

基于组织均匀性目标的 TC4合金盘形件 等温成形工艺优化

陈希凯¹ 李付国¹ 张李骊¹ 彭富华² 黄永胜²

(1 西北工业大学材料学院,西安 710072)

(2 成都飞机工业公司,成都 610092)

文 摘 采用有限元数值模拟虚拟试验方法,以终锻件组织均匀性为目标,研究了 TC4合金盘形件等温成形过程,为锻造工艺参数的优化提供了一条从虚拟试验—回归模型—优化设计的新思路。根据锻造工艺参数与组织均匀性之间的关系,结合建立的回归模型,采用单纯形优化算法对 TC4合金盘形件等温锻造成形工艺参数进行了优化。采用优化后的工艺参数模拟了等温锻造成形过程,结果表明,锻后组织分布均匀,优化效果显著。

关键词 TC4合金,虚拟试验,优化设计,单纯形法

Optimization Design Based on Microstructure Uniformity in Isothermal Forging Processes for Titanium Alloy

Chen Xikai¹ Li Fuguo¹ Zhang Lili¹ Peng Fuhua² Huang Yongsheng²

(1 School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Chengdu Aircraft Industrial Company, Chengdu 610092)

Abstract Taking the final forging microstructure uniformity as optimum objective, the disk isothermal forging process of TC4 alloy is analyzed with combining the virtual experiment and FEM numerical simulation, then the relation between the effective factors of isothermal forging and the function of microstructure uniformity is obtained. Based on the virtual experiment results and FEM numerical simulation, technological parameters of TC4 alloy are optimized by regressive model and simplex method - a kind of optimizing algorithm. Optimizing results indicate that optimizing effect is obvious, and then the results supply a new optimizing viewpoint including virtual experiments, regression model and optimum design for technological parameters of TC4 alloy in isothermal forging process.

Key words TC4 alloy, Virtual experiment, Optimum design, Simplex method

1 前言

涡轮盘是航空发动机重要的热端部件之一,采用钛合金或高温合金等航空难变形材料锻造而成,由于设计方法和生产方式的局限,材料锻后组织和

性能不稳定、良品率低,因而造成人力和物力的极大浪费。等温锻造是近几年发展起来的一种先进的锻造技术,在等温成形条件下,坯料以较低的应变速率发生变形,变形材料能够充分动态再结晶,从而可以

收稿日期:2005-07-28;修回日期:2005-12-06

基金项目:航空基础科学基金资助项目(03H53048)

作者简介:陈希凯,1979年出生,硕士研究生,主要从事材料成形模拟与控制一体化技术的研究工作

大部分或全部克服加工硬化的影响^[1]。自等温成形工艺应用到实际生产以来,许多学者就对它的成形机理进行了研究,但由于早期条件所限,通常采用主应力法、滑移线法和上限法等传统的塑性加工分析方法进行研究。采用这些方法时,必须对被研究的模型进行一定的简化,因此得到的结果不太精确。近年来,随着计算机技术的发展和有限元方法在塑性加工中的应用,一些学者尝试用有限元方法来分析等温模锻工艺,并提出了与等温模锻实际情况较吻合的有限元力学模型。在生产实践中,虽然理论分析和经验积累已为等温锻造工艺方案的制订提供了依据和原则,但这仅仅规定了工艺参数的大致范围,在可行域内选择的一组工艺参数,往往只能保证工艺过程的可行性,但是不能保证其最优特性,因此,需要进行工艺过程的优化设计,并在加工过程中实现实时控制。

针对以上问题,以 TC4 合金盘形件为研究对象,终锻件组织均匀性为目标,采用有限元数值模拟方法,得到了锻造工艺参数与组织均匀性之间的函数关系;结合建立的回归模型,采用单纯形优化算法,对锻造工艺参数进行了优化。

2 虚拟试验

2.1 盘形模锻件形状

图 1 所示的盘形模锻件为取自某型飞机发动机上的部件,材料为 TC4 合金。从改善构件内部质量,节省原材料,降低成本的角度出发,钛合金材料适宜锻造成形。

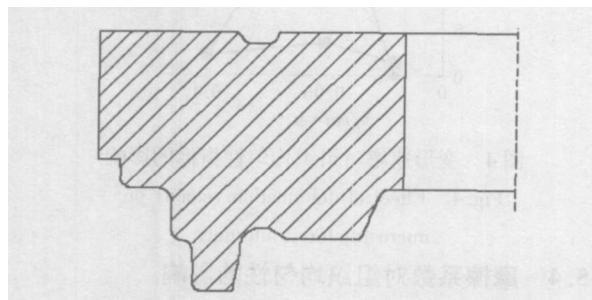


图 1 TC4合金盘形模锻件剖面示意图

Fig 1 Sketch of disk-shaped forge piece of TC4 alloy

2.2 虚拟试验目标模型

为了获得理想尺寸精度和均匀分布的显微组织,在热成形工艺设计时应以成形后锻件组织的均匀性为目标,选定的组织均匀性函数 G 应能反映变形材料最终的组织性能^[2],以期得到主要工艺参

数的优化值,其表达式为:

$$G = \frac{\sum (d_i - d_{avg})^2 \times V_i}{V_{total}} \quad (1)$$

式中, d_i 为单元区域内的晶粒尺寸; d_{avg} 为平均晶粒尺寸; V_i 为单元体积; V_{total} 为变形体的体积。

2.3 坯料设计

采用不同尺寸和形状的坯料,对模具承载能力及坯料的变形程度有很大的影响。对于盘形件这类大型锻件来说,在满足质量要求的前提下,坯料形状越简单越好。盘形件坯料主要有环坯和饼坯两种,据文献 [3] 所知,采用饼坯,锻造力较大,易出现回流、折叠以及型槽充不满等锻造缺陷,因此综合考虑采用环坯作为试验的坯料。通过有限元模拟试算,得坯料几何尺寸: $D_{内} = 221.10 \text{ mm}$, $D_{外} = 396.10 \text{ mm}$, 高度 $H = 109.44 \text{ mm}$ 。根据盘形终锻件的轴对称性(假设变形材料各向同性),取其子午面进行分析,在 $109.44 \text{ mm} \times 87.50 \text{ mm}$ 的矩形截面上建立轴对称有限元求解几何模型(图 2)。

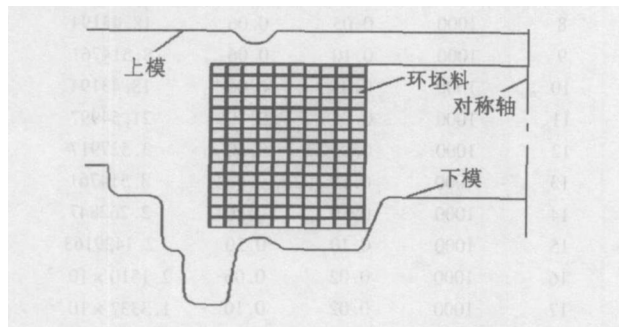


图 2 有限元求解几何模型

Fig 2 Geometry model of finite element solution

2.4 工艺参数选择

影响钛合金终锻件组织和性能的因素很多,如材料组织、变形温度、变形程度、变形速率、保压时间等^[4]。其中,保压时间对复杂锻件的充填情况有很大影响,但其主要是在变形结束后利用材料的蠕变特性而使坯料继续发生充填效应,也有文献提出保压时间对墩粗过程影响不大。因此,现主要研究变形温度、变形速率和摩擦系数等工艺参数对 TC4 合金盘形模锻件组织和性能的影响。综合考虑各因素对锻件组织的影响情况,结合 TC4 合金特点,各工艺参数取值范围如下:变形温度 $860 \sim 1000$, 变形速率 $0.02 \sim 0.1 \text{ mm/s}$, 摩擦系数 $0.01 \sim 0.5$ 。

2.5 计算结果回归分析

2.5.1 计算结果

根据 TC4 合金盘形件等温成形工艺参数与组织均匀性之间的关系,结合建立的目标模型,进行虚拟试验,结果见表 1。

表 1 TC4合金组织均匀性虚拟试验表

Tab 1 Virtual experiment table of microstructure uniformity of TC4 alloy

试验号	变形温度	变形速率	摩擦系数	组织均匀性
	$T/$	$/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	μ	指标值
1	1000	0.02	0.10	1.3337×10^{-2}
2	1000	0.05	0.10	21.54997
3	1000	0.10	0.10	2.262847
4	1000	0.02	0.50	1.487781
5	1000	0.05	0.50	3.527917
6	1000	0.10	0.50	2.1429163
7	1000	0.02	0.06	2.1310×10^{-5}
8	1000	0.05	0.06	18.43194
9	1000	0.10	0.06	8.514761
10	1000	0.05	0.06	18.43194
11	1000	0.05	0.10	21.54997
12	1000	0.05	0.50	3.527917
13	1000	0.10	0.06	8.514761
14	1000	0.10	0.10	2.262847
15	1000	0.10	0.50	2.1429163
16	1000	0.02	0.06	2.1310×10^{-5}
17	1000	0.02	0.10	1.3337×10^{-2}
18	1000	0.02	0.50	1.487781
19	950	0.02	0.06	6.3620×10^{-4}
20	950	0.02	0.10	25.07766
21	950	0.02	0.50	14.87718
22	1000	0.02	0.06	2.131×10^{-5}
23	1000	0.05	0.06	18.43194
24	1000	0.10	0.06	8.514761
25	860	0.02	0.50	24.56046
26	950	0.02	0.50	14.87718
27	1000	0.02	0.50	1.487781
28	860	0.02	0.06	26.39371
29	950	0.02	0.06	6.3620×10^{-4}
30	1000	0.02	0.06	2.1310×10^{-5}

2.5.2 变形温度对组织均匀性的影响

由图 3 可以看出,在变形速率与摩擦系数一定的条件下,终锻件组织均匀性指标值 G 随变形温度的增加而减小,依据其变化规律建立如下关系式:

$$G = mT^b \quad (2)$$

式中, T 为变形温度; m 、 b 为回归系数。

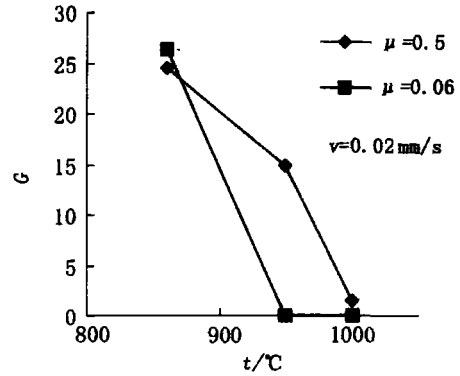


图 3 变形温度对组织均匀性指标的影响

Fig 3 Effect of deformation temperature on microstructure uniformity

2.5.3 变形速率对组织均匀性的影响

由图 4 可以看出,在变形温度与摩擦系数一定的条件下,当变形速率较小时,组织均匀性指标值随变形速率的增大而增大,并且包含着摩擦系数对它的影响。综合考虑,等温锻造成形变形速率通常较低,因此可建立如下函数关系式:

$$G = Dv^{kl} \quad (3)$$

式中, D 、 k 为回归系数。

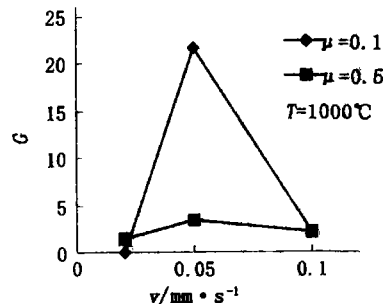


图 4 变形速率对组织均匀性指标的影响

Fig 4 Effect of deformation velocity on microstructure uniformity

2.5.4 摩擦系数对组织均匀性的影响

由图 5 可以看出,在变形温度一定的条件下,摩擦系数对终锻件的影响同样包含着变形速率的交互作用,变形速率较高时,终锻件的组织均匀性指标值较低,综合考虑建立如下关系式:

$$G = n \left(\frac{\mu v}{0.005} \right)^{ct} \quad (4)$$

式中, n 、 c 为回归系数。

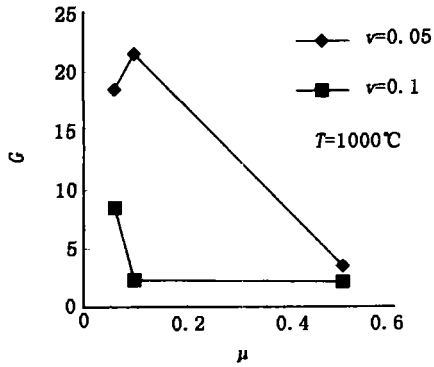


图 5 摩擦系数对组织均匀性指标的影响

Fig 5 Effect of friction coefficient on microstructure uniformity

2.5.5 交互作用

根据变形温度、变形速率、摩擦系数等工艺参数对终锻件组织均匀性的影响规律并综合考虑各因素之间的交互作用,建立以下函数关系式:

$$G = e^a T^b v^k \mu^c \left(\frac{\mu v}{0.005} \right)^{cT} \quad (5)$$

式中, G 为终锻件组织均匀性函数; T 为变形温度; v 为变形速率; μ 为摩擦系数; a, b, c, k 为回归系数。

将式 (5) 进行线性变换, 得:

$$\ln G = a + b \ln T + k \mu \ln v + c T \ln \frac{\mu v}{0.005} \quad (6)$$

2.6 多元回归分析

对式 (6) 中的变量进行变换, 并令:

$$x_0 = 1, x_1 = \ln T, x_2 = \mu \ln v,$$

$$x_3 = T \ln \frac{\mu v}{0.005}, y = \ln G$$

对试验数据进行多元线性逐步回归, 得到的回归系数见表 2。

表 2 多元回归结果

Tab 2 Results of multi-regression

变量	回归系数	标准误差	t 统计值	概率
x_0	75.43669	41.07076	1.836749	0.0777054
x_1	-10.7261	5.967371	-1.79745	0.083889
x_2	0.000799	0.000249	3.213408	0.0034849
x_3	-0.73026	0.048159	-15.1634	1.999×10^{-14}

由表 2 可得各回归系数如下:

$$a = 75.43669, b = -10.7261,$$

$$k = 0.000799, c = -0.73026$$

组织均匀性指标与变形温度、变形速率以及摩擦系数等工艺参数之间的关系式为:

$$y = 75.43669 - 10.7261x_1 + 0.000799x_2 - 0.73026x_3 \quad (7)$$

为检验回归方程可靠性, 利用试验数据, 将求出的预测值同实测值进行比较验证, 由图 6 可知, 除少数实测值与预测值有较大的偏差外, 绝大多数试验点吻合较好, 并且各试验点的预测值和实测值基本上均匀分布在斜率为 1 的标准线两侧 (图 7), 说明回归方程可靠。

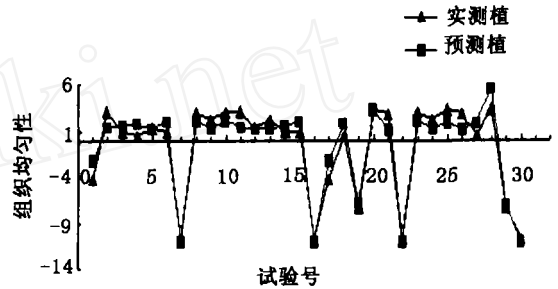


图 6 回归预测值与实测值的比较

Fig 6 Comparison between regressive and measured values

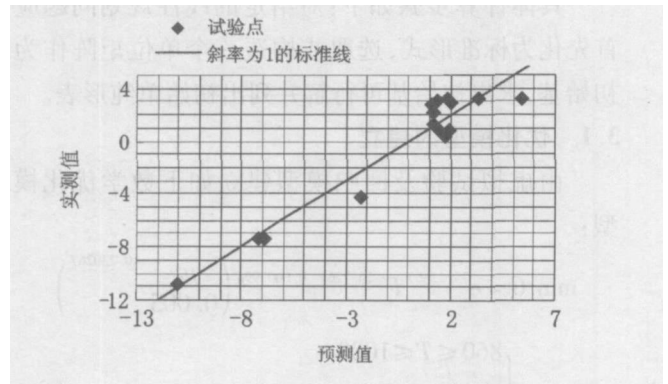


图 7 回归方程可靠性检验图

Fig 7 Test diagram for reliability of regression equation

综上所述, 回归出的方程表示自变量与目标函数之间的关系, 将各变量换成对应的变形温度、变形速率、摩擦系数以及组织均匀性指标等参数, 得到相应的函数关系式:

$$\ln G = 75.43669 - 10.7261 \ln T + 0.000799 \mu \ln v -$$

$$Q = 73026T \ln \frac{\mu v}{0.005} \quad (8)$$

整理得:

$$G = e^{75.43669T - 10.7261v - 0.000799\mu} \left(\frac{\mu v}{0.005} \right)^{-0.73026T} \quad (9)$$

对回归方程进行方差分析,得 $F = 141.36876$, 给定水平 $\alpha = 0.05$, 有 $F(4, 13) = 3.41$, $F \gg F(4, 13) = 3.41$ 成立, 因此, 回归方程十分显著。同时, 其全相关系数 $R = 0.970688$, 可知线性关系明显。

3 单纯形法优化

由运筹学^[5-6]可知, 如果线性规划问题存在最优解, 一定有一个基可行解是最优解。因此单纯形法迭代的基本思路是: 对标准型的线性规划问题先找出一个基可行解, 判断其是否为最优解, 如为否, 则转换到相邻的基可行解, 并使目标函数值不断增大, 一直找到最优解为止。

$$\begin{aligned} \max z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ s.t. &\begin{cases} \sum_{j=1}^n P_j x_j = b \\ x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

具体计算步骤如下: 对给定的线性规划问题应首先化为标准形式, 选取或构造一个单位矩阵作为初始基, 求出初始基可行解并列出初始单纯形表。

3.1 优化模型的建立

由虚拟试验及回归模型建立如下数学优化模型:

$$\begin{aligned} \min G &= e^{75.43669T - 10.7261v - 0.000799\mu} \left(\frac{\mu v}{0.005} \right)^{-0.73026T} \\ s.t. &\begin{cases} 860 - T - 1000 \\ 0.02 - v - 0.10 \\ 0.01 - \mu - 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

此模型为一非线性规划问题, 其中, G 为优化问题的目标函数, T, v, μ 为自变量, 约束函数为不等式约束。

为保证极小化目标函数有整体唯一解, 预先给定两组经验值 K_{\min} 和 K_{\max} , 则有:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$$

其中:

— 50 —

$$K = \begin{bmatrix} T \\ v \\ \mu \end{bmatrix}, K_{\min} = \begin{bmatrix} 860 \\ 0.02 \\ 0.01 \end{bmatrix}, K_{\max} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0.1 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

对数学优化模型作线性化处理, 得到:

$$\begin{aligned} \min y &= 75.43669 - 10.7261x_1 \\ &+ 0.000799x_2 - 0.73026x_3 \\ s.t. &\begin{cases} 6.75693x_1 - 6.90776 \\ -2.30259x_2 - 0.13816 \\ -222627671x_3 - 2417.71434 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$x_1 = \ln T, x_2 = \mu \ln v, x_3 = T \ln \frac{\mu v}{0.005}, y = \ln G$$

标准化处理得:

$$\begin{aligned} \max f &= -75.43669 + 10.7261x_1 - 0.000799x_2 \\ &+ 0.73026x_3 \\ s.t. &\begin{cases} 6.75693x_1 - 6.90776 \\ 0.13816x_2 - 2.30259 \\ 0 - x_3 - 4643.99105 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中:

$$x_1 = x_1, x_2 = -x_2, x_3 = 2417.71434 - x_3$$

最优化解法所得的结果一般是局部范围内的最优解, 即计算结果往往与初始值的选取有关。因此, 在实际计算前, 可将前述虚拟正交优化试验所得的工艺参数作为迭代求解过程的初始值。TC4合金盘形件等温锻造过程工艺参数优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min J(K) \\ s.t. &\begin{cases} C_1(K) \geq 0 \\ C_2(K) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$J(K) = G, K = [T \ v \ \mu]^T$$

$$\text{初始值 } K_0 = [1000 \ 0.1 \ 0]^T$$

3.2 优化设计结果

利用 Matlab 优化工具箱完成优化过程, 得到如下工艺参数: 变形温度为 1000; 变形速率为 0.02 mm/s, 摩擦系数为 0.06。

采用优化后的工艺参数进行锻造工艺过程数值模拟, 由模拟结果可以看出, TC4合金在锻造过程中的流动性得到了进一步改善, 其峰值载荷与工厂目

宇航材料工艺 2006年 第6期

前采用的典型工况下之峰值载荷相比得到了进一步的减小,现为 6.952 MN(图 8)。

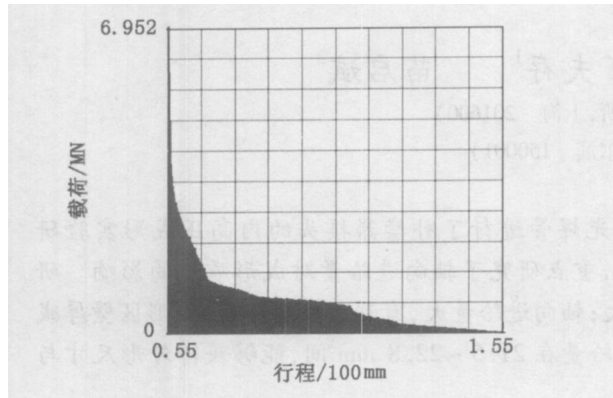


图 8 优化后的终锻件载荷—行程曲线图

Fig 8 Load-stroke curve for second-optimized design

在整个锻造工艺过程中,最大等效应变值约为 2.448,小于工厂目前采用的典型工况下之最大等效应变,且材料变形均匀,流线依外形分布合理,伸展流畅平滑,组织均匀性指标值从 2.262 847 降到了 2.13×10^{-5} ,得到显著降低,其终锻件平均晶粒尺寸为 15.93 μm 左右,小于原始坯料晶粒尺寸。综上所述,在此工艺条件下,锻件微观组织再结晶充分,分布均匀,优化效果显著,最终锻件的组织分布和性能更加趋于理想。

4 结论

(1)采用有限元数值模拟虚拟试验方法,以终锻件组织均匀性为目标,研究了 TC4 合金盘形件等温成形过程,为锻造工艺参数的优化提供了一条从虚拟试验—回归模型—优化设计的新思路。

(2)根据锻造工艺参数与组织均匀性之间的函数关系,结合建立的回归模型,采用单纯形优化算法对 TC4 合金盘形件等温锻造成形工艺参数进行了优化。采用优化后的工艺参数模拟了等温锻造成形过程,结果表明,锻后组织分布均匀,优化效果显著。

参考文献

- 1 王旭. 国外钛合金超塑性成形应用现状及发展趋势. 航天工艺, 1989; (4): 20~25
- 2 张季骊. 钛合金盘件等温成形工艺优化与过程控制. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2004
- 3 张立斌. TC11 压气机盘超塑性等温锻造工艺. 航天工艺, 1996; (4): 38~41
- 4 Semiaton S L, Lahoti G P. The occurrence of shear bands in isothermal hot forging. Met Trans A, 1982; 13A (2): 275~288
- 5 胡运权. 运筹学教程. 北京:清华大学出版社, 2003
- 6 邓成梁. 运筹学的原理和方法(第 2 版). 武汉:华中理工大学出版社, 1998

(编辑 任涛)

(上接第 16 页)

辐射间隙和内部硬化层三部分组成,采用了先进材料和最优化的热防护层材料布置。Micro-X 作为美国下一代 RLV,它的一个主要目标是能够验证大量先进技术,不仅仅是先进 TPS 的实验验证。

4 结束语

现阶段,研究 TPS 冷却方式的热点包括相态转变、汽化冷却和热管。在本文所述的 Micro-X 概念验证机中,TPS 的防热是被动的,并且没有工作的流体。

未来的研究工作将主要分析验证机远离驻点流地方,包括下风向和迎风方向的 CRI 使用;其他不同的 TPS 结构,比如面积区域中的 CRI 和更先进前端和前缘的 C/C,以减少覆盖在运载器上的不同 TPS 种类。随着研究的深入,TPS 将继续向耐用、易维护、减轻质量、降低成本、高可靠性方向发展。

参考文献

- 1 王思青等. 重复使用运载器陶瓷热防护系统. 导弹与航天运载技术, 2004; (3): 37~41
- 2 曹义等. 美国金属热防护系统研究进展. 宇航材料

工艺, 2003; 33(3): 9~12

- 3 John Rogacki. Materials for air and space. Advanced Materials & Process, 2000
- 4 刘蓓威. 用于 RLV 的金属热防护系统研究进展. 飞航导弹, 2003; (11): 44~48
- 5 Jane's Defence Weekly. England, Sep 8, 2004
- 6 Bhungalia A A. Thermal protection system (TPS) design and optimization—a case study. AIAA 2005-6809
- 7 Blosser M L. Development of metallic thermal protection systems for the reusable launch vehicle. NASA Technical Memorandum 110296, 1996: 1~22
- 8 关春龙等. 可重复使用热防护系统防热结构及材料的研究现状. 宇航材料工艺, 2003; 33(6): 7~11
- 9 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 北京:科学出版社, 1998
- 10 ElSoudani S M. High performance RX2TM Ti6242S titanium for reusable launch vehicles metallic thermal protection systems. AIAA 200025147

(编辑 李洪泉)