

引文格式: 史建猛, 李宾良, 张海宝. 基于正交试验法的 7055T7751 铝合金时效蠕变性能研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 80-84.

SHI Jianmeng, LI Binliang, ZHANG Haibao. Orthogonal experimental study on creep aging behavior of 7055T7751 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 80-84.

基于正交试验法的 7055T7751 铝合金时效蠕变性能研究

史建猛, 李宾良, 张海宝

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 基于正交试验方法设计了 7055T7751 铝合金的单向拉伸时效蠕变试验, 应用正交多项式回归方法对试验结果进行分析, 得到了 7055T7751 铝合金经时效蠕变后的屈服强度与预应力、时效温度和时效时间的经验公式, 并分析了上述 3 个工艺参数对 7055T7751 铝合金经蠕变后的屈服强度的影响规律。

关键词: 正交试验法; 7055T7751 铝合金; 时效蠕变; 屈服强度; 时效成形; 飞机整体壁板

Orthogonal Experimental Study on Creep Aging Behavior of 7055T7751 Aluminum Alloy

SHI Jianmeng, LI Binliang, ZHANG Haibao

(AVIC Xi'an Aircraft Industrial Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] This paper presents an orthogonal experimental design on the creep aging test for 7055T7751 aluminum alloy by uniaxial stretch. An empirical formula on calculating the yield strength from the prestress, aging temperature and aging duration after creep aging is obtained by analyzing the experimental results using the orthogonal polynomial regression method. In addition, the effects of the three process parameters on the yield strength of 7055T7751 aluminum alloy after creep aging are investigated.

Keywords: Orthogonal experiment; 7055T7751 aluminum alloy; Creep aging; Yield strength; Age forming; Integral aircraft panel

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.12.080

时效成形是利用材料蠕变与应力松弛特性, 使待成形零件的弹性预应变在一定的温度下, 经过一定的时间部分转化为塑性应变, 从而实现零件成形的一种工艺方法, 具有零件残余应力小、工艺可重复性好、能够提高可时效铝合金的抗疲劳性能等优点^[1]。已有的研究往往忽略了升温速率波动对成形件塑性应变量的影响, 而在生产过程中利用热压罐加热大型模具和飞机整体壁板时, 升温速率波动是不可避免的^[2]。对于解决大尺寸、变厚度、内部结构复杂的大型机翼整体壁板成形制造问题, 时效成形技术是一个重要的研究方向。由于时效成形机理尚不明确、壁板零件形状复杂、成形工艺参数多以及成形过程的非线性, 使得时效应力松弛成形工艺参数难以准确确定、时效应力松弛成形过程难以描述, 所以需要进行大量的基础试验, 才能找出时效应力松弛成形的优化成形条件^[3]。

7055 铝合金是在 7050 和 7150 的基础上进一步提高 Zn 的含量发展起来的, 其锻件、厚板和挤压件主要用于抗压结构^[4]。本文选取飞机壁板广泛采用的 7055T7751 铝合金, 以预应力、时效温度和时效时间对 7055T7751 铝合金时效蠕变的力学性能的影响作为研究对象, 设计单向拉伸时效蠕变的正交试验, 通过统计方法处理试验数据进而分析上述工艺参数对 7055T7751 铝合金力学性能的影响规律。

1 正交试验方案设计

1.1 试验材料

本文以 7055T7751 铝合金为研究对象, 对其进行单向拉伸时效蠕变试验, 试件按 GB/T2039—1997^[5] 规定设计, 形状和尺寸如图 1 所示。时效后的拉断试件按图 2 进行铣削加工(单位 mm), 试件厚度介于 2.0~2.3mm

之间。

1.2 试验流程

1.2.1 蠕变试验

试验前首先检测并启动计算机和保温炉。然后按以下步骤控制蠕变过程：

(1) 准备——首先对 7055T7751 铝合金试件(图 1)进行打磨,并测量截面的面积;

(2) 安装——将试件装夹好,完成试验参数的设置;

(3) 加热——升高炉内温度,升温速率 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$,使得炉内温度稳定在目标温度范围内,(根据蠕变或应力松弛试验标准,温度偏差在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内);

(4) 加载——采用应力控制进行加载,通过试验机横梁移动将试件应力由 0 加载到目标应力值;

(5) 保温——试验过程中保持应力不变,记录应变随时间的变化过程;

(6) 降温——在蠕变结束后对试件进行降温处理,降温速率 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$,使得温度由给定的时效温度降为室温,同时保持应力不变;

(7) 卸载——保温炉温度降为室温后,通过力控制对试件进行卸载,存储试验数据;

(8) 数据处理——处理试验数据并进行初步分析。

1.2.2 拉断试验

将经时效蠕变后的试件按图 2 所示的尺寸进行铣削加工,然后在电子万能拉伸机上进行拉断试验,记录材料的弹性模量和屈服强度等力学性能指标。

1.2 正交试验设计

本试验主要研究预应力、时效温度和时效时间对材料力学性能的影响规律,试验因素为预应力、时效温度

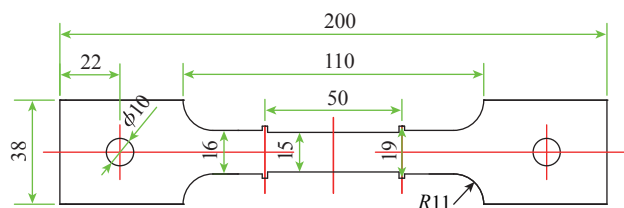


图 1 单向拉伸试件平面图

Fig.1 Drawing of specimen for uniaxial stretch

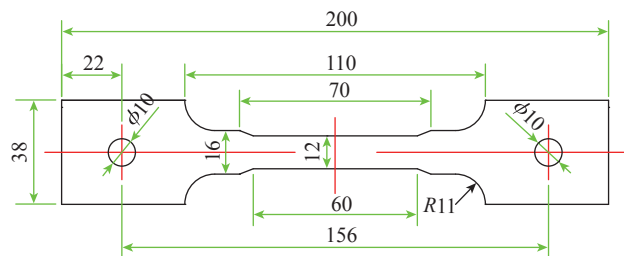


图 2 拉断试件平面图

Fig.2 Drawing of stretched specimen

和时效时间,主要衡量指标有屈服强度和弹性模量。该试验属于多因素和因素多水平问题,如果对每个因素不同水平的相互搭配进行全面试验的话,工作量将会很庞大,故可采用正交试验方法设计试验,并应用统计方法分析试验结果,可通过少量的试验获得较多的信息以得到上述 3 个工艺参数对材料弹性模量和屈服强度的影响规律,正交试验法的相关知识请参阅文献 [6]。

为节省试验成本,对每个因素取 3 个水平察看 3 个因素对衡量指标的影响规律,见表 1。不考虑因素间的交互作用,选取 $L_9(3^4)$ 正交表,试验方案见表 2。

2 试验结果分析

2.1 试验结果

根据表 1、2 的方案进行 7055T7751 铝合金薄板件的单向拉伸时效蠕变试验,其中第 9 组试件在蠕变时效过程中发生失效破坏,其蠕变应变曲线如图 3 所示,说明材料在 170°C 、预应力为 280MPa 的条件下进行蠕变时,经过第 II 阶段的稳定蠕变期后快速进入失效破坏阶段,导致变形突然增大,最终断裂破坏,破坏后的试件如图 4 所示。

试验得到材料的弹性模量和屈服强度见表 3,同等

表 1 单向拉伸时效蠕变试验参数

Table 1 Experimental parameters in creep age test by uniaxial stretch

因素	水平		
	1	2	3
初始应力 A/MPa	120	200	280
时效温度 $B/^{\circ}\text{C}$	120	145	170
时效时间 C/h	8	12	16

表 2 单向拉伸时效蠕变试验方案

Table 2 Experimental design of uniaxial stretch creep age test

序号	A	B	C	4
	1	2	3	
S1	1	1	1	1
S2	1	2	2	2
S3	1	3	3	3
S4	2	1	2	3
S5	2	2	3	1
S6	2	3	1	2
S7	3	1	3	2
S8	3	2	1	3
S9	3	3	2	1

条件下未经蠕变试验的 7055T7751 铝合金的参数为弹性模量 70.4GPa,屈服强度 614MPa。

从表 3 中可以初步看出,时效蠕变前后,材料弹性模量变化很小,所以本节以屈服强度作为材料力学性能的评价指标,对数据进行统计分析。

2.2 正交多项式回归分析

便于计算分析,把表 3 的屈服强度减去 500MPa,然

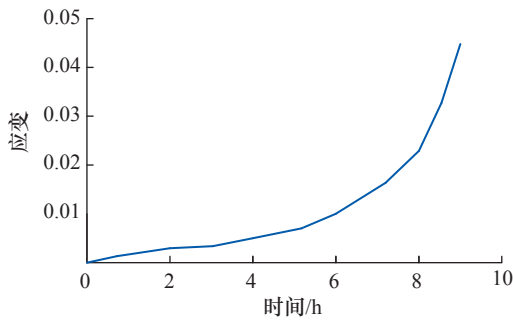


图 3 时效蠕变试验 S9 试件蠕变曲线

Fig.3 Creeping curve of S9 sample from creep aging test

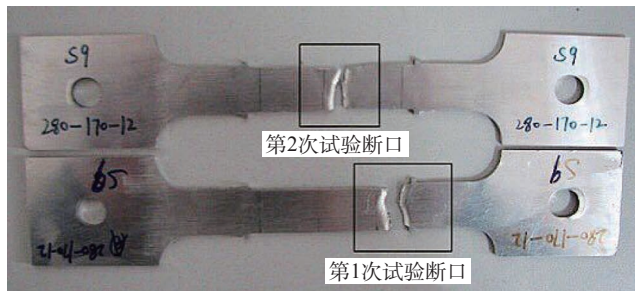


图 4 试验组 S9 试件

Fig.4 Experimental group S9 sample

表 3 试验结果记录

Table 3 Experimental results

序号	A	B	C	4	屈服强度 σ / MPa	弹性模量 / GPa
	1	2	3			
S1	1	1	1	1	595	71.4
S2	1	2	2	2	542	70.7
S3	1	3	3	3	435	72.9
S4	2	1	2	3	605	71.4
S5	2	2	3	1	550	71.7
S6	2	3	1	2	460	70.4
S7	3	1	3	2	590	73.9
S8	3	2	1	3	570	71.2
S9	3	3	2	1	—	—

注:由于蠕变过程中发生蠕变破坏,所以试验编号 S9 数据空缺。

后填入正交表 2 右侧,分别计算各列 1、2、3 水平的数据之和 I、II、III,数据总和 T 及总平均值 μ ,填入正交表,见表 4 (S9 试件在蠕变过程中失效破坏,为了保证数据的完整性,以 450MPa 代替该试验条件下的屈服强度)。

正交表的均衡搭配性质保证了对某一因子的效应及变动计算完全可以像单因子一样进行。对于因子 A (预应力),设效应函数(描述一个因子取某一水平时,使得指标相对总平均的偏差量)具有正交多项式的形式,即:

$$\varphi(A') = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 P_1(A') + \tilde{a}_2 P_2(A') \quad (1)$$

由于只有 3 个水平,至多可以展至二次正交多项式。根据文献 [5] 计算得因子 A (预应力)、因子 B (时效温度)和因子 C (时效时间)对应的正交多项式及其变动分别为:

$$\tilde{a}_0 = 0, \tilde{a}_1 = \frac{19}{3}, \tilde{a}_2 = -8$$

$$\tilde{b}_0 = 0, \tilde{b}_1 = -\frac{445}{6}, \tilde{b}_2 = -31.5$$

$$\tilde{c}_0 = 0, \tilde{c}_1 = -\frac{25}{3}, \tilde{c}_2 = 1$$

$$S_{\tilde{a}_1} = 240.67, S_{\tilde{a}_2} = 128$$

$$S_{\tilde{b}_1} = 33004, S_{\tilde{b}_2} = 1984.5$$

$$S_{\tilde{c}_1} = 416.67, S_{\tilde{c}_2} = 2$$

由正交表 4 的第 4 列计算出误差的变动和自由度为:

表 4 试验结果及数据处理

Table 4 Experimental results and data processing

序号	A	B	C	4	$\sigma-500\text{MPa}$
	1	2	3		
S1	1	1	1	1	95
S2	1	2	2	2	42
S3	1	3	3	3	-65
S4	2	1	2	3	105
S5	2	2	3	1	50
S6	2	3	1	2	-40
S7	3	1	3	2	90
S8	3	2	1	3	70
S9	3	3	2	1	-50
I	72	290	125	95	$T=297$ $\mu=33$
II	115	162	97	92	
III	110	-155	75	110	

$$S_{\text{误}} = S_4 = 62, f_4 = 3 - 1 = 2$$

则误差的平均变动为:

$$\frac{S_4}{f_4} = \frac{62}{2} = 31$$

比较所有因子的效应函数各系数的变动与 S_4/f_4 的大小,发现 $S_{\tilde{c}_2} < S_4/f_4$,则应将其并入误差变动,最后得误差的变动和自由度为:

$$S_{\text{误}} = S_4 + S_{\tilde{c}_2} = 62 + 2 = 64, f_{\text{误}} = f_4 + 1 = 3$$

正交试验表中通常用 F 值与临界值比较判断来检验各因素影响的显著性,因子 F 值表达式为:

$$F = \frac{S_{\text{因}}/f_{\text{因}}}{S_{\text{误}}/f_{\text{误}}} \sim F_{\alpha}(f_{\text{因}}, f_{\text{误}}) \quad (2)$$

根据式(2)计算得到各因子效应函数的系数显著性见表5。

综上,可得到3个影响因子A、B、C的效应函数分别是:

$$\phi(A) = 6.33 \times \left(\frac{A-40}{80} - 2 \right) - 8 \times \left(\left(\frac{A-40}{80} - 2 \right)^2 - \frac{2}{3} \right)$$

$$\phi(B) = -74.17 \times \left(\frac{B-95}{25} - 2 \right) - 31.5 \times \left(\left(\frac{B-95}{25} - 2 \right)^2 - \frac{2}{3} \right)$$

$$\phi(C) = -8.33 \times \left(\frac{C-4}{4} - 2 \right)$$

则当因子A、B、C任意取一个水平时,可用下式估计材料的屈服强度。

$$\sigma_s = \phi(A) + \phi(B) + \phi(C) + 33 + 500 \quad (3)$$

其误差为:

$$S_{\sigma_s} = \sqrt{\frac{64}{3}} = 4.62 \text{ 的 } 2 \text{ 倍, 即 } 9.24 \text{ MPa.}$$

为了更直观、定量地分析上述3个因素对屈服强度的影响,绘出了不同时效时间下屈服强度与时效温度的

表5 正交多项式系数的显著性

Table 5 Significance of orthogonal polynomial coefficients

方差来源	变动	自由度	F 值	显著性
\tilde{a}_1	240.67	1	11.28	*
\tilde{a}_2	128	1	6	o
\tilde{b}_1	33004	1	1547.06	**
\tilde{b}_2	1984.5	1	93.02	**
\tilde{c}_1	416.67	1	19.53	*
误差	64	3	—	—

注: $F_{0.10}(1,3)=5.54$, $F_{0.05}(1,3)=10.13$, $F_{0.01}(1,3)=34.12$; “**”显著水平为1%，“*”显著水平为5%，“o”显著水平为10%。

关系曲线,如图5所示。可以得出以下结论:

(1)通过正交多项式回归分析估计的屈服强度与试验值相差很小。如时效时间为8h(图5(a)),预应力为120MPa,时效温度为120℃时,试验值为595MPa,通过正交多项式预估为596.33MPa;时效时间为16h(图5(c)),预应力为200MPa,时效温度为145℃时,试验值为550MPa,通过正交多项式预估为551.33MPa。

(2)在同一时效时间下,材料的屈服强度随时效温度的升高显著下降。时效温度由120℃升高到170℃,材料的屈服强度由600MPa降为450MPa左右;

(3)在同一时效时间下,预应力对材料的屈服强度影响较小。当预应力从120MPa增大到200MPa时,材料的屈服强度增大20MPa左右,预应力增大到280MPa时,屈服强度变化不大。

3 结论

(1)7055T7751 铝合金在时效蠕变前后,弹性模量变化不大。

(2)时效温度对7055T7751 铝合金屈服强度的影响最为显著,随着时效温度的升高,材料的屈服强度显著下降。

(3)预应力和时效时间对7055T7751 铝合金屈服强度的影响较小,随着时效时间的延长,材料的屈服强度逐渐降低,而初始应力对屈服强度的影响很小。

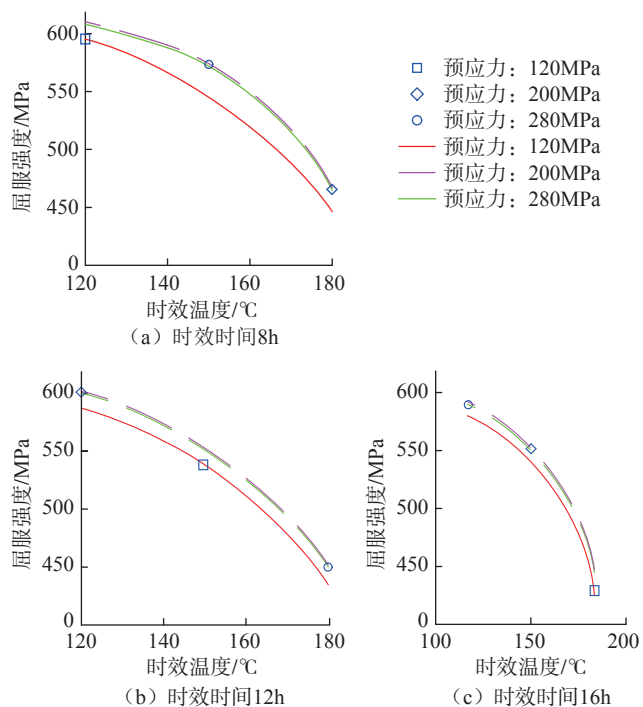


图5 屈服强度与时效温度的关系

Fig.5 Relationship between yield strength and aging temperature

参考文献

[1] 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 1-8.
 ZENG Yuansong, HUANG Xia, HUANG Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 1-8.

[2] 吕源. 2124 铝合金时效成形保温工艺优化方法 [J]. 现代制造技术与装备, 2018(6): 91-92.
 LÜ Yuan. Optimization method of thermal insulation process for 2124 aluminum alloy aging forming[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(6): 91-92.

[3] 黄晓婧. 双曲率铝合金薄板件的时效应力松弛变形规律研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
 HUANG Xiaojing. Research on aging stress relaxation deformation law of double curvature aluminum alloy sheet[D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2010.

[4] 李平. 7055 铝合金热处理的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
 LI Ping. Research on heat treatment of 7055 aluminum alloy[D]. Shenyang: Northeast University, 2005.

[5] 国家技术监督局. 金属拉伸蠕变及持久试验方法: GB/T 2039—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
 The State Bureau of Quality Technical Supervision. Creep and stress rupture test method for metals: GB/T 2039—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.

[6] 北京大学数学力学系概率统计组. 正交设计法 [M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1976.
 Probability and Statistics Group, Department of Mathematical Mechanics, Peking University. Orthogonal design method[M]. Beijing: Petrochemical Industry Press, 1976.

[7] 刘大海, 谢永鑫, 黎俊初, 等. 7075 铝合金蠕变时效成形工艺参数对回弹的影响 [J]. 机械工程材料, 2015, 39(12): 5-8, 70.
 LIU Dahai, XIE Yongxin, LI Junchu, et al. Influences of process parameters on springback of 7075 aluminum alloy during creep age forming[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(12): 5-8, 70.

[8] 湛利华, 杨有良. 大型构件蠕变时效成形技术研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(13): 16-22.
 ZHAN Lihua, YANG Youliang. Research on creep aging forming technology of large components [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(13): 16-22.

[9] 任巍巍, 邹林池, 张兴峰, 等. 7050 铝合金时效成形中应力松弛行为与回弹方程 [J]. 2016, 44(9): 89-95.
 REN Weiwei, ZOU Linchi, ZHANG Xingfeng, et al. Stress relaxation behavior and springback equation in aging forming of 7050 aluminum alloy[J]. 2016, 44 (9): 89-95.

[10] 马振武, 童国权, 徐宝林. 蠕变时效成形回弹预测及工装型面优化 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(1/2): 66-70.
 MA Zhenwu, TONG Guoquan, XU Baolin. Springback prediction and tooling surface optimization of creep aging forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(1/2): 66-70.

[11] 甘忠, 张尧, 冯爽, 等. 蠕变时效成形工艺参数多目标优化 [J]. 机械科学与技术, 2017, 36(7): 1116-1122.

GAN Zhong, ZHANG Yao, FENG Shuang, et al. Multi objective optimization of creep aging process parameters[J]. Mechanical Science and Technology, 2017, 36(7): 1116-1122.

[12] 马振武, 童国权, 陈峰, 等. LY12 蠕变时效成形机制及回弹规律研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 57(5): 67-71.
 MA Zhenwu, TONG Guoquan, CHEN Feng, et al. Investigation of the creep age forming mechanism and springback behavior of LY12[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 57(5): 67-71.

通讯作者: 史建猛, 高级工程师, 研究方向为对材料加工、零件成形、部件装配等飞机制造过程的控制。
 (责编 阳光)

(上接第 79 页)

[7] 大连企业研发出结合 3D 打印技术的五轴联动机床 [J]. 机械, 2016, 43(1): 19.
 Dalian enterprises have developed a five-axis linkage machine tool combined with 3D printing technology[J]. Machinery, 2016, 43(1): 19.

[8] 郭观林. 金属激光增减材复合工艺及整机结构 CAE 分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
 GUO Guanlin. Metal laser hybrid additive and subtractive manufacturing processes and the CAE analysis of the machine structure[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[9] 彭伟, 王宝和, 邵璟. 增减材复合机床开发及应用研究项目 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2018(4): 47-50.
 PENG Wei, WANG Baohe, SHAO Jing. Development and application of the additive and subtractive materials compound machine tool[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2018(4): 47-50.

[10] ZHU Z C, DHOKIA V, NASSEHI A, et al. Investigation of part distortions as a result of hybrid manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 23-32.

[11] HANSEL A, MORI M, FUJISHIMA M, et al. Study on consistently optimum deposition conditions of typical metal material using additive/subtractive hybrid machine tool[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 579-582.

[12] DU W, BAI Q, ZHANG B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 1018-1030.

[13] 朱剑英. 研发航空制造的先进理念与创新技术 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 1-4, 24.
 ZHU Jianying. Advanced idea and innovative technologies for R & D of aviation manufacturing[J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(2): 1-4, 24.

[14] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望 [J]. 航空动力学报, 2004(3): 375-382.
 ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004(3): 375-382.

通讯作者: 王振忠, 副教授, 博士, 研究方向为精密加工装备及工艺技术、光机电一体化。
 (责编 阳光)