

# 5A06 铝合金焊接接头裂纹失效分析

## Failure Analysis of 5A06 Aluminum Alloy Welding Joint Crack

张红霞, 刘晓晴, 闫志峰, 王文先, 李永莲  
(太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)  
ZHANG Hong-xia, LIU Xiao-qing, YAN Zhi-feng, WANG Wen-xian, LI Yong-lian  
(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University  
of Technology, Taiyuan 030024, China)

**摘要:** 针对 5A06 铝合金焊缝附近出现的裂纹进行了分析。5A06 铝合金母材、焊缝及热影响区组织分析结果表明, 材料成型后的组织不均匀, 并且存在夹杂物, 晶内和晶界有析出相出现。采用光学显微镜对裂纹的扩展特征进行分析, 结果表明, 裂纹在材料边缘夹杂物处启裂, 以沿晶的特征进行扩展。采用 SEM 对断口进行微观和宏观分析, 断口中存在二次裂纹, 断口为脆性断裂。

**关键词:** 5A06 铝合金; 二次裂纹; 脆性断裂; 沿晶断裂

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.03.006

**中图分类号:** TG146.21   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-4381(2013)03-0027-05

**Abstract:** The cracks near 5A06 aluminum alloy welding joint are analyzed. The metallurgical structure of base metal, welding joint and heat-affected zone are analyzed and the results indicate that organization is uneven and there is inclusion in the aluminum alloy, the precipitates are found in grain inner and boundary. The crack propagation character are analyzed and the results indicate that the crack originates from the inclusion of the specimen edge, and crack propagation along the grain boundary. Micro-fracture and macro fracture are analyzed by SEM and found that there are secondary cracks in the fracture, and the fracture was brittle fracture.

**Key words:** 5A06 aluminum alloy; secondary crack; brittle fracture; intergranular fracture

近年来, 铝、镁等轻质合金由于其节约能源、减少废气排放等特点, 在海事用途 (如船舶)、汽车、飞机<sup>[1,2]</sup>、地铁轻轨及需严格防火的压力容器等得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。5A06 铝合金为 Al-Mg 系防锈铝, 具有较高的强度、腐蚀稳定性和良好的焊接性等特点<sup>[4,5]</sup>, 是防锈铝合金中的典型合金。用其代替钢铁材料, 可显著减轻构件的质量。

铝合金结构产品往往需要通过焊接加工成形, 5A06 铝合金的焊接特点主要为: 与氧的亲合力大, 焊接时生成一层难熔的氧化铝膜; 线膨胀系数较大, 易产生焊接变形; 易造成氧化, 产生气孔、热裂纹和接头不等强等问题<sup>[6]</sup>, 这些问题的存在对结构或产品的安全性造成影响, 一旦发生破坏事故, 往往给人们的生命财产带来灾难性的损失。

国内相关研究者对铝合金的焊接性能<sup>[7]</sup>、铝合金疲劳断口及疲劳断裂行为<sup>[8-10]</sup>等进行了分析研究。研究发现采用适当的焊接方法, 铝合金焊接接头的性能可以满足使用要求<sup>[11]</sup>, 但使用一段时间后由于力、

介质的作用会使结构失效。本工作针对 5A06 防锈铝合金某产品焊接后使用一段时间出现裂纹的原因进行分析, 并对材料及焊接接头的组织、裂纹扩展特征以及断口等进行分析, 找出裂纹产生的原因, 提出相应防止裂纹产生的措施。

### 1 实验材料及焊接工艺

为了分析裂纹产生的原因, 将产生裂纹的局部产品取样后进行分析。

#### 1.1 实验材料

产品材料为 5A06 防锈铝合金, 其化学成分<sup>[12]</sup>见表 1, 力学性能见表 2。

**表 1 5A06 铝合金的化学成分 (质量分数/%)**  
Table 1 Chemical compositions of 5A06 aluminum alloy  
(mass fraction/%)

Mg	Mn	Cu	Si	Zn	Ti	Fe	Other	Al
6.2	0.75	0.1	0.4	0.2	0.06	0.4	0.1	Bal

表 2 5A06 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical property of 5A06 aluminum alloy

Examination condition	Tensile strength $\sigma_b$ /MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa	Elongation $\delta$ /%
Rolling	315	155	16
Anneal	333	177	20
Extrusion	314	157	6

1.2 焊接工艺

取样的结构由壳体和支柱通过焊接连接而成,焊缝结构示意图见图 1。壳体材料为轧制成型的铝合金板,经过卷圆成型;支柱材料经热挤压成型后机械加工而成。

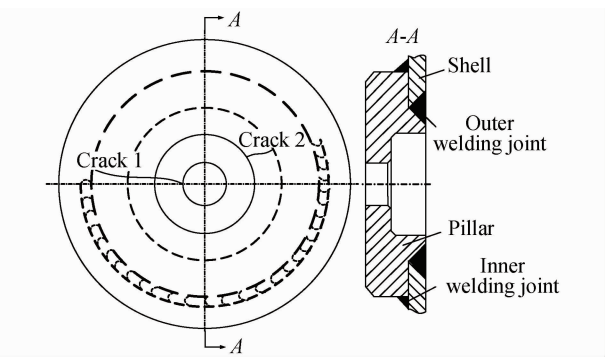


图 1 试件装配、焊接及裂纹存在部位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assemble, welding and crack existence position

壳体与支柱通过焊接连接在一起,其中包括两条焊缝:如图 1 中的外部焊缝和内部焊缝,两焊缝均采用钨极氩弧焊进行焊接,焊接工艺为:外部焊缝开坡口后焊接,坡口角度 35°,钝边 1~2mm,将支柱装配到壳体对应孔上,点焊固定。用手工钨极氩弧焊打底,然后采用钨极氩弧焊进行焊接,焊接电流 150~160A,电弧电压 12~15V。焊缝余高 3mm,焊后采用机械加工的方法去除余高并磨平。内部焊缝不开坡口,焊接电流 140~150A,电弧电压 12~15V。由于结构的影响,内部焊缝采取断续焊接,焊后也不做清理。焊后产品整体进行 200℃退火处理。

由于壳体为圆筒状,与其配合的支柱面也加工成圆弧面,从而保证壳体和支柱配合较好。

2 结果分析

2.1 组织分析

2.1.1 壳体组织

对壳体材料的横截面和轧制面进行了组织分析,分析结果见图 2。图 2 中可见壳体组织较细小,晶粒大小不很均匀,平均晶粒尺寸为 5~20μm,并且材料中存在一些夹杂物。

2.1.2 支柱组织

支柱金相照片如图 3 所示,图 3 中可见支柱组织取

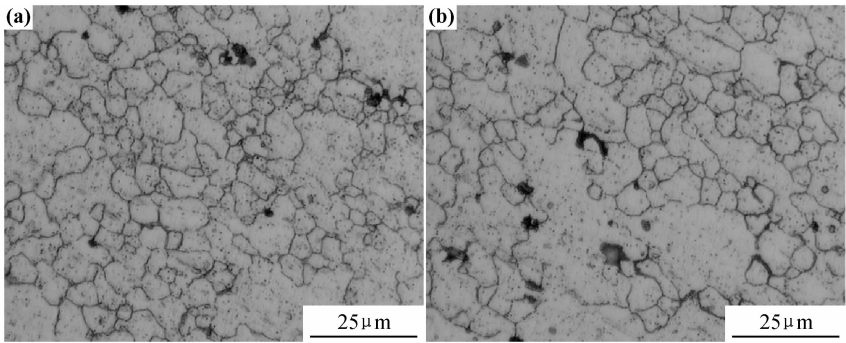


图 2 壳体组织 (a)横截面;(b)轧制面

Fig. 2 Shell metallurgical structure (a)cross section;(b)shell surface

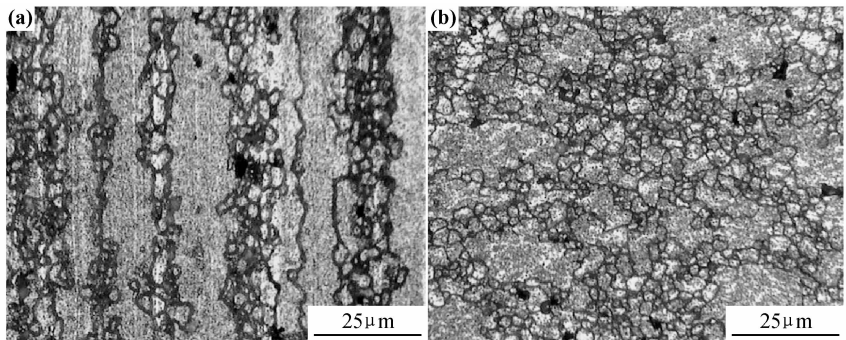


图 3 支柱组织 (a)挤压方向组织;(b)垂直于挤压方向

Fig. 3 Pillar metallurgical structure (a)extrusion direction;(b)perpendicular to the extrusion direction

向严重,沿挤压方向存在粗大的带状组织。

2.1.3 焊缝组织分析

对外部焊缝进行宏观观察,焊缝宏观照片如图 4

所示。图 4(a)为外部焊缝的整体形貌,图 4(b)为焊缝熔合区金相照片,图 4(c)为焊缝组织照片,由图可以发现焊缝组织细小,较为均匀,热影响区组织较粗大,

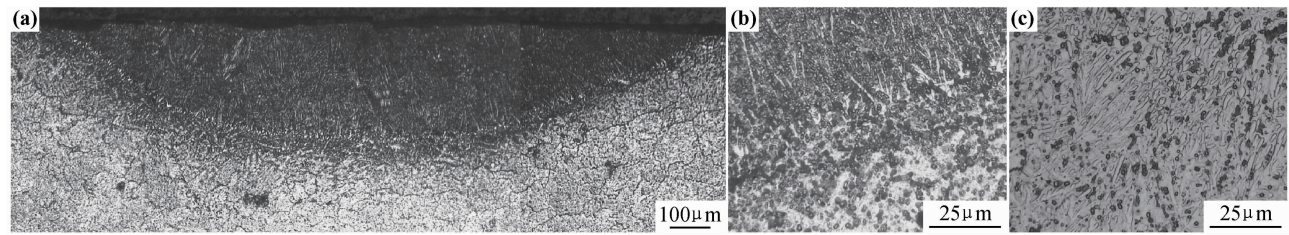


图 4 试件焊缝金相照片 (a)焊缝全貌;(b)熔合区金相照片;(c)焊缝金相照片  
Fig. 4 Microstructure of welded joint (a)the whole weld;(b)fusion zone;(c)weld center

但组织比较均匀。

2.2 裂纹分析

产品运行一段时间后,在外部焊缝附近出现两处裂纹,图 1 中所示为产生裂纹的部位示意图。裂纹 1 为横贯焊缝的长裂纹,裂纹 2 较短,其长度为从内孔边缘到达焊缝处。

2.2.1 宏观裂纹分析

对图 1 中右侧的裂纹 2 进行分析,裂纹的宏观扩展特征如图 5 所示。由图中可以发现支柱材料中心孔径缺陷处为裂纹源,裂纹扩展方向为由裂纹源向壳体

方向发展,由图中还可以发现裂纹呈断续扩展,沿材料中的缺陷部位扩展,断续裂纹以二次裂纹为起裂点然后扩展。

2.2.2 微观裂纹分析

对裂纹的扩展特征进行微观分析,其结果如图 6 所示。

图 6(a)为裂纹源,裂纹产生于支柱内部边缘缺陷处,在裂纹源处受到力的作用后开始扩展,裂纹沿晶界薄弱环节处向前扩展。

图 6(b)~(d)为裂纹沿晶扩展照片,可以看出裂纹均为沿晶扩展特征,由此可以发现材料的晶界为薄弱环节,当裂源产生后,在应力的作用下,裂纹易沿晶界向前扩展。图 6(e)可以发现母材晶界存在析出相,由以上分析可知晶界为材料的薄弱环节,再加上析出相的存在为裂纹扩展提供了有利条件;图 6(f)可以发现材料中存在缺陷,在试件受到力的作用后,由于缺陷的存在,裂纹会在缺陷处产生并沿着晶界及缺陷的部位进行扩展。

由以上分析可知,裂纹起源于壳体材料中的缺陷处,然后在支柱材料中沿柱状组织的晶界扩展,裂纹扩展以沿晶特征为主。材料中的缺陷对裂纹的产生和扩展起到帮助作用。

2.3 断口分析

2.3.1 宏观断口分析

将试件沿裂纹 1 人为拉断,断口宏观照片如图 7。

图 7(a)中可见截面中大部分已断裂,壳体裂纹已通过外部焊缝,支柱裂纹已扩展至下部边缘。支柱断口存在大量的二次裂纹,见图 7(b)。灰暗断口部位为实验时已断裂部位,较亮断口为人为断口。图中可见支柱断口中存在粗大的纤维状,断口粗糙,取向明显。壳体断口较细,焊缝及热影响区断口也均匀细致。

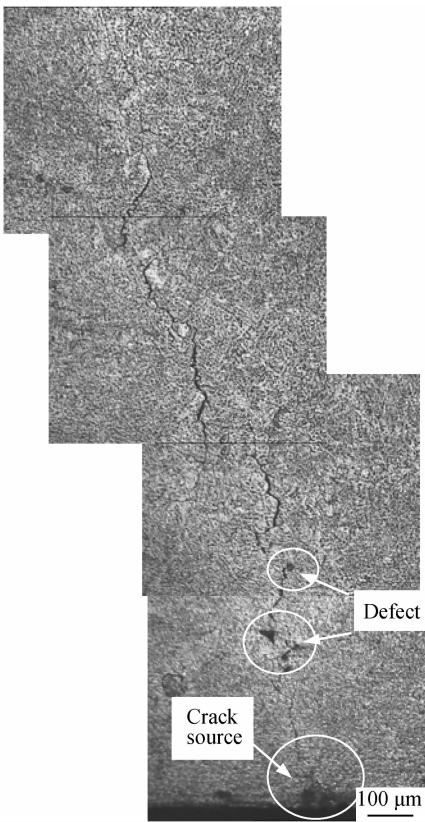


图 5 裂纹扩展方向  
Fig. 5 Macro-crack propagation direction



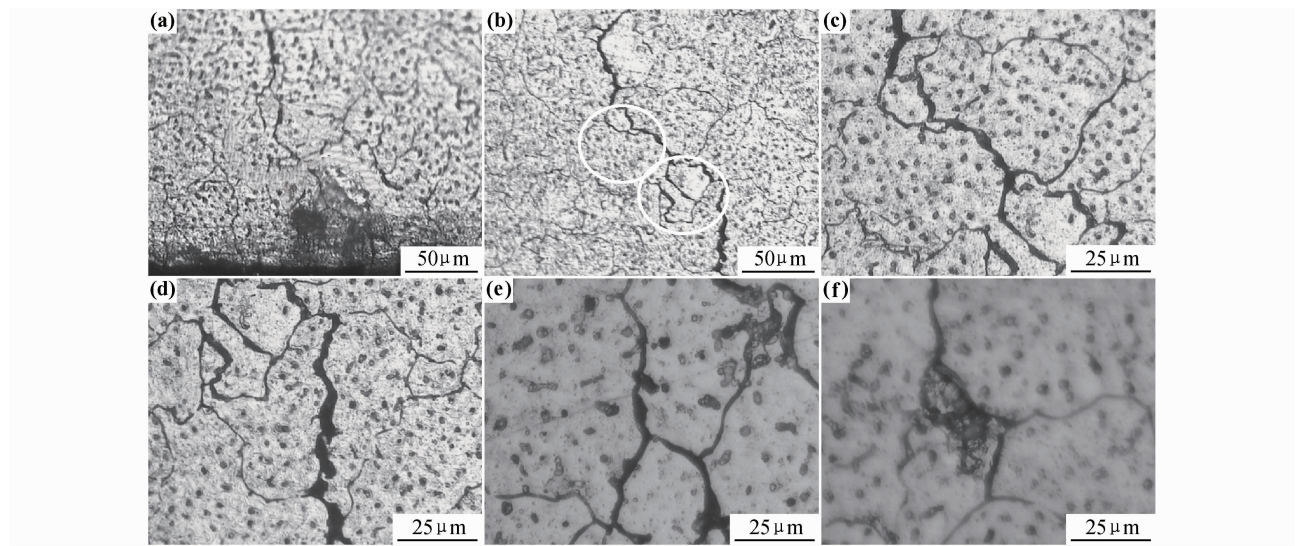


图 6 微观裂纹形貌 (a)裂纹源;(b)裂纹沿晶扩展;(c),(d)图(b)放大;(e)晶界为薄弱环节;(f)晶界处存在缺陷  
Fig. 6 Micro-crack morphology (a)crack source;(b)crack intergranular propagation;(c),(d)partially enlarged for 6(b);  
(e)precipitated phase along grain boundary;(f)defect in grain boundary

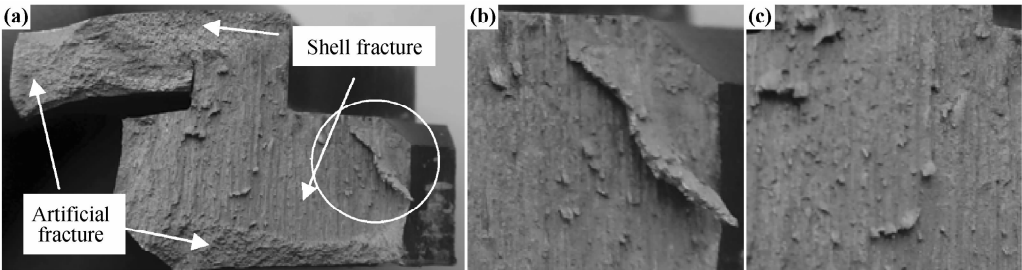


图 7 宏观断口照片 (a)宏观断口;(b)(c)二次裂纹  
Fig. 7 Macro-fracture photo (a)macro-fracture; (b),(c)secondary crack

2.3.2 微观断口分析

采用 LEO-438VP 扫描电子显微镜对微观断口进

行分析,结果如图 8 所示。

图 8(a),(b)为壳体断口微观形貌,对其放大

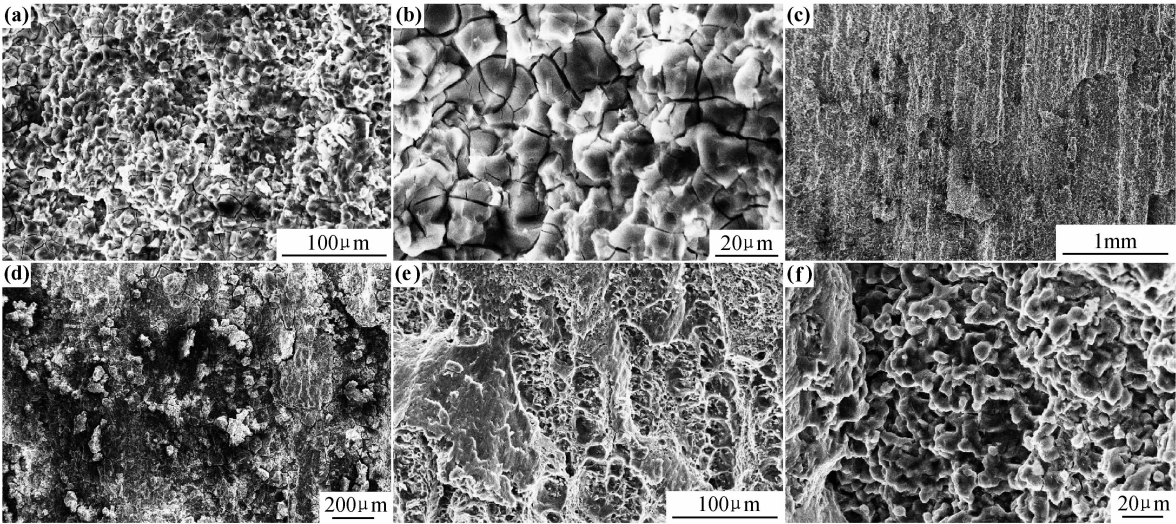


图 8 断口微观照片 (a)壳体断口;(b)图 8(a)放大;(c)支柱断口;(d)图 8(c)放大;(e)人为断口照片;(f)图 8(e)放大  
Fig. 8 Micro-fracture photo (a)shell fracture; (b) partially enlarged for fig. 8(a);(c)pillar fracture;  
(d)partially enlarged for fig. 8(c);(e)artificial fracture;(f)partially enlarged for fig. 8(e)

3000 倍后发现,晶间存在大量的微观裂纹,结合强度较低,断面有腐蚀现象存在,这为裂纹的产生及扩展提供了有利条件。图 8(c),(d)为支柱的微观断口形貌,由图中可见支柱断口为粗糙的柱状断口,存在二次裂纹,对其放大到 200 倍后,发现有介质腐蚀的腐蚀坑存在。图 8(e),(f)为人为断口的微观形貌,断口中以韧性断裂为主,存在大量的撕裂韧窝,放大 2000 倍后发现晶界结合较好。

由宏观和微观断口分析可知,裂纹启裂于支柱内孔边缘夹杂物处,并沿径向扩展,粗大的支柱材料组织,晶间结合强度较低,为裂纹扩展提供了条件。介质的存在(海水)可能造成应力腐蚀。

### 3 裂纹产生原因

结合产品的特征以及以上实验结果,裂纹的产生主要是由于以下方面的原因造成。

#### 3.1 材料组织的原因

对试件组织分析结果可知,壳体材料中存在缺陷,其存在为裂纹产生和扩展提供了前提;支柱组织取向严重,组织中存在大量的带状组织为裂纹扩展创造了条件。

#### 3.2 应力集中

本产品中支柱所处部位特征决定了内部焊缝只能断续焊接,焊缝部位存在应力集中。由本产品的焊缝位置来看,裂纹均起源于焊缝端部,产生微裂纹后,在应力集中的作用下,引起裂纹的扩展。

本产品中支柱面加工成圆弧面与壳体的圆弧面相配合,但装配过程中,支柱圆弧面与壳体的圆弧面配合出现偏差,致使两部件配合间隙不均匀。造成两试件间距有较大的偏差,焊后产生较大的应力集中。

#### 3.3 焊接残余应力

支柱与壳体焊接后,产品整体进行了 200℃ 的退火处理,查阅相关资料<sup>[13,14]</sup>,5A06 铝合金焊后进行退火的温度,在 280~335℃ 进行完全退火,可以消除残余应力。因此,在 300℃ 左右对结构件进行退火处理,能够使其内部的焊接残余应力得到充分释放,并且不会导致结构过度软化,退火处理后,有效保证了结构件的综合性能。因此,试件在焊接后进行的整体退火温度偏低未使焊接残余应力彻底释放也会引起裂纹的产生。

### 4 结论

(1)试件材料组织粗大,加工成型前应对材料进行

晶粒细化处理,消除粗大及具有取向特征的组织。

(2)焊后进行整体回火处理的温度应适当提高,将目前的退火温度 200℃ 提高到 300℃ 左右,以细化支柱及壳体的组织,并且可以消除焊后残余应力。

(3)裂纹起源于外部焊缝附近夹杂物处,以沿晶的特征向前扩展。材料中存在的夹杂物及析出相使得裂纹沿夹杂物处扩展。

(4)由于内部环焊缝未完全焊接,造成试件各部分焊后变形受力不均匀造成残余应力,应尽量保证环焊缝完全焊接。

### 参考文献

- [1] 林钢,林慧国,赵玉涛. 铝合金应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] ZHAO Tian-wen,JIANG Yan-yao. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 834—849.
- [3] HE Zhu-bin, FAN Xiao-bo, XU Yong-chao, et al. Investigation on the formability of 5A06 sheet for rapid gas forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S3): 144—147.
- [4] 彭非,楚浩,杨兵. 5A06 铝合金油箱氩弧焊热影响区裂纹分析及预防措施[J]. 电焊机, 2007, 37(7): 34—37.  
PENG Fei, CHU Hao, YANG Bing. Analysis and preventive of fracture in 5A06 aluminium alloy fuel tank with manual TIG welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(7): 34—37.
- [5] 方昆凡. 工程材料手册-有色金属材料卷[M]. 北京:北京出版社, 2000. 50—75.
- [6] 都宏海,郭建明,张先龙,等. 5A06 铝镁合金管的焊接[J]. 焊管, 2011, 34(12): 36—38.  
DU Hong-hai, GUO Jian-ming, ZHANG Xian-long, et al. 5A06 aluminium-magnesium alloy pipe welding[J]. Welded Pipe and Tube, 2011, 34(12): 36—38.
- [7] 刘红伟,王法科,王冬生,等. 5A06 铝合金焊接接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(2): 72—75.  
LIU Hong-wei, WANG Fa-ke, WANG Dong-sheng, et al. Research on welding joint properties of 5A06 aluminum alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(2): 72—75.
- [8] 蹇海根,姜锋,郑秀媛,等. 航空用高强高韧铝合金疲劳断口特征的研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 97—102.  
JIAN Hai-gen, JIANG Feng, ZHENG Xiu-yuan, et al. Study on fatigue fractography of high strength and toughness aluminum alloy for aviation[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 97—102.
- [9] UENO Akira,MIYAKAWA Susumu,YAMADA Koji,et al. Fatigue behavior of die casting aluminum alloys in air and vacuum[J]. Procedia Engineering, 2009,(2): 1937—1943.
- [10] 李占明,朱有利,辛毅. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 28—32.

(下转第 37 页)

温度场分布、焊合阶段模具的受力情况等提供了一种新的计算分析方法。

(3)可预测非对称断面空心型材挤压模具结构的合理性及挤出型材质量,从而为此类型材的分流模挤压模具结构与尺寸的合理设计及实际生产提供参考。

(4)焊合面网格重构技术目前存在的主要问题为,满足焊合面重构准则的焊合面网格模型提取及修复过程皆为人工干预,对于焊合面较多的型材时,修复过程耗时较长。为此以后工作需要对修复过程进行程序开发,完成焊合面的自动修复重构,从而提高计算效率。

### 参考文献

- [1] 村上哲. アルミニウムの合金押出材と加工技術[J]. 塑性加工, 2008, 49(567): 25—30.  
MURAKAMI S. Adoption of aluminum extrusion and its technology[J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2008, 49(567): 25—30.
- [2] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [3] XIE J X, MURAKAMI T, IKEDA K. Experimental simulation of metal flow in porthole-die extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 49(1—2): 1—11.
- [4] JO H H, LEE S K, JUNG S C. A non-steady state FE analysis of Al tubes hot extrusion by a porthole die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(2): 223—231.
- [5] LIU G, ZHOU J, DUSZCZYK J. FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200(1—3): 185—198.
- [6] 程磊, 谢水生, 黄国杰, 等. 分流组合模挤压过程的有限元分步模拟[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6603—6608.  
CHENG L, XIE S S, HUANG G J, et al. Multi-stage finite element simulation of porthole die extrusion process[J]. Journal of

System Simulation, 2008, 20(24): 6603—6608.

- [7] 邸利青, 张士宏. 分流组合模挤压过程数值模拟及模具优化设计[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(2): 123—127.  
DI L Q, ZHANG S H. Porthole die extrusion process numerical simulation and optimal die design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(2): 123—127.
- [8] JUNG M L, BYUNG M K, CHUNG G K. Effects of chamber shapes of porthole die on elastic deformation and extrusion process in condenser tube extrusion[J]. Materials and Design, 2005, 26(4): 327—336.
- [9] LI L, ZHANG H, ZHOU J. Numerical and experimental study on the extrusion through a porthole die to produce a hollow magnesium profile with longitudinal weld seams[J]. Materials and Design, 2008, 29(6): 1190—1198.
- [10] WU X H, ZHAO G Q, LUAN Y G, et al. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435(5): 266—274.
- [11] YANG D Y, KIM K J. Design of processes and products through simulation of three-dimensional extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1—3): 2—6.
- [12] 谢建新, 黄东男, 李静媛, 等. 一种空心型材分流模挤压焊合过程数值模拟技术[P]. 中国专利: CN 101604350A, 2009-12-16.
- [13] 黄东男, 李静媛, 张志豪, 等. 方形管分流模双孔挤压过程中金属的流动行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 487—495.  
HUANG D N, LI J Y, ZHANG Z H, et al. The metal flowing behaviors during the diplopore extrusion of square tube by a porthole die[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 487—495.

**基金项目:**教育部重点实验室开放课题基金(KLAMP-1104); 内蒙古工业大学科学研究项目(2D201112)

**收稿日期:**2011-08-08; **修订日期:**2012-01-09

**作者简介:**黄东男(1979—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为金属挤压理论与工艺, 联系地址: 呼和浩特市新城区爱民街 49 号, 内蒙古工业大学材料科学与工程学院(010051), E-mail: dongnan\_2000@163.com

\*\*\*\*\*

(上接第 31 页)

- LI Zhan-ming, ZHU You-li, XIN Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 28—32.
- [11] MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties[J]. Transaction Nonferrous Metals Society China, 2011, 21(5): 962—973.
- [12] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册-第 3 卷 铝合金 镁合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [13] 侯学涛, 王立君. 5A06 铝合金焊接结构件退火消应最佳温度的确定[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 35—37.  
HOU Xue-tao, WANG Li-jun. Confirm optimum annealing temperature of 5A06 aluminium alloy[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(9): 35—37.

- [14] 孙卫国, 徐贺年, 姜文举, 等. 改善 5A06-0 铝合金板材性能的研究[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(12): 26—28.

SUN Wei-guo, XU He-nian, JIANG Wen-ju, et al. Research about improving properties of 5A06-0 aluminium alloy sheet[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(12): 26—28.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51175364)

**收稿日期:**2012-04-01; **修订日期:**2012-11-12

**作者简介:**张红霞(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事焊接结构失效及安全评定, 材料连接及界面行为研究, 联系地址: 太原市迎泽西大街 79 号, 太原理工大学材料科学与工程学院(030024), E-mail: hongxzhang@163.com

**通讯作者:**李永莲(1960—), 女, 高级实验师, 主要从事焊接结构失效及安全评定, 焊接工艺与设备研究, 联系地址: 太原市迎泽西大街 79 号, 太原理工大学材料科学与工程学院(030024), E-mail: liyonglian0916@yahoo.com.cn