

铝合金 FSW 拼焊板塑性变形规律研究

万心勇, 胡志力, 戴明亮, 张益雷, 华林

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘要: 铝合金搅拌摩擦焊拼焊板焊缝各区力学性能的差异导致拼焊板成形时严重的不均匀性, 降低了拼焊板的成形性能, 极大地限制了铝合金拼焊板的应用。以 2024 铝合金搅拌摩擦焊拼焊板为研究对象, 通过实验和有限元模拟系统研究接头力学性能失配对铝合金拼焊板塑性成形性能的影响规律和机理。对铝合金搅拌摩擦焊接头进行金相检验和硬度测试, 根据接头组织及硬度分布特征, 将搅拌摩擦焊接头划分为焊核区、热机影响区、热影响区以及母材区 4 个部分, 以此建立搅拌摩擦焊接头的有限元模型, 对接头变形过程中的约束与协调变形规律进行分析。接头变形时拉伸应力在屈服应力最小的区域最低, 在屈服应力较大的区域相应升高, 且在接头中存在失配比交界处都会发生突变。从形变能的角度分析, 这主要是由于力学性能失配而导致变形不协调及相互约束, 表现在接头拉伸性能上就是屈服强度及屈服位置、抗拉强度、延伸率随接头各区失配比组合的差异。

关键词: 铝合金拼焊板; 力学性能失配; 有限元模拟; 变形规律

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3357-09

环境污染严重, 能源约束趋紧, 汽车轻量化以致节能减排势在必行。拼焊板 (TWB) 成形技术被认为是实现车身轻量化的先进制造技术, 它是将数块不同材质、不同尺寸的金属板料拼焊在一起再进行冲压成形的技术。早期乃至现在用于汽车行业的拼焊板材料都是钢材, 因此已有的研究多是以钢制拼焊板为对象, 设计制造技术较为成熟。如美国通用汽车公司 F. Saunders 等人做的钢制拼焊板胀形实验^[1], 发现焊缝的塑性比母材差, 但强度与硬度大于母材, 焊缝的移动量受焊缝分布的影响很大, 并且随着焊缝移动量增大板料的成形性能下降。加拿大女皇大学的 K. Abdullah 等人做的钢拼焊板接头单向拉伸试验^[2]发现焊缝位置以及焊缝长度对拼焊板的冲压成形性能有很大影响, 针对激光焊接接头材料性能分布特点提出 3 种焊缝建模方式, 分别为完整焊缝模型、粗略焊缝模型和无焊缝模型, 并研究了焊缝建模对成形模拟精度的影响。面对日益严苛的节能减排政策法规, “以铝代钢”, 加快汽车轻量化的步伐迫在眉睫。但由于铝合金焊接性能较差, 尤其是高强铝合金, 传统的熔焊方法获得的接头难以用于塑性加工。搅拌摩擦焊作为一种低熔点合金板材固态连接技术, 可以避免熔焊工艺容易存在的气孔、裂纹等缺陷, 特别适合 Al-Cu(2xxx 系

列) 和 Al-Zn (7xxx 系列) 等熔焊困难的铝合金的焊接成形。密西根大学 M. Garware 等人研究了 5754 铝合金搅拌摩擦焊拼焊接头的静拉伸和拉伸疲劳行为^[3], 发现铝合金搅拌摩擦焊拼焊板单向拉伸试样的屈服强度和抗拉强度与母材的非常接近, 延伸率却比母材降低了 50%, 铝合金拼焊接头的疲劳强度要优于母材等一些宏观表象性能。代尔夫特理工大学 A. A. Zadpoor 等人研究了异质差厚铝合金拼焊板搅拌摩擦焊接头的显微结构特征和机械性能^[4], 发现焊接区域形成了一个非对称的软化区, 接头前进侧的硬度高于后退侧, 接头的屈服强度、抗拉强度以及延伸率都要低于母材。目前, 由于铝合金拼焊成形技术出现较晚, 关于铝合金搅拌摩擦焊的文献多集中在对接头组织性能的研究, 对于铝合金搅拌摩擦焊接头的成形性能及变形规律研究还较少。

传统钢制拼焊板多采用激光焊接等熔焊技术, 焊缝一般分为 3 个区^[5], 即母材区 BM、热影响区 HAZ、焊核区 WNZ, 焊缝尺寸也较小, 多小于 2 mm, 有限元建模多用线焊建模方式^[6]。而铝合金搅拌摩擦焊接头, 焊缝分为 4 个区, 即母材区 BM、热影响区 HAZ、热机影响区 TMAZ 和焊核区 WNZ, 焊缝宽度多在 10~20 mm, 拼焊板塑性变形时 4 个区变形协调, 相互

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51405358); 中国汽车产业创新发展联合基金 (U1564202); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2015T80844); 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放基金 (AWJ-M16-11)

作者简介: 万心勇, 男, 1991 年生, 硕士生, 武汉理工大学汽车工程学院, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070, 电话: 027-87856733, E-mail: wy126wxy@126.com

约束^[7-10]。材料和焊接方法的差异，导致已有的钢质拼焊板的有限元建模方法和成形规律很难适用于铝合金搅拌摩擦拼焊板，迫切需要开展铝合金搅拌摩擦焊有限元建模方法和变形规律的研究。本研究基于已有的铝合金搅拌摩擦焊拼焊板实验数据，从焊缝各区材料特性与尺寸两方面出发，利用金相分析、强度与硬度的关系，建立准确的铝合金拼焊板有限元模型，对铝合金拼焊板塑性变形规律进行研究，揭示铝合金拼焊板材变形特征及成形机理，促进铝合金拼焊板在汽车车身上的应用，提高我国汽车轻量化制造技术水平。

1 实验与模拟

1.1 铝合金拼焊板的实验

实验材料 2024 铝合金板材，厚 2.85 mm，热处理状态 O 态和 T6 态，采用搅拌摩擦焊接技术，转速为 600 r/min，焊接速度为高焊速 300 mm/min 及低焊速 100 mm/min 2 种。拉伸实验根据 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》，处理实验数据获得铝合金拼焊板接头的屈服强度、抗拉强度、应力应变曲线以及延伸率等。此外还做了搅拌摩擦焊接头金相分析，观察焊缝的微观组织，如图 1 所示。显微硬度实验仪器为 HV-1000A 显微硬度计，测量方向垂直于焊缝，焊缝部分测量点间距为 0.5 mm，母材部分测量点间距为 1 mm，加载压力值为 100 g，加载时间为 10 s。硬度分布如图 2 所示。

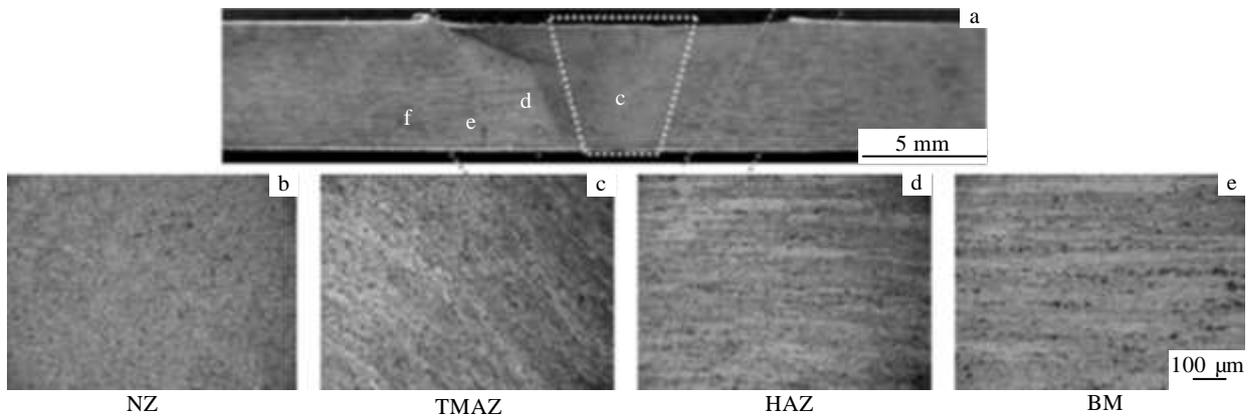


图 1 搅拌摩擦焊接头金相照片

Fig.1 OM images of FSW joint: (a) FSW joint; (b) C zone in Fig.1a; (c) d zone in Fig.1a; (d) e zone in Fig.1a; (e) f zone in Fig.1a

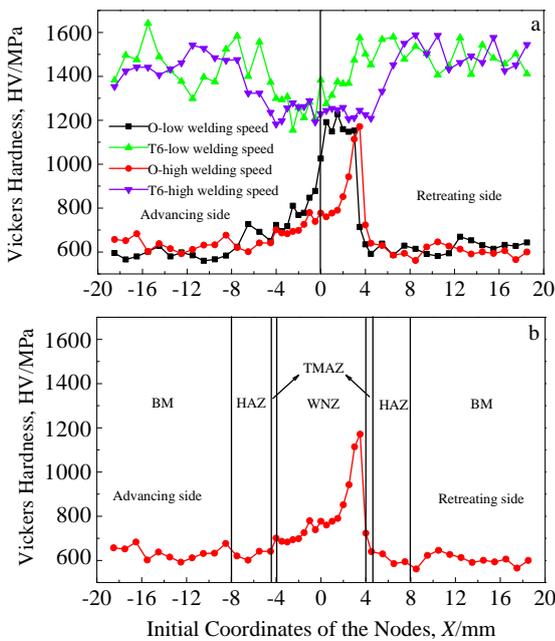


图 2 搅拌摩擦焊接头的显微硬度分布

Fig.2 Micro-hardness distributions of FSW joint: (a) O, T6-high/low welding speed and (b) O-high welding speed

图 2a 为在不同热处理状态及不同焊速下接头的显微硬度分布。可以看出，O 态搅拌摩擦焊接头的焊缝硬度要高于母材硬度，而 T6 态搅拌摩擦焊接头的焊缝硬度要低于母材硬度；不同焊速下搅拌摩擦焊接头与母材的硬度差也存在一定的差别。

根据显微硬度数据的差异，如图 2b 所示，划分焊缝各分区，进而做各分区材料微拉伸实验，试样尺寸及取样位置如图 3 所示。所得各分区平均硬度和强度，如表 1 所示。通过分析这些数据，可以在一定误差范围内验证强度与硬度拟合公式(1)及(2)的正确性，见图 4。

1.2 有限元模拟

为了体现接头的力学性能不均匀性以及有限元模拟的准确性，如图 2b 所示，根据接头的硬度分布特征，把搅拌摩擦焊接头划分为焊核区(WNZ)热机影响区(TAMZ)、热影响区(HAZ)以及母材(BM) 4 个区域^[11]，并确定各区域尺寸及平均硬度值。

表 1 2024-O 态铝合金拼焊板力学性能
Table1 Mechanical properties of 2024-O FSW-TWB

Mechanical properties	WNZ	TMAZ	HAZ	BM	
Average hardness, HV/MPa	918	642	642	636	605
σ_b /MPa	296.5	221.5	232.6	213.8	202.7
σ_s /MPa	234.3	118.7	132.5	117.2	98.4

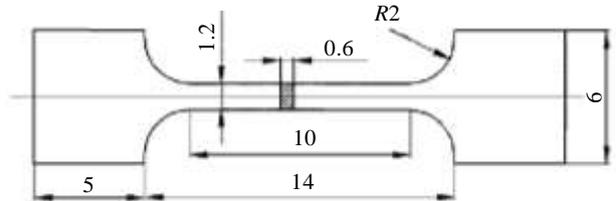
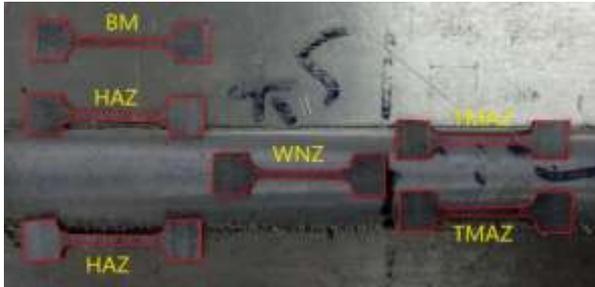


图 3 焊缝各分区微拉伸实验

Fig.3 Tensile test of different zones in FSW joint

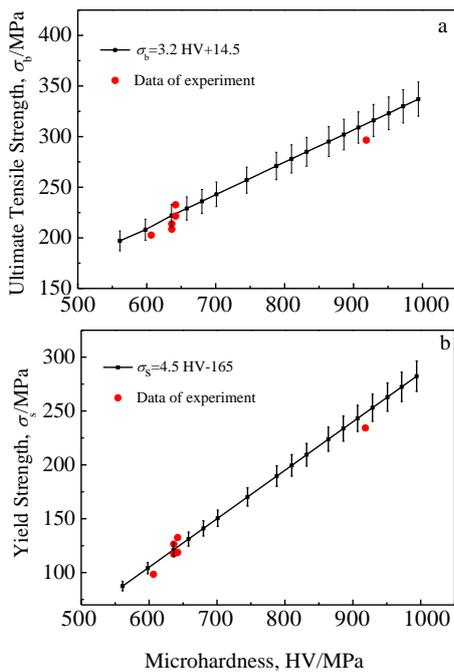


图 4 微拉伸实验数据分析

Fig.4 Analysis of tensile test in different zones: (a) ultimate tensile strength and (b) yield strength

有限元模型的几何尺寸与单向拉伸实验试样的几何尺寸相同。由图 2 可知，搅拌摩擦焊接头的焊缝两边的区域是不对称的，但为了有限元建模与分析的方便性，规定焊缝左右两边的区域是对称的，且焊核区、热机影响区和热影响区的宽度分别为 8、1、3 mm。接头有限元网格模型如图 5 所示。

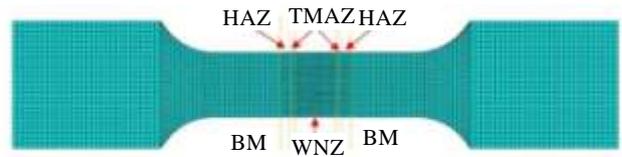


图 5 搅拌摩擦焊接头有限元模型

Fig.5 Finite element model of FSW joint

利用 ABAQUS 对单向拉伸实验进行有限元模拟。在施加载荷增量的过程中，记录每一步加载面的载荷值以及试样标距长度上的位移，将这些数据处理后就得到搅拌摩擦焊接头单向拉伸的名义应力应变曲线。

2 结果与分析

2.1 铝合金材料强度与硬度之间的关系

《机械设计手册（第三版）》（机械工业出版社）提供了铝合金板材硬度与强度换算值^[12]，以此数据为基础，得 2024 铝合金抗拉强度与维氏硬度之间的拟合公式(1)，再根据文献提供的数据^[13,14]，拟合得到 2024 铝合金屈服强度和维氏硬度之间的公式(2)。

$$\sigma_b = 3.2HV + 14.5 \tag{1}$$

$$\sigma_s = 4.5HV - 165 \tag{2}$$

又由于 2024 铝合金加工硬化过程符合幂函数规律，再通过名义应力与真实应力、名义应变与真实应变之间的关系，综合分析推导得：

$$\frac{\sigma_0}{e^{\epsilon_0} + 0.2\%} \left(1 + \frac{\ln(e^{\epsilon_0} + 0.2\%)}{\epsilon_0}\right)^n = 4.5\text{HV} - 165 \quad (3)$$

$$\sigma_b = \sigma_0(1+n/\epsilon_0)^n \quad (4)$$

$$\sigma_0 = (1+n/\epsilon_0)^n e^{-n} = 3.2\text{HV} + 14.5 \quad (5)$$

$$\sigma_0 = E\epsilon_0 \quad (6)$$

式中, E 为弹性模量、 σ_0 为真实屈服强度、 σ_b 抗拉强度, n 为硬化指数, 求解方程组 (3)、(4)、(5)、(6) 可得 σ_0 、 σ_b 和 n 与 HV 之间的关系, 结果如图 6a 所示。

通过显微硬度实验知材料的硬度值, 然后利用图 6a 的结果, 即可得到该材料的屈服强度、抗拉强度及加工硬化指数。利用此方法可以将图 2 中接头的硬度分布转化为接头各区材料的力学性能曲线, 如图 6b 所示。

2.2 力学性能失配对接头拉伸性能的影响规律

搅拌摩擦焊接头具有明显的力学性能不均匀性。定义焊核区、热机影响区和热影响区的失配比分别为: $M_{yw} = \sigma_{yw}/\sigma_{yb}$ 、 $M_{yt} = \sigma_{yt}/\sigma_{yb}$ 、 $M_{yh} = \sigma_{yh}/\sigma_{yb}$, 其中 σ_{yw} 、 σ_{yt} 、 σ_{yh} 、 σ_{yb} 分别为焊核区、热机影响区、热影响区和母材的屈服强度。定义搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度和相对抗拉强度分别为: $M_{yj} = \sigma_{yj}/\sigma_{yb}$ 和 $M_{bj} = \sigma_{bj}/\sigma_{bb}$, 其中 σ_{yj} 、 σ_{bj} 是接头的屈服强度和抗拉强度, σ_{yb} 、 σ_{bb} 是母材的屈服强度和抗拉强度。

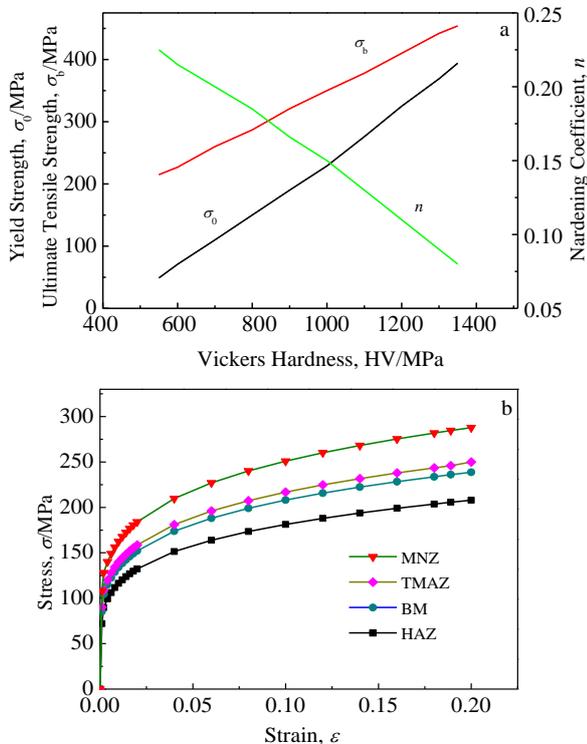


图 6 材料性能参数与维氏硬度的关系及接头各分区真实应力-应变曲线

Fig.6 Relation of materials properties parameters with hardness (HV) (a) and σ - ϵ (b)

如图 2 和图 7 所示, 不同的焊接参数和焊后热处理工艺导致焊缝接头各区域的硬度值存在差异^[15-17], 即强度存在差异, 针对 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头既存在高匹配, 又存在低匹配的情况。设计 0.8、0.85、0.9、0.95、0.98、1.05、1.1、1.15、1.2、1.3 等系列失配比, 组合成高匹配和低匹配 2 种情况来研究失配对接头拉伸性能的影响规律。已知 2024 母材的力学性能, 根据设定的失配比, 就可计算得到失配比对应的屈服强度和抗拉强度, 从而根据应力应变幂函数规律, 转化得到相应的真实应力-应变曲线, 如图 8 所示。

根据设定的失配比, 对各区进行失配比组合, 以研究在高匹配和低匹配的情况下各区的失配比对接头拉伸性能的影响规律。根据失配比的组合情况, 对搅拌摩擦焊接头有限元模型的各区域输入图 8 中对应的应力应变曲线, 然后进行单向拉伸实验有限元模拟。

根据模拟的结果, 处理得到不同失配比组合下搅拌摩擦焊接头的名义应力应变曲线, 如图 9 所示。

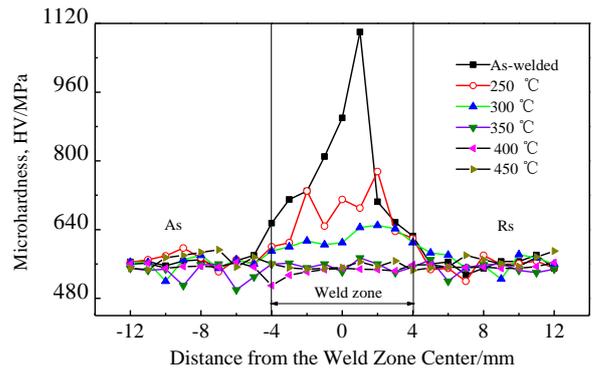


图 7 接头显微硬度分布

Fig.7 Microhardness of the joints

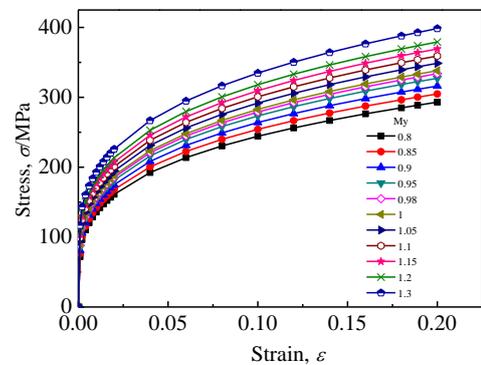


图 8 不同失配比对应的接头的真实应力-应变曲线

Fig.8 Real σ - ϵ curves of the joints with different mismatch ratios

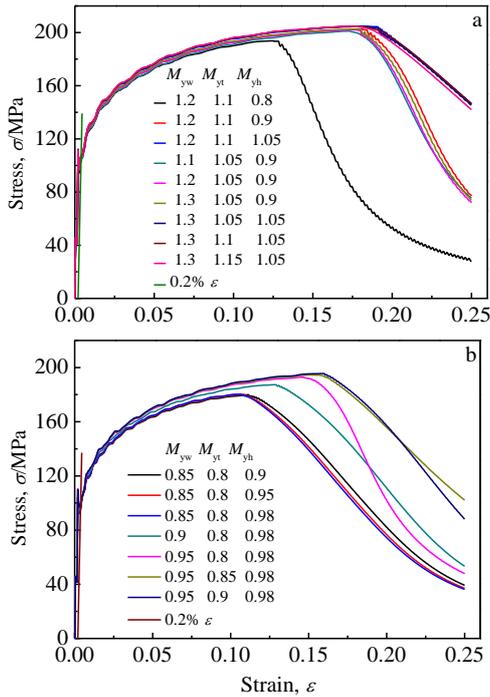


图 9 不同失配比搅拌摩擦焊接头的名义应力-应变曲线
Fig.9 Nominal σ - ϵ curves of the joints with different mismatch ratios: (a) overmismatch and (b) undermismatch

根据焊接接头力学性能测试结果，设计高匹配时热机影响区的失配比 M_{yt} 为 1.05，热影响区的失配比 M_{yh} 为 0.9，焊核区的失配比 M_{yw} 从 1.1~1.3 变化；低匹配时，热机影响区的失配比 M_{yt} 为 0.8，热影响区的失配比 M_{yh} 为 0.98，焊核区的失配比 M_{yw} 从 0.85 到 0.95 变化。处理所得结果如图 10 所示。由图 10 可以看出，不管是高匹配还是低匹配，搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度、相对抗拉强度以及延伸率都随着焊核区失配比的增大而增大。也就是说通过提高焊核区的强度，可以提高搅拌摩擦焊接头的强度及延伸率。

热机影响区是一个过渡区，强度性能与焊核区有较强的联系。同理，根据焊接接头力学性能测试结果设计高匹配时焊核区的失配比 M_{yw} 为 1.3，热影响区的失配比 M_{yh} 为 1.05，热机影响区的失配比 M_{yt} 从 1.05~1.15 变化；低匹配时，焊核区的失配比 M_{yw} 为 0.95，热影响区的失配比 M_{yh} 为 0.98，热机影响区的失配比 M_{yt} 从 0.8~0.9 变化。得到热机影响区的失对比对搅拌摩擦焊接头拉伸性能的影响规律如图 11 所示。从图 11 中可以看出，高匹配时，搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度和相对抗拉强度基本不受热机影响区失配比变化的影响，而延伸率却随着热机影响区失配比的增加而减小；低匹配时，搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度、相对抗拉强度以及延伸率都随着热机影响区失配比的增大而增大。

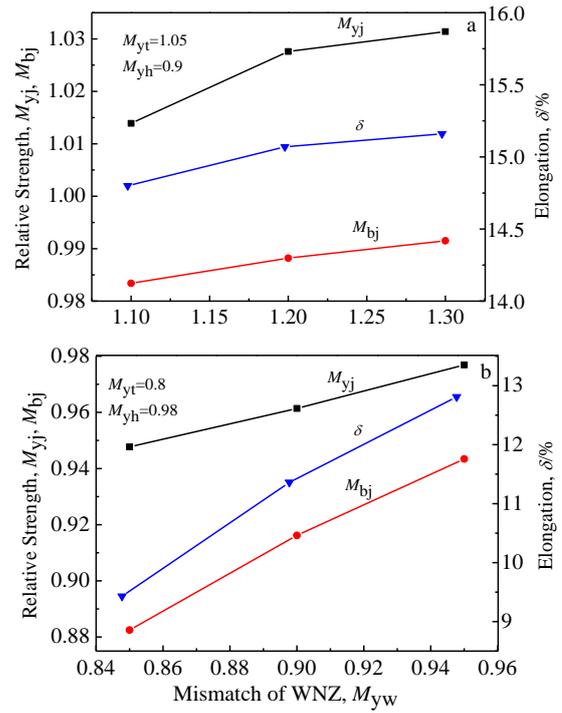


图 10 焊核区失对比对搅拌摩擦焊接头拉伸性能的影响
Fig.10 Influence of different WNZ mismatch ratios on tensile property of welded joint: (a) overmismatch and (b) undermismatch

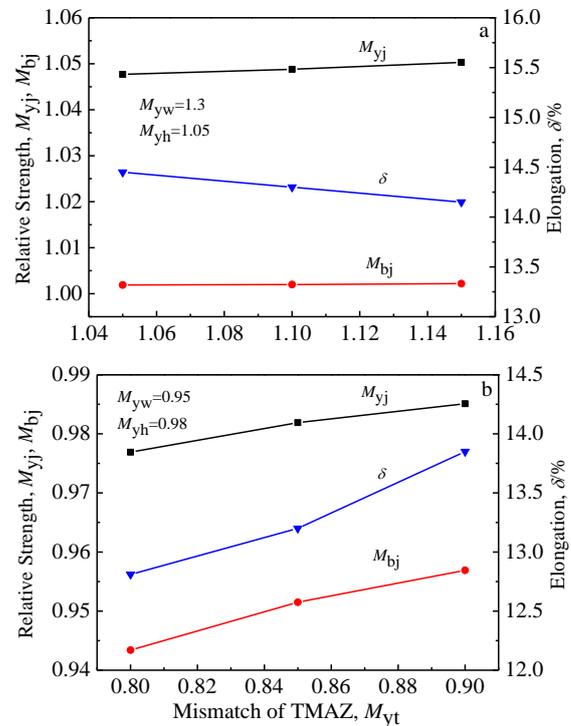


图 11 热机影响区失对比对搅拌摩擦焊接头性能的影响
Fig.11 Influence of different TMAZ mismatch ratios on tensile property of welded joint: (a) overmismatch and (b) undermismatch

为了研究接头热影响区失配对接头拉伸性能的影响规律, 同理, 设计高匹配时焊核区的失配比 M_{yw} 为 1.2, 热机影响区的失配比 M_{yt} 为 1.1, 热影响区的失配比 M_{yh} 从 0.8~1.05 变化; 低匹配时, 焊核区的失配比 M_{yw} 为 0.85, 热机影响区的失配比 M_{yt} 为 0.8, 热影响区的失配比 M_{yh} 从 0.9~0.98 变化。据此得到热影响区的失配对接头拉伸性能的影响规律如图 12 所示。从图 12 可以看出, 高匹配时, 搅拌摩擦焊接头的屈服强度随着热影响区失配比的增加呈直线增加的趋势; 热影响区失配比小于 1 时, 抗拉强度和延伸率随着失配比的增加而逐渐增大, 热影响区失配比大于 1 时, 抗拉强度基本保持不变, 而延伸率逐渐减小。低匹配时, 搅拌摩擦焊接头的屈服强度和抗拉强度随着热影响区失配比的增大而略有增大, 但延伸率却随着失配比的增大而逐渐减小。

2.3 铝合金拼焊板接头塑性变形的应力应变分析

图 13 为不同焊核区失配比下接头等效应力与等效应变沿试样长度方向的分布特征。由图 13a 中的等效应力分布可以看出, 对于高匹配搅拌摩擦焊接头, 热影响区的屈服强度最小, 搅拌摩擦焊接头在拉伸过

程中最先在热影响区发生屈服和颈缩。随着焊核区失配比的增大, 搅拌摩擦焊接头在热机影响区和热影响区的等效应力反而逐渐减小。这是因为焊核区的失配比越大, 焊核区对热机影响区的约束保护作用就会越强, 热机影响区的等效应力就会越小, 而热机影响区对热影响区又存在约束保护作用, 因此造成了热影响区的等效应力随焊核区失配比的增大而减小。在相同外载荷的条件下, 热影响区的等效应力越小, 搅拌摩擦焊接头发生屈服和颈缩的时间就会越晚, 因此搅拌摩擦焊接头的屈服强度和抗拉强度就会越大, 这就解释了为什么搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度和相对抗拉强度会随着焊核区失配比的增大而增大。

延伸率是接头等效应变沿试样长度方向的积分。由图 13a 中的等效应变分布可以看出, 随着焊核区失配比的增大, 焊核区、热机影响区、以及热影响区的等效应变都逐渐减小, 但母材区的等效应变却略有增大, 母材区的长度占标距长度的 76.7%。因此, 母材区等效应变的略有增大造成了接头延伸率的增大, 这就解释了为什么搅拌摩擦焊接头的延伸率会随着焊核区失配比的增大而增大。

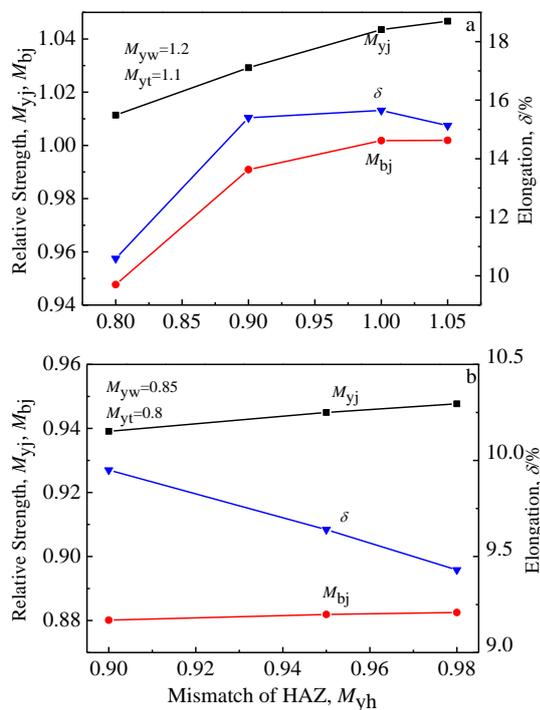


图 12 热影响区失配对接头拉伸性能的影响
Fig.12 Influence of different HAZ mismatch ratios on tensile property of welded joint: (a) overmismatch and (b) undermismatch

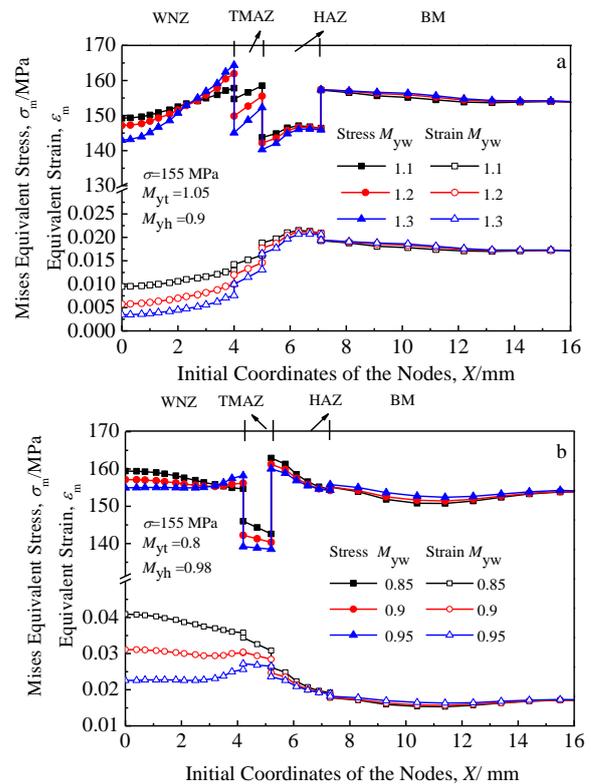


图 13 不同焊核区失配比下搅拌摩擦焊接头等效应力应变的分布特征
Fig.13 Stress-strain distributions of welded joints with different WNZ mismatch ratios: (a) overmismatch and (b) undermismatch

图 13b 是低匹配时搅拌摩擦焊接头的等效应力应变沿试样长度方向的分布特征。低匹配时热机影响区的屈服强度最小，搅拌摩擦焊接头在拉伸过程中最先在热机影响区发生屈服和颈缩。低匹配时焊核区失配比对搅拌摩擦焊接头性能的影响机制与高匹配时相同，在此不再赘述。

图 14 为不同热机影响区失配比下搅拌摩擦焊接头等效应力与等效应变沿试样长度方向的分布特征。从图 14a 可以看出，高匹配时，随着热机影响区失配比的增大，热影响区的等效应力变化幅度很小，而试样的等效应力基本没变化，因此高匹配时热机影响区的强度变化对搅拌摩擦焊接头的性能基本没有影响。低匹配时，搅拌摩擦焊接头中屈服强度最低的是热机影响区，接头的屈服强度和抗拉强度主要由热机影响区的性能决定。因此，随着热机影响区失配比的增大，搅拌摩擦焊接头整体的屈服强度和抗拉强度逐渐增大。从图 14b 中的等效应变分布可以看出，随着热机影响区失配比的增大，母材区的等效应变逐渐增大，这就造成了搅拌摩擦焊接头的延伸率随着热机影响区失配比的增大而增大。

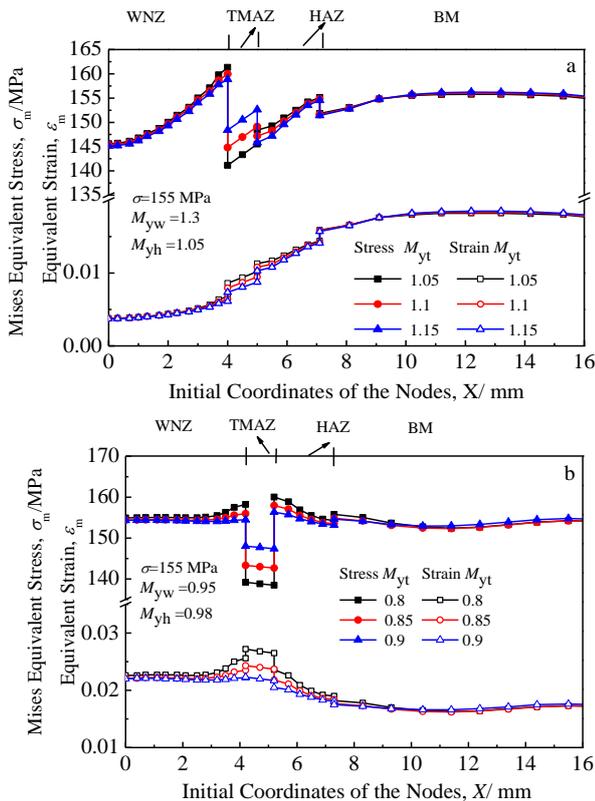


图 14 不同热机影响区失配比下搅拌摩擦焊接头等效应力应变的分布特征

Fig.14 σ_m - ϵ_m distributions of welded joints with different TMAZ mismatch ratios: (a) overmismatch and (b) undermismatch

图 15 为不同热影响区失配比下搅拌摩擦焊接头等效应力与等效应变沿试样长度方向的分布特征。从图 15a 中的等效应变分布。可见，随着热影响区失配比的增大，母材区的等效应变逐渐增大，因此搅拌摩擦焊接头的整体延伸率随着热影响区失配比的增大而逐渐增大。图 15b 是低匹配时等效应力应变的分布。可以看出，随着热影响区失配比的增大，热机影响区的等效应力逐渐减小。这是因为热影响区的失配比越大，对热机影响区的约束保护作用就越强，导致热机影响区的等效应力越小。而热机影响区的屈服强度是不变的，因此在拉伸过程中，随着热影响区失配比的增大，搅拌摩擦焊接头在热机影响区发生屈服和颈缩的时间就会越晚，搅拌摩擦焊接头的屈服强度和抗拉强度就会越大。等效应变的分布显示，在母材区等效应变基本不随热影响区失配比的增加而变化，但在其他区域等效应变随着热影响区失配比的增大而较小，这就导致了搅拌摩擦焊接头的整体延伸率随着热影响区失配比的增大而较小。

2.4 铝合金拼焊板接头塑性变形的形变能分析

由前两节的分析可知，存在失配比差的交界处在拉伸过程中，由于力学性能失配而导致变形不协调及相互

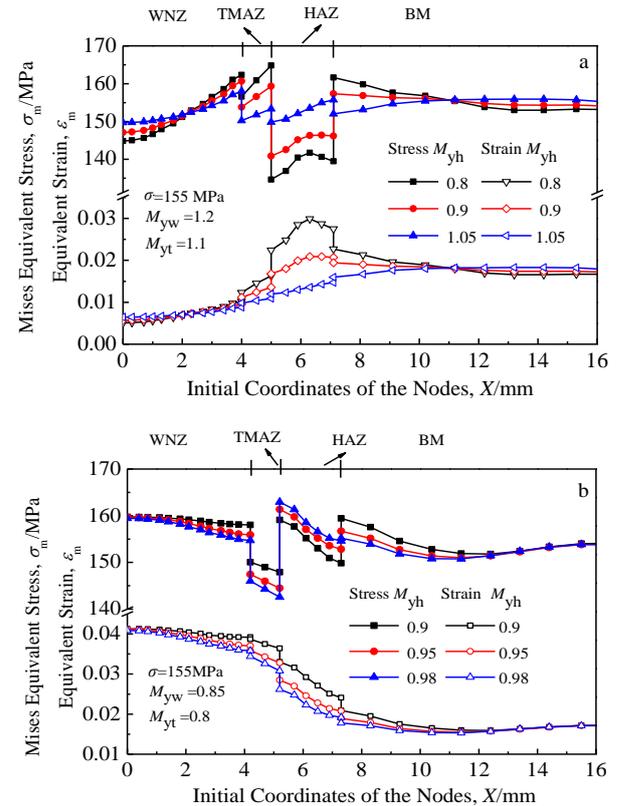


图 15 不同热影响区失配比下搅拌摩擦焊接头等效应力应变的分布特征

Fig.15 σ_m - ϵ_m distributions of welded joints with different HAZ mismatch ratios: (a) overmismatch and (b) undermismatch

约束, 从而出现沿试样长度方向上应力应变分布的不均匀性, 表现在接头拉伸性能上就是屈服强度及屈服位置、抗拉强度、延伸率随失配比组合的差异。

高或低匹配时, 热机影响区的强度变化对搅拌摩擦焊接头的拉伸性能基本没有影响, 并且热机影响区是焊核区和热影响区之间的过渡部分, 宽度很小。因此从能量的角度研究搅拌摩擦焊接头塑性变形规律时将热机影响区与焊核区合并在一起, 统称为焊缝, 则搅拌摩擦焊接头模型变为焊缝、热影响区和母材 3 部分组成。假设焊缝的失配比 M_{yw} 为 1.2, 热影响区的失配比 M_{yh} 为 0.8、0.9、0.95、1.0、1.05。

每单位体积的塑性应变能是由下式给出:

$$W = \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^p \quad (7)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 是等效应力和 $\bar{\epsilon}^p$ 是等效塑性变形, 由于存在约束, 可以假设, 受约束的热影响区所产生的应变能 (W^c) 可以分解成两部分:

$$W^c = W^{hom} + W^{het} \quad (8)$$

式中, W^{hom} 为热影响区材料组成的试样单向拉伸均匀变形时吸收的应变能 (该能量可以通过每一种热影响区的材料特性计算得到), 对应的应变能 W^c 可以从拉伸接头的数值模拟中直接计算。 W^{het} 是有关约束存在的一个应变能术语, 通过应用以上公式便可以计算出 W^{het} 。

图 16 显示了比值 W^{het}/W^{hom} 随热影响区失配比的变化规律。该比值可视为约束影响因子, 表示在热影响区塑料变形中约束对其影响的性质和程度。在图中, 当整个接头中载荷达到最大值时, 若约束影响因子为正值, 意味着 $W^c > W^{hom}$ 。在这些情况下, 通过约束引起的平均应力增大热影响区的材料强度。

此外, 如图 16 所示, 若约束因子为负值, 这表明 $W^c < W^{hom}$ 。在这些情况下, 试样的最大载荷发生在热影响区的相邻区域, 且热影响区的等效应力和应变值要低于材料的最大强度。这种情况出现在材料具有高匹配抗拉强度时。

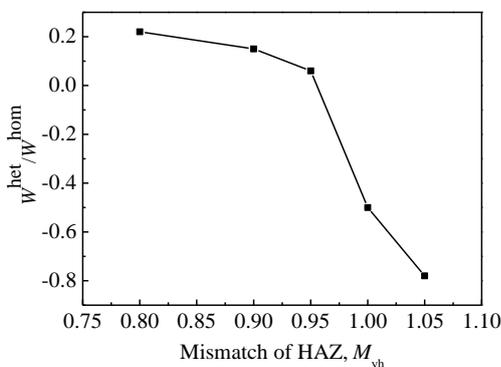


图 16 热影响区失对比对 W^{het}/W^{hom} 的影响

Fig.16 Influence of HAZ mismatch ratio on W^{het}/W^{hom}

3 结 论

1) 根据金相与硬度实验, 将焊缝分区, 通过铝合金材料强度与硬度的关系公式, 计算焊缝各个分区对应的材料特性, 最终得到准确的有限元模型。

2) 对于焊核区, 不管是高匹配还是低匹配, 搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度、相对抗拉强度以及延伸率都是随着焊核区失配比的增大而增大。对于热机影响区, 高匹配时, 热机影响区失配比的变化对接头的拉伸性能基本没有影响; 低匹配时, 搅拌摩擦焊接头的相对屈服强度、相对抗拉强度以及延伸率都随着热机影响区失配比的增大而增大。对于热影响区, 高匹配时, 搅拌摩擦焊接头的屈服强度随着热影响区失配比的增加呈直线增加的趋势, 而抗拉强度和延伸率, 当热影响区失配比小于 1 时, 随着失配比的增加而逐渐增大; 当热影响区失配比大于 1 时, 抗拉强度基本保持不变, 而延伸率逐渐减小; 低匹配时, 热影响区性能失配对搅拌摩擦焊接头拉伸性能的影响很小。

3) 主应力和 Mises 等效应力及等效应变在试样长度方向上是非均匀分布的, 应力在屈服应力最小的区域最低, 在屈服应力较大的区域相应升高, 各分区的应变存在相互协调与约束, 并且在搅拌摩擦焊接头中存在失配比差的交界处应力与应变都会发生突变。

4) 存在失配比差的交界处在拉伸过程中, 由于力学性能失配而导致变形不协调及相互约束, 印证了沿试样长度方向上应力应变分布的不均匀性, 表现在接头拉伸性能上就是屈服强度及屈服位置、抗拉强度、延伸率随失配比组合的差异。

参考文献 References

[1] Sounders F, Wagoner R H. *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 1996, 27(9): 2605

[2] Abdullah K, Wild P M, Jeswiet J J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 112(1): 91

[3] Garware M, Kridli G T, Mallick P K. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2010, 19(8): 1161

[4] Zadpoor A A, Sinke J, Benedictus R et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 494(1-2): 281

[5] Xiong Linyu(熊林玉), Zhang Yanhua(张彦华). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2012, 6(3): 733

[6] Chu Guannan(初冠南), Wang Xiaosong(王小松), Liu Gang(刘钢) et al. *Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报)[J], 2012, 48(22): 34

[7] Zhou Caizhi(周才智), YangXinqi(杨新歧), Luan Guohong(栾国红). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料

- 与工程[J], 2006, 35(7): 1021
- [8] Zhang Hua(张 华), Lin Sanbao(林三宝), Wu Lin(吴 林) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程[J], 2005, 34(7): 1172
- [9] Liu Xiaowen(刘小文), Gu Jianjun(谷建军), Ma Caixia(马彩霞). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程[J], 2009, 38(S1): 415
- [10] Wang Kuaishe(王快社), Shen Yang(沈 洋), Wang Xunhong (王训宏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(10): 1677
- [11] Mishra R S, Ma Z Y. *Materials Science and Engineering R Reports*[J], 2005, 50(1-2): 1
- [12] *Mechanical Design Handbook Editorial Committee*(机械设计手册编委会). *Mechanical Design Handbook (Third Edition)* (机械设计手册第三版)[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 1
- [13] Hakan Aydın, Ali Bayram, Agah Ug̃uz *et al.* *Materials and Design*[J], 2009, 30: 2211
- [14] Srivatsan T S, Satish Vasudevan, Lisa Park. *Materials Science and Engineering* [J], 2007, 466: 235
- [15] Liu Huijie, Fujii H, Maeda M *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 142: 692
- [16] Zhang Z, Xiao B L, Ma Z Y. *Acta Materialia*[J], 2014, 73: 227
- [17] Bozkurt Y, Salman S, Çam G. *Science and Technology of Welding and Joining* [J], 2013, 18: 4

Plastic Deformation Behavior of Friction Stir Welded Tailor-Welded Blank of Aluminum Alloy

Wan Xinyong, Hu Zhili, Dai Mingliang, Zhang Yilei, Hua Lin

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Because of the differences in the mechanical properties of the welded joint district, the deformation law and forming characteristics of aluminum alloy Tailor Welded Blanks (TWB) joint is quite different compared to traditional sheet metal forming. This kind of mechanical properties mismatch often leads to the lower forming property of aluminum alloy TWB than that of the base metal, which greatly restricts the popularization and application of aluminum alloy TWB in automobile manufacturing industry. Based on the 2024-O aluminum alloy TWB of Friction Stir Welding, the influence law and influence mechanism of mechanical properties mismatch on the formability of aluminum alloy TWB was studied through the tests combined with the finite element method. Microstructure and hardness test of aluminum alloy FSW joint were carried out. According to the distribution of the hardness of welded joint, the FSW joint can be divided into Thermal Mechanical Affect Zone (TMAZ), Heat Affect Zone (HAZ) and Base Metal (BM). Finite element simulation of uniaxial tensile test was carried out based on the finite element model of FSW joint. Using the finite element model, the influence of mechanical properties mismatch of WNZ, TMAZ, and HAZ on tensile property of joint was studied. The results show that the stress is the lowest in minimum yield stress area, and correspondingly increases in larger yield stress area. The stress will mutate if there is mismatch ratio difference. In the views of the strain energy, the results are attributed to the nonuniform property of deformation and the constraint in the FSW joint, furthermore which leads to the variation of yield strength, location of yield, ultimate tensile strength and elongation with the diversity of mechanical properties mismatch.

Key words: aluminum alloy TWB; mechanical properties mismatch; finite element simulation; laws of formability

Corresponding author: Hu Zhili, Ph. D., Associate Professor, Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China, Tel: 0086-27-87856733, E-mail: zhilihuhit@163.com