

文章编号:1005-0523(2011)03-0073-05

超声冲击对镁合金焊接接头疲劳性能的研究现状

何柏林

(华东交通大学机电工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:概述了镁合金及镁合金焊接接头疲劳性能国内外研究现状,指出了目前镁合金焊接接头疲劳性能研究存在的问题与不足,最后分析了提高镁合金焊接接头疲劳性能和疲劳寿命的研究趋势。超声冲击方法不仅可以有效地降低焊接接头的应力集中系数,降低接头的残余拉伸应力,甚至在焊接接头表面造成残余压应力,还可以细化焊缝及其附近区域的显微组织,甚至达到表面纳米化组织,该方法对提高镁合金焊接接头的疲劳性能和疲劳寿命具有很大的作用。

关键词:镁合金,焊接接头,疲劳性能,超声冲击

中图分类号:TB114.3;TB115

文献标识码:A

镁是所有结构用金属及合金材料中密度最低的。与其他金属结构材料相比,镁及镁合金具有比强度、比刚度高、减震性、电磁屏蔽和抗辐射能力强,易切削加工,易回收等优点^[1-6],在汽车、电子、电器、交通、航天、航空和国防军事工业领域具有极其重要的应用价值和广阔的应用前景。是继钢铁材料、铝合金之后的第三类金属结构材料,并被称为21世纪的绿色工程材料。目前,镁及镁合金材料的研究成为世界性的热点。但是,由于镁合金具有性质活泼、熔点低、导热快、热膨胀系数大等特点^[7],与铝合金相比,镁合金在焊接时更易形成疏松、热脆性较大的氧化膜及夹渣,其焊接性较差^[8],镁合金焊接结构的疲劳强度较低^[9-10],成为制约镁合金大规模应用的技术关键和难点。

疲劳断裂是金属结构失效的主要形式之一。大量统计资料^[11]表明,由于疲劳引起的焊接结构断裂事故占总断裂失效事故的90%左右。焊接接头附近区域存在应力集中、残余拉伸应力和焊接缺陷是导致疲劳断裂的主要因^[12]。目前,国内外对于镁合金焊接方面的研究还主要集中在镁合金材料的焊接方法、焊接性能、工艺性能以及常规力学性能的试验研究,有关镁合金焊接接头的疲劳强度及疲劳性能研究较少,疲劳数据相当缺乏。因此,如何提高镁合金焊接接头的疲劳强度与疲劳性能,对增加镁合金焊接结构的可靠性,促进镁合金结构的广泛应用具有重大的推进作用。

与传统的粗晶粒材料相比,纳米以及超细晶粒材料通常具有独特的力学性能,如超高强度、高硬度和高疲劳性能等。最近,表面纳米化已引起国际同行的广泛关注,被认为是今后几年内纳米材料研究领域最有可能取得实际应用的技术之一。本文概述了镁合金及镁合金焊接接头疲劳性能国内外研究现状,目前镁合金焊接接头疲劳性能研究存在问题与不足,最后提出了提高镁合金焊接接头疲劳性能和疲劳寿命的研究趋势。

1 国内外研究现状

目前有关镁合金疲劳问题的研究报道主要集中在疲劳裂纹的萌生与疲劳裂纹的扩展行为、循环应力响应行为、 $S-N$ 曲线、 $\varepsilon-N$ 曲线等。张华等^[13]在研究3种快速凝固镁合金的疲劳行为时发现,在低应变幅加载的条件下,3种镁合金都表现为初始循环软化,而后则表现为持续周期很长的循环稳定,在最终断裂之前,

收稿日期:2011-04-10

基金项目:国家自然科学基金(51065010);江西省自然科学基金(2009GZC0016)

作者简介:何柏林(1962—),男,教授,研究方向为材料强度与断裂。

又发生快速的循环软化、微观疲劳裂纹的萌生、疲劳裂纹的扩展与合并,可形成一条或多条宏观裂纹,引起镁合金力学性能的下降,致使合金发生循环软化直至断裂。在不同应变幅下的疲劳断口的形貌是相似的,即在宏观上呈现脆断特征,在微观上表现为脆性与韧性的混合断裂。Eisenmeier等^[14]在研究压铸镁合金的疲劳性能时发现,疲劳裂纹常常萌生于表面或次表面的气孔处。Mayer等^[15]采用在一定循环周次后停机,用SEM(Scanning Electron Microscope)对相应的疲劳试样的表面复型进行观察,实验结果表明,在控制应变的条件下,疲劳裂纹的扩展是通过小裂纹的合并进行的。疲劳裂纹既可以沿着枝晶区域扩展,也可以直接穿过枝晶区扩展,主要取决于镁合金的微观组织结构。在较小的压应力作用下,疲劳裂纹会发生闭合,在小的拉应力作用下,疲劳裂纹则会张开。Wang等^[16]在研究铸态AM50合金的疲劳裂纹扩展行为时发现,在疲劳应力作用下,疲劳裂纹将萌生在 α -Mg基体相的晶界处,而后疲劳裂纹沿着 α -Mg与共晶体之间的界面扩展,但并不会贯穿整个 α -Mg晶粒尺寸,当外加疲劳载荷接近或者超过合金的屈服强度时,由于晶界滑移将会导致疲劳裂纹产生二次裂纹。Nan等^[17]在研究挤压态AZ31镁合金的高周疲劳性能时发现,在疲劳过程的变形初期,疲劳裂纹优先在 $Mg_{12}Al_{17}$ 晶粒处萌生,随后以I型和II型复合模式穿晶扩展。高洪涛等^[18]在研究镁合金疲劳强度与疲劳性能时发现,当应力幅略高于材料的疲劳极限时,裂纹扩展会受到晶界的阻碍作用,出现非平面滑移,将会导致断裂面两侧晶体的高度差异显著增大;当疲劳循环周次达到使裂纹端部积聚的能量达到足以克服晶界的阻碍作用时,疲劳裂纹就可以穿过晶界向相邻晶粒中扩展,非平面滑移积聚在晶界处的能量将得到释放,导致断裂面两侧晶体间的高度差异显著减小,此时,由于疲劳裂纹开始的时候以I型模式扩展,裂纹宽度迅速增大。在全反向加载的条件下,如果疲劳裂纹尖端的应力场强度因子较小,晶界及原有的第二相粒子将阻碍裂纹的扩展,疲劳裂纹在扩展过程中将避开枝晶间区域,而是在成分相对比较均匀的枝晶内部扩展,并形成清晰的疲劳条纹;如果疲劳裂纹尖端应力场强度因子较大,第二相粒子的破碎以及夹杂物与基体之间的分离将形成疲劳裂纹扩展的有利通道,疲劳裂纹将沿着枝晶间区域扩展,并在断口上形成锯齿状条纹。

目前,镁合金焊接接头疲劳性能的研究鲜有报道,大部分研究是在探讨镁合金焊接工艺方法的过程中才提及的。Cavaliere^[19]等研究了AZ91镁合金搅拌摩擦焊(FSW)焊接接头的疲劳性能,认为经过搅拌摩擦焊后,材料原有的铸造缺陷得到有效消除,降低了疲劳裂纹的扩展速率,提高了焊接接头的疲劳寿命;Tsujikawa Masato等^[20]研究了AZ31和AZ61的搅拌摩擦焊和TIG焊焊接接头的疲劳性能,试验结果表明,AZ31镁合金焊接接头的疲劳强度可以达到母材金属的80%左右,AZ61镁合金焊接接头的疲劳强度可以达到母材金属的60%,两种材料焊接接头的疲劳断口都呈现出脆性断裂特征,焊接接头的显微组织显著地影响着疲劳裂纹的扩展方向;Mohlfahrt等^[21]研究了厚度为1.35~5.0 mm的AZ31和AZ61两种镁合金的MIG焊接接头的疲劳性能,其研究结果与文献[20]中的结论有较大差异,得到的焊接接头的疲劳性只能达到母材的50%,通过强化处理能达到母材强度的75%;Draugelates等^[22]采用非中空电子束焊接镁合金,试验结果表明,得到了令人满意的接头疲劳强度。

细化晶粒是提高金属强度和韧性的有效手段之一。金属表面自身纳米化是由LuKe等^[23]率先提出的,是近几年发展起来的一种特殊的表面强化技术。它采用冲击机械能使金属材料表面产生大塑性变形,从而细化表层金属组织,提高表面层的强度。与其它纳米材料制备方法不同的是,材料表面自身纳米化采用常规表面处理技术或表面处理技术进行改进即可实现。表面纳米化材料的组织沿厚度方向呈梯度变化,在使用过程中不会发生剥层和分离。

张金旺等^[24]采用超声喷丸处理AZ31镁合金TIG焊焊接接头,研究表明,AZ31镁合金母材的疲劳强度为57.8 MPa,角焊缝接头和十字接头的疲劳强度分别为20.0 MPa和17.2 MPa(2×10^6 周次)。两种焊接接头在超声喷丸处理后的疲劳强度分别为30.3 MPa和24.7 MPa,疲劳强度分别提高了51.5%和43.6%,载荷在40 MPa时的疲劳寿命比未冲击的试样寿命分别提高了2.74倍和1.05倍。文献[25]指出:细化晶粒相当于减小了位错平均滑移距离,减小了在晶界上位错塞积所引起的应力集中,有利于抑制裂纹的萌生。

此外,由于塑性变形表面纳米化层的残余应力为压应力,可抵消掉部分或全部拉应力,减小裂纹扩展速率,从而改善金属材料抗疲劳性能。霍立兴等^[26]对几种典型焊接结构用钢的对接和十字接头实施冲击处理,进行了焊态与冲击态的弯曲与拉伸两种加载方式的疲劳对比试验,分别获得了冲击处理前后的 $\sigma-N$ 曲线及条件疲劳极限(2×10^6 周次),结果表明,超声冲击处理后,Q235B对接接头条件疲劳极限(2×10^6 周次)提高了57%(拉伸),十字接头(4点弯曲)提高了64%。16Mn对接接头条件疲劳极限(2×10^6 周次)提高了90%(拉伸),十字接头(拉伸)提高了67%。何柏林等^[27]对AZ91D镁合金进行超声冲击处理,结果表明,经过超声冲击强化处理,样品表面的晶粒得到明显细化,在超声冲击时间分别为20,30,50 min时,AZ91D镁合金表面划痕硬度分别提高了7.2%,16.96%,28.90%,磨损2 min和5 min的耐磨性分别提高了39.63%和37.56%。

Ovid'ko I A^[28]对纳米晶材料的变形与扩散模型进行了研究,探讨了晶格位错滑移、晶界滑移、晶界扩散蠕变、旋转滑移等因素之间的相互影响,建立了纳米晶材料的变形与扩散模型。

Hanlon T等^[29]采用平均晶粒尺寸小于100 nm的纳米晶材料、100~1 000 nm的微纳米晶材料以及微米晶材料,探讨了晶粒细化对摩擦损伤和滑动接触疲劳损伤的影响,结果表明,纳米晶材料不仅能够很好地抵抗摩擦损伤和滑动接触疲劳损伤,而且表面的摩擦系数较微纳米晶材料以及微米晶材料小很多。细化晶粒和强度提高都增强了材料表面抵抗摩擦损伤和滑动接触疲劳损伤的能力。

2 镁合金焊接接头疲劳性能研究存在的不足与研究趋势

2.1 存在的不足之处

镁合金焊接接头疲劳性能的研究仍处于初级阶段。主要存在以下几个方面的问题。

1) 镁合金疲劳性能与其微观组织结构之间的相互关系研究的不深入、不系统。目前,对传统的体心立方金属(铁)和面心立方金属(铝)的疲劳性能研究已相当深入,但有关密排六方金属镁及其合金的疲劳性能方面的研究还相当缺乏。因此,应针对镁合金疲劳变形的微观机制、疲劳变形诱发微观结构的演化以及与镁合金疲劳行为之间的关系,位错、孪晶在镁合金疲劳变形及断裂过程中的作用等方面开展系统的研究工作。

2) 因为焊接接头疲劳性能的测试相对比较麻烦,因而在未来的研究中要求提高疲劳试验数据的精确度或准确性,疲劳数据系统化,建立镁及其合金疲劳性能数据库。

3) 各种表面强化技术提高镁合金焊接接头的疲劳性能与疲劳寿命的机理研究很少,特别是镁合金焊接接头超声冲击表面纳米化机理、超声冲击对焊接接头疲劳失效机理的影响的研究才刚刚起步。

2.2 研究趋势

影响焊接接头疲劳性能的因素很多,主要有焊接接头的应力集中、残余应力和接头的组织、焊接缺陷等。焊接结构的疲劳强度在很大程度上取决于构件的应力集中情况,不合理的接头形式和焊接过程中产生的各种缺陷是产生应力集中的主要原因。超声冲击方法不仅可以有效地降低焊接接头的应力集中系数,降低接头的残余拉伸应力,甚至在焊接接头表面造成残余压应力,还可以细化焊缝及其附近区域的显微组织,甚至达到表面纳米化组织,对提高焊接接头的疲劳性能和疲劳寿命具有很大的作用。国内有研究者采用超声冲击方法已在钢材焊接接头表面获得了纳米化组织,镁合金的强度比钢材要小得多,可以实现焊接接头表面超声冲击纳米化。因此,通过改变超声激励电流、冲击振幅完全可以在镁合金表面获得纳米晶组织,从而提高焊接接头的疲劳性能。

国内外虽有少数研究者就表面纳米化对焊接接头的疲劳性能进行了研究,但目前还没有研究者就超声冲击纳米化对镁合金焊接接头金属塑性变形机制,对位错、孪晶等的影响进行过研究;也没有对超声冲击纳米化后镁合金焊接接头的疲劳失效机理进行过研究。从上述国内外研究情况来看,用超声冲击方法可以在金属材料表面形成纳米晶粒,获得的纳米晶组织能够不同程度地提高材料的强度。但目前金属材料表面自身纳米化的研究还很不成熟,特别是镁合金焊接接头表面纳米化机理及纳米化对镁合金焊接接头疲劳性能及失效机理影响的研究才刚刚起步。找出超声冲击对镁合金焊接接头疲劳寿命影响的内在规

律,为确保镁合金焊接结构的广泛应用具有较大的现实意义。

3 结语

镁合金焊接接头疲劳性能的研究仍处于初级阶段。主要存在以下方面的问题:①疲劳性能与微观组织关系的研究不够深入;②镁合金焊接接头疲劳性能数据缺乏;③各种表面强化技术提高焊接接头的疲劳性能与疲劳寿命的机理,特别是镁合金焊接接头超声冲击表面纳米化机理、超声冲击对焊接接头疲劳失效机理的影响的研究才刚刚起步。超声冲击方法不仅可以有效地降低焊接接头的应力集中系数,降低接头的残余拉伸应力,甚至在焊接接头表面造成残余压应力,还可以细化焊缝及其附近区域的显微组织,甚至达到表面纳米化组织,该方法对提高镁合金焊接接头的疲劳性能和疲劳寿命具有很大的作用。

参考文献:

- [1] MONTEMOR M F, SIMOES A M, CARMEZIM M J. Characterization of rare-earth conversion films formed on the AZ31 magnesium alloy and its relation with corrosion protection[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(16): 6922-6931.
- [2] ZHOU L W, ZHOU W. Effect of cooling rate on ignition point of AZ91D+0.98 wt.%Ce magnesium alloy[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(13): 2772-2774.
- [3] ISHIHARA S, NAN Z, GOSHIMA T. Effect of microstructure on fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 468(3): 214-222.
- [4] 余琨,黎文献,王日初,等. 变形镁合金的研究、开发及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(2): 277-288.
- [5] AGHION E, BRONFIN B, FRIEDRICH H. The environmental impact of new magnesium alloys on the transportation industry [J]. *Magnesium Technology*, 2004, 14(1): 167-172.
- [6] SCHUMANN S, FRIEDRICH H. Current and future use of magnesium in the automobile industry[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 419(1): 51-56.
- [7] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
- [8] 曲广学,刘庆忠,郭道厚. 镁合金薄板的焊接[J]. *焊接*, 2002(2): 44-45.
- [9] 杨化仁,郭晓光. 焊接结构疲劳强度理论[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2002.
- [10] JACQUES R P, ASGUPTA R D. Hot chamber diecasting of magnesium alloy AM50A for automotive interior structural components[J]. *Society of Automotive Engineers*, 1996, 63(2): 1522-1530.
- [11] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [12] 张兆栋,刘黎明,王来. 镁合金活性TIG焊焊接接头组织特征分析[J]. *焊接学报*, 2004, 25(4): 55-58.
- [13] 张华,吴林. AZ31镁合金搅拌摩擦焊接接头力学行为[J]. *焊接学报*, 2003, 24(5): 65-68.
- [14] EISENMEIER G, HOLZWARTH B, HOPPEL H W, et al. Cyclic deformation and fatigue behavior of the magnesium alloy AZ91 [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 319(1): 578-582.
- [15] MAYER H, PAPAKYRIACOU M, ZETTL B, et al. Influen of Porosity on the fatigue limit of die-casting Magnesium and aluminum alloys [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(3): 245-256.
- [16] WANG X S, LU X, WANG D H. Investigation of surface fatigue microcrack growth behavior of cast Mg-Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 364(1): 11-16.
- [17] NAN Z Y, ISHIHARA S, GOSHIMA T, et al. Scanning probe microscope observations of fatigue proces in magnesium alloy AZ31 near the fatigue limit [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(4): 429-434.
- [18] 高洪涛,吴国华,丁文江. 镁合金疲劳性能的研究现状[J]. *铸造技术*, 2003, 24(4): 266-268.
- [19] CAVALIERE P, DE MARCO P P. Fatigue behaviour of friction stir processed AZ91 magnesium alloy produced by high pressure die casting[J]. *Materials Characterization*, 2007, 58(3): 226-232.
- [20] TSUJIKAWA M, SOMEKAWA H, HIGASHI K, et al. Fatigue of Welded Magnesium Alloy Joints[J]. *Materials Transactions*, 2004, 45(2): 419-422.

- [21] WOHLFAHRT H, RETHLEMEIER M, BOUAIFI B, et al. Metal-inert gas welding of magnesium alloys [J]. *Welding and Cutting*, 2003, 55(2): 80-84.
- [22] DRAUGELATES U, BOUAIFI B, BARTZSCH J, et al. Welding of magnesium alloys by means of non-vacuum electron-beam welding [J]. *Welding and Cutting*, 2000, 52(4): 62-67.
- [23] LUKE, LUJIAN. Surface nanocrystallization (SNS) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach [J]. *J Mater Sci Technol*, 1999(3): 39-43.
- [24] ZHANG JINWANG, WANG WENXIAN, ZHANG LAN, et al. Improving the fatigue property of welded joints for AZ31 magnesium alloy by ultrasonic peening treatment [J]. *China Welding*, 2008(2): 20-26.
- [25] 张力. 浅析表面纳米化对金属疲劳性能的影响[J]. *中国科技信息*, 2006(9): 302-303.
- [26] 霍立兴, 王东坡, 张玉凤, 等. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击法的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(4): 78-82.
- [27] HE BOLIN, YU YINGXIA, MIAO YANPING. Effect of ultrasonic impact strengthening treating on microstructure and properties of AZ91D magnesium alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 139(1): 382-385.
- [28] OVID KOI A. Deformation and diffusion modes in nanocrystalline materials [J]. *International Materials Reviews*, 2005, 50(2): 65-82.
- [29] HANLON T, CHOKSHI A H, MANOHARAN M. Effects of grain refinement and strength on friction and damage evolution under repeated sliding contact in nanostructure metals [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(11): 1159-1163.

Researching Status and Developing Trend of the Effect of Ultrasonic Impact on Fatigue Properties of Magnesium Weld Joints

He Bolin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Researching status and developing trend of the fatigue properties of magnesium weld joints are reviewed, and the main problems and recent developing focus and goals are outlined. The developing trend of increasing the fatigue properties and fatigue life is analyzed. The ultrasonic impact method can not only decrease the stress concentration coefficient and tension residual stress, but also refine the grain size of weld joints, even compressive stress and nanograins. The method is helpful to increase fatigue properties and life of magnesium weld joints.

Key words: magnesium alloy; weld joints; fatigue properties; ultrasonic impact