

# 7020 铝合金列车车钩梁开裂原因与机理

王 荣 鄢国强 李光福 陈冰川

(上海材料研究所 上海 200437)

摘要: 用直读光谱仪、万能材料试验机、光学显微镜、扫描电子显微镜等分析手段, 分析高速列车 7020 铝合金车钩梁多处开裂现象及其原因。结果表明, 开裂的 7020 铝合金车钩梁材料质量正常, 服役后的车钩梁基体表面存在腐蚀坑, 腐蚀坑中存在 Cl<sup>-</sup> 离子, 主裂纹位于焊接热影响区和母材交界处, 裂纹沿晶扩展。实验室采用和车钩梁相似的环境和受力状况进行模拟试验, 高强度合金双悬臂梁试样的应力腐蚀开裂 (SCC) 裂纹形貌特征和车钩梁裂纹吻合良好, 表明车钩梁开裂原因为 SCC, 并讨论了铝合金的 SCC 机理。

关键词: 7020 铝合金 车钩梁 焊接 应力腐蚀开裂 (SCC)

中图分类号: TG146.32, U260.32 文献标识码: A 文章编号: 1005-4537(2008)04-0240-06

## 1 前言

铝合金因其质轻、耐蚀性及拉伸性能优良等特点, 可实现其型材的大型宽体化, 其在高速列车车体中的应用已成为当今的研究热点<sup>[1]</sup>。7020 铝合金属于中高强 Al-Zn-Mg 合金, 具有较高的强度, 良好的焊接性能和工艺性能, 是航空航天器以及地面车辆和装备的主要焊接结构材料, 被广泛用于制造高速列车的车体<sup>[2]</sup>。铝合金的 SCC 是人们关注的问题<sup>[3]</sup>。7020 铝合金经过热处理后具有良好的综合性能, 但该系合金对应力腐蚀开裂 (SCC) 敏感<sup>[4-7]</sup>, 其应用潜力受到了限制。铝合金的 SCC 只能在潮湿氢气或水蒸气中出现<sup>[8]</sup>。沿晶开裂是铝合金氢致破裂的重要特征<sup>[9]</sup>。车钩梁是高速列车地铁的一个重要部件, 材料为 7020 铝合金, 由多个铝合金零件焊接而成。上海地铁公司于 2000 年初从国外同批购进的 37 列车辆中, 于 2007 年初检查时共发现 7 列车体中的 10 个车钩梁的相同部位出现裂纹, 裂纹形貌特征基本相同。

## 2 试验方法

试验所用材料为 7020 铝合金板料 (厚度分别为 30 mm 和 15 mm) 和开裂的车钩梁本体, 两者的化学成分和力学性能实测结果分别见表 1 和表 2 所示, 符合技术要求。

理化试验方法按照 GB/T 228-2002, GB/T13298-1991 和 GB/T17359-1998 进行。显微组

织检验步骤为: 切割样品 镶嵌 磨抛 侵蚀 观察。采用 PHILIPS 扫描电子显微镜 (SEM) 观察断面形貌前先用丙酮和超声波清洗仪清洗断面。

应力腐蚀试验中, 高强度合金双悬臂梁预裂纹试样尺寸为 72 mm × 16 mm × 14 mm, 应力腐蚀试验依据 GB/T12445.1-1990 和 ISO 7539-6:2003。DCB (Double Cantilever Beam) 试样取样方向为 Z-X 和 Z-Y (Z 表示加载方向, 为短横向; X、Y 表示裂纹扩展方向, X 为长横向, Y 为纵向)。试验前先用酒精和超声波清洗仪清洗试样, 按计划用螺栓加载到规定的应力强度因子后, 快速放置到室温的 3.5% NaCl 水溶液中; 用 100 倍的体视显微镜和读数显微镜定期观测裂纹的萌生和扩展情况, 开始一个月每天观测两次, 一个月后 1 d~2 d 观测一次; 根据溶液的挥发情况 4 d~5 d 更换一次溶液; 若在计划时间内无应力腐蚀裂纹萌生或扩展, 则提高应力强度因子, 做第二次加载后并快速放置到 3.5% NaCl 水溶液中继续试验。

## 3 结果与讨论

### 3.1 裂纹观察

宏观观察, 不同车辆车钩梁上的裂纹位置和形貌基本相同, 水平扩展, 比较平直, 均位于平板二分之一厚度处, 大多数呈单根扩展, 最长的裂纹有 900 mm 长 (图 1a), 有的呈台级式扩展, 有的贯穿了车钩梁端面, 有的纵深方向已扩展到腰型孔的侧面。根据裂纹开口宽度的变化判断裂纹是从槽形件区域平板二分之一厚度处萌生, 然后向两边和纵深方向扩展。裂纹开口处最大间隙宽度为 1 mm, 据此可以推断开裂部位所受的 Z 向 (垂直于平板厚度方

定稿日期: 2008-03-13

作者简介: 王荣, 男, 1966 年生, 高级工程师, 主要从事材料综合性能评估和失效分析工作

向) 拉应力较大。

对车钩梁其它部位进行宏观观察,发现车钩梁焊接组件有的区域表面存在点状腐蚀痕迹,有的区域表面涂层已经开裂、剥落,基体已受到严重腐蚀。从开裂的车钩梁槽形件部位切割制样,采用 15% NaOH 水溶液侵蚀后肉眼观察,可见焊缝中存在大量气泡,主裂纹整体呈单根扩展,位于焊接热影响区和母材的交界处,距离焊缝边缘约 6 mm~8 mm,也具有台阶式扩展特征(图 1b)。微观观察,可见靠近主裂纹处存在数条平行于主裂纹的细小裂纹,与裂纹宏观分布特征相同,存在起源于次表面的细小裂纹(图 1c)。

### 3.2 显微组织分析

车钩梁正常部位的有机涂层经测量厚度为 0.32 mm~0.34 mm,涂层和基体交界处比较疏松,疏松层经测量厚度为 0.01 mm~0.02 mm(图 2a);经过服役的车钩梁表面涂层和基体交界处存在点蚀坑(图 2b),点蚀坑中的腐蚀产物的 EDS 分析表明,腐蚀产物中除含有 Al, Zn, Mg, Si, Fe, K, Ca 等元素外,还含有强腐蚀性元素 O, S, Cl, 其中 O 元素含量为 28.09%, S 元素含量为 3.13%, Cl 元素含量

为 1.90%,分析图谱见图 2c。靠近涂层的次表面存在细小裂纹,其分布和铝合金中的带状未溶相方向基本一致(图 2d)。从开裂面处切割取样并制成金相试样后采用 0.5%HF 水溶液侵蚀,然后于光学显微镜下观察。金相组成为  $(Al) + (MgZn_2) + T(Al_2Mg_3Zn_3) + Mg_2Si + S(Al_2CuMg) + Al_{14}(CrFe)_3Si$ 。其中,  $(MgZn_2)$  相和  $T(Al_2Mg_3Zn_3)$  为铝合金的主要强化相,两者在  $(Al)$  中有较高的溶解度,并随着温度的下降而减小,因而有强烈的硬化效应。而  $Mg_2Si$  相、 $S(Al_2CuMg)$  相和  $Al_{14}(CrFe)_3Si$  相为杂质相,不能通过固溶处理溶于  $(Al)$  基体中,会降低合金的力学性能。铝板经过轧制处理后,这些不溶相呈游离状或聚集状分布于基体中,见图 3a。采用  $(HCl(5\text{ ml} \sim 40\text{ ml}) + HNO_3(5\text{ ml} \sim 40\text{ ml}) + HF(10\text{ ml}) + H_2O(380\text{ ml} \sim 150\text{ ml}))$  混合酸溶液侵蚀后,开裂面处的显微组织见图 3b,可见纤维状变形痕迹,有数条和开裂面近乎平行的细小裂纹,开裂面上存在腐蚀坑,小裂纹具有沿晶特征。

### 3.3 断口形貌分析

车钩梁上靠近平板端面的主裂纹开裂面 SEM 形貌见图 4a,可见覆盖着腐蚀产物,点状腐蚀坑和

Table 1 Results of chemical composition analysis (mass%)

analyzed elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti
normal tilted rib	0.13	0.29	0.042	0.19	1.01	0.12	4.84	0.11	0.059
cracked place	0.17	0.34	0.036	0.19	1.19	0.10	4.84	0.091	0.040
raw plate(30 mm thick)	0.12	0.21	0.15	0.22	1.24	0.20	4.34	0.13	0.035
raw plate(15 mm thick)	0.15	0.21	0.17	0.21	1.21	0.19	4.46	0.13	0.034
requirement of EN573-3: 2007(E)	0.35	0.40	0.20	0.05~0.50	1.0~1.4	0.10~0.35	4.0~5.0	0.08~0.20	Zr+Ti 0.08~0.25

Table 2 Results of mechanical properties

property	tensile strength $R_m$ / MPa	yield strength $R_{p0.2}$ / MPa	elongation / %
normal tilted rib	405	365	16.5
cracked place	401	322	14.3
raw plate(30 mm thick)	395	348	17.0
raw plate(15 mm thick)	385	335	16.5
requirement of EN573-3: 2007(E)	350	250	9

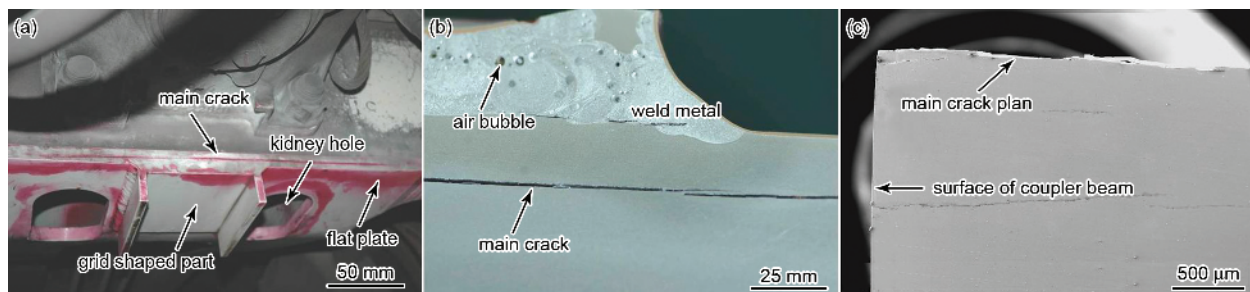


Fig.1 Morphologies of (a) crack appearance of the coupler beam, (b) macro-appearance of the crack, (c) micro-appearance of the cracks



二次裂纹。对点蚀坑中的腐蚀产物采用 EDS 能谱仪分析, 其结果和涂层底部的腐蚀坑中产物成分相似, 同样含有强腐蚀性元素 O、S、Cl (图 4d); 靠近裂纹尖端的开裂面比较清洁, 无明显腐蚀痕迹, 可见开裂面上的层状特征 (图 4b) 及沿晶特征 (图 4c)。

### 3.4 应力腐蚀试验

7020 铝合金应力腐蚀初步试验中的裂纹萌生和扩展记录列于表 3。可见, 7020 铝合金的线切割 DCB 预裂纹试样的 SCC 裂纹开始萌生的时间较长, 但观察到了裂纹的萌生和扩展, 表明 7020 铝合金对 SCC 具有一定的敏感性。

DCB 试样的 SCC 裂纹形貌如图 5 所示。主裂纹比较平直, 存在许多和主裂纹近乎平行的细小裂纹

(图 5a), 主裂纹有断续现象和台阶式特征 (图 5b)。可见 DCB 试样的 SCC 裂纹和车钩梁上的裂纹特征相吻合。图 6a 显示开裂面上的二次裂纹特征, 图 6b 显示开裂面上的沿晶特征。可见, DCB 试样的 SCC 裂纹开裂面 SEM 特征和车钩梁开裂面 SEM 特征相吻合。

### 3.5 分析与讨论

SCC 是由于腐蚀环境和静态或单向变化的拉应力共同作用而引起的一种局部腐蚀, 通常会导致裂纹的形成而造成脆性断裂, 造成金属结构承载性能明显下降, 是一种较为隐蔽的局部腐蚀形式。裂纹的萌生和亚临界扩展往往在宏观上没有明显的预兆, 裂纹扩展到临界长度后使得应力强度因子达到断裂韧性时易于造成突发性的断裂失效事故。拉

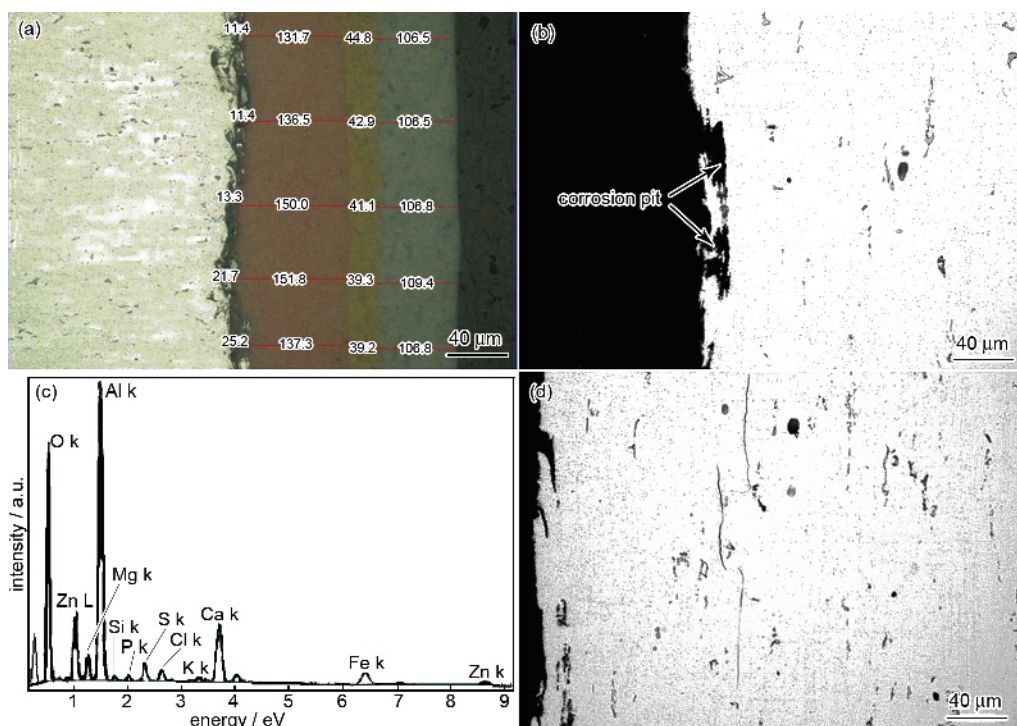


Fig.2 Morphologies of (a) appearance of surface coating, (b) corrosion pits on the surface, (c) EDS spectrum of corrosion products, (d) tiny cracks near the surface

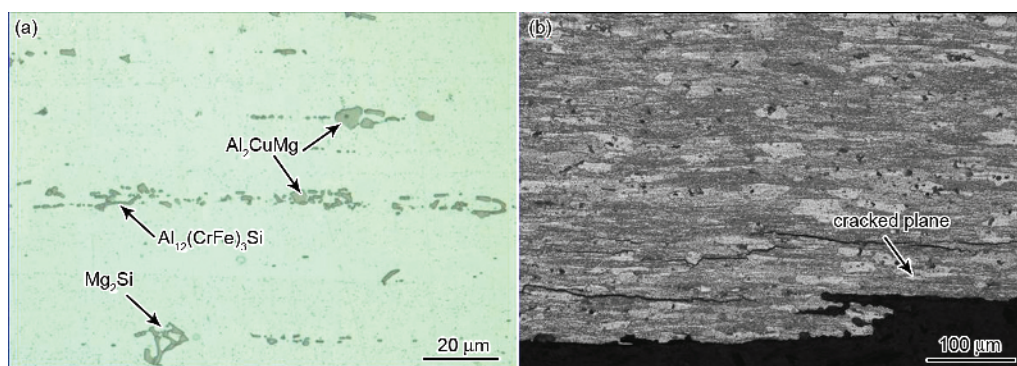


Fig.3 Morphologies of microstructure near the cracking plane of the coupler beam (a) etched by hydrofluoric acid, (b) etched by solution of mixed acids

应力、特定的腐蚀环境和敏感材料是发生应力腐蚀破裂的三要素<sup>[10]</sup>。

按照列车实际结构采用高次等参单元对车体的整车结构进行离散, 然后进行有限元计算, 结果表明车钩梁平板端面的外加应力极低, 造成车钩梁开裂的主要应力应为焊接残余拉应力, 该应力构成了 SCC 的“拉应力”要素。EDS 能谱分析结果表明正常部位有机涂层底部和车钩梁裂纹的开裂面上的腐蚀坑中存在氯离子, 并且观察到防护涂层存

在破损, 即使在完好防护涂层下面的铝合金也有点蚀等腐蚀特征, 说明能导致铝合金点蚀和应力腐蚀破裂的首要有害物质氯离子能穿过涂层到达基体, 从而构成了 SCC“特定的腐蚀环境”之要素。上海地铁的服役环境为沿海气氛, 比较潮湿、闷热, 底盘处的车钩梁容易出现含氯离子的凝结水, 若时间足够, 氯离子可穿透防护性有机涂层到达下面的基体金属并导致腐蚀。有机涂层一般只能延缓有害离子的迁移, 但不能永久性隔断基体金属与外界的腐蚀

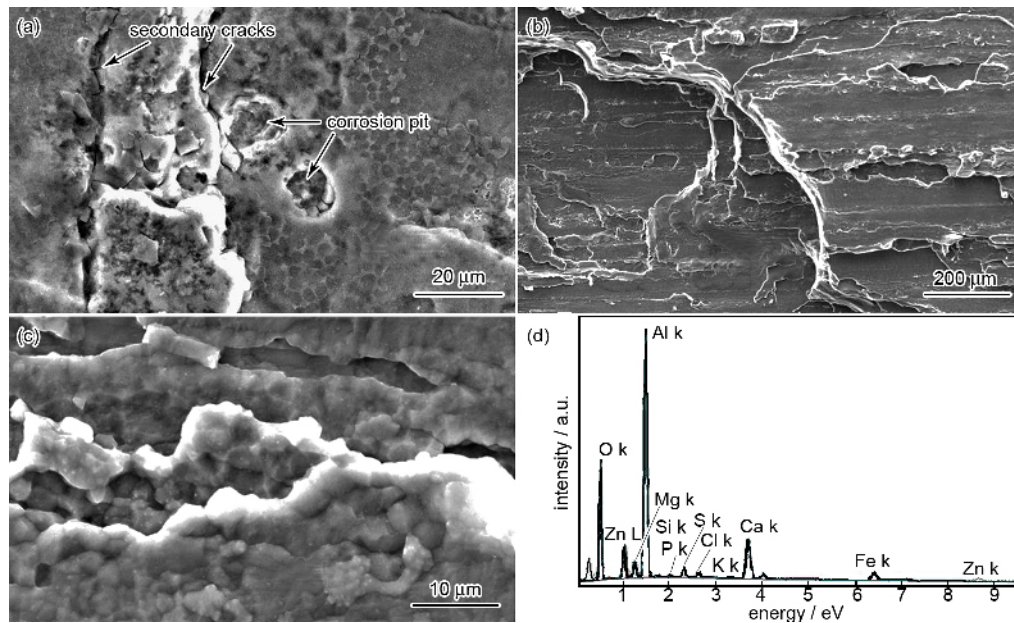


Fig.4 SEM morphologies of (a) fracture of coupler beam, (b) fracture surface of the layered character, (c) fracture surface of the intergranular character and (d) EDS spectrum of corrosion products

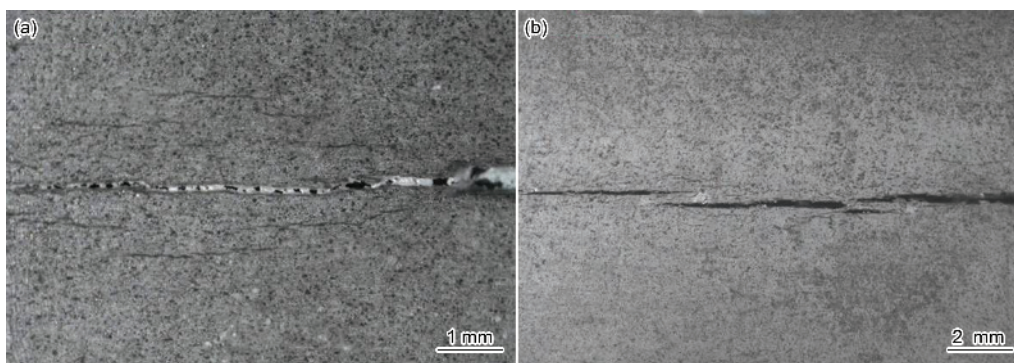


Fig.5 SCC crack appearance of the double cantilever beam specimen (a) continuous propagation of cracks, (b) discontinuous propagation of cracks

Table 3 Cracks initiation and propagation of the DCB specimens

orientation of pre-cracked specimens	stress intensity factor $K / \text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	time of SCC crack nucleation / h	lengths of SCC cracks propagation on both sides / mm	propagation rate $(da/dt) / \text{m} \cdot \text{h}^{-1}$
Z-X	15.8	258	1.85/4.09 after 768 h immersion	$2.41 \times 10^{-6} / 5.33 \times 10^{-6}$
Z-Y	33.4	305	0.18/0.70 after 768 h immersion	$2.34 \times 10^{-7} / 9.11 \times 10^{-7}$
Z-Y	39	552	0.01/0.63 after 1055 h immersion	$9.48 \times 10^{-9} / 5.97 \times 10^{-7}$



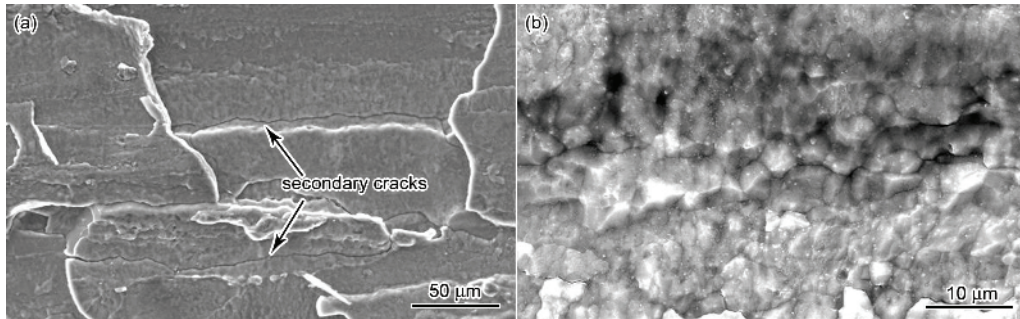


Fig.6 SEM morphology of SCC fracture surface of double cantilever beam specimen (a) secondary cracks, (b) intergranular character

性环境。应力腐蚀试验结果表明 7020 铝合金在模拟海洋性气氛的环境中对应力腐蚀破裂敏感,从而满足了 SCC“敏感材料”之要素。应力腐蚀试验结果中 DCB 试样的 SCC 裂纹形貌特征和开裂的车钩梁裂纹吻合良好,说明车钩梁和 DCB 试样具有相同的开裂模式,表明车钩梁开裂原因为 SCC。

车钩梁槽形件部位存在多处焊接,存在焊接残余拉应力。车钩梁表面含氯离子的凝结水可穿过有机涂层抵达基体,由于合金表面的氧化膜与基体金属延伸性存在差异,在拉应力作用下,氧化膜破裂,发生了  $\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}^+$  的化学反应,产生了活性氢原子。铝合金中呈带状聚集分布的不溶相类似于三轴应力缺陷,首先捕捉了反应生成的氢原子,并在拉应力的作用下沿晶界优先偏聚。即使不存在预裂纹,当原子氢通过应力诱导扩散,富集至临界值后就会促进局部塑性变形,从而在无位错区域或位错塞积群前产生极大的应力集中,当它等于被氢降低了的原子键合力时就会使氢致裂纹形核<sup>[11]</sup>。一旦裂纹形核或存在预裂纹,则富集在裂纹尖端附近的氢原子进一步扩散,引起沿晶开裂。另外,氢原子在裂纹尖端聚集造成该区域呈酸性,也会使 SCC 敏感性升高<sup>[12]</sup>。氢在裂纹附近的浓度高于基体浓度,在裂纹尖端,氢除了浓度较高外,其扩散系数也最大,比距离裂纹较远处基体中的高两个数量级<sup>[13]</sup>。铝合金因轧制作用,其不溶相呈带状聚集分布,相互间大致平行,导致 SCC 裂纹也存在相同特征。SCC 裂纹沿轧制方向扩展的同时,临近的微裂纹之间会相互贯通,在开裂面上表现为二次裂纹或层状分布特征。随着时间的延长,微裂纹不断长大,彼此连成一体,形成宏观可见的 SCC 裂纹。

#### 4 结论

(1) 7020 铝合金 SCC 裂纹具有群集现象,各裂纹之间大致平行并相互贯通。

(2) 7020 铝合金在含氯离子的环境中对 SCC 敏感,SCC 裂纹萌生时间较长,扩展速率较慢。

(3) 该车钩梁开裂原因为潮湿、闷热的沿海气氛和焊接残余拉应力导致的 SCC。

(4) 7020 铝合金的 SCC 符合氢脆型破裂机理。

#### 参考文献

- [1] Yao S P, Xu P. High speed maglev transportation made in China [J]. J. Traffic Transp. Eng., 2004, 4(2): 40-44  
(姚曙光, 许平. 高速磁浮列车车体国产化[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 40-44)
- [2] Gür C H, Yild Z I. Nondestructive investigation on the effect of precipitation hardening on impact toughness of 7020 Al-Zn-Mg alloy [J]. Mater. Sci. Eng., 2004, A382: 95-400
- [3] Song R G, Dietzel W. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-(Cu) alloy [J]. Acta Mater., 2004, 52(16): 4727-4743
- [4] Liu J, Kulak M. A new paradigm in the design of aluminum alloy for aerospace applications [J]. Mater. Sci. Forum, 2000, 331-337: 127-140
- [5] Heinz A, Haszler A, Keidel C. Recent development in aluminium alloy for aerospace applications [J]. Mater. Sci. Eng., 2000, A280(1): 102-107
- [6] Zhang X Y, Sun Z H, Liu M H, et al. Effect of environment on stress corrosion cracking of high strength Al alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2007, 27(6): 354-362  
(张小云, 孙志华, 刘明辉等. 环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 354-362)
- [7] Sun Z H, Liu M H, Zhang X Y, et al. Effect of aging parameters on stress corrosion cracking susceptibility of Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2006, 26(4): 232  
(孙志华, 刘明辉, 张晓云等. 时效制度对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金应力腐蚀敏感性的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(4): 232)
- [8] Burleigh T D. Mechanism of stress corrosion cracking for aluminum alloy (2) 1980~1989 document summary [J]. Corrosion, 1991, 47(2): 89-98
- [9] Liu J H, Li D, Zhang P F. Effect of hydrogen on stress corrosion cracking of LC4 high strength Al alloy [J]. J. Chin. Soc. Corros.

- Prot., 2002, 22(5): 308-310  
(刘继华, 李荻, 张佩芬. 氢对 LC4 高强铝合金应力腐蚀断裂的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5): 308-310)
- [10] Parkins R N, Translated by Yang W. Stress Corrosion Cracking, in Uhlig's Corrosion Handbook (Second Edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 525
- [11] Chu W Y, Qiao L J, Chen Q Z, et al. Fracture and Environment Fracture[M]. Beijing: Science Press, 2001: 120
- (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, 2001: 120)
- [12] Hollingsworth E H, Hunsticker H Y. Corrosion of aluminum and aluminum alloys[J]. Corrosion, 1987, 43(9): 583-609
- [13] Liu Y. Progress of research on stress corrosion cracking of aluminum alloys[J]. J. Beijing Union Univ. (Nat. Sci.), 2006, 20(1): 34  
(刘洋. 铝合金应力腐蚀研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2006, 20(1): 34)

## FAILURE ANALYSIS OF CRACKING OF COUPLER BEAM OF ALUMINUM ALLOY 7020

WANG Rong, YAN Guoqiang, LI Guangfu, CHEN Bingchuan  
(Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437)

**Abstract:** The reason of cracking happened in several coupler beams of 7020 aluminum alloy used in high speed trains has been analyzed by means of optical emission spectrometer, universal material testing machine, optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and finite element analysis. Cracks and some corrosion pits were found in the beams after service of several years. The cracks propagated in horizontal direction, with the morphology being even and straight. Most cracks propagated continuously and others grew discontinuously with steps. Observation with SEM showed that the cracks were intergranular.  $\text{Cl}^-$  ions were found on the fracture surface and corrosion pits. Tests showed that the material of the coupler beam was normal according to the requirement of relevant standards on the chemical composition and mechanical properties. The results of finite element analysis indicated that the working load did not cause apparent tensile stress at the "Z" direction. Stress corrosion cracking (SCC) test showed that the material was sensitive to SCC in  $\text{Cl}^-$  containing environment and the crack characteristics in the test was similar to that of the cracks found on the coupler beam. Finally it was demonstrated that the cracking of the coupler beams was caused by SCC in the hot and humid inshore atmosphere and residual tensile stress of the welding. The mechanism of the SCC was also discussed in this paper.

**Key words:** 7020 aluminum alloy, coupler beam, welding, stress corrosion cracking (SCC)