 重塑形后的平均剪切强度为 2 636.1 N, 即重塑形后的剪切强度比重塑形前提高了 125.6%。

表 5 重塑形前后的平均拉伸和剪切强度

阶段	$\bar{F}/\text{N}$	$\bar{T}/\text{N}$	$F_{\text{simulation}}/\text{N}$
重塑形前	950.6	1 168.6	939.7
重塑形后	1 130.7	2 636.1	1 135.9

5 结 论

本文提出了一种采用特制铆钉的铆压重塑形工艺,该工艺有助于降低机械变形压力连接点的高度,增加连接强度。

采用 DEFORM-2D 软件进行了有限元分析,整个分析过程包括 3 个阶段:机械变形压力连接;铆压重塑形;拉伸试验模拟。以拉伸强度为评价标准,采用正交试验方法对铆钉的尺寸进行了优化设计。对得到的数据进行了极差分析和方差分析,结果表明凹坑直径 d 对拉伸强度的影响最大,其次分别是凹坑锥角 α 和凹坑深度 l ,由此获得的铆钉尺寸最优组合是 $d=4.4\text{ mm}$, $\alpha=45^\circ$, $l=0.4\text{ mm}$ 。

试验结果表明:连接点的凸起高度从 1.6 mm 降低到 1.1 mm;平均拉伸强度从 950.6 N 提高到 1 130.7 N,即重塑形后的拉伸强度比重塑形前提高了 18.9%;平均剪切强度从 1 168.6 N 提高到 2 636.1 N,即重塑形后的剪切强度比重塑形前提高了 125.6%。由此证明,铆压重塑形工艺可显著降低连接点的凸起高度,同时可以提高连接点的强度。

参考文献:

[1] 景艳, 赵培全, 何平. 汽车新材料的应用: 轻量化[J]. 现代制造技术与装备, 2007(1): 75-78.
JING Yan, ZHAO Peiquan, HE Ping. The application of new materials on vehicles: tendency of light quality[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2007(1): 75-78.

[2] LAMBIASE F. Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9/10/11/12): 2123-2131.

[3] PAULA A, AGUILAR M, PERENCE A, et al. Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1/2/3): 352-357.

[4] MUCHA J, WITKOWSKI W. The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 55-66.

[5] 徐凡. 板材无铆钉连接的塑性变形机理及损伤演化机制研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.

[6] 杨慧艳, 何晓聪, 邓成江, 等. 铜-铝异种金属板压印连接与接头拉剪载荷研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(19): 2669-2673.
YANG Huiyan, HE Xiaocong, DENG Chengjiang, et al. Study on clinch joining for Cu/Al alloy sheets and mechanical properties of joints [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(19): 2669-2673.

[7] 杨慧艳, 何晓聪, 丁燕芳, 等. 铝合金压印接头的强度研究 [J]. 应用力学学报, 2014, 31(2): 299-304.
YANG Huiyan, HE Xiaocong, DING Yanfang, et al.

- Analytical models and experimental studies on clinched joints in aluminium alloy [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(2): 299-304.
- [8] 郑俊超, 何晓聪, 邢保英, 等. 分体式下模压印接头成形的有限元模拟及接头微观组织 [J]. 机械工程材料, 2013, 37(9): 79-83.
- ZHENG Junchao, HE Xiacong, XING Baoying, et al. Finite element simulation of segmented die clinched joint deformation and microstructure of joint [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(9): 79-83.
- [9] 田恒宇. 压力连接质量监控系统的研究与开发 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [10] 郭俊行. 金属板料塑性成形过程损伤演化与韧性断裂机制的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
- [11] WEN T, WANG H, YANG C, et al. On a reshaping method of clinched joints to reduce the protrusion height [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 1709-1715.

(编辑 葛赵青)

(上接第 49 页)

- [10] WANG Xurong, WU Yi, WANG Jiangfeng, et al. Thermo-economic analysis of a recompression supercritical CO₂ cycle combined with a transcritical CO₂ cycle [C]// ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2015: GT2015-42033.
- [11] 王亮, 陈海生, 刘金超, 等. 高压液态空气储能/释能系统: 中国, CN 102758748 A [P]. 2012-10-31.
- [12] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties: REFPROP, NIST standard reference database 23 [DB]. version 9.0. Boulder, USA: National Institute of Standards and Technology, 2010.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 54 页)

- [11] DOMINGUEZ-PEREZ M, SEGADE L, CABEZA O, et al. Densities, surface tensions, and refractive indexes of propyl propanoate plus hexane plus *m*-xylene at 298.15 K [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2006, 51(1): 294-300.
- [12] GAYOL A, CASAS L M, ANDREATTA A E, et al. Surface tension of dialkyl carbonates plus (alkanes or 1, 4-dimethylbenzene) and 1, 4-dimethylbenzene plus alkanes binary mixtures at $T = 308.15$ K [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2013, 58(3): 758-763.
- [13] KAHL H, WADEWITZ T, WINKELMANN J. Surface tension of pure liquids and binary liquid mixtures [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2003, 48(3): 580-586.
- [14] ZHOU Y, WU J T, LEMMON E W. Thermodynamic properties of *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, and ethylbenzene [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2012, 41(2): 1-26.
- [15] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties: REFPROP, NIST standard reference database23 [DB]. Version 9.0. Boulder, USA: National Institute of Standard and Technology, 2010.
- [16] AZIZIAN S, BASHAVARD N. Surface tension of dilute solutions of alkanes in cyclohexanol at different temperatures [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2008, 53(10): 2422-2425.
- [17] MOHSEN-NIA M, RASA H, NAGHIBI S F. Experimental and theoretical study of surface tension of *n*-pentane, *n*-heptane, and some of their mixtures at different temperatures [J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2010, 42(1): 110-113.
- [18] MOHSEN-NIA M. Measurement and modelling of surface tensions of systems containing *n*-hexadecane, *n*-heptane and *n*-pentane [J]. Physics and Chemistry of Liquids, 2011, 49(5): 608-614.
- [19] 赵贯甲. 表面光散射法黏度和表面张力实验系统研制及应用 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

(编辑 荆树蓉)