

# MGH956 合金板材基本成形性能研究

## Research on Formability of MGH956 Alloy Sheet

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 杨 踊 曹一超 周 勇

**[摘要]** MGH956 合金为国内仿 MA956 合金研制的一种氧化物弥散强化高温合金,对 MGH956 合金板材进行了埃里克森杯突、拉深、扩孔、弯曲、锥杯和成形极限图等试验。通过试验,对于 MGH956 合金板材,建议采用具有拉深、胀形或拉胀复合成形特征零件的热成形,减少或避免用于具有较多翻边特征的零件加工。

**关键词:** 氧化物弥散强化 成形性能 板材

**[ABSTRACT]** MGH956 alloy is a kind of ODS superalloy that simulates MA956. MGH956 alloy possesses many advantages: excellent higher temperature strength, antioxidation and anticorrosion. On the other while, the formability of this superalloy is bad. Some tests about formability of MGH956 alloy sheets are introduced. Through the experiment, hot forming is conformably forming process for MGH956 alloy sheets.

**Keywords:** Oxide dispersion strengthened (ODS) Formability Sheet

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.16.085

MGH956 合金为国内仿 MA956 合金研制的一种氧化物弥散强化高温合金(Oxide Dispersion Strengthened, 简称 ODS 合金),该材料具有优良的高温强度、抗氧化、耐碳化和耐热腐蚀等综合性能<sup>[1]</sup>。国外已应用于航空发动机和燃汽轮机的一些高温部件,长期使用温度 1100℃左右,完全抗氧化温度达到 1200℃左右,国内正在开展其应用研究工作。然而, MGH956 合金较低的加工硬化指数、较大的屈强比、较差的延伸率及高的缺口敏感性导致其冲压成形工艺性差。该合金的屈服强度高于多数传统材料的屈服强度,导致成形零件具有较高冲压力和较大成形回弹量。据国外相关 MA956 合金板材成形方面资料介绍,这种材料的冲压成形性能与钛合金板材类似,冷成形不适合成形较复杂和精度要求较高的零件,热成形是其理想的成形工艺<sup>[2]</sup>。

为了全面掌握该材料的成形性,按照 GB/T 15825 进行拉深、扩孔、弯曲、锥杯和成形极限图试验,按照标准 GB/T 4156-2007 进行埃里克森杯突试验,将部分试验结果与钛合金做了对比,最后对 MGH956 合金板材基本冲压成形性能进行了较全面评价。

## 1 试验材料

试验用材料为采用机械合金化方法制备并经过轧制加工的氧化物弥散强化高温合金 MGH956 板材,状态为轧制后在 1325℃下进行 1h 高温退火处理,材料表面为吹砂状态,板材厚度为 1mm。试验材料的化学成分如表 1 所示。

表1 MGH956成分质量分数 %

元素	C	Cr	Al	Ti	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	Fe
含量	≤ 0.05	18.5~21.5	4.0~6.0	0.3~0.7	0.3~0.7	≤ 0.5	余量

## 2 MGH956 合金板材成形试验

### 2.1 埃里克森杯突试验

按照国家标准 GB/T 4156-2007“金属材料薄板和薄带埃里克森杯突试验”,杯突试验在一个装备有压模、冲头和垫模的设备上进行,杯突试验方法如图 1 所示。试验设备为 BCS50AR 万能薄板试验机,试样尺寸为  $\phi 90 \times 1\text{mm}$ ,环境温度 22℃。分别进行室温和高温杯突试验,室温试验条件:22℃ / 压边力 10kN / 无润滑;高温试验条件:650~850℃ / 压边力 10kN / 无润滑。

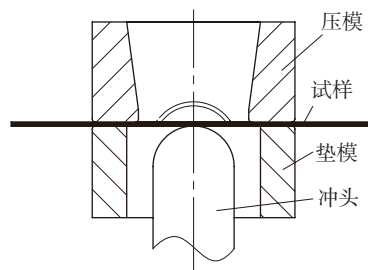


图1 埃里克森杯突试验示意图

Fig.1 Diagram of Erichsen cupping test

板材胀形成形性能常用室温埃里克森杯突试验来进行评价,杯突值 IE 的大小可以直接评价板材的胀形成形能力,该值越大,表明板材的室温胀形性能及拉深类成形性能越好。

室温埃里克森杯突试验结果:试样厚度为 1mm 的 MGH956 合金板材室温杯突平均值为 6.06mm,接近于

TC4 合金 5~7mm 和 TB8 合金 7~10mm 的杯突值,表明 MGH956 合金板材室温胀形成形能力与钛合金 TC4、TB8 相当,试验试样如图 2 所示,试验结果见表 2。



图2 室温埃里克森杯突试验变形试样

Fig.2 Erichsen cupping test samples at room temperature

表2 MGH956板材室温埃里克森杯突值IE mm

试样编号	1	2	3	平均
杯突值 IE	6.06	6.21	5.91	6.06

高温埃里克森杯突试验结果: 试样厚度为 1.0mm 的 MGH956 合金板材, 650~850℃ 高温杯突值 IE 约为 8~9mm, 接近 TA15 合金 6~10mm (700~900℃), 略低于 TC4 合金 10~14mm(650~800℃), 试验试样如图 3 所示, 试验结果见表 3。试验结果表明高温下 MGH956 合金具有更好的胀形成形性能。



图3 高温埃里克森杯突试验变形试样

Fig.3 Erichsen cupping test samples at high temperature

表3 MGH956板材高温杯突值IE

试样编号	杯突平均值 IE/mm	温度 /℃
1	8.64	650
2	8.74	700
3	9.04	850

## 2.2 拉深试验

试验标准参考 GB/T 15825.3-1995 “金属薄板成形性能与试验方法——拉深与拉深载荷试验”, 试验时将圆片形试样放置于压边圈和凹模之间, 通过凸模对其进行拉深成形, 拉深试验方法如图 4 所示。试验设备为 BCS50AR 万能薄板试验机, 试样起始直径为 90mm, 以

1.25mm 级差加工, 环境温度 22℃。分别进行室温和高温拉深试验, 室温试验条件: 22℃ / 压力 10kN / 无润滑; 高温试验条件: 700℃ / 压力 10kN / 石墨润滑。

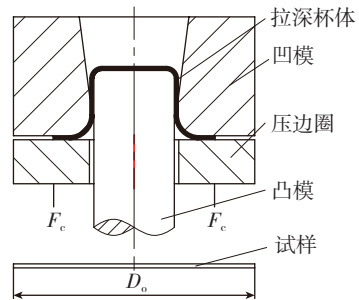


图4 拉深试验示意图

Fig.4 Drawing test diagram

通过拉深试验能够测得金属薄板的极限拉深比。对于金属薄板拉深成形性能而言, 极限拉深比越大, 表明板材的拉深变形程度越大, 拉深性能越好。通过试验, 测得 1.0mm 厚度的 MGH956 合金室温下的极限拉深比约为 1.56, 略高于 TC4 合金板材的室温极限拉深比 (1.2~1.5), 室温拉深变形试样如图 5 所示。

高温拉深试验得到的 1.0mm 厚度 MGH956 合金 700℃ 下的极限拉深比约为 1.65, 高温拉深变形试样如图 6 所示。试验结果表明, 在高温下 MGH956 合金的拉深成形性能较好。



图5 室温拉深变形试样

Fig.5 Drawing samples at room temperature



图6 高温拉深变形试样

Fig.6 Drawing samples at high temperature

### 2.3 扩孔试验

试验标准参考 GB/T 15825.4-1995 “金属薄板成形性能与试验方法——扩孔试验”，试验时将带有预制圆孔的圆形试样放置在压边圈和凹模之间压紧，通过凸模将其下部的试样材料压入凹模，迫使预制圆孔直径不断扩大，扩孔试验方法如图 7 所示。试验设备为 BCS50AR 万能薄板试验机，试样外廓直径 100mm，内孔 12mm，环境温度 22℃。分别进行室温和高温扩孔试验，室温扩孔试验条件：22℃ / 压边力 10kN / 无润滑；高温扩孔试验条件：700℃ / 压边力 10kN / 无润滑。

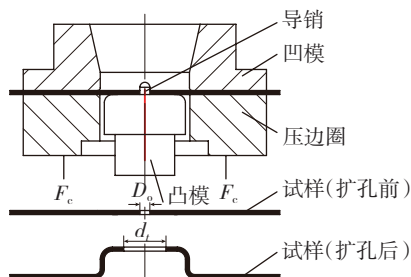


图7 扩孔试验示意图

Fig.7 Expanding hole test diagram

圆孔翻边成形性能常用扩孔试验来进行评价，扩孔率  $\lambda$  的大小可以直接评价板材的翻边性能，该值越大，表明材料的翻边性能越好。通过试验测得，厚度为 1.0mm 的 MGH956 合金板材的室温扩孔率约为 22%，低于 TB8 合金 33.5% 和 TB5 合金的 58.7%。室温扩孔试样见图 8，试验数据见表 4。



图8 室温扩孔变形试样

Fig.8 Expanding hole test samples at room temperature

表4 MGH956板材室温扩孔值

试样编号	最大孔径/mm	最小孔径/mm	扩孔率 $\lambda$ /%
1	14.7	14.5	21.7
2	14.6	14.5	21.3
3	14.8	14.7	22.9
平均	—	—	22.0

高温扩孔试验结果：厚度为 1.0mm 的 MGH956 合金板材 700℃ 扩孔率约为 28.2%，低于 TB8 合金 33.5% 和 TB5 合金的 58.7%，高温扩孔试样见图 9，试验数据



图9 高温扩孔变形试样

Fig.9 Expanding hole test samples at high temperature

表5 MGH956板材高温扩孔值

试样编号	最大孔径/mm	最小孔径/mm	扩孔率 $\lambda$ /%
1	15.1	14.8	24.6
2	15.8	15.6	30.8
3	15.7	15.2	28.8
平均	—	—	28.2

见表 5。试验结果表明，温度对 MGH956 合金扩孔率影响不大。

### 2.4 弯曲试验

试验标准参考 GB/T15825.5-1995 “金属薄板成形性能与试验方法——弯曲试验”，采用一系列具有不同半径的凸模，将试样按照规定的弯曲角度弯曲后，检查其变形区外侧表面，以该表面不产生裂纹或显著凹陷时的最小相对弯曲半径作为板材的弯曲性能指标，弯曲试验方法如图 10 所示。试验设备为 AG-1.500kN 电子拉伸试验机，环境温度 22℃，试验温度 22℃，试样尺寸为 150mm × 50mm × 1mm。

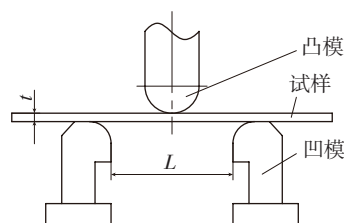
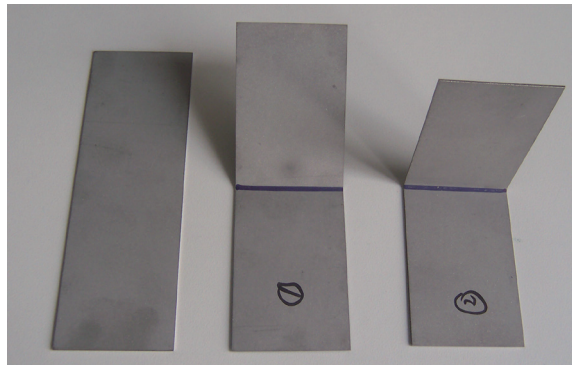


图10 弯曲试验示意图

Fig.10 Bending test diagram

采用 3.0mm、5.0mm、8.0mm、10mm 和 14mm 共 5 种圆弧半径的凸模，跨距分别为 6.0mm、8.0mm、11mm、13mm 和 17mm，进行 3 点弯曲试验，弯曲角分别为 45° 和 90°。凸模半径为 3.0mm，跨距为 6.0mm 弯曲变形试样如图 11~12 所示。

最小弯曲半径是板材弯曲性能的主要评定尺度，一般以相对于板料厚度的相对弯曲半径表示。此值越小，表明板材的弯曲性能越好。由于试验模具所限，在跨距为 6.0mm，试验最小圆弧半径 3.0mm 的凸模作用下弯



(a)原始试样 (b)45°弯曲试样 (c)90°弯曲试样

图11 原始试样、45°和90°弯曲变形试样

Fig.11 Original, 45° and 90° bending samples



(a)MGH956 45°弯曲试样 (b)TA12 45°弯曲试样

图12 MGH956和TA12 45°弯曲试样

Fig.12 MGH956 and TA12 45° bending samples

曲角 90° 时,仍保持试样变形区外侧表面无裂纹出现或显著凹陷,可知 MGH956 合金的最小弯曲半径应小于 3.0mm。

试验结果表明, MGH956 合金板材的室温弯曲性能良好。图 12 中所示为圆弧半径 3.0mm 的压头作用下弯曲角 45° 时 MGH956 和 TA12 合金的变形试样,后者变形区外侧表面出现明显裂纹,表明 MGH956 合金的极限弯曲变形能力应优于 TA12 与 TC4 合金 3.5~5.0mm 的最小弯曲半径。

### 2.5 锥杯试验

试验标准参考 GB/T 15825.6-1995 “金属薄板成形性能与试验方法——锥杯试验”,试验时将圆片形试样放在锥形凹模内,通过钢球对试样进行“拉深+胀形”复合成形,直到杯底侧壁发生破裂时停机,然后测量锥杯口部的最大直径和最小直径,从而计算出锥杯值 CCV 作为板材的“拉深+胀形”复合成形性能指标,锥杯试验方法见图 13。试验设备为 BCS50AR 万能薄板试验机,圆形试样直径为 78mm,环境温度 22℃。分别进行室温和高温锥杯试验,室温锥杯试验条件:22℃ / 压边力 10kN / 无润滑;高温锥杯试验条件:700℃ / 压边力 10kN / 石墨润滑。

锥杯试验常用于模拟板材对于球形形状零件的拉深成形及一些大型覆盖件的加工成形的适应能力,锥杯

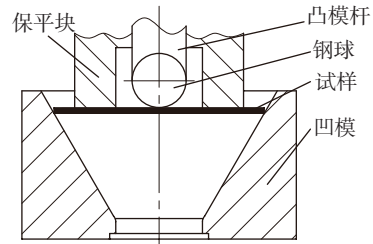


图13 锥杯试验示意图

Fig.13 Conical cup test diagram

值 CCV 值越小,表明材料可能产生的变形越大,其复合成形性能越好。

测试得到的 1.0mm 厚度 MGH956 合金室温下的锥杯值 CCV=56.1mm,与一般中碳钢( CCV 值为 45~49mm )基本相当,室温锥杯试验试样如图 14 所示,试验结果见表 6。



图14 室温锥杯变形试样

Fig.14 Conical cup test samples at room temperature

表6 MGH956板材室温锥杯值 mm

试样编号	最大直径	最小直径	锥杯值 CCV
1	56.4	56.3	56.4
2	56.6	54.7	55.7
3	56.4	55.7	56.1
平均	—	—	56.1

高温锥杯试验结果:厚度为 1.0mm 的 MGH956 合金板材 700℃ 锥杯值 CCV 约为 47.9,高温锥杯试样见图 15,试验数据见表 7。试验结果表明 MGH956 合金复合成形性能较好,高温下其复合成形性能更好。

试验结果表明温度对 MGH956 合金锥杯值影响不大,由于未查到相关钛合金的锥杯值数据,无法进行对

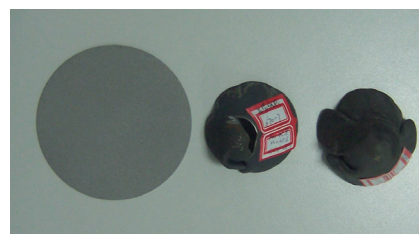


图15 高温锥杯变形试样

Fig.15 Conical cup test samples at high temperature

表7 MGH956板材高温锥杯值 mm

试样条件编号	最大直径平均值	最小直径平均值	锥杯平均值CCV
1	45.8	45.6	45.7
2	50.6	49.4	50
平均	—	—	47.9

应比较。

## 2.6 成形极限图试验

试验标准参考 GB/T 15825.8-1995 “金属薄板成形性能与试验方法——成形极限图(FLD)试验”,试验设备为 BCS50AR 万能薄板试验机,试样尺寸 180mm × (20~180)mm,环境温度 22℃。分别进行了室温和高温成形机线图试验,室温成形极限图试验条件:22℃ / 压边力 10kN/PVC 膜润滑;高温成形极限图试验条件:700℃ / 压边力 10kN/ 无润滑。

室温成形极限图试验测试试样如图 16 所示。由于没有获得 MGH956 合金的应变硬化指数  $n$  值,在采用 GMASystem 系统进行应变分析时,选取默认值 0.2 进行 FLD 绘制,获得 MGH956 室温成形极限图如图 17 所示。

成形极限曲线将整个图形分成 3 部分:安全区、破裂区及临界区。数据点集中于左中部的低应变区,即压-拉变形区,说明 MGH956 合金板材在室温胀形状态下

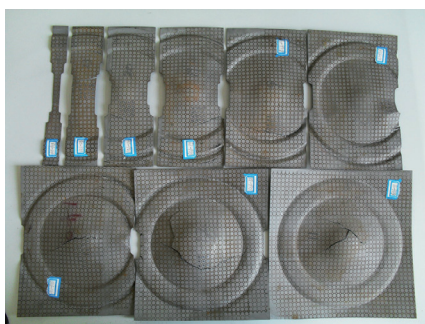


图16 室温成形极限试样

Fig.16 FLD samples at room temperature

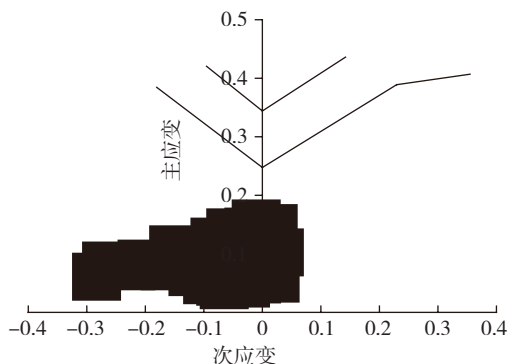


图17 室温成形极限图

Fig.17 FLD at room temperature

成形能力很差。

高温成形极限图试验测试试样如图 18 所示。同样,由于没有获得 MGH956 合金的应变硬化指数  $n$  值,在采用 GMASystem 系统进行应变分析时,选取默认值 0.2 进行 FLD 绘制,获得的 MGH956 高温成形极限图(FLD)如图 19 所示。

由图 19 可知,成形极限曲线将整个图形分成 3 部分:安全区、破裂区及临界区。数据点集中于左中部的中等应变区,即压-拉变形区,说明 MGH956 合金板材在高温胀形状态下具有一定的成形能力。从成形极限图的角度考察,该合金具备一定的高温成形加工能力。

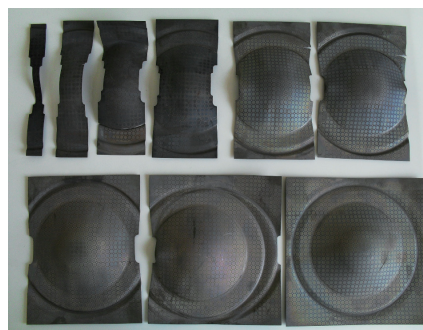


图18 高温成形极限试样

Fig.18 FLD samples at high temperature

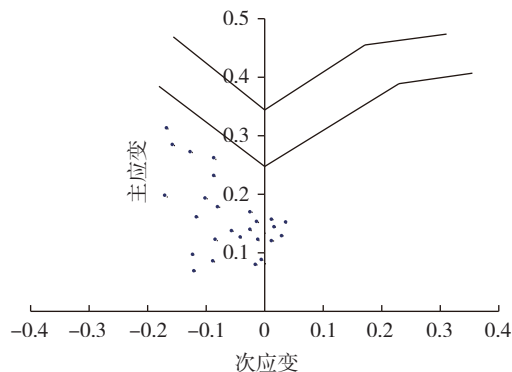


图19 高温成形极限图

Fig.19 FLD at high temperature

## 3 结论

MGH956 合金总体成形性能接近于两相钛合金,其热成形性能较好。通过试验得到结论如下:

(1) 该合金的室温胀形能力一般,但在高温下具有一定的胀形成形能力,其总体胀形性能接近于 TA15 合金;

(2) 该合金具有一定的室温拉深成形能力,其高温拉深性能较好;

(3) 该合金的室温翻边成形能力较差,在高温下也没有明显改善;

(下转第 95 页)



图8 螺栓组拧紧试验实物图

Fig.8 Test of bolt group tightening

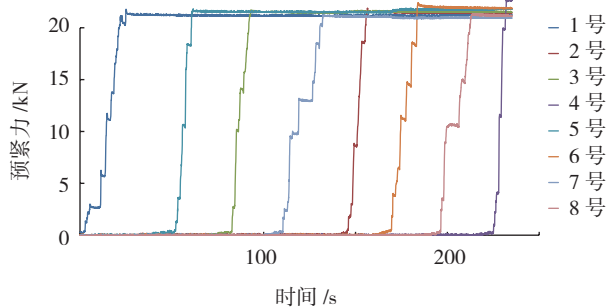


图9 螺栓组拧紧试验数据曲线图

Fig.9 Tightening test of bolt group

表1 力矩扳手拧紧试验 kN

螺栓序号	顺序拧紧	对称拧紧
1	19	18
2	21	22
3	15	22
4	20	22
5	17	20
6	16	22
7	16	22
8	14	17
极差	6.8	5.4
相对误差	0.4	0.27

## 6 结束语

螺栓(或螺钉)连接是航空航天等机电产品装配中最常用到的连接方法之一。针对目前螺栓组连接中的预紧力测量难、螺栓连接质量过分依赖拧紧力矩的问题,笔者提出了一种基于垫片式力传感器的螺栓组连接预紧力测量方法,试验表明该方法测量方便,且能够有效监测螺栓组拧紧过程中以及拧紧之后的预紧力。

该测量设备适合在实验室、装配现场、振动等环境直接测量螺栓及螺栓组中的预紧力,为制定及评价螺栓组拧紧工艺、研究螺栓组在振动等工况环境下的防松等提供了有效措施。

## 参考文献

- [1] 熊云奇,张琼敏,淮进,等. 螺纹紧固件摩擦性能评述. 汽车科技,1998(6):12-18.
- [2] 天津大学. 一种测试螺栓预紧力的装置及其控制方法: 中国,102519652[P]. 2012-06-27.
- [3] 杜刚民,李东风,曹树. 螺栓轴向应力超声测量技术. 无损检测: 试验研究,2006,28(1):20-25.
- [4] 湘电风能有限公司. 一种螺栓预紧力检测仪: 中国,201611293[P]. 2010-10-20.
- [5] 东风汽车有限公司. 螺栓组预紧力测量装置: 中国,201083575[P]. 2008-07-09.

(责编 谷雨)

(上接第 84 页)

## 参考文献

- [1] Baker A A. Fiber composite repair of cracked metallic aircraft components practical and basic aspects. Composites, 1987, 18(4):293-307.
- [2] Baker A A. Repair of cracked of defective metallic aircraft components with advanced fiber composites—an overview of Australian work. Composite Structures, 1984, 2:153-181.
- [3] Alias M N, Brown R. Corrosion behavior of carbon fiber composites in the marine environment. Corrosion Science, 1993, 35:31-54.
- [4] 白金泽. 复合材料补片胶接补强修补技术参数分析. 机械科学与技术, 2001, 20(5): 748-750.
- [5] 赵立涛,王志璟. 复合材料胶接修补金属裂纹板的应力强度因子研究. 飞机设计, 2011, 31(2): 67-50.
- [6] 朱新宇,卢俊文. 基于剩余强度的复合材料补片形状优化研究. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(3):8-11.
- [7] 严沾谋,游敏,余海洲,等. 胶粘剂弹性模量对铝合金单搭接接头应力应变分布的影响. 航空材料学报, 2006, 26(4):39-42.
- [8] Kaye R H, Heller M. Through-thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints. Adhesion & Adhesives, 2002, 22:7-21.

(责编 古京)

(上接第 89 页)

(4) 该合金的室温弯曲性能较好,但回弹现象比较严重;

(5) 该合金具有较好的“拉深+胀形”复合变形能力,其复合变形能力在高温下更加优良;

(6) 该合金板材适用拉深、胀形或拉胀复合成形特征零件的热成形,应减少或避免用于具有较多翻边特征的零件加工。

## 参考文献

- [1] 杨踊,石竖鲲,石晓东. 新型 ODS-MGH956 合金板材热成形性能研究. 航空制造技术, 2010(4):87-89.
- [2] 李华林,单秉权. ODS-MGH956 高温高强度抗氧化合金的全面性能. 钢铁, 1994(5):54-59.

(责编 古京)