

引文格式: 周丽娜, 付明杰, 李晓华, 等. TA32 高温钛合金超塑性性能研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 86-90.

ZHOU Lina, FU Mingjie, LI Xiaohua, et al. Superplastic behavior of TA32 high temperature titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 86-90.

## TA32 高温钛合金超塑性性能研究

周丽娜<sup>1,2,3</sup>, 付明杰<sup>1</sup>, 李晓华<sup>1,2,3</sup>, 韩秀全<sup>1,2,3</sup>

(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)

[摘要] 采用恒应变速率法对TA32高温钛合金板材进行超塑拉伸,研究了温度920-980℃和应变速率 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下材料的超塑变形行为,并分析了锥形件胀形过程的变形特征和微观组织演变规律。结果表明,TA32合金具有良好的超塑性变形能力,温度920℃、应变速率 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时最大延伸率达到864%。温度为940℃和960℃时,受平面应力变形的锥形件高度较高,分别为90mm和92mm;经过不同变形量的变形后微观组织变化并不显著。

关键词: TA32; 高温钛合金; 超塑性; 胀形; 显微组织

### Superplastic Behavior of TA32 High Temperature Titanium Alloy

ZHOU Lina<sup>1,2,3</sup>, FU Mingjie<sup>1</sup>, LI Xiaohua<sup>1,2,3</sup>, HAN Xiuquan<sup>1,2,3</sup>

(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)

[ABSTRACT] The superplastic behavior of TA32 titanium alloy sheet was investigated by constant strain rate tensile tests at deformation temperature range of 920-980℃ and strain rate range of  $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . The deformation characteristics and microstructure evolution during superplastic bulging of cone shaped part was analyzed. The results show that TA32 alloy provides superior superplastic deformation capability, with a maximum elongation up to 864% at 920℃ with the strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . The height of the cones is higher at 940℃ and 960℃, 90mm and 92mm, respectively, and microstructure has no significant change with different deformation.

Keywords: TA32; High temperature titanium alloy; Superplasticity; Bulging; Microstructure

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.05.086

超塑成形是一种低成本、高效益、近无余量的成形工艺,具有有效降低结构重量、提高结构的完整性和承载效率的优点,在航空航天领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。TA32合金是在TA12合金基础上进行成分改进而得到的一种新型近 $\alpha$ 型钛合金,名义成分为Ti-5.5Al-3.5Sn-3.0Zr-0.7Mo-0.3Si-0.4Nb-0.4Ta<sup>[3]</sup>。该合金在550℃具有良好的综合性能,在低于550℃的环境可长时间使用,短时使用温度可达600℃,在超音速飞行器和航空

发动机中具有广泛的应用前景。目前国内已针对TA32合金板材开展了热变形行为的研究<sup>[4-7]</sup>,但超塑成形相关的研究较少<sup>[8-9]</sup>。

在本研究中,通过单向超塑拉伸试验研究变形工艺参数(应变速率、变形温度)对TA32合金超塑性的影响规律,获得最大超塑延伸率的工艺参数。通过锥形件的超塑胀形,研究平面应力变形条件下TA32合金的变形特征和微观组织演变规律,为结构件的工艺设计提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验所用材料为宝钛集团提供的 1.5 mm 厚退火态 TA32 钛合金, 板材的原始显微组织如图 1 所示, 由白色等轴  $\alpha$  和黑色  $\beta$  相组成,  $\beta$  相呈等轴状或长条状, 平均晶粒尺寸小于  $5\ \mu\text{m}$ 。

### 1.2 试验方法

(1) 单向超塑拉伸试验。

利用线切割加工出如图 2 所示的拉伸试样, 试样表面经除油处理和砂纸研磨, 保证表面平整、无裂纹。试样标距表面均匀涂抹抗氧化涂料。超塑拉伸试验在 SANS-CMT4104 型微机控制电子万能试验机上进行, 试样加热采用电阻炉, 工作区的温度误差  $\leq \pm 5\ ^\circ\text{C}$ 。超塑拉伸时, 拉伸试样加热到温后保温 5 min, 以保证试样温度分布均匀, 然后进行恒应变速率单向超塑拉伸, 试验过程中通过横梁位移来计算试样变形。选取的超塑拉伸温度为  $920\ ^\circ\text{C}$ 、 $940\ ^\circ\text{C}$ 、 $960\ ^\circ\text{C}$ 、 $980\ ^\circ\text{C}$ , 应变速率为  $5.0 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$ 。

(2) 锥形件超塑胀形试验。

板材下料尺寸为  $180\ \text{mm} \times 180\ \text{mm}$ , 板料上下表面均匀喷涂止焊剂。锥形件超塑胀形试验在专用的胀形模具中进行, 如图 3 所示。试验时, 先将板材放置在上下模中间, 并加热模具, 当温度达到  $200\ ^\circ\text{C}$  时, 模具中加入  $0.02\ \text{MPa}$  保护气, 当模具温度达到目标温度, 上模通入氩气使板料开始胀形, 胀形过程中采用匀速连续加压, 加压速率为  $0.02\ \text{MPa}/\text{min}$ , 直至零件吹破为止。选

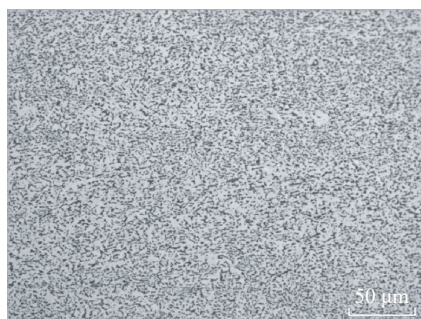


图 1 TA32 合金板材原始显微组织

Fig.1 Initial microstructure of TA32 titanium alloy sheet

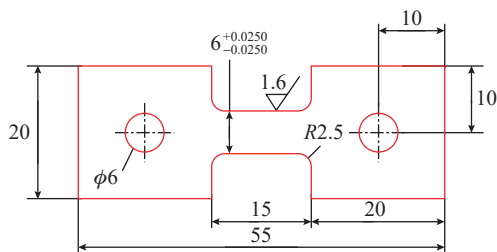


图 2 拉伸试样 (mm)

Fig.2 Tensile specimen (mm)

取成形温度为  $920\ ^\circ\text{C}$ 、 $940\ ^\circ\text{C}$ 、 $960\ ^\circ\text{C}$ 、 $980\ ^\circ\text{C}$ 。取出零件后, 从锥形件不同位置取样, 采用 OLYMPUS BX41M 金相显微镜对显微组织进行观察分析。

## 2 结果及讨论

### 2.1 应力应变曲线

图 4 为相同应变速率不同变形温度的拉伸真应力 -

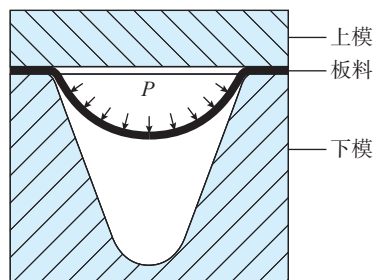
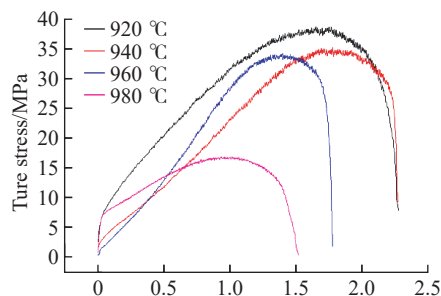
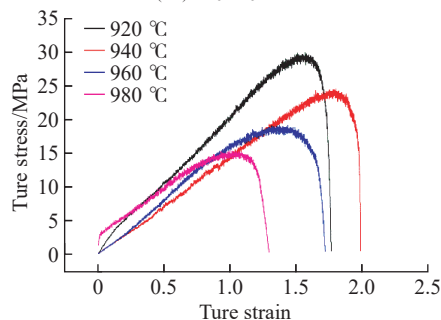


图 3 锥形件超塑胀形示意图

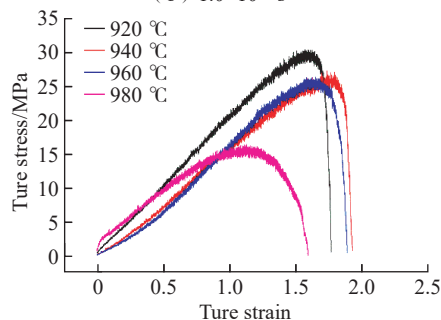
Fig.3 Superplastic bulging diagram of cone shape part



(a)  $1.0 \times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$



(b)  $1.0 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$



(c)  $5.0 \times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$

图 4 TA32 合金在不同变形温度下的真应力 - 应变曲线

Fig.4 True stress-strain curves of TA32 alloy at different deformation temperatures

应变曲线,可以看出曲线呈现出明显的加工硬化变形特征,在所有变形条件范围内应力均随着应变的增加而增加,当变形大于峰值应变后,应力迅速减小,发生断裂。原因是恒应变速率拉伸过程中随着变形量的增加,横梁的移动速度增加,材料发生动态再结晶软化的速度小于加工硬化的速度。然而,采用恒速度超塑拉伸的曲线特征则与恒应变速率的相反,峰值应变通常较小,变形继续增加时则发生软化,即应力随着应变的增加而减小,应变速率逐渐减小。由此可以推断,动态再结晶的软化作用取决于变形历史。

图5为应变速率对真应力-应变曲线的影响,可见,除960℃之外,其他3个温度变形时,应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的应力-应变曲线几乎重合,表

明低应变速率条件下应变速率对流变应力的影响较小。

## 2.2 超塑延伸率

图6为不同参数条件下的超塑延伸率,由图6(a)可知,在同一变形温度下,超塑性分为两种类型,变形温度为920℃和940℃时,超塑延伸率均随应变速率的增加而增加,在应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时最高,分别为864%和862%;而变形温度为960℃和980℃时,超塑延伸率随应变速率的增加先降低后缓慢增加,在应变速率为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时最高,分别为554%和387%。由图6(b)可知,在同一应变速率下,超塑延伸率随着温度的升高先增加后降低,变形温度为940℃时最高,变形温度为980℃时,超塑延伸率最低,均小于400%。因此,采用单向超塑拉伸时,温度920~940℃和高应变速率

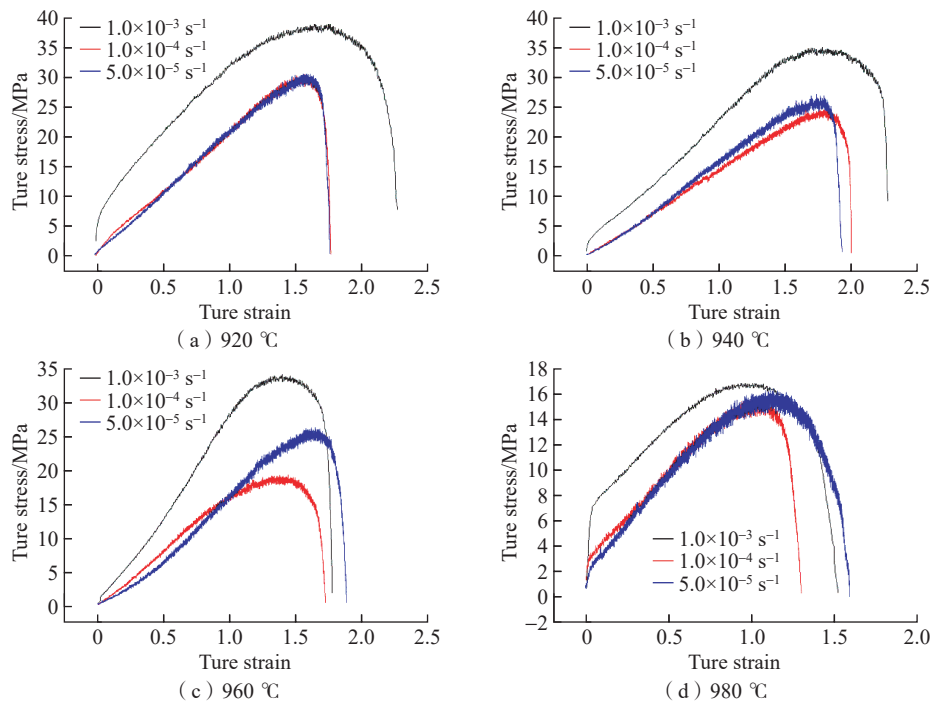


图5 TA32合金在不同应变速率下的真应力-应变曲线

Fig.5 True stress-strain curves of TA32 alloy at different strain rates

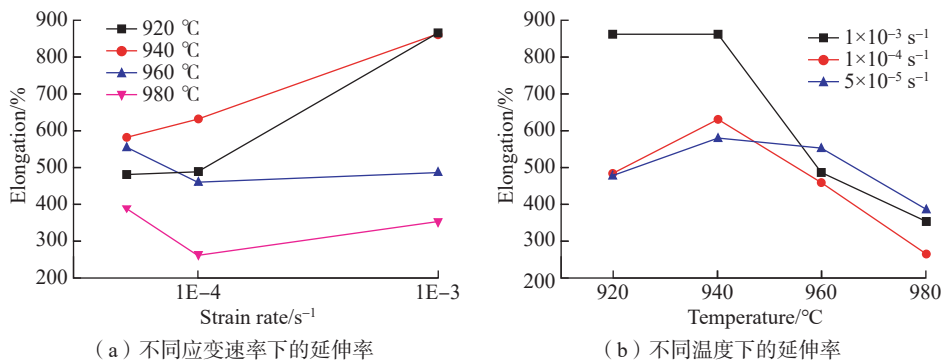


图6 TA32合金在不同参数条件下的超塑延伸率

Fig.6 Elongation of TA32 alloy at different deformation conditions

$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时为最佳变形条件,变形温度不宜超过  $980 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 锥形件超塑胀形

图7为锥形件超塑胀形后的结果,可知锥形件超塑胀形后外观质量良好,失效位置均位于变形量最大的锥顶。

对不同温度条件下锥形件的胀破压力和高度进行比较(图8),由图8(a)可见,随着变形温度的增加,锥形件胀破压力逐渐减小,温度为  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  时基本相同,均为  $0.6 \text{ MPa}$ ,温度为  $920 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  分别为  $1.1 \text{ MPa}$  和  $1.0 \text{ MPa}$ 。然而,不同温度下的锥形件的高度差

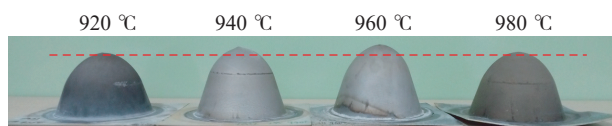
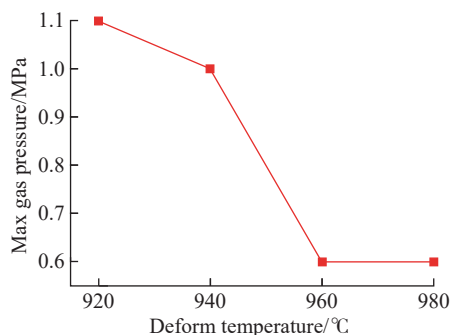
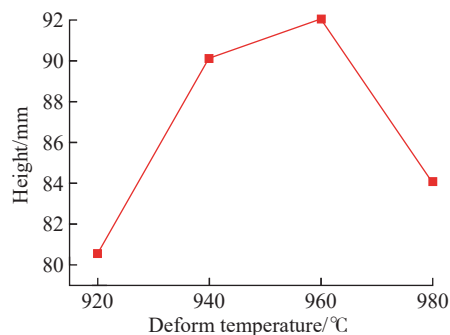


图7 超塑成形锥形件外观

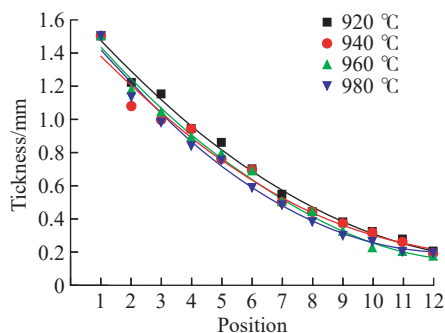
Fig.7 Macro-morphologies of superplastic formed cone shape part



(a) 胀破气压



(b) 锥形件高度



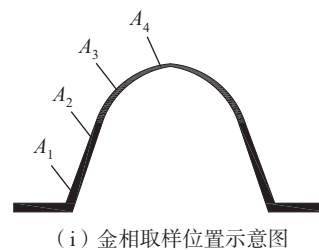
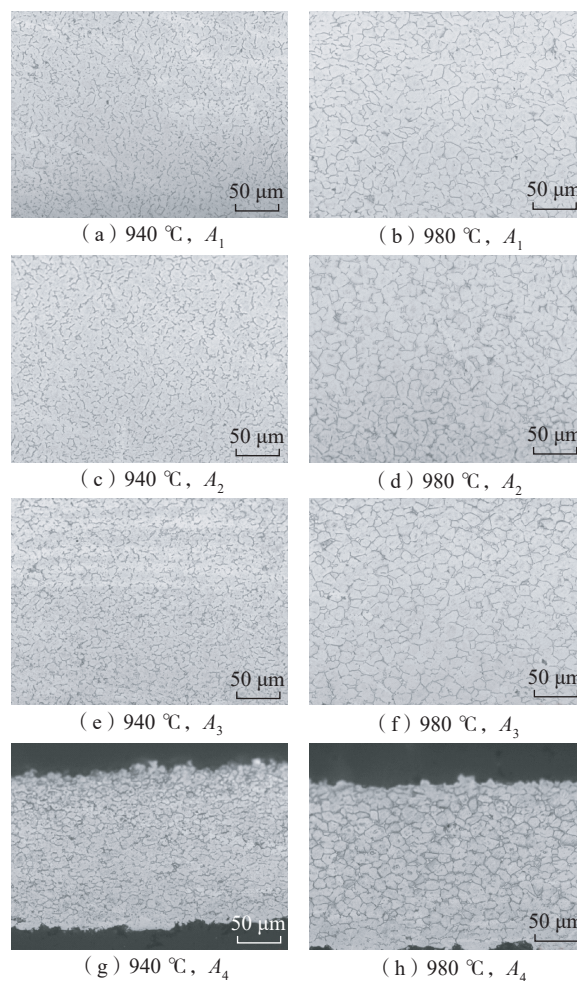
(c) 壁厚变化

图8 超塑成形锥形件成形结果

Fig.8 Result of superplastic formed cone shape part

别较大,在  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  时,锥形件的高度较高,分别为  $90 \text{ mm}$  和  $92 \text{ mm}$ ,该结果对结构件的工艺设计具有很重要的参考价值。由图8(c)可见,4个温度条件下试件贴模后的壁厚变化呈线性减薄,接近锥顶位置未贴膜,壁厚减薄呈抛物线变化。

图9为锥形件在  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $980 \text{ }^\circ\text{C}$  成形后不同位置的微观组织,其中  $A_1 \sim A_4$  变形量逐渐增大。可见,同一变形温度下经过不同变形量变形后的微观组织变化并不显著,均为细小等轴晶粒,且随着变形温度的升高,晶粒



(i) 金相取样位置示意图

图9 锥形件在不同位置的微观组织

Fig.9 Microstructures of cone shape part at different position

逐渐粗化,940 ℃和 980 ℃成形后的平均晶粒尺寸分别约为 9 μm 和 11 μm。

### 3 结论

(1) 在 920~960 ℃、应变速率  $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  条件下,TA32 合金板材具有良好的超塑性,采用单向超塑拉伸时,温度 920~940 ℃和高应变速率  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时为最佳变形条件。

(2) 随着变形温度的增加,锥形件胀破压力逐渐减小,在 960 ℃和 980 ℃时最小,为 0.6 MPa;在 940 ℃和 960 ℃时,锥形件的高度较高,分别为 90 mm 和 92 mm;经过不同变形量的变形后的微观组织变化并不显著,该结果为结构件的工艺设计提供参考。

### 参考文献

[1] 李志强,郭和平.超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J].航空制造技术,2010,53(8):32-35.  
LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(8): 32-35.

[2] HEFTI L D. Innovations in the superplastic forming and diffusion bonded process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(2): 178-182.

[3] 王清江,刘建荣,杨锐.高温钛合金的现状与前景[J].航空材料学报,2014,34(4):1-26.  
WANG Qingjiang, LIU Jianrong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.

[4] FAN R L, WU Y, CHEN M H, et al. Relationship among microstructure, mechanical properties and texture of TA32 titanium alloy sheets during hot tensile deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 928-943.

[5] 吴荣华,陈明和,谢兰生,等.TA32 钛合金高温应力松弛行为及其对应的本构方程[J].稀有金属材料与工程,2019,48(10):3142-3148.  
WU Ronghua, CHEN Minghe, XIE Lansheng, et al. Stress relaxation behavior and corresponding constitutive relation of TA32 titanium alloy at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3142-3148.

[6] 陈灿,陈明和,谢兰生,等.TA32 新型钛合金高温流变行为及本构模型研究[J].稀有金属材料与工程,2019,48(3):827-834.  
CHEN Can, CHEN Minghe, XIE Lansheng, et al. Flow behavior of TA32 titanium alloy at high temperature and its constitutive model[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(3): 827-834.

[7] 龚宗辉,谢兰生,陈明和,等.新型 TA32 钛合金板的高温拉伸变形行为[J].机械工程材料,2019,43(1):69-74.  
GONG Zonghui, XIE Lansheng, CHEN Minghe, et al. High temperature tensile deformation behavior of new titanium alloy sheet TA32[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(1): 69-74.

[8] 刘章光,李培杰,尹西岳,等.变形参数对 TA32 合金的超塑性变形行为及微观组织演化的影响[J].稀有金属材料与工程,

2018, 47(11): 3473-3481.

LIU Zhangguang, LI Peijie, YIN Xiyue, et al. Effects of deformation parameters on the superplastic behavior and microstructure evolution of TA32 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3473-3481.

[9] 程超,陈志勇,刘建荣,等.TA32 钛合金板材的超塑性性能研究[J].钛工业进展,2020,37(2):21-25.

CHENG Chao, CHEN Zhiyong, LIU Jianrong, et al. Research on superplastic behavior of TA32 titanium alloy plate[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(2): 21-25.

通讯作者:周丽娜,工程师,硕士,研究方向为金属成形技术。

(责编 古京)

(上接第 85 页)

[22] 卞永明,马道阳,高飞,等.基于改进 A-Star 算法的 AGV 全局路径规划[J].机电一体化,2019,25(6):9-15.

BIAN Yongming, MA Xiaoyang, GAO Fei, et al. AGV global path planning based on the improved A-Star algorithm[J]. Mechatronics, 2019, 25(6): 9-15.

[23] 吴飞龙,郭世永.基于改进 A\* 算法的 AGV 路径规划[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2020,20(9):90-93.

WU Feilong, GUO Shiyong. AGV's path planning based on improved A\* algorithms[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2020, 20(9): 90-93.

[24] 陆佳依,金晓怡,朱天宝,等.基于改进 A\* 算法的 AGV 路径研究[J].机械设计与研究,2020,36(1):49-52.

LU Jiayi, JIN Xiaoyi, ZHU Tianbao, et al. Research on AGV path based on improved A\* algorithm[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(1): 49-52.

[25] 邢普学,李强,魏巍,等.改进 A\* 算法的 AGV 路径规划在智慧仓储中的应用[J].信息技术,2019,43(5):130-133.

XING Puxue, LI Qiang, WEI Wei, et al. Application of AGV path planning based on improved A\* algorithm in intelligent warehousing[J]. Information Technology, 2019, 43(5): 130-133.

[26] 泰应鹏,邢科新,林叶贵,等.多 AGV 路径规划方法研究[J].计算机科学,2017,44(S2):84-87.

TAI Yingpeng, XING Kexin, LIN Yegui, et al. Research of path planning in multi-AGV system[J]. Computer Science, 2017, 44(S2): 84-87.

[27] 廉胤东,谢巍.基于视觉引导多 AGV 系统的改进 A\* 路径规划算法研究[J].控制与决策,2020,36(8):1881-1890.

LIAN Yindong, XIE Wei. Research on improved A\* path planning algorithm based on vision-guided multi-AGV system[J]. Control and Decision, 2020, 36(8): 1881-1890.

[28] 高新浩,陈晓华,王占山,等.多 AGV 动态交通调度算法设计[J].山东工业技术,2019(9):149-151.

GAO Xinhao, CHEN Xiaohua, WANG Zhanshan, et al. Design of multi-AGV dynamic traffic dispatching algorithm[J]. Shandong Industrial Technology, 2019(9): 149-151.

通讯作者:陈娟,教授,博士生导师,博士,研究方向为检测与智能检测、人工智能及其应用。

(责编 晓月)