

盘用材料缺口特征尺寸对缺口强度的影响

汪洁¹, 胡绪腾¹, 贾旭¹, 孙力¹, 冯引利², 宋迎东¹

(1. 南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;
2. 中国科学院工程热物理研究所 轻型动力实验室, 北京 100190)

摘要:现代航空发动机轮盘工况复杂, 常常在榫槽、通气孔、螺栓孔等几何不连续处遭受破坏。这些几何不连续性特征可以视为广义的缺口, 为了分析缺口附近几何特征尺寸对航空发动机轮盘复杂结构件抗拉强度的影响规律, 基于典型盘用合金 GH4169 设计了双边缺口平板试样、双边不等缺口平板试样、不等厚双边缺口平板试样以及不等厚双边不等缺口平板试样进行试验研究。试验结果表明: 缺口平板试样的应力集中系数与缺口抗拉强度存在一定的相关性, 缺口抗拉强度无量纲化常数与应力集中系数的试验数据点存在一定的分布规律, 二者的拟合曲线能很好地描述试验结果分布规律。包括 GH4169、GH738 和 TC11 合金等常用航空塑性金属材料在内的缺口平板试验数据点落在拟合曲线 $\pm 10\%$ 以内的分散带内。

关键词:缺口几何特征尺寸; 应力集中系数; 抗拉强度; 航空发动机

中图分类号: V216.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.02.012

The Influence of Notch Characteristic Size of Disc Material on Notch Strength

WANG Jie¹, HU Xu-teng¹, JIA Xu¹, SUN Li¹, FENG Yin-li², SONG Ying-dong¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power Systems, State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Light Power Laboratory, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The working condition of modern aeroengine disk was complex, and it was often damaged in the geometric discontinuities such as mortise, vent hole and bolt hole. These geometric discontinuities could be regarded as generalized notches. In order to analyze the influence of the notch geometric characteristic size on the tensile strength of complex structural parts of aeroengine disk, based on the typical disk alloy GH4169, plate samples with double notches, plate samples with two unequal notches, plate samples with two unequal notches and plate samples with two unequal notches were designed for experimental study. The experimental results show that there is a certain correlation between the stress concentration factor and the notched tensile strength of the notched plate specimen, and there is a certain distribution law between the dimensionless constant of the notched tensile strength and the experimental data points of the stress concentration factor, and the fitting curve of the both can well describe the distribution law of the experimental results. The data points of notched plate test including GH4169, GH738 and TC11 alloy are within $\pm 10\%$ of the fitting curve.

Key words: notch geometric characteristic size; stress concentration factor; tensile strength; aeroengine

0 引言

由于结构设计需要, 在航空发动机压气机盘、鼓筒等零件上不可避免的存在榫槽、通气孔、螺栓孔等各种类型的几何不连续性结构特征。可以将这些结构特征当作广义的缺口, 缺口附近的应力集中造成轮盘内的应力应变分布不均匀、处于多轴应力状态, 使

得这些几何不连续的结构特征成为强度薄弱部位, 最先开始破坏。因此, 有必要通过典型航空材料缺口件模拟几何不连续性结构特征, 结合强度理论, 探究缺口几何特征尺寸对航空发动机复杂结构件抗拉强度的影响规律。

国内外学者针对缺口件静强度问题开展了大量

收稿日期: 2020-09-10 基金项目: 基础加强项目资助

作者简介: 汪洁 (1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为航空发动机结构强度; E-mail: 601988441@qq.com。

引用格式: 汪洁, 胡绪腾, 贾旭, 等. 盘用材料缺口特征尺寸对缺口强度的影响[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 68-73. WANG Jie, HU Xuteng, JIA Xu, et al. The influence of notch characteristic size of disc material on notch strength[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 68-73.

的理论和试验研究。文献[1]认为缺口的存在会引起缺口根部的应力集中和应变集中,使缺口处位于3向应力状态,而使材料的塑性变形受到约束,并提高材料的屈服强度;梁永生等[2]进一步提出:将材料的塑性变形受到约束后对材料屈服强度的提高定义为应力强化系数 Q ,其与缺口处的最大应力成正比,对于高强度和超高强度材料,其缺口敏感性高已成为限制其强度水平进一步发展的重要问题;田伟等[3]对TC17合金光滑和缺口试样进行有限元计算,结合试验结果表明,由于缺口的存在,在缺口部位造成的应力集中导致缺口部位由单向拉伸的单向应力状态变成3向应力状态,使得缺口试样的等效应力比光滑试样的低,产生缺口强化效应,随着应力集中系数(<3)的增大,缺口强化效应越发明显,缺口抗拉强度逐渐升高,缺口伸长率逐渐降低。

Sachs等[4]将几种金属材料在不同温度下试验测得的缺口强度与应力集中系数在双对数坐标系下进行拟合,得出脆性材料缺口强度与应力集中系数的乘积等于材料的极限拉伸强度;Peterson[5]提出在平面应变状态下,应当用复合应力集中系数 K_t' 替代应力集中系数 K_t ;郑修麟等[6-8]对于脆性材料的缺口强度预测结果与Sachs的一致,对于塑性材料铝合金引入平面应力应变状态系数和材料的断裂应力和断裂延伸率对公式进行修正。

分析上述文献可知,应力集中系数作为缺口附近几何特征尺寸的表征参量,与缺口抗拉强度存在着一定的关联。已有的缺口试验研究大多集中于对小应力集中系数试样开展,而且对于复杂缺口特征试样的研究比较少。

本文针对性地设计了在航空发动机上应用广泛、应力集中系数较大的GH4169合金双边缺口平板试样,以及两边应力集中系数不等的双边不等缺口平板试验件和不等厚缺口平板试验件,进行室温拉伸试验,模拟研究复杂结构件几何特征尺寸对缺口抗拉强度的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

GH4169合金是以体心四方的 γ'' 和面心立方的 γ' 相沉淀强化的镍基高温合金,在 $-253 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 具有良好的综合性能,在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的屈服强度居变形高

温合金的首位,并具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能,以及良好的加工性能、焊接性能和长期的组织稳定性[9]。

1.2 试验方案与平板试样设计

本文设计的GH4169合金平板室温拉伸试验方案主要包括光滑平板试样和双边、双边不等、不等厚双边、不等厚双边不等4类缺口平板试样,平板试样尺寸以及对应的应力集中系数分别如图1~5所示。其中光滑平板是为了获得该批材料室温极限抗拉强度;双边缺口平板试样是为了得到高应力集中系数的拉伸试验数据结果;双边不等缺口平板是为了考察两边缺口半径不等导致的缺口应力集中改变对抗拉强度的影响;不等厚缺口平板是为了考察两边平行段厚度不等和缺口半径不等导致的应力集中改变对抗拉强度的影响。

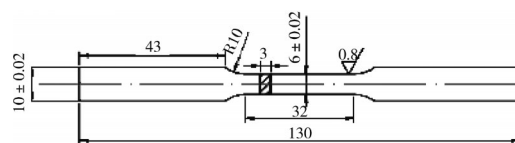


图1 光滑平板试样设计

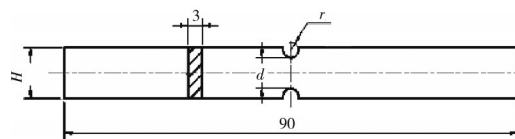


图2 5种双边缺口平板尺寸

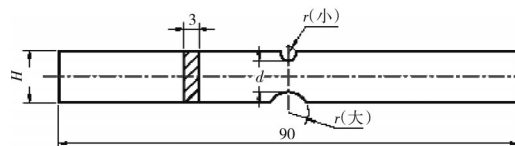


图3 2种双边不等缺口平板尺寸

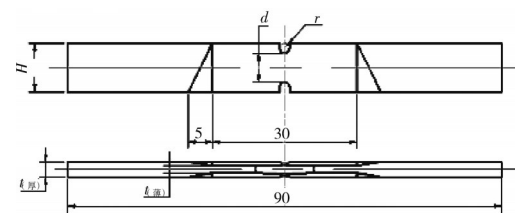


图4 2种不等厚双边缺口平板尺寸

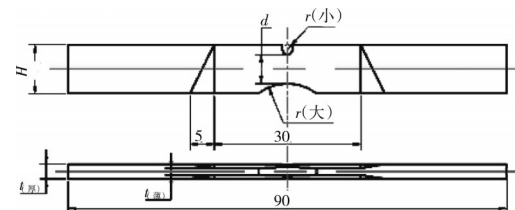


图5 2种不等厚双边不等缺口平板尺寸

在试样设计过程中涉及应力集中系数计算。本文主要针对在单向拉伸状态下的缺口平板试样进行应力集中系数与缺口抗拉强度的相关性分析。为了统一计算基准,参照应力集中系数手册的定义准则^[10-11]定义单向拉伸状态下缺口平板的应力集中系数

$$K_t = \frac{\sigma_{y\max}}{\bar{\sigma}_y}$$

(1)

式中: $\bar{\sigma}_y$ 为基准应力,即缺口平板缺口根部最小截面上拉伸方向的平均应力; $\sigma_{y\max}$ 为承受拉伸载荷时平板缺口根部拉伸方向最大应力值。

对于小缺口试样,网格单元尺寸对应应力集中系数有限元计算结果的影响很大,因此分别对不同厚度和缺口半径模型,进行多种分析,逐步调整加密网格,每次都以为2:1的比例调整加细网格尺寸,分析应力集中系数计算结果的变化情形,检查相对收敛性。分析发现对于缺口半径为0.2 mm的试样,当网格单元尺寸小于0.025 mm时,应力集中系数计算结果几乎不变。本文设计的试验件缺口半径都大于0.2 mm,因此所有缺口试样的应力集中系数计算都是在局部网格加密到0.025 mm下进行,保证计算结果相对收敛。局部网格划分如图6所示。表1~4列出了每种缺口平板缺口根部应力集中系数的有限元计算结果,见表1~4。

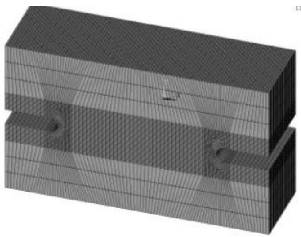


图6 缺口平板应力集中区域的网格细化

表1 5种双边缺口平板应力集中系数

参数	K_t				
	2.03	2.97	3.00	4.03	4.95
r/mm	3.00	1.00	0.60	0.30	0.40
d/mm	12.00	10.00	6.00	6.00	12.00
H/mm	16.00	15.00	10.00	10.00	20.00

表2 2种双边不等缺口平板应力集中系数

参数	K_t			
	3.97	2.01	3.10	1.30
r/mm	0.27	2.00	0.40	12.00
d/mm		6.00		6.00
H/mm		10.00		10.00

表3 2种不等厚双边缺口平板应力集中系数

参数	K_t			
	4.13	3.13	3.40	2.55
r/mm	1.00	1.00	10.00	10.00
t/mm	1.50	3.00	1.50	3.00
d/mm	6.00	6.00	6.00	6.00
H/mm	10.00	10.00	10.00	10.00

表4 2种不等厚双边不等缺口平板应力集中系数

参数	K_t			
	3.88	2.64	3.37	2.98
r/mm	1.00	1.00	10.00	10.00
t/mm	1.50	3.00	1.50	3.00
d/mm	6.00	6.00	6.00	6.00
H/mm	10.00	10.00	10.00	10.00

2 室温拉伸试验结果

GH4169 合金平板室温拉伸试验是为了获得室温下平板试样的抗拉强度,从而分析应力集中偏大时对抗拉强度的影响,以及考察双边应力集中系数不等时抗拉强度的变化规律。由于不同缺口试样的最小横截面面积不同,因此本文定义缺口抗拉强度来表征不同缺口试样的极限承载能力

$$\sigma_{bN} = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

(2)

式中: $F_{\max}$ 为缺口试样极限拉伸载荷; A_0 为试样缺口处初始最小横截面积。

GH4169 合金平板试样缺口抗拉强度随应力集中系数的分布如图7所示。从图中可见,缺口抗拉强度随应力集中系数并没有明显的变化规律。

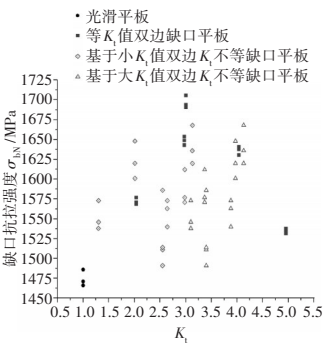


图7 GH4169合金平板试样缺口抗拉强度随应力集中系数的分布

3 缺口几何特征对缺口抗拉强度的影响

王盛尧等^[12]的研究表明,缺口抗拉强度与试样单一几何特征没有明显的相关性,可以推测缺口抗拉强度是受多个几何特征综合影响的。依据本批次试验数据,结合课题组以往批次试验数据以及文献[12]的试验数据,分析缺口抗拉强度与几何特征参数无量纲化之间的关系。

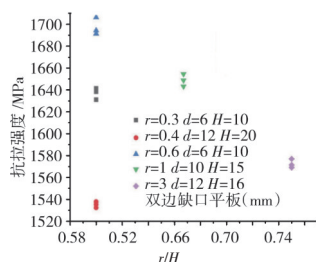
3.1 r/d对缺口抗拉强度的影响

对缺口试样设计了双边缺口平板、双边不等缺口平板和不等厚缺口平板,考察双边缺口半径相等试样的试验结果,分析缺口平板试样的缺口抗拉强度随缺口根部半径与最小宽度之比的变化规律,如图8所示。

从图中可见,对于双边缺口半径相等试样,随着缺口半径与最小宽度之比(r/d)的增大,缺口抗拉强度呈现先增大后减小的趋势;当缺口半径与最小宽度

3.2 d/H 对缺口抗拉强度的影响

度随最小宽度和平行段宽度之比的变化规律,如图9所示。



从图中可见,在一定范围内,双边缺口试样的缺口抗拉强度随着最小宽度与平行段宽度之比(r/H)的增大而减小;在最小宽度和平行段宽度之

3.3 应力集中系数对缺口抗拉强度的影响分析

$$K = \frac{\sigma_{bN}}{\sigma_b \cdot K_t} \quad (3)$$

基于课题组以往不同材料的缺口平板试验件室温单向拉伸试验数据,对 K 与 K_I 进行拟合,来考察缺口平板件应力集中系数与其抗拉强度的相关性。

验和双边应力集中系数不等的缺口平板试验。为探究双边应力集中系数不等时缺口抗拉强度的变化规律,分别基于大应力集中系数和小应力集中系数对 K_1 与 K_2 进行拟合分析。基于大应力集中系数拟合函数为

$$K=[\exp(-0.217(K_i-1))+\exp(-1.298(K_i-1))]/2 \quad (4)$$

基于小应力集中系数拟合函数为

$$K = [\exp(-0.212(K_i - 1)) + \exp(-1.314(K_i - 1))] / 2 \quad (5)$$

将课题组以往批次得到的 GH4169 合金试验数

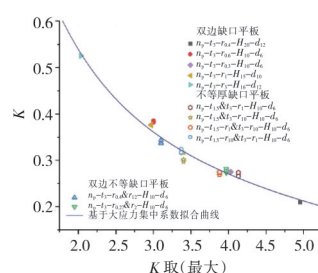


Figure 10 is a graph showing the relationship between the normalized maximum stress K (Y-axis) and the normalized length of the notch $K_{\text{取(最小)}}$ (X-axis). The Y-axis ranges from 0.2 to 0.9, and the X-axis ranges from 1.0 to 5.0. The graph includes data points for various notch shapes and sizes, categorized into three groups:

- 双边缺口平板 (Double-edged notch plate):**
 - $n_1=n_2=r_1=r_2=H-d_1$ (Red square)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Blue diamond)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Green triangle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Purple circle)
- 单边缺口平板 (Single-edged notch plate):**
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Red circle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Blue circle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Green circle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Purple circle)
- 不等厚缺口平板 (Notch plate of any thickness):**
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Red triangle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Blue triangle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Green triangle)
 - $n_1=r_1=r_2=H-d_1$ (Purple triangle)

A solid line represents the average curve from the data points.

据放在一起处理,得到所有 GH4169 合金平板数据 K_I 与 K 关系,如图 12 所示。从图中可见,对于不同批次 GH4169 合金缺口平板试验数据而言,不论是基于大应力集中系数还是小应力集中系数,其 K 与 K_I 都呈一定的曲线规律分布。因此,分别基于大应力集中系数和小应力集中系数,对所有 GH4169 合金数据中的缺口平板 K_I 和 K 进行相关性分析。基于大应力集中系数的拟合函数为

$$K=[\exp(-0.221(K_i-1))+\exp(-1.267(K_i-1))]/2 \quad (6)$$

$$K = [\exp(-0.219(K_i - 1)) + \exp(-1.274(K_i - 1))] / 2 \quad (7)$$

二者拟合结果如图 13 所示。

从图 12、13 中可见,对于所有 GH4169 合金缺口

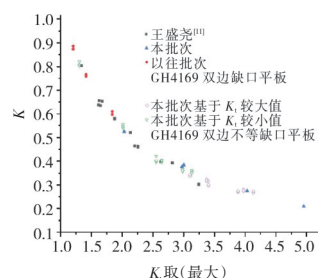


图13 所有GH4169平板数据
 K_1 与 K_2 拟合结果

平板而言,按大应力集中系数和小应力集中系数的数据不仅都分布在相同的曲线附近,二者的拟合曲线也相近,拟合参数也都差不多,说明可以忽略大应力集中系数或小应力集中系数的影响。

因此,在对4种不同材料平板数据拟合时,对双边不等缺口平板都基于大应力集中系数对 K 与 K_t 的数据相关性进行描述。4种材料的缺口平板 K_t 与 K 的数据汇总结果如图14所示。其拟合函数为

$$K=[\exp(-0.204(K_t-1))+\exp(-1.252(K_t-1))]/2 \quad (8)$$

拟合结果如图15所示。

从图14、15中可见,对于包括GH738、GH4169合

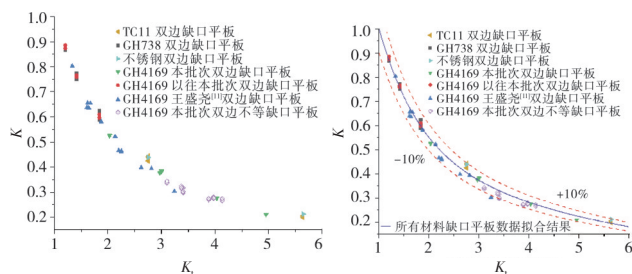


图14 4种塑性金属材料缺口平板 K_t 与 K 的数据汇总

图15 4种塑性金属材料缺口平板 K_t 与 K 的拟合结果

金等在内的典型航空发动机盘用材料缺口平板数据,经过无量纲化后的常数 K 虽然仍有一定的分散性,但是其整体分布趋势一致,包括双边应力集中系数不等缺口平板的试验数据都处在拟合函数曲线 $\pm 10\%$ 的分散带内。说明采用这种函数形式能够较好地描述缺口 K 随 K_t 的变化规律。表征的是在缺口平板单向拉伸载荷过程中,缺口几何形状导致应力集中而产生的最大拉伸应力对缺口抗拉强度的影响。

4 结论

本文对GH4169合金平板试样室温拉伸试验数据进行了分析,并以此为基础提出了1种适用于多种典型航空发动机盘用塑性金属材料、基于缺口平板件应力集中系数的缺口强度拟合公式。得到如下结论:不单单对于GH4169合金,还包括TC11、GH738合金和不锈钢在内的常用航空材料,本文给出的缺口强度拟合公式(式8)的函数曲线都能很好地描述缺口平板件应力集中系数与缺口无量纲化常数之间的关系。不同各向同性塑性金属材料的试验数据点处理后都落在函数曲线 $\pm 10\%$ 的分散带内,可以认为用应力集中系数这一表征缺口附近最大应力值的几何特征参数可以很好地拟合缺口平板件的抗拉强度。

参考文献:

- [1] 机械工业部.《机械工程材料测试手册》[M]. 沈阳:辽宁科技出版社, 2001:15-20.
Ministry of Machinery Industry. Mechanical engineering materials testing manual[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001:15-20. (in Chinese)
- [2] 梁永生, 孙明武, 张宪民. 冲击值与金属材料其他力学性能关系的研究[J]. 机械强度, 2012(3): 441-444.
LIANG Yongsheng, SUN Mingwu, ZHANG Xianmin. Study on the relationship between impact value and other mechanical properties of metal materials [J]. Mechanical Strength, 2012 (3): 441-444. (in Chinese)
- [3] 田伟, 伏宇, 钟燕, 等. 缺口对TC17钛合金拉伸性能和低周疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(11): 68-72.
TIAN Wei, FU Yu, ZHONG Yan, et al. Effect of notch on tensile properties and low cycle fatigue properties of TC17 titanium alloy [J]. Journal of Material Heat Treatment, 2016, 37 (11): 68-72. (in Chinese)
- [4] Sachs G, Sessler J G. Effect of stress concentration on tensile strength of titanium and steel alloy sheet at various temperatures[J] Symposium on Low Temperature Properties of High-Strength Aircraft and Missile Materials, 1961: 122-135.
- [5] Peterson R E. Stress concentration design factors[M]. New York: John Wiley, 1962: 15-40.
- [6] 郑修麟. 切口件的断裂力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 46-57.
ZHENG Xiulin. Fracture mechanics of notched parts [M]. Xi'an: North-western Polytechnic University Press, 2005: 46-57. (in Chinese)
- [7] Meng L, Tian L, Zheng X L. Notch strength and stress concentration sensitivity of alloy 2090 with various cerium contents[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(6): 1481-1486.
- [8] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 63-72.
ZHENG Xiulin. Mechanical properties of materials[M]. Xi'an: North-west University of Technology Press, 2000: 63-72. (in Chinese)
- [9] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 323.
China Aviation Materials Manual Committee. China Aviation Materials Manual[M]. Beijing: China Standards Press, 2002: 323. (in Chinese)
- [10] Peterson R E, Plunkett R. Stress concentration factors[J]. Naval Engineers Journal, 1955, 67(3): 697-708.
- [11] 航空工业部科学技术委员会. 应力集中系数手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 3-5.
Science and Technology Committee of The Ministry of Aviation Industry. Handbook of stress concentration factor [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990: 3-5. (in Chinese)
- [12] 王盛尧. 典型盘用材料缺口拉伸强度预测方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
WANG Shengyao. Research and application of prediction method for

- notched tensile strength of typical disc materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [13] 朱浩, 朱亮, 陈剑虹. 应力三轴度和应变率对6063铝合金力学性能的影响及材料表征[J]. 材料科学与工程学报, 2007(3): 358-362.
- ZHU Hao, ZHU Liang, CHEN Jianhong. Effect of stress triaxiality and strain rate on mechanical properties of 6063 aluminum alloy and material characterization[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007(3): 358-362. (in Chinese)
- [14] 梁永生, 孙明武, 张宪民. 冲击值与金属材料其他力学性能关系的研究[J]. 机械强度, 2012(3): 441-444.
- LIANG Yongsheng, SUN Mingwu, ZHANG Xianmin. Study on the relationship between impact value and other mechanical properties of metal materials [J]. Mechanical Strength, 2012(3): 441-444. (in Chinese)
- [15] 王林. 考虑三轴应力度和应变率效应的Q460GJ钢动力力学性能和断裂失效准则试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- WANG Lin. Experimental study on dynamic mechanical properties and fracture failure criterion of Q460GJ steel considering triaxial stress and strain rate effect [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [16] 刘立熙, 朱健, 李志强. 基于应力三轴度和罗德参数的6061和7075铝合金材料断裂失效分析[J]. 实验力学, 2017, 32(3): 342-350.
- LIU Lixi, ZHU Jian, LI Zhiqiang. Fracture failure analysis of 6061 and 7075 aluminum alloys based on stress triaxiality and rod parameters [J]. Experimental Mechanics, 2017, 32(3): 342-350. (in Chinese)
- [17] 段兴旺, 刘建生. 应变速率和应力三轴度对316LN钢强度的影响[J]. 锻压技术, 2017, 42(11): 172-176.
- DUAN Xingwang, LIU Jiansheng. Effect of strain rate and stress triaxiality on strength of 316LN steel [J]. Forging Technology, 2017, 42(11): 172-176. (in Chinese)
- [18] Al-Rubaie K S, Grande M A D, Travessa D N, et al. Effect of pre-strain on the fatigue life of 7050-T7451 aluminium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 464(1-2): 141-150.
- [19] Marino F, Rebuffo A, Sorrentino F. Effects of low-cycle fatigue on bending properties and fracture toughness of un-HIP'ed Ti-47Al-2Cr-2Nb-1B intermetallic[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(2): 143-153.
- [20] Wojciech M, Zbigniew L, Kowalewski. Evolution of tensile properties of the tial6v4 alloy due to the prior cyclic loading history [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 52(3): 847-851.
- [21] Kobayashi H, Daimaruya M, Tsuda H. Effect of pre-fatigue on dynamic and static tensile properties of laser welded butt joints between different high strength steel plates[J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22(9): 1141-1146.
- [22] Galan L J, Verleysena P, De Baerea I. Tensile properties of thin-sheet metals after cyclic damage [J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 1961-1966.
- [23] 邱少林, 卢锦德, 季方方, 等. 预变形对高强度铝铜合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(24): 18-19.
- QIU Shaolin, LU Jinde, JI Fangfang, et al. Effect of pre deformation on microstructure and properties of high strength aluminum copper alloy[J]. Hot Working Process, 2011, 40(24): 18-19. (in Chinese)
- [24] Barack W N, Domas P A. An improved turbine disk design to increase reliability of aircraft jet engines[R]. NASA-CR-135033.

(编辑:程海)