

# 2A12 铝合金锻坯开裂故障分析

李东东<sup>1</sup> 王影<sup>2</sup> 王世超<sup>1</sup> 刘涛<sup>1</sup> 林德健<sup>2</sup>

(1 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 某产品用 2A12 铝合金锻坯在生产过程中发生开裂故障。本文对开裂锻坯进行了形貌观察与断口分析,并对比研究了热处理后开裂锻坯、未热处理锻坯和原材料铝棒。结果表明:开裂锻坯上的开裂模式为脆性开裂;开裂锻坯上的裂纹形成于热处理过程,形成原因应与锻造工艺控制不当导致锻坯在热处理过程中形成的粗晶有关。

**关键词** 2A12 铝合金,锻坯,开裂故障,脆性开裂,粗晶

中图分类号: TG146.2

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.019

## Analysis on Crack Trouble of 2A12 Aluminum Alloy Forging Stock

LI Dongdong<sup>1</sup> WANG Ying<sup>2</sup> WANG Shichao<sup>1</sup> LIU Tao<sup>1</sup> LIN Dejian<sup>1</sup>

(1 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Several 2A12 aluminum alloy forging stocks were found to have fractured in the production process. In this article, morphological observation and fraction analysis were employed to investigate the reason why cracking phenomenon happened. In addition, the article studied comparatively the cracking forging stock with heat treatment, the forging stock without heat treatment and the aluminum bar. The results indicated that the fracture mode of the forging stock belong to brittle fracture, and the crack formed in the heat treatment process and related to the coarse-grain generated in the treatment process due to the improper forging process.

**Key words** 2A12 aluminum alloy, Forging stock, Crack trouble, Brittle facture, Coarse-grain

### 0 引言

2A12 铝合金强度高,有一定的耐热性,综合性能较好;该合金的主要特点是:主要合金组元铜、镁在固溶热处理后,溶于铝固溶体中呈饱和或过饱和状态,经过沉淀硬化处理,抗拉强度明显提高,而且还具有较好的塑性<sup>[1-3]</sup>。2A12 铝合金在热状态、退火状态下成形性能都比较好,可用作 150℃ 以下工作的零件,为制造航天航空构件的理想材料之一<sup>[4-7]</sup>。

2A12 铝合金锻坯在生产过程中发生开裂故障。此铝合金锻坯的加工流程为:2A12 铝合金棒材(直径 210 mm)→锻造为坯料(锻坯尺寸:1 300 mm×150 mm×105 mm)→铣加工锻坯表面(铣完锻坯尺寸:1 290 mm×140 mm×95 mm)→热处理→检验。12 件锻

坯热处理后,其中 8 件锻坯表面存在目视可见的裂纹;另外,同批次其余 20 件锻坯已完成铣加工表面工序,未进行热处理,目视检查此 20 件锻坯表面,均未发现裂纹存在。此锻坯加工的零件为箭体关键结构件,类似大批量的开裂故障,之前从未发生过,对此开裂故障进行分析研究以避免此类故障的再次发生具有非常重要的意义。

本文通过对开裂锻坯的形貌观察、金相分析以及对热处理后开裂锻坯、铣完表面未热处理锻坯和原材料铝棒的对比分析研究,确定了开裂故障的发生原因,为避免出现同类故障提供借鉴。

### 1 实验

#### 1.1 材料

收稿日期:2014-12-02

作者简介:李东东,1982 年出生,硕士,主要从事金属材料质量保证及机械产品失效分析等方面的研究。E-mail:ldfighting@126.com

2A12 铝合金棒材、铣加工完表面未热处理的锻坯(与开裂锻坯同批次)和热处理后开裂的锻坯,实

验材料具体情况如表 1 所示。

表 1 实验材料

Tab.1 Mechanical property test

实验材料	状态
原材料 2A12 铝合金棒材 (以下简称“铝棒”)	实验用铝棒与开裂锻坯所用铝棒为同一个批次,铝棒为西南铝生产,挤压成型,材料技术条件为 GB/T3191—1998,到货复验项目为:化学成分、力学性能、低倍检查,均符合标准要求。
与开裂锻坯同批次的铣加工完表面未热处理锻坯 (以下简称“未热处理锻坯”)	未热处理锻坯与开裂锻坯为同一批次,锻坯已铣加工完表面,未进行热处理,共 20 件,目视检查均未发现裂纹。
热处理后开裂锻坯 (以下简称“开裂锻坯”)	12 件锻坯经热处理,其中 8 件锻坯表面存在目视可见裂纹,另外 4 件目视检查未发现裂纹。

## 1.2 实验方法

采用机械方法,沿横截面(垂直于锻坯长度方向)在裂纹位置将开裂锻坯剖开,对裂纹在深度方向上的扩展形态进行观察。将裂纹打开,将裂纹断面置于配有能谱仪的扫描电镜下,对裂纹断面的形貌进行观察,并对裂纹断面进行 EDS 能谱分析。

分别从铝棒、未热处理锻坯和开裂锻坯(裂纹位置)上截取横截面试样,按照标准 GB/T3246.2—2000 对三种试样进行低倍组织检查,并对铝棒、未热处理锻坯和开裂锻坯的显微组织进行观察。

分别从铝棒、未热处理锻坯和开裂锻坯三种实验材料的边缘位置、心部位置截取试样,使用维氏硬度仪,对三种实验材料的维氏硬度进行测试。

对 20 件未热处理锻坯和 4 件热处理后目视检查未发现裂纹的锻坯,使用 A 型脉冲反射式超声波探伤仪,采用纵波直探头接触法,按照标准 GB/T6519—2000 进行超声波探伤。

## 2 实验结果

### 2.1 宏观形貌

开裂锻坯的外观形貌如图 1 所示。

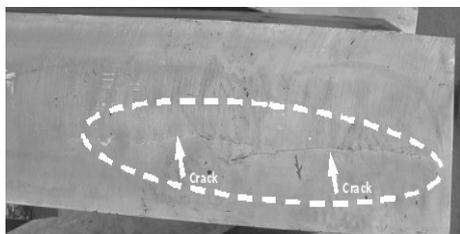


图 1 开裂锻坯外观形貌

Fig.1 Appearance of the failure forging

裂纹位于锻坯的“长×宽”表面,沿锻坯的长度方

向扩展,其中最长的—条裂纹长度约为 250 mm,裂纹具有一定的深度,但在锻坯的厚度方向上未穿透。

裂纹的横剖面形貌如图 2 所示,主裂纹在横截面上呈“Y”形,主裂纹上存在较多分叉小裂纹,裂纹扩展最深处在高度方向深约为 20 mm。

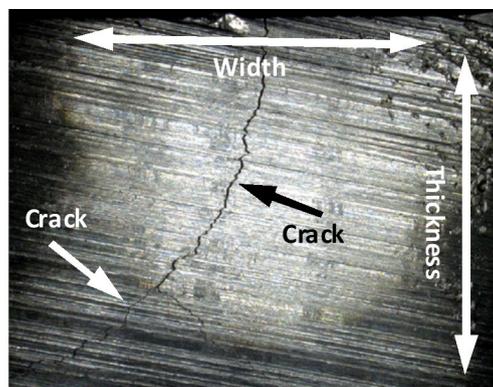


图 2 开裂锻坯截面形貌

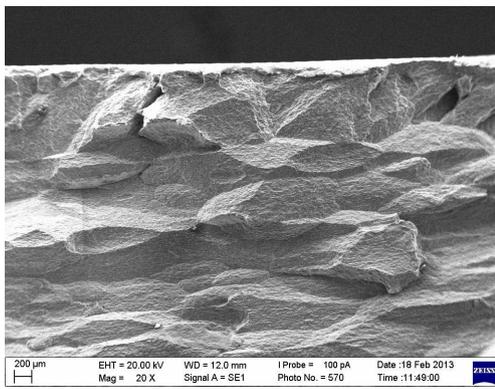
Fig.2 Section morphology of the failure forging

### 2.2 断口分析

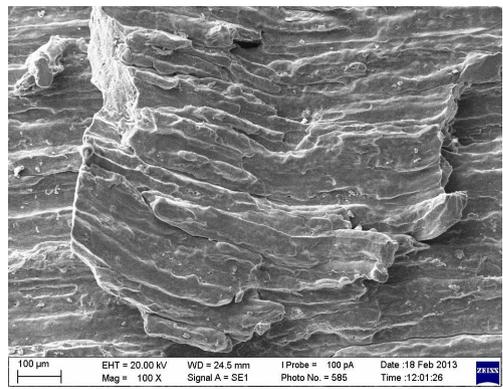
将开裂锻坯沿裂纹打开,对断口进行分析,裂纹断口形貌如图 3 所示。可以看出,裂纹断口呈沿晶形貌,局部区域可见明显的沿层间开裂形貌,靠近锻坯表面的晶粒尺寸明显大于靠近锻坯心部的晶粒尺寸,断口表面形貌较粗糙,断口未见明显的韧窝断裂特征。

断口形貌特征表明锻坯的开裂模式为脆性开裂<sup>[8]</sup>。

对裂纹断面进行能谱成分分析,结果显示:裂纹断面除含有基体元素外,还含有少量的 O 元素,表明裂纹断面发生了轻微的氧化。



(a) 靠近锻坯表面的裂纹



(b) 靠近锻坯心部的裂纹

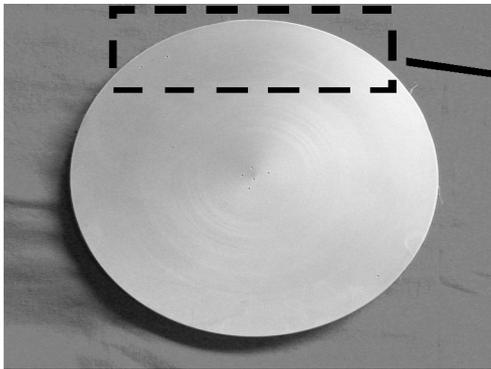
图3 裂纹断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of the crack

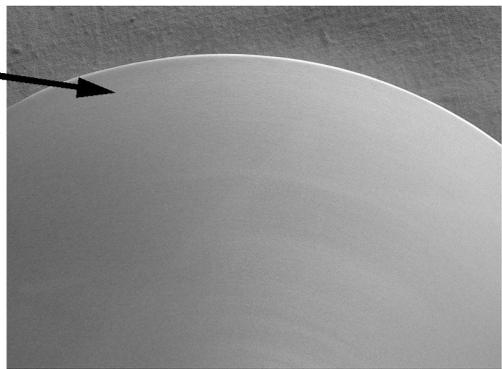
### 2.3 低倍组织

蚀后的低倍组织形貌如图4所示。

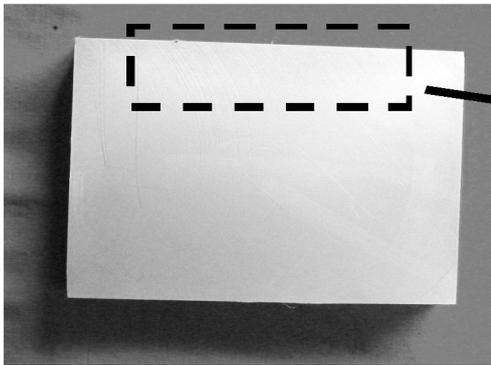
铝棒、未热处理锻坯和开裂锻坯三种实验材料浸



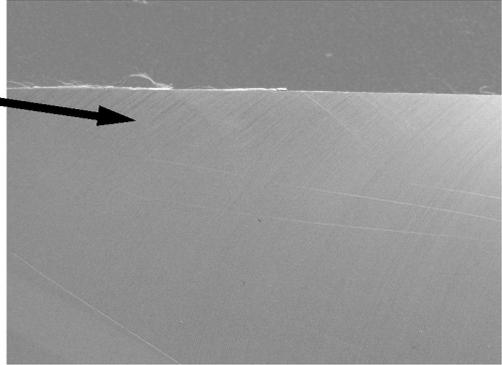
(a) 铝棒低倍



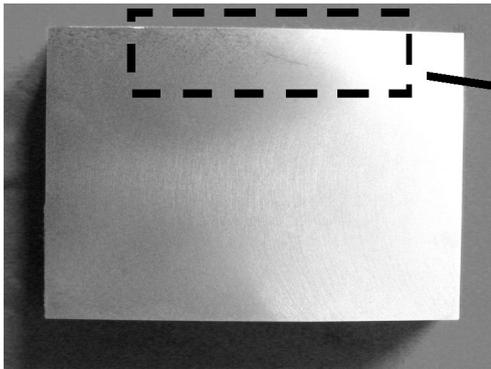
(b) 铝棒边缘区域放大



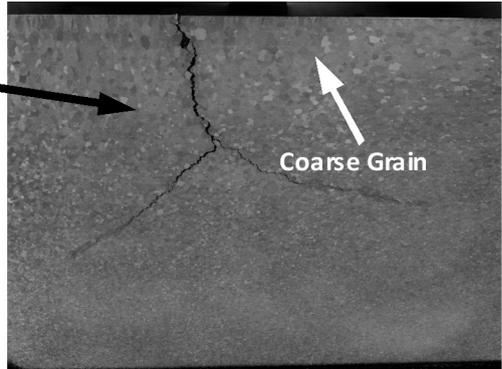
(c) 未热处理锻坯低倍



(d) 未热处理锻坯边缘区域放大



(e) 开裂锻坯低倍



(f) 开裂锻坯边缘区域放大

图4 低倍组织

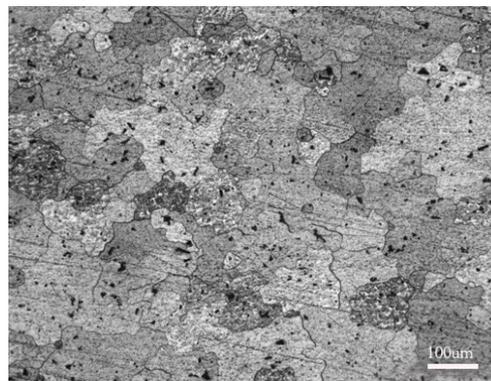
Fig.4 Macrostructure

从图4中可以看出,铝棒及未热处理锻坯的低倍组织未见明显差异,两者边缘均无粗晶存在,且晶粒细小(晶粒度为1级);开裂锻坯的边缘区域存在明显的粗晶(晶粒度为5级),粗晶区深度约为10 mm,开裂锻坯上的裂纹位于粗晶区内,沿晶扩展。

## 2.4 显微组织

铝棒、未热处理锻坯和开裂锻坯三种实验材料的显微组织形貌如图5所示。

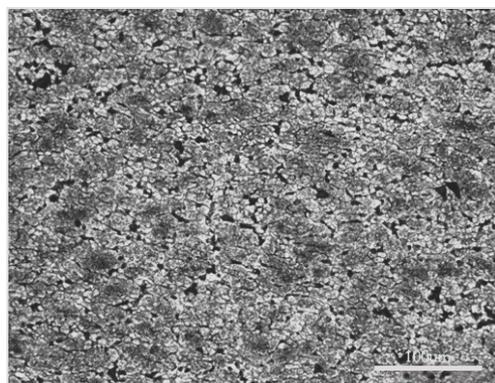
三种实验材料的显微组织均无过烧、非金属夹杂等材料缺陷存在。铝棒及未热处理锻坯的显微组织较均匀,且晶粒较细小,两者的晶粒尺寸明显小于开裂锻坯的晶粒尺寸。开裂锻坯的显微组织不均匀,晶粒粗大,其边缘区域的显微组织与心部区域的显微组织存在较大的差异,边缘区域的晶粒尺寸远远大于其心部区域的晶粒尺寸。



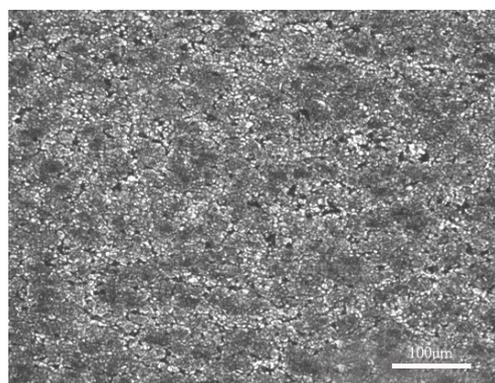
(d) 开裂锻坯心部区域

图5 显微组织

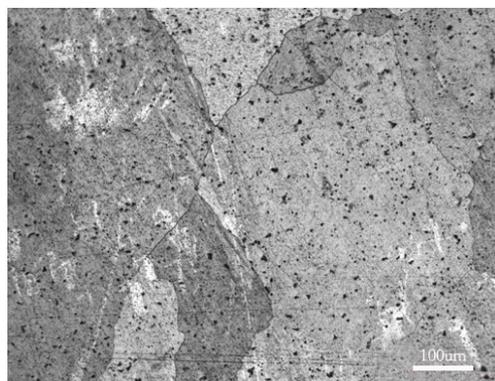
Fig. 5 Microstructure



(a) 铝棒



(b) 未热处理锻坯



(c) 开裂锻坯边缘区域

## 2.5 硬度分析

对三种实验材料的边缘区域和心部区域进行维氏硬度测试,结果如表2所示。

表2 三种实验材料的维氏硬度(HV0.2)

Tab. 2 Vickers hardness test (HV0.2) of the experimental materials

实验材料	测试位置	HV0.2	average
铝棒	边缘	63,62,65	63
	心部	70,71,71	71
未热处理锻坯	边缘	78,70,72	73
	心部	60,65,64	63
开裂锻坯	边缘(粗晶区)	144,150,156	150
	心部	141,140,136	139

维氏硬度测试结果表明,开裂锻坯边缘区域粗晶区的硬度略高于心部区域的硬度。

## 2.6 超声波探伤

4件热处理后目视检查未发现裂纹的锻坯及20件未热处理锻坯的超声波探伤结果如表3所示。

表3 锻坯超声波探伤

Tab. 3 Ultrasonic inspection of the forging stock

实验材料	检测数量	超声波检测结果
热处理后目视检查未发现裂纹的锻坯	4件	1件锻坯存在线性缺陷,其余3件均未发现大于 $\Phi 1.2$ mm平底孔当量的缺陷,均符合标准GB/T6519—2000的A级要求。
未热处理锻坯(目视检查未发现裂纹)	20件	20件未热处理的锻坯均未发现大于 $\Phi 1.2$ mm平底孔当量的缺陷,均符合标准GB/T6519—2000的A级要求。

## 2.7 化学成分分析

对开裂锻坯基体化学成分进行分析,结果如表4所示。结果显示,开裂锻坯基体化学成分符合技术标准要求。

表4 开裂锻坯基体化学成分

Tab.4 Composition of the forging stock wt%

element	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Zn	Ni
forging stock	0.07	1.56	0.57	0.07	4.51	0.04	0.01	≤0.10
standard	≤0.50	1.2 ~ 1.8	0.3 ~ 0.9	≤0.50	3.8 ~ 4.9	≤0.15	≤0.30	≤0.10

### 3 分析讨论

开裂锻坯基体的化学成分符合技术标准要求,未见异常。开裂锻坯上的裂纹在锻坯的横剖面上呈“Y”形扩展,主裂纹上存在较多分叉小裂纹;裂纹断面呈沿晶形貌,局部区域可见明显沿层间开裂形貌,靠近开裂锻坯表面的晶粒尺寸明显大于靠近开裂锻坯心部的晶粒尺寸,断口表面形貌较粗糙,断口未见明显韧窝断裂特征,上述实验结果表明:开裂锻坯的开裂模式为脆性断裂。

低倍组织和显微组织实验结果显示:开裂锻坯的组织不均匀,边缘区域存在明显粗晶区,裂纹位于粗晶区内,沿晶扩展;原材料铝棒及未热处理锻坯的显微组织较均匀,且晶粒较细小,两者晶粒尺寸明显小于开裂锻坯的,且两者边缘均无粗晶存在。

结合原材料铝棒、未热处理锻坯和热处理后开裂锻坯三者的加工过程,可以推断开裂锻坯上的粗晶区应形成于热处理过程。

粗晶缺陷是铝合金锻件常见缺陷之一<sup>[9]</sup>。粗晶缺陷会显著恶化锻件的力学性能、焊接性能、疲劳强度及表面着色性能等<sup>[10-12]</sup>。产生粗晶的根本原因是再结晶<sup>[13]</sup>。金属经过塑性变形后自由能提高,组织处于不稳定状态,当将其加热到适当温度时重新形成晶核并长大,由新晶粒构成的显微组织即为再结晶<sup>[14]</sup>。再结晶之后一般可得到细而均匀的等轴晶粒,但是如果加热温度正利于晶粒长大或加热保温时间过长,再结晶晶粒会长大成为粗大晶粒;另外,变形程度会影响再结晶温度,变形程度大,晶粒破碎严重,使内能增高,再结晶温度降低<sup>[15-18]</sup>。那么,铝合金锻造过程中,如果锻造工艺控制不当,使得金属变形不均匀(尤其是外表层金属),再结晶温度也会不均匀,再结晶温度低的区域在后续加热过程中就会形成粗晶缺陷。

结合硬度分析和超声波探伤结果以及锻坯的加工工艺过程进行分析可知,开裂锻坯上的裂纹应形成于热处理过程,形成原因应与锻造工艺控制不当导致锻坯在热处理过程中形成粗晶有关。

### 4 结论

开裂锻坯上的开裂模式为脆性开裂。原材料铝棒及未热处理锻坯的显微组织均匀,且晶粒较细小,两者

的晶粒尺寸明显小于开裂锻坯的晶粒尺寸,且两者边缘均无粗晶存在;开裂锻坯的组织不均匀,边缘区域存在明显的粗晶区,裂纹位于粗晶区内。开裂锻坯上的裂纹形成于热处理过程,形成原因应与锻造工艺控制不当导致锻坯在热处理过程中形成的粗晶有关。

### 参考文献

- [1] Chen Guoqing, Fu Xuesong, Zhao Fei, et al. Microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminum alloy after age forming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 1975-1980
- [2] 师昌绪, 颜鸣皋, 吴世平, 等. 工程材料使用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 39-84
- [3] Wu Dafang, Song Hao, Gao Zhenong, et al. Mechanical properties of 2A12 Al alloy at transient heating[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 531-534
- [4] 李东东, 张增阳, 林德键, 等. 航天型号用原材料数据包络分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(2): 71-75
- [5] 康进兴, 马康民, 李应红. 航空材料学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 158-184
- [6] 中国军工材料体系总编委会. 中国军工材料体系-航天[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 6-39
- [7] 曹景竹, 王祝堂. 铝合金在航空航天器中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(2): 1-5
- [8] 褚武扬, 乔利杰, 陈奇志, 等. 断裂与环境断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 22-33
- [9] 肖亚庆, 谢水生, 刘静安, 等. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- [10] 王迪瓚. LY12 铝合金型材粗晶对性能的影响[J]. 洪都科技, 2000, 3: 26-36
- [11] 郭红, 梁晓宁, 张福娜, 郭凤芹, 等. 2A50 合金反挤压棒材粗晶的研究[J]. 黑龙江冶金, 2007, 3: 11-14
- [12] 彭云, 王艳杰, 何长红, 等. 细晶组织耐候钢热影响区粗晶区的组织和性能[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(12): 41-44
- [13] 王奕雷, 田旺源. 6A02 铝合金挤压棒材粗晶环控制方法[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(8): 45-48
- [14] 王成江, 屈丽杰, 英卫东, 等. 铝合金模锻件粗晶缺陷浅析[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(7): 37-38
- [15] 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- [16] 刘浩, 杨琴, 郭玉娜, 等. 冷轧高强度汽车钢板的再结晶及组织[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(1): 37-41
- [17] 吴庆辉, 杨忠民, 王慧敏, 等. 热变形对耐蚀重轨钢动态再结晶及组织的影响[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(2): 72-78
- [18] 江海涛, 孙璐, 蔡正旭, 等. 预处理和变形量对 6082 铝合金再结晶组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(8): 80-84

(编辑 任涛)