

# 基于三维X射线成像的激光复合焊接7020铝合金的组织与力学特性演变

胡雅楠<sup>1</sup> 吴圣川<sup>1\*</sup> 张思齐<sup>1</sup> 焦汇胜<sup>2</sup> 付亚楠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031

<sup>2</sup>上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240

<sup>3</sup>中国科学院上海应用物理研究所上海光源, 上海 201204

**摘要** 基于光学显微镜、扫描电镜、同步辐射X射线成像、电子背散射衍射技术、显微硬度计、拉伸性能测试以及有限元仿真探讨了光纤激光-脉冲MIG复合焊接2 mm厚7020-T651铝合金的微观组织与力学特性。结果表明:焊缝、熔合线和母材分别为粗大等轴树枝晶、粗大柱状晶和典型的轧制组织,紧邻熔合线存在一个约100 μm宽的等轴细晶区;接头的抗拉强度、屈服强度、延伸率和强度系数分别为260 MPa、213 MPa、4.8%和0.7;强化元素Zn的蒸发烧损和再分布以及强化相颗粒变异的综合影响,导致焊缝的硬度值最低(75 HV),约为母材的62.5%,但不是导致接头应力集中的重要原因,焊趾区微小缺口才是导致接头疲劳强度降低的根本原因。

**关键词** 材料; 织构演变; 元素分布; 同步辐射光源; 疲劳性能; 高速列车

中图分类号 TG47; U271

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0103007

## Three-Dimensional X-Ray Micro-Tomography Based Microstructure and Mechanical Performance of Hybrid Laser Welded AA7020

Hu Yanan<sup>1</sup> Wu Shengchuan<sup>1</sup> Zhang Siqu<sup>1</sup> Jiao Huisheng<sup>2</sup> Fu Yanan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Lab of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>3</sup>Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

**Abstract** Rolled AA7020-T651 with 2 mm thickness are welded by a hybrid laser arc heat source system with the ER5356 filler. The microstructure and mechanical performance of hybrid welded joint are investigated by optical microscope, scanning electron microscope, Shanghai synchrotron radiation X-ray micro-tomography, electron backscattered diffraction, micro-hardness, tensile properties and finite element simulation. The results show that the weld zone, fusion line and base metal exhibit cast equiaxial dendrites, large columnar crystal and stretching rolling structure, respectively. Moreover, a fine grain zone with about 100 μm in width near the heat affected zone is observed clearly. The tensile strength, yield strength, elongation and welding coefficient are 260 MPa, 213 MPa, 4.8% and 0.7, respectively. Central hybrid weld has the lowest hardness (75 HV), which is about 62.5% of base metal, presenting a serious strength loss. This is mainly due to serious evaporation losses and redistribution of strengthening element Zn as well as the precipitate particles modifications during the hybrid welding process. Finite element analysis suggests that the undercut similar to a notch near weld toe rather than central weld zone with the

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(11572267)、牵引动力国家重点试验室开放基金(2015TPL\_T07, TPL1505)

作者简介: 胡雅楠(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构强度方面的研究。E-mail: huyan0121@sina.com

导师简介: 吴圣川(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高速列车焊接结构抗疲劳断裂设计及寿命评估仿真软件研发等方面的研究。E-mail: wusc@swjtu.edu.cn(通信联系人)

lowest hardness is the fundamental reason to the fatigue failure of in-service hybrid welded joints.

**Key words** materials; texture modification; elemental distribution; synchrotron radiation source; fatigue strength; high-speed railway train

**OCIS codes** 160.3900; 140.3390; 110.6590

## 1 引 言

Al-Zn-Mg系中强可焊7020铝合金具有较高的强度、较宽的固溶处理温度区间、优良的耐蚀性、冷加工性和热变形性,室温下具有很好的时效强化能力,适用于焊后不便进行热处理、对焊接工艺要求较高的关键部位如高速车体底架、牵缘、枕梁和牵枕缘等<sup>[1-2]</sup>。目前,高铁发达国家均已将7020铝合金应用于轨道车辆的制造中<sup>[3-5]</sup>。Gam等<sup>[6]</sup>研究了7020铝合金电子束焊接接头的组织与性能,发现热影响区(HAZ)和熔合区对于裂纹的扩展呈现出较高的阻力。Heidarzadeh等<sup>[7]</sup>以7020搅拌摩擦焊接接头的拉伸性能为出发点,发现较高的搅拌头转速和轴向压力,较低的横向速度会导致较高的接头塑形;热输入越大,接头更易于塑形断裂。Dudzik<sup>[8]</sup>对比7020、5083和5059铝合金的MIG熔焊接头性能后发现7020铝合金的强度最高,此外他们还对焊接方法对于接头硬度的影响进行了研究<sup>[9]</sup>,结果表明搅拌摩擦焊接接头软化程度小于传统的MIG焊接。

当前7020铝合金的焊接以传统弧焊如MIG和TIG为主,这些熔焊方法热输入大、焊后变形严重。作为一种具有巨大发展潜力的先进焊接方法,激光焊接虽能较好地解决上述问题,但也存在着装配精度高、对激光反射率大和稳定性差等问题。激光-电弧复合焊兼有先进的激光和传统的电弧两种热源的优点,是目前焊接领域研究的前沿和热点。本文深入考察7020-T651铝合金光纤激光-脉冲MIG复合焊接头微观行为与性能之间的关系,旨在为工程应用提供理论和试验依据,推进其在高速列车车体及受电弓中的应用<sup>[10-12]</sup>。

## 2 试验方法

### 2.1 焊接材料

所用7020铝合金轧制板材的热处理状态为T651,即固溶处理+人工时效,并在T6回火条件下拉伸以减小内应力,最后线切割成为300 mm×120 mm×2 mm的焊接试板。选用直径为1.2 mm的进口铝镁合金焊丝ER5356,目的是尽可能地补充焊接过程中蒸发烧损的镁元素,又可以降低焊缝(WM)热裂敏感性。母材和焊丝的主要化学成分如表1所示。

表1 母材与焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal and the filler (mass fraction, %)

	Zn	Mg	Cu	Cr	Ti	Fe	Si	Mn	Zr
Base metal	4.22	1.21	0.10	0.16	0.05	0.20	0.06	0.14	0.13
Filler metal	0.10	4.80	0.10	0.10	0.12	0.40	0.25	0.15	—

### 2.2 试验规范

对焊接平面进行全面细致地化学清洗,在现场焊接前再进行机械打磨,最后采用激光在前电弧在后的旁轴复合形式在IPG YRL-4000光纤激光器和Fronius TPS4000 MIG复合焊平台上进行无间隙的对接焊,其中脉冲电弧的干伸长为15 mm,光丝间距为4 mm,空气湿度为80%。为防止铝合金板面反射的激光对光纤的损害,激光束偏移试板法线约10°,电弧偏移法线约15°,其他焊接参数见表2。

表2 光纤激光-脉冲MIG复合焊接7020-T651铝合金的工艺参数

Table 2 Hybrid laser arc welding parameters for AA7020-T651

Laser power	Arc welding	Arc welding	Welding speed	Feeding speed	Argon gas	Defocusing
P/W	current I/A	voltage U/V	l/(m/min)	l/(m/min)	flow l/(m <sup>3</sup> /h)	distance/mm
3000	100	19.7	9.0	8.3	1.5	0

### 2.3 检验方法

取焊缝形貌光滑连续的焊接试板,沿焊缝横截面制备金相、拉伸和X射线三维成像试样,然后选用体积分数为1.0%HF+1.5%HCL+2.5%HNO<sub>3</sub>的Keller腐蚀剂,在蔡司显微镜下观察接头各区域的显微组织。对金相试样重新抛光制备电子背散射衍射(EBSD)样品,依次采用颗粒度为9 μm、3 μm和1 μm的金刚石抛光液精

细抛光,再用颗粒度为 $0.035\ \mu\text{m}$ 的硅溶胶抛光 $30\ \text{min}$ ,之后进行离子刻蚀,时间约为 $10\ \text{min}$ 。织构检测和分析采用LYRA型电镜,同时利用扫描电镜上配备的AZtec HKL EBSD进行接头的织构检测和接头元素线分布的定量表征。

依次用粗细砂纸去除下余高及其他几何不连续,在MTS-809试验机上进行拉伸测试,加载速度为 $1\ \text{mm/min}$ ,取3组试样的平均值。应用HVS-30型数显维氏硬度计测量显微硬度,加载力为 $3\ \text{kN}$ ,保荷时间为 $15\ \text{s}$ ,硬度测点距焊缝上表面 $1/4$ 厚度处,每个点测试3次取其平均值。在上海光源13W1和15U1上分别获得接头内气孔的三维形貌和强化元素分布<sup>[13]</sup>。13W1的试验参数:能量为 $21\ \text{keV}$ ,探测器距离试样 $15\ \text{cm}$ ,空间分辨率为 $1.85\ \mu\text{m}$ ,曝光时间为 $2.0\ \text{s}$ ;15U1的试验参数:能量为 $18\ \text{keV}$ ,扫描时间为 $2.7\ \text{s}$ ,步长为 $0.5\ \text{mm}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 微观组织

微观行为决定了宏观性能,在复合焊接热循环作用下,冷却后焊接接头各区域的晶粒尺寸和组织结构将发生明显变化。图1为7020-T651复合焊接头的微观组织。

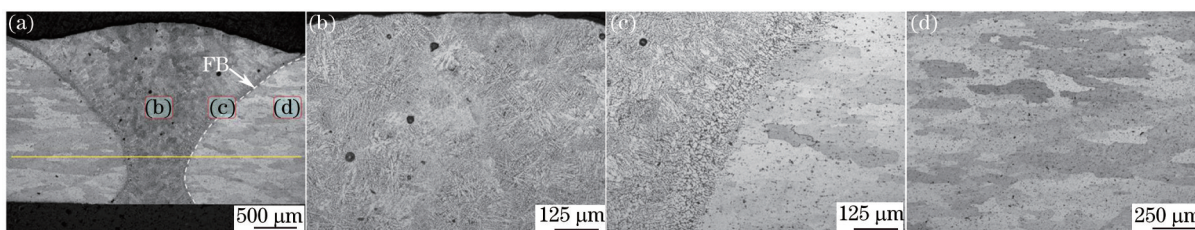


图1 激光复合焊接头的显微组织。(a)宏观形貌;(b)焊缝区;(c)热影响区;(d)原始母材

Fig.1 Microstructures of hybrid welded joints. (a) Macroscopic profile; (b) weld zone; (c) heat-affected zone; (d) as-received base metal

由图1(a)可知,复合焊接头截面呈现漏斗形,是由激光和电弧两种热源共同作用所致:上部为相对宽大的电弧贡献区,下部是深宽比较大的激光作用区,表现为典型的激光深熔焊特征,而中部为两种热源复合的区域;由于样品较薄,焊缝组织在厚度方向的变化并不明显。从图1(b)知,较快的焊接速度导致熔池中心的成分过冷度较大,从而形成等轴枝晶。由于复合焊接较单激光焊接的热输入大,导致凝固速度较低,熔池体积较大,高温区域停留时间较长,因此该区域的晶粒有较充分的时间和空间长大,因而与单独自燃激光焊缝相比该区表现出更为粗大的类铸造态等轴树枝晶<sup>[14]</sup>。但与传统MIG焊接相比,复合焊接速度又较快,导致熔池中溶质浓度存在差异(发生了强化元素再分布),且来不及均匀化,符合典型的铸造组织特征,这种急冷组织必然导致焊缝区域的硬度和强度较低,塑形较差。

图1(c)是焊缝与母材的过渡区或者熔合区,靠近焊缝一侧晶粒相对均匀,表现为沿散热最快方向、沿焊缝中心生长的粗大柱状晶[图2(b)]。另外熔合线附近存在宽约 $100\ \mu\text{m}$ 的等轴细晶区,研究认为细晶区与合金中Zr元素有关( $\text{Al}_3\text{Zr}$ 非均匀形核);同时 $\text{Al}_3\text{Zr}$ 对亚晶界和位错具有钉轧效应,因此能一定程度上提高强度。从图1(d)看出,由于母材区较少受到热循环的作用,晶粒在总体上仍然保持着轧制态组织,即呈现细长的纤维状。热影响区组织与母材相比并没有明显的变化(晶粒尺寸有长大趋势),大致保持着轧制形态。

#### 3.2 织构分析

图1中复合焊接头各区域组织结构的差异必然导致不同的宏观性能。但光学组织无法清晰地给出晶粒尺寸、分布以及取向信息。织构可以有效地表征晶粒形貌、大小和取向,通过对织构分析能更好地理解组织性能演变和接头软化行为<sup>[15]</sup>。图2为复合焊接头各区域晶粒取向、尺寸及形貌,其中颜色代表晶粒取向。

从图2(a)焊缝织构看出,焊缝处的晶粒取向呈现出明显的随机分布特性。这主要是由于焊缝是加热熔化后结晶及后续急速冷却形成,为一种典型的快速急冷的铸造组织。较多的异质形核点和较高的过冷度形成了大量的等轴枝晶,因此织构呈随机分布的特点,这说明高能量密度的激光和电弧复合热源改变了母材的织构特性。测算表明,焊缝中心晶粒直径为 $10\sim 130\ \mu\text{m}$ ,平均尺寸约 $33\ \mu\text{m}$ 。

相比之下,图2(c)中母材晶粒狭长,尺寸为 $3\sim 96\ \mu\text{m}$ ,平均值约为 $28\ \mu\text{m}$ 。图2(d)为紧邻熔合线一定范围的等轴细晶区,形状为球形,无分枝,尺寸较小,约为 $9\ \mu\text{m}$ ,取向呈随机分布状态;细晶区宽度较小,约为



100  $\mu\text{m}$ 。需要指出的是,这一宽度与完全同样焊接工艺下 7075-T6 铝合金复合焊缝中细晶区宽度大致相当,据信应是一个共性问题。

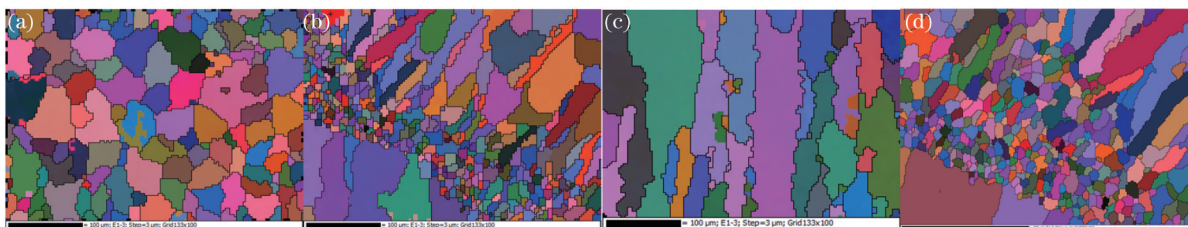


图2 激光复合焊接头各区的组织。(a)焊缝区;(b)熔合区;(c)母材区;(d)细晶区

Fig.2 Crystal orientation of hybrid welded joints. (a) Weld zone; (b) fusion zone; (c) base metal; (d) fine crystal zone

焊缝晶粒尺寸大于母材并不是导致硬度低于母材的本质原因,而应该与原有母材中强化元素在复合焊接中发生了严重的蒸发烧损和再分布、弥散分布的细小强化相颗粒发生了长大和溶解以及焊缝中存在大量微气孔等有关。基于透射电子显微镜(TEM)的激光复合焊接 7075-T6 铝合金的研究清楚表明<sup>[15]</sup>,强化相颗粒不仅数量明显减小,而且尺寸也明显增大。下面章节将进一步从强化元素和气孔分布两个角度进行分析。

### 3.3 接头硬度分布

为了对 3.2 节最后的结论部分进行验证,有必要考察接头的宏观性能。图 3 为 7020-T651 铝合金复合焊接头横截面上的硬度分布。

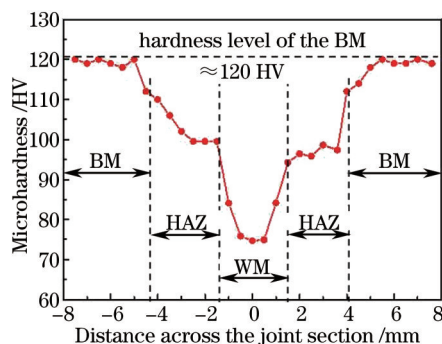


图3 激光复合焊接头的显微硬度分布曲线

Fig.3 Measured hardness curve of hybrid welded joints

由图可知,硬度大致以焊缝平台为中心呈现为对称分布。焊缝中心硬度最低,约为 75 HV,为母材(约 120 HV)的 62.5%,热影响区的硬度值介于焊缝与母材之间,约为 103 HV,随着距焊缝中心的距离增加硬度值增大。可见,复合焊接头存在着较为严重的强度损失<sup>[6]</sup>。分析认为,经固溶、时效的 7020 铝合金,主要的强化相为  $\text{MgZn}_2$  和  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}$ ,在焊接热循环的作用下,母材中沉淀相粒子将再次经历固溶、析出和长大,可见过时效软化是导致热影响区和焊缝硬度下降的重要原因。焊缝区热量高度集中,强化元素 Zn 和 Mg 的蒸发损失较热影响区和母材更为严重,从而很难形成足够的弥散强化相使得硬度恢复至母材水平。由图 2 可知,焊缝区的晶粒尺寸大于母材,根据经典 Hall-Petch 关系,晶粒尺寸越大则屈服强度越低,显微硬度越低,因此焊缝区的硬度低于原始母材。

由此可见,时效强化型铝合金焊缝和热影响区硬度降低的根本原因是高能量密度热源作用下强化元素的蒸发烧损(而不是晶粒尺寸长大<sup>[16]</sup>),加之焊丝不能及时补充强化元素,使得即使采用焊后热处理,焊缝硬度和强度也难以恢复至母材水平。此外由于复合焊接速度较快,单位热输入量少,因此热影响区较窄。

### 3.4 强化元素变化

基于同步辐射 X 射线荧光探测技术,图 4 进一步探究了图 3 中焊缝硬度降低和表 3 焊接接头强度损失的微观机制。焊接过程中,主要强化元素 Zn 和 Mg 的含量和分布对接头的微观行为及机械性能有较大的影响。一方面,在高能量密度复合焊热源的作用下,合金元素蒸发烧损严重,冷却后接头中不能形成足够的弥散强化相,从而导致析出相的强化效果显著降低;另一方面,主要强化相颗粒  $\text{MgZn}_2$  和  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}$  在焊后发生了粗化和溶解。上述因素导致强化效果的降低和一系列性能的恶化(应力腐蚀开裂)<sup>[17]</sup>。

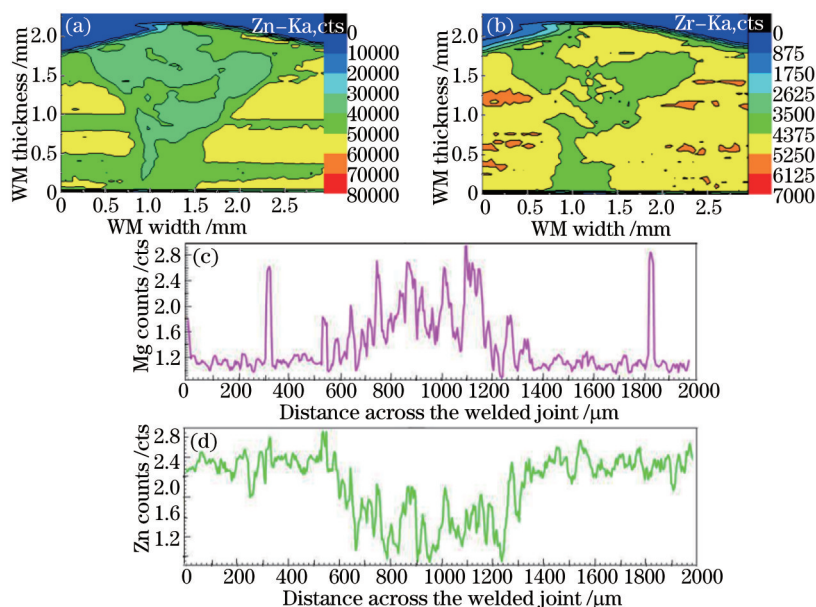


图4 激光复合焊接接头强化元素分布。(a) Zn元素;(b) Zr元素;(c) Mg元素;(d) Zn元素

Fig.4 Strengthened elemental distribution of hybrid welded 7020-T651. (a) Zn; (b) Zr; (c) Mg; (d) Zn

由图4(a)和(b)可知,Zn和Zr具有相似分布,焊缝中心含量较低,两侧母材含量较高且差异较大。具体来说,接头中Zn的含量约为母材一半,呈现出由母材至焊缝中心递减的趋势;同时焊缝上部含量较多,下部含量较少。Zn的沸点约为960℃,远低于高能量密度的复合焊热源在熔池前沿产生的高温,从而导致发生严重的蒸发烧损,上述现象导致焊缝区域理论上难以形成足够的弥散强化相。由于熔合线靠近热影响区Zr元素含量较多,细化晶粒作用较强,因此在金相组织图片中可以观察到一定范围的细晶区。

由于特殊K吸收边,同步辐射光源无法检出轻元素Mg。采用能谱(EDS)分析能谱,图1(a)为一条贯穿接头各区域的元素扫描线,图4(c)和(d)为扫描结果。Mg的沸点约为1107℃,焊接过程中Mg同样发生了严重蒸发烧损,但由于ER5356焊丝中Mg的含量约为母材的4倍,能够显著弥补其损失,图4(c)呈现出焊缝中心区域Mg含量高于母材的现象,而Zn元素由于无法得到足够的补充,因此表现出与Mg元素完全相反的现象。由此可见,Zn是熔焊铝合金接头硬度和强度损失的主要原因。此外由图可见,特殊的轧制工艺造成了这种材料均匀性较差,这必然影响材料的各项服役性能指标,建议改进和优化工艺。

### 3.5 焊缝气孔表征

实践证明,氢是铝合金熔焊气孔形成的主要原因,主要来源有弧柱气氛、焊面污物、氩气导管及空气等。基于同步辐射X射线三维成像技术,图5给出了接头内三维气孔的形貌及其分布,工业X射线(分辨率达毫米级)检测该焊缝为I级。但高速车体和受电弓破坏断口上发现有蜂窝状的大量气孔,此外铸造齿轮箱断口也发现有很多气孔,因此有必要研究气孔对焊接接头疲劳断裂的作用机制。

由图5可知,焊缝处气孔的大小不一,分布极不均匀,其中下部较为密集且尺寸较小,而上部稀疏但尺寸较大。统计发现,该接头中的气孔总数量约为3332个,其中大部分为冶金型气孔,即氢气孔,形貌多为规则

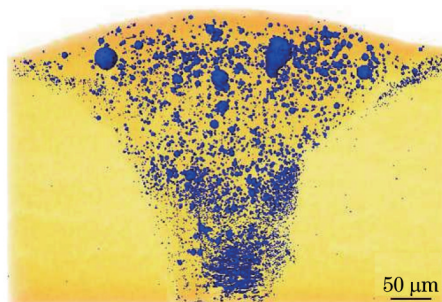


图5 激光-电弧复合焊接7020-T651接头中三维气孔分布

Fig.5 Imaged three-dimensional porosity inside a hybrid welded 7020-T651 joint

的球形,其断口内壁光滑洁净<sup>[18]</sup>。此外当焊接工艺不稳定时还可能产生一种工艺型气孔,它主要是由于焊接中小孔瞬间失稳形成,此类气孔往往形貌不规则,内壁粗糙,且尺寸普遍大于氢气孔,如图中右上角的大尺寸气孔。与传统熔焊方法相比,激光复合焊接熔池温度更高,液态熔池溶解较多的氢;另外复合焊接的速度快,也不利于气孔逸出,因此激光复合焊接铝合金时更易产生较多的氢气孔,这使得焊缝区域成为复合焊接头的薄弱环节。在制定焊接规范时,可适当降低焊接速度和增大线能量以减少气孔产生。采用干燥的保护气体、采取焊前清理焊接面污物以及引入特殊的激光清理焊接面等有可能最大程度地降低氢气孔的产生。需要指出的是,由于电弧的加入使得复合焊接产生工艺型气孔的倾向小于单激光焊接。

由于试样切割加工困难,制备试样时采用砂纸配合千分尺的方法将2 mm厚的试样磨成1 mm厚度,但该过程无法保证足够高的精确度。图6为焊缝气孔的等效直径、圆整度以及气孔到上自由表面距离的关系。

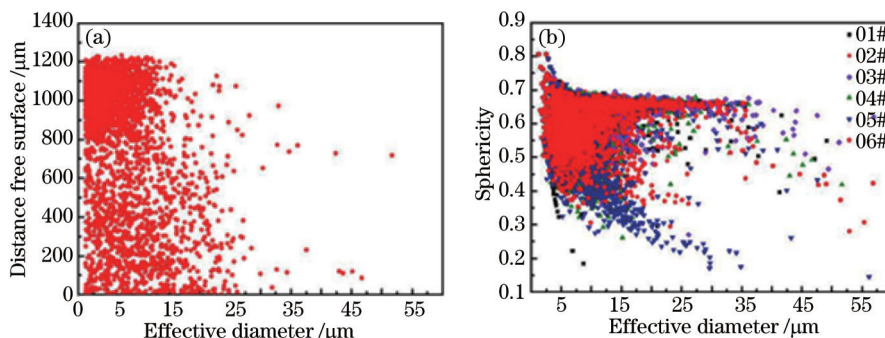


图6 焊缝中三维气孔分布、尺寸及形貌的表征

Fig.6 Characterization of distribution, size and geometry of three-dimensional gas pores

由图6(a)可知,焊缝下部气孔相对密集且尺寸较小,而等效直径较大的气孔多数位于焊缝上表面附近。这主要是由于焊丝和母材熔化时氢元素从固相母材中迅速析出或者外部带入的氢元素开始析出,而熔体周围仍为大体积的冷态材料,从而导致氢快速聚集为小气孔并急速上浮并长大,但由于冷却速度快、熔池体积小,部分气孔在从焊缝底部上浮至表面的过程中,尺寸不断增大,未来得及逸出的大气孔便停留在焊缝上部,从而造成焊缝上部区域气孔尺寸较大但数量较少的现象,如图5所示。

图6(b)统计了6种复合焊缝中气孔的圆整度。由图可知,气孔圆整度平均为0.68,气孔的平均等效直径为20 μm,少见200 μm以上的大气孔;同时圆整度随等效直径的增大而趋于稳定。图5中的气孔总体上为球形,但统计计算表明应该为近球形。

从图中还可以看出,焊缝区存在气孔密集的现象与焊缝中心硬度最低相吻合。但有关研究指出,气孔对接头静强度的影响较小,仅为1%左右<sup>[15]</sup>。Rudy等<sup>[19]</sup>通过人为地调节氦气中的氢气,获得了直径在0.13~5.08 mm的宏观气孔,并详细地考察了气孔形貌、尺寸及数量与静强度的关系,发现纵向抗拉强度几乎不受气孔的影响;并据此认为相对于宏观气孔,直径在0.4 mm以下的微气孔几乎不会对接头的性能产生影响。基于这一结论,焊接接头的气孔等效直径均为60 μm以下,因此这种微气孔对静拉伸强度没有影响。

### 3.6 拉伸性能

考虑到7020-T651铝合金焊后时效性能较好,表3给出了复合焊接头4个月自然时效后的常温拉伸试验结果,并与母材进行对比。

表3 激光-电弧复合焊接7020-T651接头的拉伸性能

Table 3 Mechanical properties of hybrid welded 7020-T651 joints

Specimens	UTS $R_m$ /MPa	Yield strength $R_{eH}$ /MPa	Elongation $A$ /%
Base metal	357	319	12.77
Welded joints	260	213	4.8

由表3可知,复合焊接头存在一定程度的强度损失,母材的抗拉强度为357 MPa,延伸率为12.7%,而复合焊接头分别为260 MPa和4.8%,相对于原始母材分别下降了27.2%和62.2%,接头强度系数约为0.7,根据相关标准满足实际工程需要。



试验还发现,80%以上的拉伸试样断裂于热影响区。肉眼观察发现,由于接头焊趾处存在微小的咬边,这种咬边致缺口效应会导致应力集中,因此本次试验中的接头拉伸试样多数断裂于热影响区,而非微观硬度较低的焊缝处。

### 3.7 缺口效应

测量可知咬边深度约为 $H=0.06\text{ mm}$ ,根据缺陷评级标准GB/T 19418-2003,远小于标准值 $0.5\text{ mm}$ ,因此该试样完全满足使用要求。但这种微小缺口在静力或者疲劳加载下可能会成为裂纹萌生源,从而最终导致焊接接头从此处破坏。根据图1(a)激光复合焊接头形貌,依据圣维南原理建立接头的有限元模型,如图7所示。

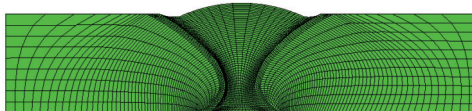


图7 激光-电弧复合焊接 7020-T651 铝合金的完整接头网格模型

Fig.7 Mesh model of a hybrid welded 7020-T651 joint

对上述模型分别应用母材和复合焊接头拉伸的名义应力-应变关系,模拟复合焊接头的低周疲劳加载。载荷幅值选为接头的屈服强度,即 $R_{0.2}=213\text{ MPa}$ ,应力比 $R=-1$ ,正弦波加载。图7中左边线为全约束,右边线施加疲劳载荷。采取过渡高精度四边形网格形式,焊缝和热影响区网格尺寸小于母材。

在ABAQUS中提交疲劳加载的分析作业,图8给出了复合焊接头的Von Mises应力分布,同时对图8中的应力集中区进行路径选取以及应力的映射积分,并根据 $K_t=\sigma_{\max}/\sigma_n$ 求得缺口的应力集中系数 $K_t$ 约为1.066,其中远端名义应力 $\sigma_n$ 可通过路径积分获得。同时得到疲劳缺口敏感系数 $q=0.605$ ,相应的疲劳折损系数 $K_f=1.040$ 。一旦得到这些疲劳相关系数,就可以推测出名义应力 $\sigma_{t,\max}=K_f\cdot\sigma_n$ 和缺口应力 $\Delta\sigma=K_f\cdot\Delta\sigma_n^{[20]}$ ,最后根据相应接头的疲劳S-N曲线得到对应缺口等级下的疲劳寿命。

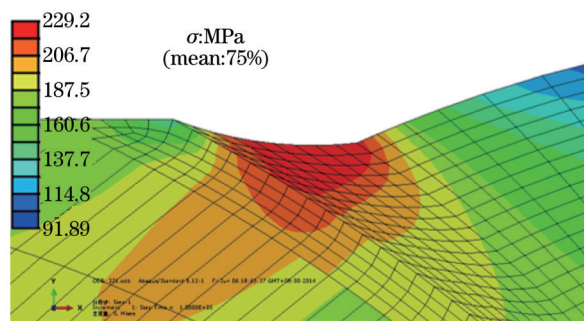


图8 疲劳加载 $N=1000$ 周后的应力

Fig.8 Stress distribution after  $N=1000$  cycles

从图8还可以看出,并结合前述分析,虽然焊缝是整个接头硬度最低的区域,但疲劳裂纹往往不从此处起裂和扩展,几何不连续(如本节中咬边导致的微小缺口)才是产生疲劳破坏的根本原因。因此对静载服役结构需要关注其静强度,而对受疲劳加载的结构必须对焊趾进行打磨,从而提高疲劳强度和裂纹扩展寿命。

## 4 结 论

对7020-T651铝合金光纤激光-脉冲MIG复合焊接头微结构特征与宏观力学行为进行了全面深入系统的研究,结论如下:

1) 焊缝区为铸态等轴枝晶,平均晶粒直径约为 $33\ \mu\text{m}$ ;熔合线为粗大的柱状晶;紧邻热影响区存在一个宽约 $100\ \mu\text{m}$ 的等轴细晶区,晶粒尺寸约为 $9\ \mu\text{m}$ ;母材为典型的纤维状的轧制态组织,可见激光复合焊接过程改变了原始母材的组织组织;

2) 接头硬度呈现出以焊缝为中心的近似对称分布,中心区的硬度最低,为 $75\text{ HV}$ ,硬度值随着距焊缝中心的距离增加而增大,到达母材区后趋于稳定值,约为 $120\text{ HV}$ ;

3) 复合焊接头的静载抗拉强度和屈服强度分别约为 $260\text{ MPa}$ 和 $213\text{ MPa}$ ,延伸率为 $4.8\%$ ,焊缝强度系数达到 $0.7$ ,满足标准和工程要求;

4) 原始母材中强化元素 Zn 的蒸发烧损和再分布是导致接头热影响区和焊缝软化的主要原因, 晶粒长大和气孔不是焊缝硬度降低的根本原因;

5) 焊缝中存在大量近球形气孔, 但均在标准许可范围内, 其平均圆整度为 0.68, 平均等效直径为 20  $\mu\text{m}$ , 对接头静强度的影响较小;

6) 虽然焊缝中心为接头的薄弱地带, 但硬度低不是导致接头破坏的本质原因, 微小咬边应是导致接头应力集中的重要原因, 从而使得接头常从热影响区疲劳破坏。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Xiaoyan, Cao Xiaowu, Duan Yulu, *et al.*. Microstructures and properties of MIG welded joint of 7020 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 912-918.  
彭小燕, 曹晓武, 段雨露, 等. 7020 铝合金 MIG 焊接接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 912-918.
- 2 Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavy section by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903006.  
张国伟, 肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903006.
- 3 Ma T, Ouden Q D. Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 266(1/2): 198-204.
- 4 Olaf E. Welded Structures of the Railway Vehicles, Railway Technology International[M]. New York: Pergamon Press, 1992.
- 5 Gur C H, Yildiz I. Nondestructive investigation on the effect of precipitation hardening on impact toughness of 7020 Al-Zn-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 382(1): 395-400.
- 6 Cam G, Kocak M. Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded Al alloy 7020[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(17): 7154-7161.
- 7 Heidarzadeh A, Barenji R V, Esmaily M, *et al.*. Tensile properties of friction stir welds of AA7020 aluminum alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, 68(5): 757-767.
- 8 Dudzik K. Mechanical properties of 5083, 5059 and 7020 aluminum alloys and their welded by MIG[J]. Journal of KONES Power train and Transport, 2011, 17(3): 73-77.
- 9 Dudzik K. Influence of joining method for hardness distribution in joints of AlZn<sub>5</sub>Mg<sub>3</sub> Alloy[J]. Journal of Kones Powertrain and Transport, 2010, 17(4): 137-141.
- 10 Li Jianmin, Wang Chunming, Yan Fei, *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of 6005A joint in laser-MIG hybrid welding[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 733-737.  
李建敏, 王春明, 闫 飞, 等. 6005A 激光-MIG 复合焊接接头组织及力学性能研究[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 733-737.
- 11 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, *et al.*. Comparison of MIG welding and laser-MIG welding of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 38-43.  
许良红, 田志凌, 彭 云, 等. 高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 38-43.
- 12 Tan Bing, Ma Bing, Zhang Lijun, *et al.*. Microstructure and properties of welding joints of aluminum alloy with medium thickness by the laser-MIG hybrid welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(5): 17-20.  
谭 兵, 马 冰, 张立君, 等. 中厚度铝合金激光-MIG 复合焊接组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(5): 17-20.
- 13 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen, *et al.*. Experimental research on hard X-ray phase-contrast imaging[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 167-169.  
高鸿奕, 谢红兰, 陈建文, 等. 硬 X 射线相位衬度成像的试验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 167-169.
- 14 Wu Shengchuan, Zhu Zongtao, Li Xiangwei. Laser Welding of Aluminum Alloys and the Performance Evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.  
吴圣川, 朱宗涛, 李向伟. 铝合金的激光焊接及性能评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- 15 Wu Shengchuan, Zhang Weihua, Jiao Huisheng, *et al.*. Towards the softening mechanism of hybrid laser arc welded 7075-T6 high strength aluminum alloys[J]. Science China: Technological Science, 2013, 43(7): 785-792.  
吴圣川, 张卫华, 焦汇胜, 等. 激光-电弧复合焊接 7075-T6 铝合金接头软化行为[J]. 中国科学 E: 技术科学, 2013, 43(7): 785-792.
- 16 Mathers G. The Welding of Aluminum and its Alloys[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2002.
- 17 Hepples W, Thornton M C, Holroyd N J H. Microstructural characterization of white zones in weldable 7000 series alloys[J]. Journal of



- Materials Science, 1992, 27(21): 5720-5726.
- 18 Zhao Lin, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.
- 赵 琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 19 Rudy J F, Rupert E J. Effects of porosity on mechanical properties of aluminum welds[J]. Welding Journal, 1970, 49(7): 322-336.
- 20 Lee Y L, Pan J, Hathaway R, *et al.*. Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice[M]. Oxford: Elsevier Inc, 2005.

栏目编辑: 张浩佳