

The Influence of Tool Geometry on the Force Exerted on the Tool in Friction Stir Welding

Wei Zhang¹, Yang Pan², Rui Han², Qipeng Liu^{1*}, Yuehua Gao²

¹School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

²College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Email: *liuqp@djtu.edu.cn

Received: Mar. 28th, 2019; accepted: Apr. 10th, 2019; published: Apr. 17th, 2019

Abstract

Based on DEFORM-3D software, a fully coupled thermo-mechanical modeling of friction stir welding for AZ91 magnesium alloy plate is established, and tool forces in friction stir welding is simulated. The simulation results are compared with the experimental results to verify the rationality of the modeling. The influences of concave angle of shoulder and cone angle of pin, as well as welding parameters on the tool forces during friction stir welding were analyzed in detail. The results show that the geometrical shape and welding parameters have a significant influence on the tool forces during friction stir welding. Shoulder concave angle will reduce the forces and pin cone angle will increase the forces on the tool. The forces increase with the increase of welding speed, and decrease with the increase of rotating speed.

Keywords

Friction Stir Welding, Tool Geometry, Welding Parameters, Tool Force

搅拌摩擦焊接过程搅拌头几何对搅拌头受力的影响

张威¹, 潘杨², 韩锐², 刘其鹏^{1*}, 高月华²

¹大连交通大学, 土木工程学院, 辽宁 大连

²大连交通大学, 机车车辆工程学院, 辽宁 大连

Email: *liuqp@djtu.edu.cn

收稿日期: 2019年3月28日; 录用日期: 2019年4月10日; 发布日期: 2019年4月17日

*通讯作者。

摘要

基于DEFORM-3D软件建立AZ91镁合金板材搅拌摩擦焊全热力耦合有限元模型,对焊接过程中搅拌头受力进行仿真研究。将模拟结果与已知实验值进行对比,验证模型的合理性。在此基础上,详细分析了轴肩凹角和搅拌针锥角、以及工艺参数对搅拌摩擦焊过程中搅拌头受力的影响。结果表明:搅拌头的几何形状和工艺参数对搅拌摩擦焊过程中搅拌头受力有显著影响,轴肩凹角会使搅拌头受力减小,搅拌针锥角会使搅拌头受力增加;焊速提高搅拌头受力增加,转速增加搅拌头受力减小。

关键词

搅拌摩擦焊, 搅拌头几何, 工艺参数, 搅拌头受力

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所于1991年发明的一种新型固相连接技术[1]。在FSW过程中,搅拌头形状既影响焊接产热量,也决定轴向压力值。国内外学者针对FSW过程中搅拌头的受力开展了诸多研究工作,其中仿真研究方面,万震宇和张昭[2]通过建立5 mm厚AZ91镁合金全热力耦合刚粘塑性有限元模型,模拟得到搅拌头沿轴向、横向(垂直于焊缝方向)和纵向(焊缝方向)的受力随工艺参数的变化情况。谭治军等[3][4]针对3 mm、5 mm厚度的2024、5052、6061三种铝合金焊件建立了搅拌摩擦焊接热力耦合模型,研究了搅拌头受力情况。Pashazadeh等[5]对4 mm铜板FSW过程进行仿真研究,阐述了不同厚度上搅拌头受力情况,并对部分模拟结果给出了实验验证。Jain等[6][7]对5.9 mm厚2024-T4铝合金板FSW过程中搅拌头受力情况进行了详细研究,数值模拟结果近乎完美地再现了Su等[8]给出的实验结果。Sibalic等[9]对7 mm和8 mm厚的6082-T6铝合金板FSW过程进行了试验和数值模拟研究,并对不同搅拌头焊速和转速的影响进行了DOE试验设计分析。

尽管众多学者对FSW过程中搅拌头受力从实验和模拟两种途径进行了诸多研究工作,但是对搅拌头几何特征对其受力影响的考虑仍然不够充分,有待深入研究。本文基于DEFORM-3D软件,建立AZ91镁合金板材全热力耦合有限元模型,研究了搅拌头轴肩凹角、搅拌针锥角对搅拌头受力的影响。此外,还讨论了搅拌头受力随搅拌头焊速和转速而变化的规律。

2. 模型介绍

2.1. 有限元模型

搅拌头几何如图1所示,1号搅拌头为平轴肩-圆柱针,2号为平轴肩-圆台针,3号凹轴肩-圆柱针。

不同搅拌头的具体几何尺寸见表1。搅拌头材料为H-13工具钢,模拟过程中定义成可进行热传导的刚体,热容为 $4.5 \text{ N/mm}^2/\text{C}$,热导率为 24.5 W/m/C 。搅拌头整体网格尺寸为1.5 mm,并对搅拌针进行局部网格细化,细化网格尺寸为0.6 mm。在搅拌摩擦焊中板材弹性变形可以忽略不计,并且高温状态下铝合金具有一定的粘性,故将其定义为刚粘塑性体。板材尺寸为 $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。整体网格划分为

1.5 mm，对焊缝局部进行网格细化，细化网格尺寸为 0.5 mm，共包含 40951 个单元和 9355 个节点，网格划分结果如图 2 所示。

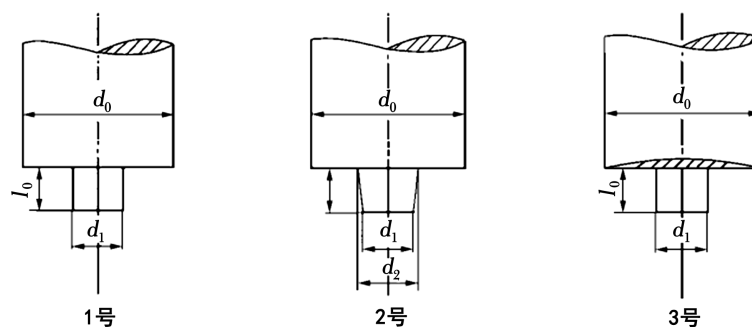


Figure 1. The geometrical characteristics of the different tools
图 1. 不同形状的搅拌头几何特征

Table 1. The parameter of tool geometry
表 1. 搅拌头几何尺寸

搅拌头编号	d_0 (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	l_0 (mm)	轴肩凹角($^\circ$)
1	15	4	4	2.5	0
2	15	3.5	4	2.5	0
3	15	4	4	2.5	3

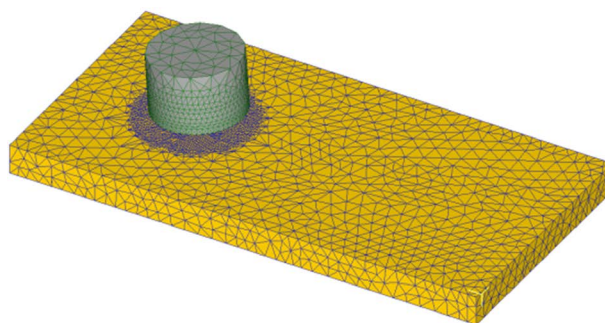


Figure 2. Mesh of the tool and workpiece
图 2. 搅拌头和板材网格划分

2.2. 材料模型

采用刚粘塑性有限元法对 FSW 过程进行仿真时，通常采用的基本假设[2] [3] [4] [5]有：1) 材料各向同性；2) 不计体积力的影响；3) 材料塑性变形服从 Levy-Mises 准则；4) 材料体积不可压缩。

采用 Arrhenius 方程[2]描述 AZ91 镁铝合金在高温下应变率 $\dot{\epsilon}$ 、流动应力 $\bar{\sigma}$ 和温度 T_{abs} 之间的关系：

$$\dot{\epsilon} = A \left[\sinh(\alpha \bar{\sigma}_y) \right]^n e^{(-\Delta H/RT_{abs})} \quad (1)$$

式中 ΔH 为高温变形 AZ91 镁合金的活化能， T_{abs} 为绝对温度， R 为气体常数， A 、 α 、 n 为金属常数。在数值模型取 $\Delta H = 1.77 \times 10^5$ ， $A = 2.8405 \times 10^{12}$ ， $\alpha = 0.021$ ， $n = 5.578$ ， $R = 8.314$ [J/(mol·K)]。

AZ91 镁铝合金板材的热容为 2.12 N/mm²/°C，热导率为 84 W/m/°C。搅拌头的热容为 4.5 N/mm²/°C，热导率为 24.5 W/m/°C。

2.3. 边界条件

力学边界条件为：限制板材底面的运动，使板材底面向各个方向的速度为 0。热学边界条件为：周围环境温度为 20℃；在焊接过程中，搅拌头、板材与四周环境之间会通过接触散热、辐射散热以及对流散热等方式进行热量交换，热交换系数为 20 W/m²/℃；板材和搅拌头之间进行接触传热，传热系数为 22,000 W/m²/℃，板材和搅拌头初始温度均为 20℃；焊接过程中，搅拌头和板材的摩擦为主要产热热源，采用剪切摩擦模型描述接触面摩擦行为：

$$f = m\bar{\tau} \quad (2)$$

式中， f 为摩擦力， m 为摩擦因子，取值 0.4， $\bar{\tau}$ 为剪切屈服极限。

整个焊接模拟过程分为下阶段和焊接阶段，搅拌头倾角 3°。下压阶段搅拌头以 900 r/min 的转速并以 6 mm/min 的速度下压，直到搅拌针根部下压深度 0.1 mm 停止。焊接阶段搅拌头保持相同旋转速度并沿焊缝方向以一定速度前进。

3. 结果分析

3.1. 模型验证

在距离焊缝中心 7.5 mm 处设置一处测温点，图 3 将得到的温度历程曲线和文献[10]中的已知实验结果进行对比，可以发现模拟值和实测值变化趋势一致，证明了模拟的可行性。

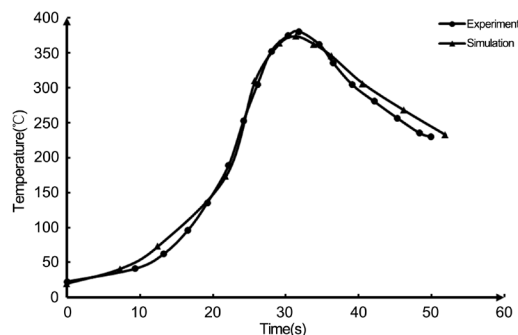


Figure 3. Comparison of temperature value in stimulation and experiment
图 3. 数值模拟温度曲线与实验实测值对比

图 4 为模拟得到的搅拌头轴向力与文献[10]中的实验结果对比图，可知搅拌头受力值和实验值吻合良好，证明了模拟的合理性。

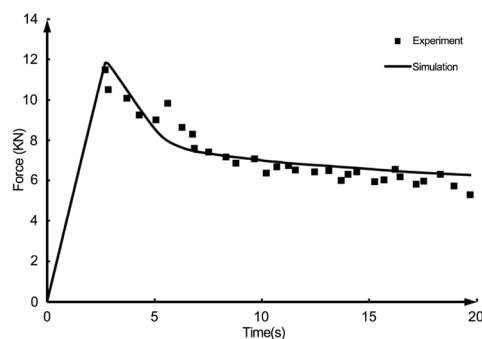


Figure 4. Comparison of tool force in axial direction between simulation and experiment
图 4. 搅拌头受到的轴向力数值和试验对比

3.2. 不同形状搅拌头受力分析

搅拌头受到沿轴向、纵向和横向三个方向受力(规定轴向 Z 为垂直于搅拌针横截面;纵向 Y 为沿焊缝方向;横向 X 为垂直于焊缝方向)。

图 5 给出了不同形状搅拌头受到的轴向力对比结果。在搅拌头下压阶段,当搅拌针接触到焊件时,轴向力从 0 开始逐渐增大,且增长趋势逐渐加快,直到搅拌头下压阶段完成,轴向力达到最大值。进入焊接阶段,搅拌头沿焊缝纵向移动,轴向力迅速下降,进入稳定焊接阶段后,搅拌头轴向力趋于平稳,并且有缓慢减小趋势。其中 1 号平轴肩-圆柱针搅拌头的轴向力最大值为 11.6 kN,稳定焊接阶段的值为 7.6 kN; 2 号平轴肩-圆台针搅拌头的轴向力最大值为 13.5 kN,稳定焊接阶段的值为 9.5 kN; 3 号凹轴肩-圆柱针搅拌头的轴向力最大值为 10.8 kN,稳定焊接阶段的值为 6.4 kN。

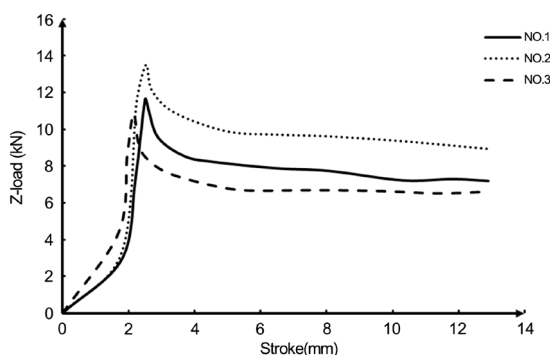


Figure 5. Forces of different tools in axial direction

图 5. 不同几何形状搅拌头受到的轴向力

图 6 给出了不同形状搅拌头受到的纵向力对比结果。可以发现,其变化趋势与轴向力变化趋势一致。其中 1 号平轴肩-圆柱针搅拌头的纵向力最大值为 0.676 kN,稳定焊接阶段的值为 0.51 kN; 2 号平轴肩-圆台针搅拌头的纵向力最大值为 0.812 kN,稳定焊接阶段的值为 0.645 kN; 3 号凹轴肩-圆柱针搅拌头的纵向力最大值为 0.635 kN,稳定焊接阶段的值为 0.46 kN。

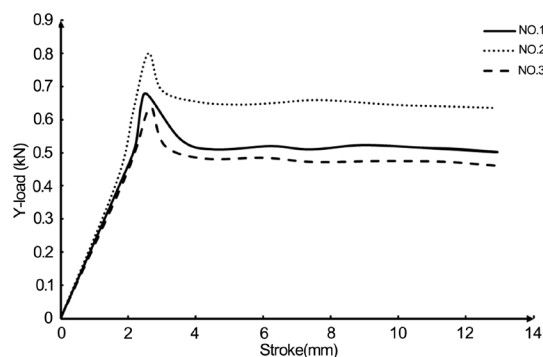


Figure 6. Forces of different tools in longitudinal direction

图 6. 不同几何形状搅拌头受到的纵向力

图 7 给出了不同形状搅拌头受到的横向力对比结果。从图中可知,其变化趋势和轴向力变化趋势一致。其中 1 号平轴肩-圆柱针搅拌头的横向力最大值为 0.486 kN,稳定焊接阶段的值为 0.262 kN; 2 号平轴肩-圆台针搅拌头的横向力最大值为 0.534 kN,稳定焊接阶段的值为 0.358 kN; 3 号凹轴肩-圆柱针搅拌头的横向力最大值为 0.385 kN,稳定焊接阶段的值为 0.215 kN。

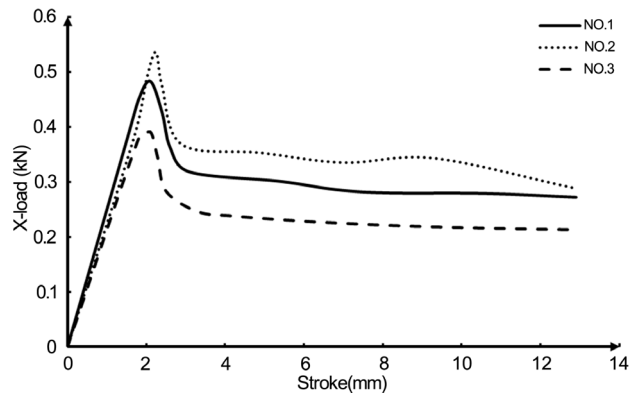


Figure 7. Forces of different tools in transverse direction
图 7. 不同几何形状搅拌头受到的横向力

图 8 为不同几何形状搅拌头 FSW 过程中焊件温度历程曲线。前 26 秒为下压阶段，温度迅速上升，26 秒以后为焊接阶段，温度变化逐渐趋于平稳。采用 2 号搅拌头时，焊接温度最低，稳定焊接阶段温度值为 464℃，采用 1 号搅拌头时，稳定焊接阶段温度值为 491℃，3 号搅拌头时，焊接温度最高，稳定焊接阶段温度值为 554℃。

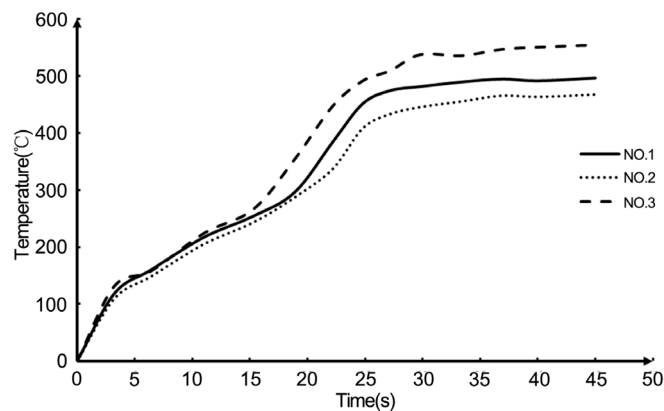


Figure 8. The maximum temperature of workpiece under different tools in welding process
图 8. 不同几何形状搅拌头焊接过程中焊件温度历程曲线

在 FSW 过程中，轴向力是搅拌头受到的主要作用力。搅拌头形状对其受力有显著影响。相同轴肩形状下，圆台针搅拌头受力比圆柱针搅拌头大，相差 1.9 kN。相同搅拌头形状下，凹轴肩搅拌头受力比平轴肩搅拌头大，相差 0.8 kN。搅拌头纵向力和横向力也表相出类似的规律。出现上述规律的主要原因在于产热。在焊接过程中，搅拌头与焊件的接触面积是焊接产热的关键，平轴肩 - 圆台针搅拌头的接触面积相较于平轴肩圆柱针搅拌头小，焊接产热亦较小，导致搅拌头所在区域焊件材料相对较硬，造成平轴肩圆锥形搅拌头受力较大。凹轴肩圆柱针搅拌头的接触面积相较于平轴肩圆柱针搅拌头大，焊接产热较多，导致搅拌头所在区域的焊件材料相对较软，故其搅拌头受力小。

3.3. 不同焊接参数条件下搅拌头受力分析

图 9 给出了焊速 40 mm/min 条件下，采用 1 号搅拌头模拟得到不同旋转速度对搅拌头轴向力的影响作用曲线。可以看出：增大搅拌头旋转速度，搅拌头轴向力的峰值和稳定阶段值均减小，这是由于搅拌头转速增加，焊件和搅拌头的摩擦产热增多，焊缝温度升高，焊件材料得以充分软化，塑性流动性变好[7]。

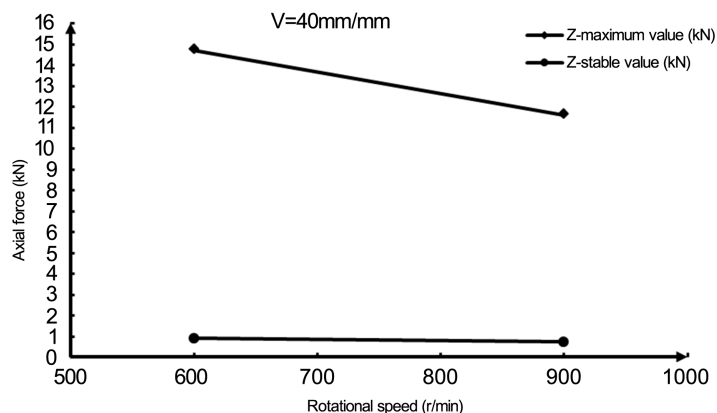


Figure 9. Tool Forces in the axial direction with different rotational speed in stimulation
图 9. 不同转速条件下的搅拌头轴向力

图 10 给出了搅拌头转速为 900 r/min 的条件下, 采用 1 号搅拌头模拟得到不同焊接速度对搅拌头轴向力的影响作用曲线。可以发现, 搅拌头轴向力的峰值和稳定阶段值随搅拌头焊接速度的增加而增加。搅拌头焊接速度增加, 在单位时间内输入焊件的热量减少, 焊接温度降低, 材料未能充分软化, 塑性流动性变差[7]。

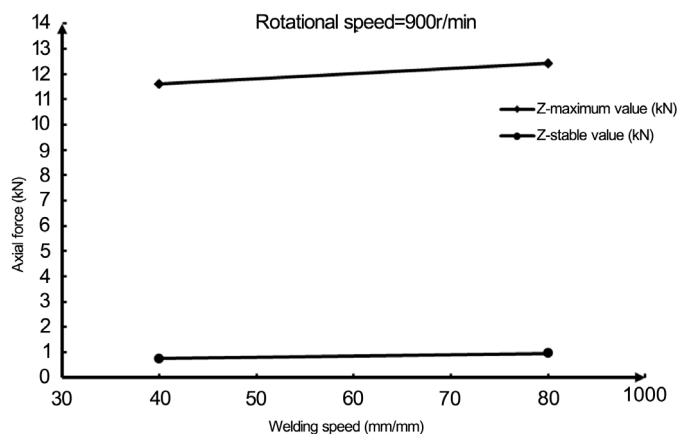


Figure 10. Tool forces in axial direction with different welding speed
图 10. 不同焊速条件下的搅拌头轴向力

4. 结论

通过对 AZ91 镁合金热力耦合的数值模拟, 研究不同几何形状的搅拌头对搅拌头受力的影响, 进一步分析工艺参数变化对受力的影响, 得出以下结论:

- 1) 采用全热力耦合的方法对搅拌头受力进行预测是可行的;
- 2) 搅拌头几何形状是影响搅拌头受力的重要因素, 相较于平轴肩圆柱形搅拌头, 采用带锥角的搅拌头会使搅拌头受力增加, 而采用带凹角的轴肩会使搅拌头受力减小;
- 3) 焊接工艺参数的改变会影响搅拌头受力, 焊速升高, 搅拌头受力增大; 转速升高, 搅拌头受力减小。

基金项目

大连交通大学大学生创新创业训练计划项目(2018-180), 辽宁省自然科学基金(20170540120, 2015020120), 大连市高层次人才创新支持计划(2015R075)。

参考文献

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., *et al.* (1991) Friction Stir Butt Welding: International Patent Application No. PCT/GB92102203 and Great Britain Patent. Application No.9125978.8.
- [2] 万震宇, 张昭. 基于网格重剖分的搅拌摩擦焊接数值模拟及搅拌头受力分析[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 107-112.
- [3] 谭治军, 吴奇, 张昭. 搅拌摩擦焊中不同搅拌头形状对搅拌头疲劳与损伤影响的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2016, 45(19): 171-178.
- [4] 谭治军, 吴奇, 张昭. 不同铝合金搅拌摩擦焊搅拌头磨损的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2017,46(7): 206-213.
- [5] Pashazadeh, H., Teimournezhad, J. and Masoumi, A. (2014) Numerical Investigation on the Mechanical, Thermal, Metallurgical and Material Flow Characteristics in Friction Stir Welding of Copper Sheets with Experimental Verification. *Materials and Design*, **55**, 619-632.
- [6] Jain, R., Pal, S.K. and Singh, S.B. (2014) Finite Element Simulation of Temperature and Strain Distribution in Al2024 Aluminum Alloy by Friction Stir Welding. *5th International & 26th All India Manufacturing Technology Design and Research Conference (AIMTDR 2014)*, Guwahati, 12-14 December 2014.
- [7] Jain, R., Pal, S.K. and Singh, S.B. (2016) A Study on the Variation of Forces and Temperature in a Friction Stir Welding Process: A Finite Element Approach. *Journal of Manufacturing Processes*, **23**, 278-286.
- [8] Su, H., Wu, C.S., Pittner, A., *et al.* (2013) Simultaneous Measurement of Tool Torque, Traverse Force and Axial Force in Friction Stir Welding. *Journal of Manufacturing Processes*, **15**, 495-500.
- [9] Sibalic, N., Vukcevic, M., Janjic, M., *et al.* (2016) A Study on Friction Stir Welding of AlSi1MgMn Aluminum Alloy Plates. *Tehnicki Vjesnik*, **23**, 653-660.
- [10] Asadi, P., Mahdavejad, R.A. and Tutunchilar, S. (2011) Simulation and Experimental Investigation of FSP of AZ91 Magnesium Alloy. *Materials Science and Engineering A*, **528**, 6469-6477.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org