

1050 H12 铝合金力学性能的响应曲面模型及优化预测

段伟¹,肖永通^{1*},邝宏聪¹,关耀威¹,罗铁础¹,郭飞跃²,杜新伟²,桂良宝²

(1. 广东省科学院工业分析检测中心,广东广州 510650; 2. 乳源东阳光优艾希杰精箔有限公司,广东韶关 512600)

摘要: 随着全球各国对南极、深海、太空等极端环境探索活动的增加,铝合金材料的低温服役性能日渐凸显重要,开展铝及铝合金在极端温度条件下力学行为与性能的研究具有重要意义。采用一种符合旋转性的球面设计方法—响应曲面设计(Box-Behnken design, BBD),对1050 H12铝合金拉伸试验参数(拉伸速率、试验温度、保温时间)进行了系统的研究,获取拉伸试验参数与1050 H12铝合金的抗拉强度和断后伸长率的关系,同时结合力学试验结果(抗拉强度、断后伸长率)得出最高优度值分别为复相关系数 $r_1^2=0.9991$ 、 $r_2^2=0.9948$ 及显著性水平 P 值(Prob>F)均小于0.0001的可靠数学模型。通过模型及方差分析可知,抗拉强度模型及断后伸长率模型的失拟项分别为0.077和0.117(均大于0.05),表明失拟性检验均为不显著,充分反映了模型试验的误差小,可用于精确分析和预测试验温度、保温时间、拉伸速率与抗拉强度、断后伸长率之间的关系。试验设计方案中3个拉伸试验参数对1050 H12铝合金抗拉强度、断后伸长率的影响从大到小的顺序为试验温度>拉伸速率>保温时间,其中1050 H12铝合金的抗拉强度、断后伸长率均对试验温度十分敏感,且均与试验温度、保温时间呈负相关关系,即在低温条件下1050 H12铝合金会出现低温增强增韧现象。通过响应曲面模型的精确预测得出,当试验温度为-30℃、保温时间为14 min、拉伸速率为9 mm·min⁻¹时,1050 H12铝合金的抗拉强度和断后伸长率会出现峰值。本研究为极端环境下应用1050 H12铝合金提供了有效的数据支撑。

关键词: 1050 H12 铝合金;低温;响应曲面;抗拉强度;断后伸长率;方差分析;拉伸速率;Box-Behnken设计
中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9981(2024)05-0762-07

引文格式: 段伟,肖永通,邝宏聪,等. 1050 H12 铝合金力学性能的响应曲面模型及优化预测[J]. 材料研究与应用,2024,18(5):762-768.

DUAN Wei, XIAO Yongtong, KUANG Hongcong, et al. BBD Modeling and Optimization Prediction of Mechanical Properties of 1050 H12 Aluminum Alloy[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(5): 762-768.

0 引言

铝及铝合金材料具有优良的成型加工、轻质耐腐抗腐、良好的导电及焊接等性能,在工业、家用、国防等各个领域中得到广泛应用^[1-3]。目前,人们对铝合金在室温、高温环境中的服役条件及力学性能的研究已获得一些探索成果。然而,随着全球各国对南极、深海、太空等极端环境探索的增加,铝合金材料的低温服役性能的重要性也日渐凸显,因此开展铝及铝合金在极端温度条件下的力学行为和性能的研究具有重要意义。孙晓红等^[4]研究了6082-T6铝合金在-80—500℃温度区间内的拉伸性能,发现该

金属的抗拉强度随温度的升高而降低,断后伸长率与温度成正比关系。同济大学郭小农等^[5]探索了国产7020-T6铝合金在-120—300℃温度区间内的力学性能,并对抗拉极限强度的高温折减系数和名义屈服强度的低温提高系数进行了拟合。Yan和朱炳麟等^[6-9]研究了6061-T6铝合金低温力学性能,结果表明合金在低温下的拉伸性能与室温下的拉伸性能相比有较大的提高。

本文采用一种符合旋转性的球面设计方法—响应曲面设计(Box-behnken design, BBD)^[10-14],对影响1050 H12铝合金拉伸性能的拉伸速率、试验温

收稿日期:2023-12-14

基金项目:韶关市引进重大科技创新资源项目(220803176272387)

作者简介:段伟,硕士,工程师,研究方向为金属热处理工艺及金属、金属基复合材料增材制造。

Email:865922638@qq.com。

通信作者:肖永通,本科,工程师,研究方向为金属材料性能检测与分析评价。E-mail:1471342426@qq.com。

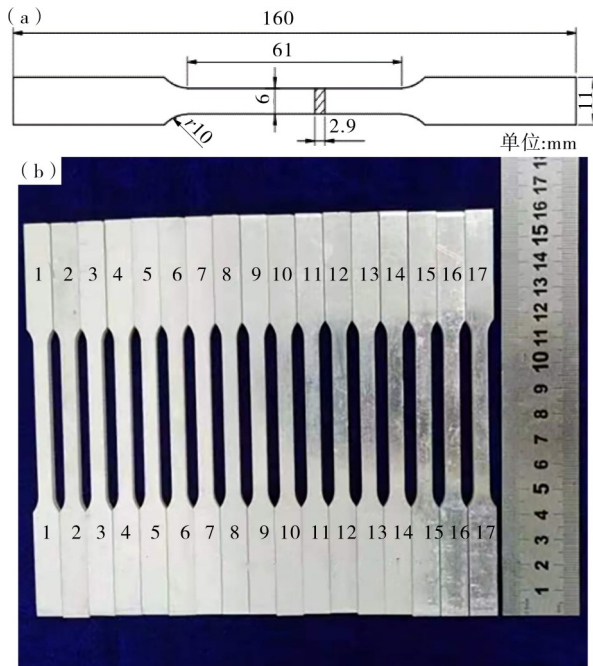
度、保温时间 3 个主要因素参数开展系统的实验设计,得到拉伸试验参数与抗拉强度、断后伸长率的关系模型,并通过模型进一步分析拉伸速率、试验温度和保温时间对 1050 H12 铝合金力学性能的影响,为极端环境中应用 1050 H12 铝合金提供有效数据支撑。

1 试验材料及方法

试验样品材料取自某厂生产的 1050 H12 铝板,使用直读光谱仪(设备型号 SPECTROLAB)测定材料的组成成分(见表 1)。参照 GB/T 16865—2023 中的方法切取拉伸试样,结果如图 1 所示。

表 1 1050 H12 铝合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy

成分	Al	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	V	Zn	Ti
含量 $w/\%$	余量	0.067	0.3	0.006	0.002 5	0.001 7	0.011	0.008 3	0.001 7



(a)—示意图;(b)—实物图。
(a)—schematic diagram;(b)—picture of real products.

图 1 拉伸试样图

Figure 1 Diagram of the tensile specimen

本研究通过 Design Expert 10. 0. 7 软件,采用了响应曲面设计方法对 1050 H12 铝合金拉伸试验参数进行 3 因素 3 水平的试验设计,探究并精确建立拉伸试验参数中 3 个因素(拉伸速率、试验温度、保温时间)与 1050 H12 铝合金抗拉强度及断后伸长率之间的数学模型,最终获得最适合 1050 H12 铝合金服役的拉伸参数条件。图 2 为设计参数取值点示意图。从图 2 可见,试验点分布是由 1 组重复参数组(中心点)和均匀分布在球面的 12 组参数组成。本研究所采用的各拉伸参数因子和水平设计详见表 2,拉伸试验采用 E44. 104 型电子万能试验机,拉伸速率($2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)采用位移控制。

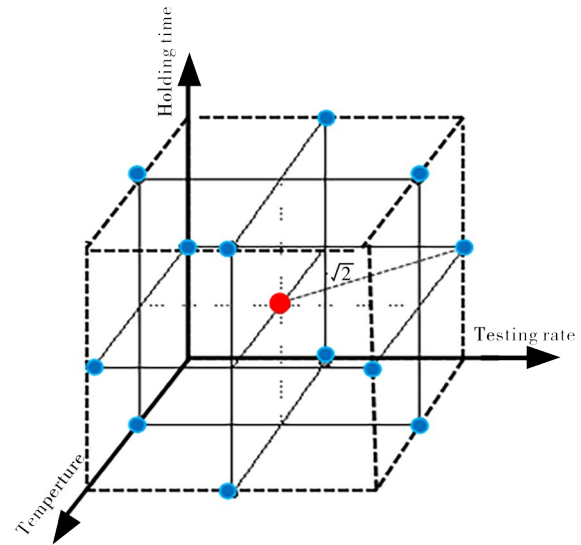


图 2 Box-Behnken 设计的试验点分布示意图

Figure 2 Test point distribution of the Box-Behnken design

表 2 Box-Behnken 响应曲面法试验设计的拉伸试验参数因子和水平

Table 2 Tensile test parameter factors and levels for Box-Behnken response surface design

试验水平	试验参数因子		
	温度 $t/^\circ\text{C}$	保温时间 H / min	拉伸速率 R / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
-1	-30	5	1
0	85	15	5
1	200	25	9

2 试验结果与讨论

2.1 响应曲面试验设计及方差分析

根据 BBD 试验原理,本研究选取拉伸速率(R)、试验温度(t)、保温时间(H)为影响因子,以抗拉强度(R_m)、断后伸长率(E)为响应值。拉伸整体

试验设计包括13组参数,其中1组有5个重复试验点,具体试验设计方案及对应力学性能结果列于表

3。图3为拉伸试验工程应力应变曲线。

表3 BBD试验的方案与结果
Table 3 Design and results of the BBD test

序号	t (A)/ $^{\circ}\text{C}$	H (B)/min	R (C)/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	R_m /MPa	E /%
1	-30	5	5	112	29.5
2	200	5	5	70	23.0
3	-30	25	5	114	27.0
4	200	25	5	65	22.0
5	-30	15	1	112	30.0
6	200	15	1	63	27.0
7	-30	15	9	114	30.5
8	200	15	9	68	22.0
9	85	5	1	87	28.5
10	85	25	1	85	28.5
11	85	5	9	90	26.5
12	85	25	9	91	24.5
13	85	15	5	90	23.0
14	85	15	5	90	23.5
15	85	15	5	90	23.0
16	85	15	5	90	23.0
17	85	15	5	91	23.0

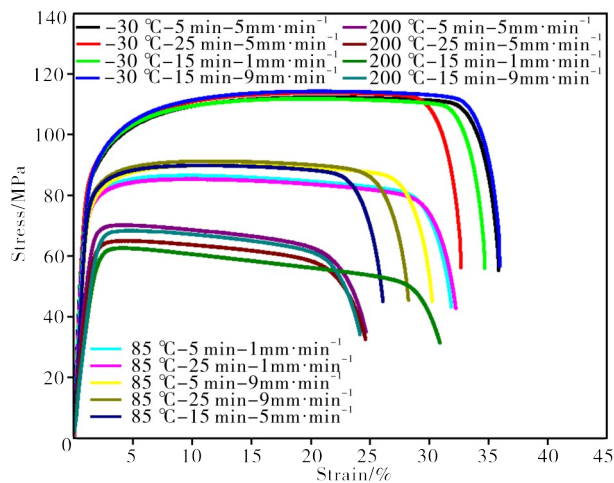


图3 拉伸试验工程应力应变曲线

Figure 3 Tensile test engineering stress-strain curve

采用Design Expert 10.0.7软件,对拉伸试验参数的编码值及对应试样的抗拉强度值和断后伸长率进行系统建模,所得最高优度值分别为 $r_1^2=0.9991$ 、 $r_2^2=0.9948$ 的数学模型,其中 r 为复相关系数,所建的模型见式(1)和式(2)。式中: R_m 为抗拉强度, E 为断后伸长率; A 、 B 、 C 分别为试验温度、保温时间、拉伸速率的编码值为-1、0和1,对应于各工艺参数

的低、中、高3个工艺水平。

$$R_m = 90.2 - 23.25A - 0.5B + 2C - 1.75AB + 0.75(AC + BC) + 0.525A^2 - 0.475B^2 - 1.48C^2 \quad (1)$$

$$E = 23.1 - 2.88A - 0.688B - 1.31C + 0.375AB - 1.38AC - 0.5BC + 1.32A^2 + 0.95B^2 + 2.95C^2 \quad (2)$$

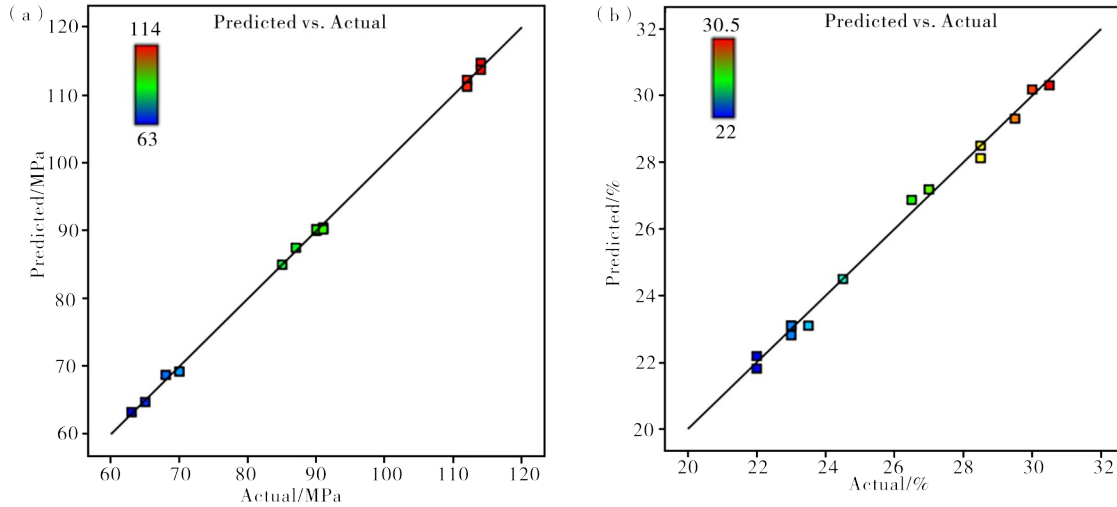
式(1)和式(2)直接反映了试验温度、保温时间、拉伸速率3个工艺参数与抗拉强度、断后伸长率的正负相关性及其影响程度。各工艺参数系数的绝对值对该工艺参数的影响呈正相关性,系数的正负反映了该工艺参数对抗拉强度、断后伸长率的正负相关关系。由式(1)和式(2)可知,在本试验设计方案的各参数值范围内,3个拉伸工艺参数对抗拉强度、断后伸长率的影响顺序为试验温度>拉伸速率>保温时间。其中,抗拉强度的数值随着试验温度和保温时间数值的增加而减小,而随拉伸速率数值的增加而增加;而断后伸长率与试验温度、保温时间和拉伸速率呈负相关关系。结合图3也可知,试验温度对1050 H12铝合金抗拉强度与断后伸长率具有非常显著的影响。

将式(1)和式(2)中各拉伸工艺参数取实测值时,则得拉伸参数与抗拉强度和断后伸长率的关系模型(见式(3)和式(4))。模型中 t 、 H 、 R 分别为试验温度、保温时间和拉伸速率的实际试验值,该模型可以非常方便地用于实际值的计算及最佳工艺参数的获取。

$$R_m = 103 - 0.194t + 0.128H + 1.00R - 0.0015tH + 0.0016tR + 0.018HR + 4 \times 10^{-5}t^2 - 0.00475H^2 - 0.0921R^2 \quad (3)$$

$$E = 33.6 - 0.032t - 0.319H - 1.73R + 3.26 \times 10^{-4}tH - 0.003tR - 0.0125HR + 1 \times 10^{-4}t^2 - 0.0095H^2 - 0.184R^2 \quad (4)$$

图4为基于式(3)和式(4)计算的抗拉强度、断后伸长率与实际测量值之间的比较图。从图4可以看出,计算值与实测值吻合良好。结果表明,该模型可精确预测在不同拉伸工艺参数条件下1050 H12铝合金的抗拉强度与断后伸长率。



(a)—抗拉强度;(b)—断后伸长率。
(a)—tensile strength;(b)—percentage elongation after fracture.

图4 抗拉强度和断后伸长率的模型计算值与实际值的对比结果

Figure 4 Comparison between calculated value based on model and actual value of tensile strength and percentage elongation after fracture

基于式(1)–(4),响应曲面多项式方差分析结果列于表4。由表4可知,代表抗拉强度和断后伸长率

模型显著性水平的 P 值(Prob> F)均小于0.0001,且二者的失拟项分别为0.077和0.117(均大于0.05)。

表4 响应面二次多项式方差分析

Table 4 Analysis of variance for the response surface quadratic model

影响因子	平方和		自由度	均方		振子强度		P 值(Prob>F)		显著性 ^①	
	R_m	E		R_m/E	R_m	E	R_m	E	R_m	E	R_m
Model	4 386	144.700	9	487.400	16.080	897.800	147.600	< 0.000 1	< 0.000 1	**	**
A	4 325	66.120	1	4 325	66.120	7 966	607.100	< 0.000 1	< 0.000 1	**	**
B	2.000	3.780	1	2.000	3.780	3.680	34.710	0.096 4	0.000 6	—	**
C	32.000	13.780	1	3 200	13.780	58.950	126.500	0.000 1	< 0.000 1	**	**
AB	12.250	0.563	1	12.250	0.563	22.570	5.160	0.002 1	0.057 3	*	—
AC	2.250	7.560	1	2.250	7.560	4.140	69.430	0.081 2	< 0.000 1	—	**
BC	2.250	1.000	1	2.250	1.000	4.140	9.180	0.081 2	0.019 1	—	*
A ²	1.160	7.390	1	1.160	7.390	2.140	67.860	0.187 1	< 0.000 1	—	**
B ²	0.950	3.800	1	0.950	3.800	1.750	34.890	0.227 5	0.000 6	—	**
C ²	9.160	36.640	1	9.160	36.640	16.870	336.400	0.004 5	< 0.000 1	—	**
实验误差	3.8	0.762 5	7	0.543	0.109	—	—	—	—	—	—
失拟性	3.0	0.562 5	3	1	0.188	5	3.750	0.077	0.117	不显著	
相差值	0.8	0.200 0	4	0.2	0.050	—	—	—	—	—	

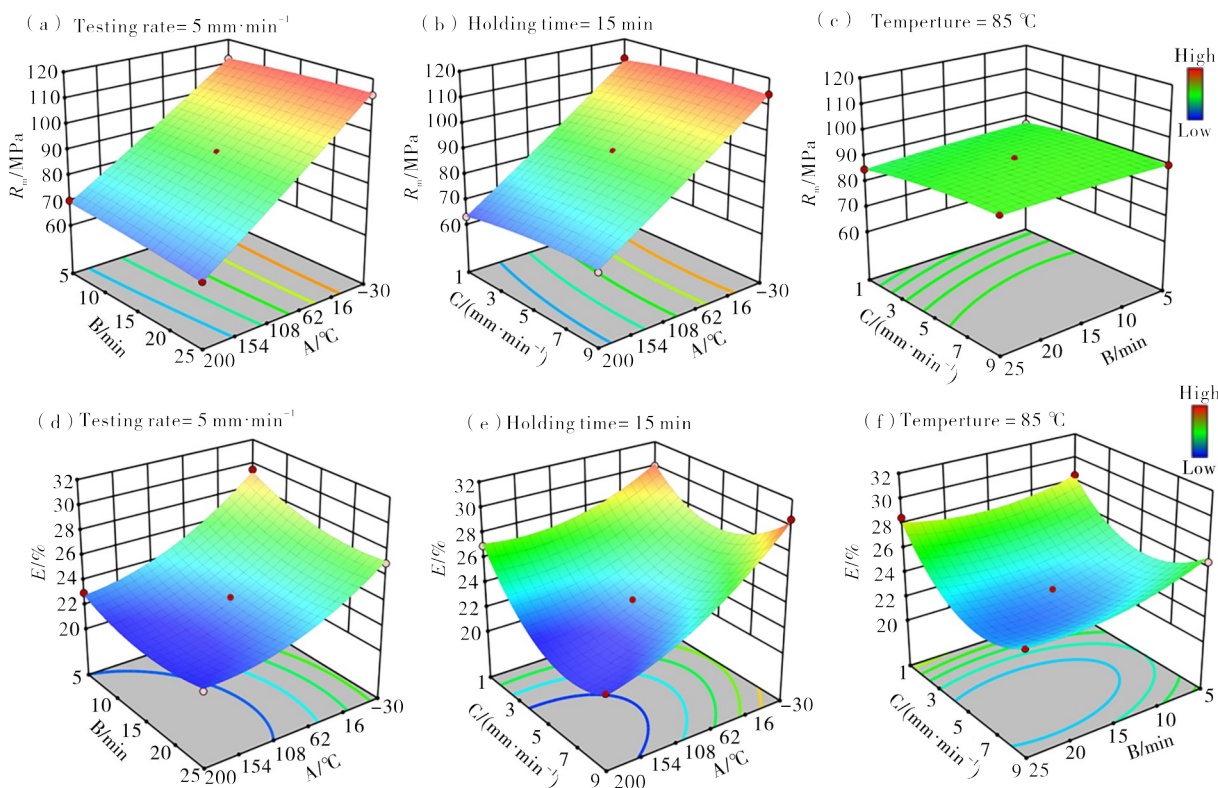
①*显著,**非常显著。

说明,抗拉强度与断后伸长率模型的计算值与试验获得的实际值趋于一致,失拟性检验不显著表示模型试验误差小,可用于精确分析和预测3个拉伸工艺参数与抗拉强度、断后伸长率之间的关系。此外,该模型方差分析显示试验温度、拉伸速率对抗拉强度、断后伸长率的影响均为高度显著,而保温时间对断后伸长率的影响也为高度显著^[15]。

2.2 响应曲面分析

图5为拉伸试验参数对1050 H12铝合金的抗拉强度与断后伸长率影响的响应曲面图。通过该图可以直观地观察到各拉伸试验参数对抗拉强度与断后伸长率的影响强弱。从图5(a)和图5(b)可见:当拉伸速度为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、保温时间为15 min时,试验温度对1050 H12铝合金抗拉强度影响显著,响应曲面整体趋势趋于线性,且试验温度越低合金的抗拉强度越高;而保温时间、拉伸速率对合金抗拉强度

的影响微弱,保温时间越长抗拉强度仅有略微下降。从图5(c)可见,当试验温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,改变保温时间和拉伸速率,合金的抗拉强度不会有明显变化,响应曲面趋于平面且整个曲面面色调一致;从图5(d)–(f)可见,当拉伸速率为 $5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、保温时间为15 min和试验温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,响应曲面均具有明显的曲面特征。反映试验温度、保温时间、拉伸速率3个参数,均对1050 H12铝合金的断后伸长率有非常显著的影响。在本次研究参数范围内,断后伸长率随着试验温度的降低而增大,而保温时间越短越易获得较大的断后伸长率。当试验温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,断后伸长率受保温时间的影响相对较弱,而随拉伸速率的增大会较明显的减小趋势;当试验温度趋于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温时,保温时间对断后伸长率有了较明显的影响,而断后伸长率随拉伸速率的增大呈先减小后增大的趋势。



(a) —保温时间、试验温度与抗拉强度的关系;(b) —拉伸速率、试验温度与抗拉强度的关系;(c) —拉伸速率、保温时间与抗拉强度的关系;(d) —保温时间、试验温度与断后伸长率的关系;(e) —拉伸速率、保温时间与断后伸长率的关系;(f) —试验速率、保温时间与断后伸长率的关系。
(a) —holding time, temperature and tensile strength;(b) —testing rate, temperature and tensile strength;(c) —testing rate, holding time and tensile strength;(d) —holding time, temperature and percentage elongation after fracture;(e) —testing rate, temperature and percentage elongation after fracture;(f) —testing rate, holding time and percentage elongation after fracture.

图5 拉伸试验参数因子与抗拉强度、断后伸长率交互作用的等高线与响应曲面

Figure 5 Contour line and response surface of interactions between tensile test parameter factors and value of tensile strength and percentage elongation after fracture

通过BBD响应曲面优化,可以非常方便地预测1050 H12铝合金在本研究拉伸参数范围内的抗拉强度与断后伸长率的变化情况。当试验温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保温时间14 min、拉伸速率为 $9\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,抗拉强度和断后伸长率均会出现峰值,此时1050 H12铝合金具有最佳的服役性能。从方差分析和响应面分析也可以看出,在低温条件下,不仅1050 H12铝合金的抗拉强度得到增强,其伸长率也得到提升,即材料出现了增强增韧现象。这是由于温度降低,1050 H12铝合金晶体内部位错的短程阻力急剧增大,进而使得合金的屈服点提高,抗拉强度增大。同时,由于低温变形过程中平面滑移受到抑制,加工硬化指数增加,变形均匀性增强,使得合金伸长率也得到提升^[16]。

3 结论

(1)通过响应曲面方法,获得1050 H12铝合金拉伸试验参数与抗拉强度、断后伸长率实测数值的可靠参数关系模型。

$$R_m = 103 - 0.194t + 0.128H + 1.00R - 0.0015tH + 0.0016tR + 0.018HR + 4 \times 10^{-5}t^2 - 0.00475H^2 - 0.0921R^2,$$

$$E = 33.6 - 0.032t - 0.319H - 1.73R + 3.26 \times 10^{-4}tH - 0.003tR - 0.0125HR + 1 \times 10^{-4}t^2 - 0.0095H^2 - 0.184R^2.$$

(2)通过BBD响应曲面优化预测1050 H12铝合金在本研究拉伸参数范围内的抗拉强度与断后伸长率的变化情况,当试验温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、保温时间14 min、拉伸速率为 $9\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,合金的抗拉强度和断后伸长率均会出现峰值,表明合金出现了低温增强增韧现象。

(3)试验设计方案中3个拉伸工艺参数对1050 H12铝合金抗拉强度、断后伸长率的影响顺序为试验温度 $>$ 拉伸速率 $>$ 保温时间,其中试验温度和保温时间与抗拉强度呈负相关关系,拉伸速率与抗拉强度呈正相关关系,而试验温度、保温时间和拉伸速率与断后伸长率均呈现负相关关系。

参考文献:

[1] 蒋显全,蒋诗琪,齐宝,等.铝合金高低温力学性能研究及应用前景[J].世界有色金属,2015(10):6.
 [2] PEREZ LLZARBE J, CARRASQUILLA J F, PEREZ C L. A study of the mechanical properties and recrystallization of two types of foil of aluminium 1050 A [J]. Key Engineering Materials, 2009, 423: 137-145.
 [3] 余欣未,蒋显全,谭小东,等.中国铝产业的发展现状及展望[J].中国有色金属学报,2020,30(4):10.

[4] 孙晓红,杨萌,孔德猛,等.6082-T6铝合金板材高低温力学性能研究[J].电焊机,2019,49(2):4.
 [5] 郭小农,陶磊,王丽,等.国产结构用7020-T6铝合金高低温力学性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2019,21(6):8.
 [6] JIA BAO Y, GUOBIN K. Low-temperature tensile behaviours of 6061-T6 aluminium alloy: Tests, analysis, and numerical simulation [J] Structures, 2023, 56:105054.
 [7] ISKHAKOV I, RIBAKOV Y. Structural phenomenon based theoretical model of concrete tensile behavior at different stress-strain conditions [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33:101594.
 [8] ADIB R S, PUSONG W, QINGSHAN D, et al. Enhancing as-built microstructural integrity and tensile properties in laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy using a comprehensive parameter optimization procedure [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020 (prepublish):140620.
 [9] 朱炳麟,周彬.铝合金材料低温力学性能试验研究[J].信息记录材料,2022,23(3):35-37.
 [10] 段伟,赵哲,吉红伟,等.粉体性能及选区激光熔化打印工艺对AlSi10Mg合金致密化行为的影响[J].材料导报,2019,33(10):6.
 [11] ZIJIAN H, ZHE Z, XIN D, et al. Microstructure and mechanical behavior of TiCN reinforced AlSi10Mg composite fabricated by selective laser melting [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 283:125996.
 [12] WANG X, LIU J, LIU H, et al. The Influence of Laser process parameters on the adhesion strength between electroless copper and carbon fiber composites determined using response surface methodology [J]. Micromachines, 2023. [http://dx. doi. org/10.3390/M14122168](http://dx.doi.org/10.3390/M14122168).
 [13] ADEOLA O, TAMBA J, OLUGBENGA O, et al. Process parametric optimization of spark plasma sintered Ni-Cr-ZrO₂ composites using response surface methodology (RSM) [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(1): 14-24.
 [14] ANKIT, VINEET K, KUMAR A Y, et al. Prediction of tribological performance of Cu-Gr-TiC composites based on response surface methodology and worn surface analysis [J]. Physica Scripta, 2023, 98(11):10.
 [15] 段伟,简思聪,伍超群,等.基于CCD的多级时效工艺对6061铝合金性能的影响[J].金属热处理,2021,46(10):96-100.
 [16] 刘瑛,张新明,李慧中,等.3种高强铝合金的低温拉伸力学性能研究[J].金属热处理,2007,32(1):4.

BBD Modeling and Optimization Prediction of Mechanical Properties of 1050 H12 Aluminum Alloy

DUAN Wei¹, XIAO Yongtong^{1*}, KUANG Hongcong¹, GUAN Yaowei¹, LUO Tiechu¹, GUO Feiyue²,
DU Xinwei², GUI Liangbao²

(1. Center for Industrial Analysis and Testing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Ruyuan Dongyangguang Fine Aluminium Foil Co., Ltd., Shaoguan 512600, China)

Abstract: The Box-Behnken design (BBD) test method, a spherical design method conforming to rotation, was adopted to systematically design the tensile test parameters of 1050 H12 aluminum alloy, including testing rate, testing temperature and holding time, and then obtained the relationship between tensile test parameters and tensile strength and elongation after fracture of 1050 H12 aluminum alloy, at the same time, combined with the mechanical test results (tensile strength, percentage elongation after fracture), a reliable mathematical model with the highest merits of $r_1^2=0.9991$ and $r_2^2=0.9948$, and P values ($\text{Prob}>F$) both levels less than 0.0001, respectively, was obtained. The model and analysis of variance, the loss of fit terms of the tensile strength model and percentage elongation after fracture model respectively are 0.077 and 0.117 (both greater than 0.05), and the loss of fit tests are not significant, which fully reflects the small error of the model test. So it can be used to accurately analyze and predict the relationship between the test temperature, holding time, tensile rate and tensile strength and percentage elongation after fracture. The influence degree of the three tensile process parameters on the tensile strength and percentage elongation after fracture of 1050 H12 aluminum alloy in the test design from large to small is as follows: temperature, tensile strength and holding time, and it can be seen that the tensile strength and percentage elongation after fracture of 1050 H12 aluminum alloy are extremely sensitive to the test temperature and are negatively correlated with the test temperature and holding time, that is, 1050 H12 aluminum alloy will be strengthened and toughened at low temperature. According to the accurate prediction of response surface model, when the testing temperature is $-30\text{ }^\circ\text{C}$, the holding time is 14 min, and the testing rate is $9\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, the tensile strength and percentage elongation after fracture of 1050 H12 aluminum alloy will peak within the range of tensile parameters in this study.

Keywords: 1050 H12 aluminum; low temperature; response surface; tensile strength; percentage elongation after fracture; analysis of variance; testing rate; Box-Behnken design

(学术编辑:褚欣)