

文章编号:1005-0523(2019)01-0001-11

7A52 铝合金焊接及其接头表面纳米化研究现状

陈芙蓉, 贾翠玲

(内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 7A52 铝合金作为一种典型的 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金, 因具有优良的力学性能和较高的比强度而被广泛应用于飞机、火箭、舰船和轻型装甲车辆等的结构件上。该合金在实际应用过程中常以焊接件的形式存在。但由于铝合金熔点低、热传导系数较大、热膨胀率高, 所以采用常规熔化焊工艺焊接时, 容易出现焊缝裂纹、气孔、焊接接头软化等缺陷; 而且, 焊接接头的不均匀性是其在服役中失效的主要原因。因此, 如何提高焊接接头的强度, 实现焊接接头组织性能的均一化是高强铝合金焊接需解决的关键问题之一。采用表面纳米化技术有望解决这一问题, 提高焊接接头的综合性能。为此, 本文综述了国内外近几年来研究成果, 在对 7A52 铝合金进行概述的基础上, 着重对比介绍了该合金双丝 MIG 焊、电子束焊、搅拌摩擦焊、激光焊、等离子焊以及各种复合焊接的研究进展; 同时, 详细介绍了金属及其焊接接头表面纳米化的国内外研究现状, 着重介绍了利用高能喷丸和超声冲击处理实现表面纳米化并提高焊接疲劳强度的研究现状和发展趋势。指出提高接头强度系数是将来铝合金焊接的重点研究方向, 而超声冲击处理技术是实现焊接接头表面纳米化的重要手段之一。

关键词: 7A52 铝合金; 焊接接头; 表面纳米化; 高能喷丸处理; 超声冲击处理

中图分类号: TG409

文献标志码: A

目前, 铝合金因具有优良的力学性能和较高的比强度被广泛应用于飞机、火箭、舰船和轻型装甲车辆等的结构件上^[1-2]。其中, 由于 7A52 铝合金具有比强度高、比刚度大、耐热性强等优点, 因而在轻型战车上得到广泛应用。然而铝合金熔化焊时, 焊缝金属不仅容易产生热裂纹, 而且焊缝强度低、塑性差, 因而影响了其作为焊接结构件的推广应用^[3]。而且, 因 7A52 铝合金焊接结构主要用在轻型战车的装甲板上, 所以磨损和疲劳断裂成为其主要的失效形式。因此在提高该合金焊接接头表面硬度和耐磨性的同时, 着力提高其抗疲劳性能是解决该合金上述焊接问题的根本所在。研究人员^[7-9]采用双丝 MIG 焊、电子束焊、搅拌摩擦焊、激光焊、等离子焊以及激光-MIG 复合焊对 7A52 铝合金进行焊接, 发现焊缝中存在分散的气孔, 疏松组织和焊接接头软化等缺陷, 降低了抗拉强度, 影响焊件的广泛应用。金属材料表面纳米化是近年来纳米表面工程的一个重要研究方向, 已经愈来愈受到广泛的关注, 在汽车、电子、军事等领域表现出广阔的应用前景。表面纳米化可显著提高材料的综合性能, 如耐磨性、疲劳强度等, 因此有着无限的市场开发空间。这恰好符合现在倡导的“先进制造、绿色制造”的理念。另一方面, 国内外已有部分学者成功实现了在各种铝合金表面的纳米化, 但还未发现表面纳米化在 7A52 铝合金焊接接头上得到应用, 在焊接接头的表面纳米化研究方面进行了一些探索, 但鲜有人对高强铝合金焊接接头的表面纳米化进行系统研究。

金属表面纳米化是卢柯与吕坚共同提出来的^[4], 该技术方法简单、处理成本低、对各种金属材料具有普适性^[5], 目前已经成功地在碳钢、不锈钢、纯铝、钛合金、高温合金等材料^[6-10]上实现了表面纳米化; 通过高能喷丸、机械研磨处理等方法 and 手段^[11-13]能有效地实现材料结构功能一体化设计, 为传统金属材料赋予高性能

收稿日期: 2018-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51765053, 51165026); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS0502); 内蒙古工业大学科学研究基金项目(ZZ201821)

作者简介: 陈芙蓉(1972—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 《焊接学报》编委, 中国机械工程学会焊接学会第十届焊接力学与结构设计制造委员会副主任, 内蒙古焊接学会副理事长兼秘书长, 主要研究方向为材料焊接性及其表面改性。

和多功能,可显著提高材料的综合性能,如耐磨性、疲劳强度、耐蚀性、高温稳定性等^[14-17],因此有着无限的市场开发空间。但表面纳米化在焊接接头上的应用较少^[18-24],而在超硬铝合金焊接接头上的研究和应用是由本课题组率先进行的,目前已经利用高能喷丸方法和超声冲击处理技术成功地在 7A52 铝合金焊接接头上制备了纳米晶^[25-26],而且其性能比纳米化之前显著提高^[27]。

1 7A52 铝合金焊接的研究现状

1.1 7A52 铝合金概述

Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金由于具有比强度高、高硬度、易加工、耐腐蚀性能较好等优点^[1],广泛应用于航空航天等领域,美国将其编为 7xxx 系,前苏联将其定义为 Bxx。自 20 世纪 30 年代开始,日本、美国、前苏联等国家都积极开发了这一系列的铝合金。我国自 20 世纪 60 年代初,相继研发生产了符合需求的 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金。其中,7A52 铝合金(曾用名 LC52 铝合金或 5210 铝合金)是由东北轻合金加工厂和北京航空材料研究所于 20 世纪 80 年代初期研制开发的,属于 Al-Zn-Mg-Cu 装甲铝合金。该铝合金于 1996 年被列入国家标准,抗弹性能与美 7039、苏 1911 相当,且具有良好的焊接工艺性能,被广泛应用于坦克装甲和炮架^[2-3]上,尤其在轻型装甲、坦克等战车中应用范围较广,且以焊接为主要成型手段。

当前,对于 7A52 铝合金的研究主要集中在材料生产缺陷分析、材料改性、表面强化、焊接制造等方面。下面重点介绍 7A52 铝合金焊接方面的国内外研究现状。

1.2 7A52 铝合金焊接研究现状

关于 7A52 铝合金焊接工艺和接头性能研究的文献比较多。由于铝合金焊接要求采用能量密度大、焊接热输入小、焊接速度高的高效焊接方法,因此其焊接方法主要有惰性气体钨极保护焊、熔化极惰性气体保护焊、搅拌摩擦焊、激光焊、等离子电弧焊、复合焊等^[4],目前 7A52 铝合金主要采用焊条电弧焊、熔化极惰性气体保护焊^[5-6]、搅拌摩擦焊^[7]和电子束焊接^[8-9],并以双丝 MIG 焊居多。

1.2.1 双丝焊(TANDEM 双丝 MIG 焊)

实验证明^[10],双丝 MIG 焊的焊接速度相对普通单丝焊可以提高 1~3 倍,且熔敷效率是单丝焊的 3 倍。在厚板高强铝合金焊接上也能够获得性能良好的焊接接头,例如双丝 MIG 焊焊接 20 mm 厚的 7A52 铝合金时,焊接接头的抗拉强度大都处于 255~270 MPa 之间,个别焊接接头的抗拉强度可达 280 MPa,约为母材抗拉强度的 60%,同时与单丝焊相比双丝 MIG 焊焊接热裂纹及气孔明显减少;单丝 MIG 焊接头平均抗拉强度在 240~260 MPa 之间,比双丝焊低 20~40 MPa。

目前,双丝 MIG 焊技术已成为十分成熟高效的焊接方法,被广泛应用于碳钢、不锈钢、铝合金以及其它金属材料的焊接。TANDEM 系统由德国 CLOOS 公司生产提供,全球已经有 500 多家用户,随着焊接自动化程度的普及,我国已引进几十套双丝焊设备,TANDEM 双丝 MIG 焊技术具有更广阔的应用前景。

近年来比较多的研究集中在该合金的双丝焊接工艺及其接头组织和性能上。余进等^[4]对中厚板的 7A52 铝合金采用 5A56 焊丝进行了双丝 MIG 气体保护焊,对其接头的组织性能进行了分析。结果表明,采用双丝 MIG 气体保护焊能够获得优良的焊接接头,但因焊丝化学成分和焊缝结晶过程的影响,焊缝仍是接头的薄弱环节。

2005 年以来,内蒙古工业大学针对 7A52 超硬铝合金双丝焊接工艺和焊接接头组织和性能进行了系统深入的研究,并取得了良好的研究成果。其中文献^[11-13]对 7A52 铝合金的单丝、双丝 MIG 焊缝进行了比较,结果表明:二者焊缝截面的硬度分布规律基本一致,焊缝区硬度高于单丝 MIG 焊缝,只是双丝 MIG 焊的热影响区与单丝焊相比减小 1/3;单丝焊对接焊缝的自由变形远大于双丝焊,双丝焊焊接接头变形小;双丝 MIG 焊的焊缝组织更为均匀细小;双丝 MIG 焊接头抗拉强度提高了 7.7%,且双丝焊可以相对更好地抑制锌挥发。何静等^[14]通过正交试验对优化了双丝 MIG 焊的焊接参数和人工时效参数进行研究,为生产实际提供了优化方案。田红雨^[15]通过数字模拟法研究了 7A52 铝合金双丝 MIG 焊接接头的温度场和应力场的分布情况,结果表明,在横向,焊缝中心点上的温度最高,距焊缝中心线越远温度越低,在空冷阶段时,各点的

温度变化随着距离的增加变化不大;在纵向,随着时间的增加,焊缝区各点温度逐渐降低而远离焊缝区各点的温度先升高然后逐渐降低。同时比较了试验与模拟的结果,并对模拟的准确性进行了验证。

1.2.2 电子束焊

采用传统熔化焊接得到的接头强度比较低,而采用电子束焊接可以显著提高接头强度系数。2010年,翟熙伟等^[8-9]对7A52铝合金采用电子束焊接的方法进行了研究,其中文献[8]采用电子束焊接方法对7A52铝合金进行了焊接,并对其接头的组织性能进行了研究,结果表明,焊缝组织均匀细小,且焊缝中的Mg元素、Zn元素均有不同程度的烧损,其中Zn元素的烧损比Mg元素的烧损更为严重,焊缝中心Mg元素、Zn元素的烧损情况比焊缝边缘Mg元素、Zn元素的烧损严重;焊缝中心硬度最低;焊接接头平均拉伸断裂强度为431.7 MPa,平均冲击韧度为27.67 J/cm²,为母材冲击韧度的82.4%。文献[9]对20 mm厚7A52铝合金板材采用试件法进行电子束焊接,确定了焊接参数并对力学性能进行了分析。结果表明,采用加速电压60 kV,电子束流120 mA,聚焦电流763 mA,焊接速度800 mm/min的参数,可得到良好的焊缝表面。电子束流增大焊缝深宽比显著增加,聚焦电流微小的数值变化可引起焊缝形状突变。接头焊缝区晶粒细小均匀,抗拉强度为母材的87%,焊缝维氏硬度最低值为母材的61%,焊缝冲击韧度为母材的95.4%,表明电子束接头的性能很高。

针对7A52铝合金材料本身的一些特点,如热膨胀率高、热传导系数较大、熔点低等物理性能,在使用常规熔化焊工艺焊接时,会出现焊接热裂纹、焊缝气孔、焊缝强度低等问题,焊缝质量得不到保证,因此许多学者近几年研究了铝合金的搅拌摩擦焊。其中,刘红伟等^[17]对20 mm厚的7A52铝合金进行了焊接,20 mm厚的7A52铝合金,在合理的工艺参数下,接头强度系数可达母材的87%;此外,傅志红等^[18]也对7A52铝合金进行了大量的搅拌摩擦焊接试验,周鹏展等^[19]采用搅拌摩擦焊方法对厚度为25 mm的7A52铝合金板进行了单道焊实验。马志华等^[20-22]采用搅拌摩擦焊接技术对7A52铝合金进行了研究,主要集中在工艺参数设置与优化、焊接接头组织与性能、以及与其它焊接方法的比较。其中文献[20]对7A52铝合金试板进行拉伸试验,结果表明,通过优化焊接参数可以使得接头抗拉强度达到384 MPa。文献[22]对7A52铝合金的FSW与双丝MIG焊接接头性能进行了比较,结果表明:对20 mm厚的7A52铝合金分别进行搅拌摩擦焊接和双丝MIG焊接,与双丝MIG接头相比搅拌摩擦焊的接头强度提高了15%左右;由于焊接时热输入量较大,双丝MIG焊缝区的晶粒明显长大;FSW焊缝区发生动态再结晶,生成细小的等轴晶粒。

焊接技术具有快速加热、快速冷却的特性,焊接过程中的材料添加和工艺特点决定了接头组织和性能具有不均匀性,焊接接头的均匀性是其在服役中失效的主要原因^[23],因此,如何实现焊接接头组织性能的均一化是焊接技术需解决的关键问题之一。采用表面纳米化技术有望可以解决这一问题,从而提高焊接接头的综合性能。

2 表面纳米化及其研究现状

2.1 表面纳米化

金属焊接接头的主要失效形式是断裂和磨损,而磨损与疲劳断裂均始于金属材料表面,所以表面结构和性能直接影响着焊接接头的综合性能,因此,通过对焊接接头进行表面纳米化处理,来提高焊接接头的表面综合性能具有非常重要的意义^[24]。

表面纳米化是利用各种物理或化学方法,将材料的表层晶粒细化至纳米量级,制备出具有纳米结构的表层,基体仍然保持原有的状态,借以改善和提高材料的表面性能,如疲劳强度、抗蚀性和耐磨性等^[25]。表面纳米化现有3种形式,分别是表面自身纳米化、表面涂层沉积和混合方式,其中自身表面纳米化具有两个优点:在使用过程中不会发生剥落、分离,能有效抑制疲劳裂纹的萌生。目前,自身表面纳米化主要有以下几种方法:表面机械加工技术、超声喷丸(USSP)、微粒冲击、机械研磨(SMAT)、高能喷丸(HESP)和超声冲击处理(UIT)。本文将高能喷丸(HESP)和超声冲击处理(UIT)作为主要的焊接接头表面改性方法^[26-27]进行论述。

近年来关于金属表面纳米化研究的文献比较多。其中高能喷丸处理技术在铝及其合金、纯铁及其合金

以及纯钛及其合金上得到了广泛应用,研究内容主要集中在纳米晶的制备、表层组织和晶粒的变化,高能喷丸处理对金属表面粗糙度、显微硬度、耐磨性和疲劳性能的影响上。而对超声冲击处理技术的研究则集中在钢铁及铝、镁等有色金属焊接接头应力的改善和疲劳性能的提高上。

2.2 高能喷丸及其研究现状

2.2.1 铝及其合金纳米化研究

2004年太原理工大学胡兰青,马晋芳等^[28-31]对1420铝合金进行高能喷丸处理,并成功制备出纳米晶结构表层,样品表面形成了厚度约为20 μm 的纳米晶层,随温度的增加,平均晶粒尺寸由约20 nm逐渐增加到约100 nm,距表层约20~50 nm为亚微细晶层,表面纳米化的程度与塑性变形量有关,表面纳米化是通过位错滑移的塑性变形方式实现的,与样品的内部相比,表面硬度显著提高。2005年研究了Al-Zn-Mg合金高能喷丸表面纳米化过程中的微观结构演变,结果表明,随着塑性变形量的增加,析出相在纳米晶区内几乎完全返溶,形成晶粒尺寸小于100 nm的单相 α 过饱和固溶体。其原因可能是 α 固溶体的晶粒尺寸超细化而导致固溶度增加。2007年研究了Al-Zn-Mg合金高能喷丸时物质发生转移的过程,结果表明,表面纳米化过程中,弹丸中的Fe, Cr原子在强制机械力的作用下转移进入铝合金表面,在材料表层约30 μm 的深度范围内形成了分布不均匀的合金化层;同年,在2005年的纳米化研究基础上对Al-Zn-Mg合金高能喷丸表面纳米化热稳定性进行了研究,结果表明,在250 $^{\circ}\text{C}$ 真空退火后,表层纳米层有大量纳米级析出相析出,晶粒大小在300 nm左右,具有较好的热稳定性。

Sheng X F, Xia Q X等^[32]采用随机弹丸模型,研究了分析步时间、覆盖率、不同弹丸数目、位置及靶材表面粗糙度对7075-T651高强度铝合金残余应力场的影响规律。周新远、汪勇等人^[33]分析研究了7A52铝合金经喷丸强化处理前后,喷丸尺寸对晶粒细化及粗糙度的影响发现,喷丸处理能够使7A52铝合金表层晶粒得到明显的细化。在表面形成强化效果较好、无明显裂纹的致密强化层;表面晶粒细化程度不受喷丸尺寸的影响,而粗糙度随喷丸尺寸的增加而增大。

2010年,韩国Cho K T, Yoo S等^[34],研究了Si含量对Al-Si合金表面喷丸效果(加工硬化)的影响。结果表明,相同喷丸工艺条件下,显微硬度随Si含量的增加而增加,晶粒尺寸则随之减小,主要是因为稠密细小的Si粒子在喷丸过程中可以加快晶粒细化。2015年,韩国Yong S N, Yoo I J等^[35],采用响应面分析方法对喷丸参数进行优化,并对较优参数处理后的航空铝合金2124-T851表面强化效果进行了研究。结果表明,较优喷丸参数为喷嘴距离50 mm,压力4 kg/cm^2 ,角度 60° ,时间130 s,显微硬度为178.2 HV,残余压应力-335.29 MPa;大的压力、角度及较长的冲击时间对显微硬度和残余应力的影响更加明显,喷嘴距离较小时效果相对明显;显微硬度受2个二次方程和2因素交互作用影响,残余应力受3个二次方程和4因素交互作用影响。2013年田龙等^[36],对7075铝合金表面纳米化后耐磨性进行了研究。结果表明,表面纳米化使7055铝合金材料表面发生严重塑性变形,材料表面分布较高幅值残余压应力,最大可达到-369 MPa,残余压应力层深度达0.6 mm,纳米化后试样显微硬度较基体提高了50%;表面纳米化一定程度降低了7055铝合金材料表面摩擦系数,磨损失重是未处理试样的32%,表明高能喷丸表面纳米化有效改善了7055铝合金材料的耐磨性能。

Gao Y K, Wu X R^[37-38]在喷丸条件下,对7475-T7351的微裂纹的扩展和疲劳寿命进行了研究,发现疲劳寿命延长最主要的原因是经喷丸强化后残余压应力降低了疲劳裂纹扩展速率,表层晶粒残余应力的存在使得疲劳寿命延长。Majzooobi G H, Azadikhah K等^[39]对喷丸和深滚工艺处理后的7075-T6铝合金的微动疲劳寿命进行研究发现,微动疲劳寿命比正常疲劳寿命减少了67%,在低周疲劳情况下对样本进行喷丸处理过的微动疲劳寿命要优于深滚工艺,寿命提高了300%,然而在高周疲劳的情况下结果则正好相反,此时深滚工艺处理过样本的疲劳寿命要优于喷丸处理过的样本,寿命提高700%。2012年,捷克共和国Černý I, Sís J等^[40],对经过喷丸处理的航空铝合金7075进行了低周疲劳试验。结果表明,经喷丸处理的试件能够阻碍裂纹扩展,对于2 mm以下的裂纹效果相对明显;试件表面不存在裂纹时,可将疲劳寿命提高2.5倍以上;残余疲劳寿命的增加归因于残余压应力。2014年,意大利Benedettia M, Fontanari V等^[41],研究了高强铝合金Al-

7075-T651 表面经喷丸处理后,对高周及超高周疲劳抗疲劳性能的影响。结果表明,表层残余应力由于塑性流动得到释放,主要取决于弯曲应力应用;极大的冲击会加快裂纹的萌生和传播,且最初的疲劳裂纹发生在表层;喷丸处理后的试件高周加载下的抗疲劳性能相对于超高周疲劳更好一些。

文献[42-43]对喷丸处理后 5056 铝合金的疲劳性能进行了研究,与普通喷丸处理过后的试样比较,5056 铝合金试样经超细喷丸处理后的疲劳性能提高可达 10^7 次。这是因为在低应力幅的疲劳试验中,残余压应力得到了释放。郭超亚,鲁世红^[44]研究了喷丸工艺参数对 7055-T775 铝合金表层硬化程度和残余应力场分布的影响规律,发现在一定范围内随冲击振幅和撞针直径的增加,残余应力场的深度分布、最大残余压应力值及其深度都增大,经超声喷丸处理对材料表面的压应力、材料疲劳极限、表面冷作硬化程度都有明显的改善作用。李鹏,刘道新等^[45]研究了喷丸工艺参数对 7055-T7751 铝合金表面粗糙度、表面残余应力场、疲劳性能和表面损伤的影响。在合理的喷丸强化参数范围内铝合金的疲劳性能得到显著提高,疲劳断裂抗力达到最高。

2.2.2 工业纯铁及其合金纳米化研究

2001 年李东,陈怀宁等^[46-48]采用高能喷丸技术对 SS400 钢焊接接头进行了处理,结果表明,高能喷丸处理可使焊接接头的表面层形成尺寸均匀、取向随机分布的纳米晶,焊接接头三个区域的纳米层硬度一致,且远高于高能喷丸处理前样品的硬度,实现了 SS400 钢焊接接头区表层组织纳米均一化和硬度均一化^[46];同年,进一步的研究表明,由于表面形成尺寸均匀、晶粒取向呈随机分布,表面分布着 10 nm 纳米晶组织,且形成残余压应力,因此焊接接头在疲劳性能和抗硝酸盐溶液 SCC 性能也得到了显著提高^[47-48]。

2010 年重庆大学孙建春,盛光敏等^[49-50]采用高能喷丸技术对工业纯铁表面纳米化进行了研究。结果表明,纳米晶的厚度随着喷丸时间的增加而增加;由于晶粒得到了细化,其显微硬度大大提高,在距喷丸面 10 μm 处,其显微硬度达到 296.6 HV,随着距喷丸面距离的增加,剧烈变形层的硬度不断减小;只要喷丸 1 min,即可在工业纯铁表面获得平均晶粒粒径为 68.4 nm,微观畸变为 0.050%的纳米晶层;随着喷丸时间的延长,晶粒粒径越来越小,而微观应变越来越大;喷丸 14 min 可在工业纯铁表面获得平均晶粒粒径为 28.5 nm,微观畸变为 0.175%的纳米晶层。

2012 年浙江工业大学卢志明,高红刚等^[51]就喷丸压力和喷丸时间等工艺参数对 304 不锈钢表面性能的影响进行了研究,结果表明,304 不锈钢板经高能喷丸处理后,表层晶粒明显细化达到纳米级,喷丸压力越大,晶粒越小;表层组织发生了应变诱导马氏体相变,随喷丸压力的增加,马氏体相逐渐增多,奥氏体相减少;喷丸处理后表层硬度显著提高,显微硬度值是未处理试样的 2 倍多;在 5~15 min 范围内,喷丸时间对试样表面性能影响不大;通过对弹丸粒子的运动分析,得到喷丸的能量主要与喷丸压力、弹丸密度、直径以及喷丸距离等参数有关,随着弹丸动能增大,表层晶粒逐渐减小,晶格畸变增加。

2013 年昆明理工大学王虎,詹肇麟等^[52-53],采用高能喷丸处理对 ST12 钢进行了处理,结果表明,一定喷丸压力下,喷丸 15 min 可以在表层获得晶粒大小为 60 nm 左右,厚度为 25 μm 的纳米级表层,继续增加喷丸时间,两者变化不明显,随着距表面距离的增加,显微硬度呈梯度变化;当喷丸时间为 15 min 或更长,显微硬度可以提高 65%左右;随后的纳米化表层渗钛处理研究结果表明,高能喷丸处理可以显著地降低等离子渗钛的温度,从而进一步提高其显微硬度和耐腐蚀性能。

2014 年浙江大学 Lu Z, Shi L 等^[54],研究了喷丸压力对 304 奥氏体不锈钢应力腐蚀的影响。结果表明,晶粒细化程度、硬度和塑性变形能力随喷丸压力的增加而增加,马氏体转变速率随喷丸压力的增加而增加;当喷丸压力小于 0.4 MPa 时,晶粒细化对应力腐蚀性能的影响起主要作用,应力腐蚀敏感性随喷丸压力的增加而增加;当喷丸压力大于 0.4 MPa 时,马氏体转变起主要作用,应力腐蚀敏感性随喷丸压力的增加而增加。在 2015 年英国 Cruchley S, Taylor M P 等^[55],对喷丸处理前后的超耐热不锈钢的 Chromia 增值动力学进行了比较。试验发现,表面次表面两者氧化物不同,表层 Chromia 层有 Ti 的参杂保护和次表层有 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 的形成,未喷丸处理在 800 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,增长率的降低随时间的变化并不明显,这种现象与 Chromia 层形成的 $(\text{Ti}, \text{Ta})\text{O}_2$ 相有关。

2.2.3 工业纯钛及其合金纳米化研究

温爱玲等^[56-57]于2003年和2007年,对工业纯钛采用高能喷丸技术并实现表面纳米化,对纳米化处理后的组织性能以及旋转弯曲疲劳性能的进行了研究,结果表明,经高能喷丸处理后,工业纯钛表面可以形成一定厚度的纳米晶粒;随着高能喷丸时间的增加,表面层的晶粒尺寸随之减小,表面硬度提高;高能喷丸后表层组织发生严重塑性变形并实现组织纳米化,是提高弯曲疲劳寿命的主要原因。2006年,杨磊,赵秀娟等^[58]对纯钛高能喷丸后的表面粗糙度进行了研究。结果表明,纯钛表面高能喷丸处理后表面粗糙度先增大后减小,喷丸10 min时粗糙度最大,随之逐渐降低,喷丸60 min时粗糙度趋于稳定,喷丸时间60 min时表面粗糙度对其疲劳性能的影响最小,表面纳米化效果最佳。2005年西安建筑科技大学的张聪慧等^[59],对TC4钛合金进行了高能喷丸处理。处理后材料表层得到了纳米级晶粒,沿深度方向的晶粒细化程度逐渐减小,材料硬度也随这个方向逐渐降低。2009年温爱玲等^[60],研究了TC4钛合金表面纳米化及其对疲劳性能的影响,并进行了旋转弯曲疲劳试验,结果表明,TC4钛合金经高能喷丸处理后,表面晶粒细化到18~22 nm,有效地提高了其疲劳极限;随喷丸时间延长,晶粒尺寸进一步减小,但表层损伤程度加大,如何降低表面损伤,是高能喷丸提高疲劳极限的关键因素。

2014年,西北工业大学Liu Y G等^[61],对喷丸处理后的TC17钛合金表层进行了研究。经喷丸处理表面形成均匀的等轴纳米晶,最小晶粒尺寸6.7 nm,晶粒尺寸随冲击压力时间的延长而减小。同一年,西北工业大学的Yu S等^[62],结合等离子体渗铬处理和喷丸强化对Ti6Al4V钛合金的疲劳特性进行了研究。试验发现,渗铬处理后的试件包括4个子层Cr沉积层、Cr2Ti层、CrTi4层和Cr-Ti固溶层,其疲劳寿命较短,主要是由于渗铬层和基体之间容易发生裂纹萌生扩展;喷丸处理以后的试件,仅存在Cr-Ti固溶层和基体,同时存在残余压应力使疲劳寿命和显微硬度均得到较好改善。

综上所述,经高能喷丸技术处理后,金属及其合金表面成功实现了纳米化,但是由于受到高能喷丸处理设备和试样尺寸的局限,使得该方法的应用受到一定限制。超声冲击处理方法有望解决这一问题,在试样材料、尺寸以及接头型式上更具灵活性和实用性。

2.3 超声冲击处理及其研究现状

2.3.1 超声冲击处理概述

超声冲击处理的主要原理^[63]是:利用大功率的超声波推动冲击工具以20 kHz的频率冲击材料表面,使得被冲击处理的材料表层由于受到超声波的高频聚焦的大能量而产生较大的压塑性变形层,细化了表层晶粒,也使得焊趾表面及其周边的几何外观形貌得到有效改善,减缓了应力集中程度。而且经过冲击处理的材料,在被冲击区域内局部会产生一定量的塑性伸长,焊接过程产生的残余拉伸弹性应变得到释放,当撤去超声冲击处理后,塑性变形层阻碍了弹性恢复,在被冲击材料表层产生压缩的残余应力,重新调整焊接残余应力场,同时超声冲击处理改变了材料表层微观组织,对材料表层的硬度、耐磨性以及抗应力腐蚀等性能产生积极的影响,使得材料疲劳性能得以显著改善。近年来,美国、俄罗斯和乌克兰等国相继开展了大量关于大功率超声技术的研究并使其广泛地应用在工业中。超声冲击处理技术在工业中的各种应用已慢慢被大家所重视,在相关领域的研究成果越来越多。超声冲击在工程上的初步应用也获得了很好的效果,大尺寸构件的试验表明超声冲击处理后的结构疲劳强度与其他焊后处理方法相比是较高的,现有的超声冲击设备可以用于对高速公路和铁路桥梁的恢复和维修处理。

国内最早的超声冲击处理方法是著名焊接专家霍立兴,王东坡等^[64]提出,天津大学焊接工程技术研究所的王东坡博士率先设计出冲击头,换能器及主电路。目前,超声冲击处理技术在我国已经广泛地应用于车辆制造、海洋工程、船舶制造等应用领域,并向表面工程等新方向拓展。2007年,上海宜邦金属新材料科技有限公司成立,使超声冲击设备在中国市场化的运作上迈出了重要的一步,为推动超声冲击处理方法的发展具有重要意义^[64]。

2.3.2 超声冲击处理对金属焊接性能的影响

调研文献知,超声冲击处理对金属结构性能的改善、接头组织以及力学性能特别是疲劳性能的影响很大。2007年天津大学的王东坡等在文献^[65-66]中首次提出用超声波冲击焊趾来提高焊接接头及结构的疲

劳强度试验,结果表明超声冲击法对改善低碳钢对接接头疲劳性能效果明显。装甲兵工程学院的朱有利,李占明等利用超声冲击对 2A12 铝合金进行焊后处理^[67-70],分别对其焊接接头组织、强化机理、接头表层组织以及接头力学性能等进行了研究。文献[67]指出,未经超声冲击处理的焊缝区为铸态枝晶组织,热影响区金属的晶粒组织粗大,熔合区气孔、缩松等焊接缺陷多,经超声冲击处理后可在焊接接头表层形成约 300 μm 厚的致密塑性变形层,产生了平行于焊缝表面的宏观织构;同时,超声冲击处理可使熔合区表层变窄,熔合区过渡不再明显,气孔和缩松被压实或压小,使组织致密化。由文献[68-69]可知,超声冲击处理后焊缝中气孔、缩松等缺陷明显减少,焊接接头表面和断面显微硬度明显提高,消除了焊接接头表面残余拉应力,形成了残余压应力。研究还表明,与未处理试样相比,超声冲击处理后的试样抗拉强度提高了 17.4%,伸长率增加了 28%;未经超声冲击处理的焊接接头断裂均发生在焊趾和熔合区,处理后的断口均在焊缝中部,并在强化层处发生 45° 转折;超声冲击处理形成的塑性变形层和晶粒细化,以及降低接头表层气孔、缩松等焊接缺陷的作用是其焊接接头力学性能改善的主要原因^[70]。此外焊后的超声冲击处理能够从拘束应力和淬硬组织两方面抑制焊接结构冷裂纹的产生。王东坡等^[71]在 45 钢表面制备出了纳米层,发现在样品的表层晶粒可细化到纳米量级,平均晶粒尺寸在 50 nm 左右,表面形成残余压应力,与样品心部相比表层硬度显著提高。向学建等^[72]采用超声冲击技术对 Q370qE 桥梁钢焊接接头进行了全覆盖超声冲击处理,经过超声冲击处理后,焊接接头在高频和强烈的机械冲击力作用下,原有表面锈层被去除干净,下表层的新鲜金属产生了厚约 100~200 μm 的致密塑性变形层,形成了大致平行于焊缝表面的非常细密的形变织构,并分析讨论了该组织结构的形成机理。于影霞等^[73]采用 HJ-III 超声冲击机对 AZ91D 镁合金进行了超声冲击处理,发现经超声冲击处理后,冲击层金属的组织变细,镁合金的表面产生了残余压应力,显微硬度、耐腐蚀性能均有不同程度的提高。在冲击电流 1.5A,冲击时间 9 min 时,与未超声冲击试样相比,表面显微硬度提高了 112.5%,耐腐蚀性提高了 61%。李东,樊钊等^[74]超声冲击技术在 J507 堆焊层上制备纳米结构表层,试样表层的晶粒可细化至 21.25 nm。在超声冲击载荷作用下,粗晶粒内部形成高密度的位错墙和位错缠结,位错墙和位错缠结逐渐演变成小角度亚晶界,小角度亚晶界继续吸收位错而转变成大角度晶界,亚晶内部不断重复上述过程,使晶粒尺寸不断减小,最终形成纳米晶。表面强化层的厚度为 100 μm 与样品的心部相比,表面纳米晶层的显微硬度提高 1.4 倍。

超声冲击处理对于消除焊接残余应力也有显著效果^[75-78],经超声波冲击后,熔透角焊缝 X 方向的焊接残余应力平均下降 50% 以上, Y 方向平均下降 60% 以上;丁字型接头焊缝 X 方向的焊接应力平均下降 89.7%, Y 方向平均下降 96.5%;有些测点的焊接残余应力从拉应力变为压应力。可见,超声波冲击可大幅度削减焊缝的焊接残余应力的峰值(尤其是对高焊接残余应力的焊缝),并能使焊接应力的分布更趋合理化,明显改善锚拉板区域的受力状态,有利于提高焊缝的疲劳强度。研究结果表明超声冲击对于焊缝及其附近区域残余应力的降低效果十分明显,横向残余应力消除率最高达 161%,纵向残余应力最高达 118%;超声冲击处理后,同一位置纵向残余应力消除率较横向残余应力要大^[74]。

超声冲击法对于提高焊接接头疲劳强度也有很大的影响^[79-87]。国内由天津大学的霍立兴和王东坡^[67]在 1999 年首次提出了利用超声波冲击法来提高焊接接头疲劳强度,并且成功研制了一套基于压电陶瓷换能器的超声冲击试验装置,得出超声冲击处理有能够有效地消除焊趾处浅层裂纹、夹渣等焊接缺陷等作用,该作用也是其提高焊接接头疲劳强度的原因之一。

3 超声冲击处理技术对焊接接头疲劳强度的改善

超声冲击处理是一种有效改善焊接接头疲劳强度的焊后处理方法,目前已经在各个领域得到应用,以往研究一般均在普通寿命区间内进行(疲劳循环次数 10^7 次),有多个文献表明,通过对不同材料、不同加载应力比以及不同焊接接头型式的焊接结构进行超声冲击处理,证实超声冲击处理可以提高焊接接头疲劳强度,延长焊接结构疲劳寿命。而对于其提高机理,普遍认为这是由于应力集中程度的改善以及超声冲击处理引入的残余压应力。

2013年,韩国的 Okawa T 等^[88]对 AH36 高强钢十字接头进行了超声冲击处理,研究了超声冲击处理在不同应力比下($R=-1, 0.1, 0.5$)焊接接头疲劳性能的改善情况,研究指出,经超声冲击处理后焊接接头疲劳强度的提高程度随应力比的增加而降低。法国 Soudure 所的 Janosch^[89]比较了超声处理对角接头和对接接头两种焊接结构的影响,研究表明,所有的对接接头试样均在焊趾部位断裂;部分角接头试样疲劳裂纹在焊趾处萌生然后扩展到母材发生断裂,另一部分在母材处发生疲劳断裂,表明通过超声冲击处理技术改变了角接头的疲劳断裂方式,使部分接头的疲劳强度达到了母材的级别。

国内有天津大学的赵小辉等^[90]通过对 TC4 钛合金十字接头的研究发现,钛合金焊接接头经过超声冲击处理后,焊趾的几何形貌发生了变化,经过超声冲击处理后接头焊趾过渡半径由原来的 0.12~0.96 mm 变为 1.3~3.3 mm,超声冲击处理后应力集中系数由原来的 $K_t=4.1$ 降低到 $K_t=2.79$,应力集中程度得到明显的改善,改善程度约为 47%。法国的 Galtier A^[91]研究了超声冲击状态下两组不同钢的疲劳性能变化,认为经过超声冲击的处理焊趾过渡角 θ 没有发生太大改变,但焊趾过渡半径 ρ 明显增大,表面形貌得到改善,应力集中系数得到明显降低。李占明等^[68]采用超声冲击处理技术对母材为 2A12 的铝合金焊接接头进行处理,并对焊趾部位的残余应力进行测量,研究表明,经过超声冲击处理后,焊趾区的残余应力平均值从 3 MPa 转变为-126 MPa,引入的压应力最高可达-285 MPa,压应力层深度约为 1.1 mm。加拿大的 Yekta R T^[92]对 350 W 钢十字接头不同超声冲击参数下进行了超声冲击处理,并用 X 射线衍射法对接头残余应力进行了测量,研究指出,只有经过合理超声冲击处理的接头其残余压应力的引入量才能达到最大。

超声冲击处理由于具有普遍适应性等诸多优点,使得其在应用及研究方面得到了迅猛的发展,目前不仅在低碳钢、高强钢、有色金属等不同材料的焊接结构上得以应用,而且在各种型式的接头中均有应用,是一种有效提高焊接结构疲劳强度、延长疲劳寿命的焊后处理方法。迄今为止,在铁路、桥梁、机械工程、车辆、航天航空等诸多领域均有所应用。

从以上文献综述可以看出,一方面,金属材料的表面纳米化是近年来纳米表面工程的一个重要研究方向,已经愈来愈受到广泛的关注,在汽车、电子、军事等领域表现出广阔的应用前景。表面纳米化可显著提高材料的综合性能,如耐磨性、疲劳强度等,因此有着无限的市场开发空间。这恰好符合现在倡导的“先进制造、绿色制造”的理念。另一方面,国内外已有部分学者成功实现了在各种铝合金表面的纳米化,在焊接接头表面纳米化研究方面也有人进行了一些探索,但鲜有人对高强铝合金焊接接头的表面纳米化进行系统研究。

参考文献:

- [1] HUANG J W, YIN Z M, LEI X F. Microstructure and properties of 7A52 Al alloy welded joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(4): 804-808.
- [2] 陈小明, 宋仁国, 李杰. 7xxx 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2009, 23(3): 67-70.
- [3] 刘玲霞, 成建国, 吕维. 7A52 铝合金焊接结构件疲劳性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(5): 37-40.
- [4] 余进, 王克鸿, 徐越兰, 等. 7A52 铝合金双丝焊接头的组织与性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 87-89.
- [5] 王生, 李周, 尹志民, 等. 钎钎微合金化焊丝焊接头的组织与性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(3): 26-29.
- [6] 解瑞军, 陈芙蓉, 唐大富, 等. 超声冲击对 7A52 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 56-60.
- [7] 傅志红, 贺地求, 周鹏展, 等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊缝的组织分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 65-68.
- [8] 毕良艳, 陈芙蓉, 翟熙伟. 7A52 铝合金电子束焊接头的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2011, 40(7): 151-153.
- [9] 翟熙伟, 陈芙蓉, 毕良艳, 等. 7A52 铝合金电子束焊接参数及性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 73-76.
- [10] 张传臣, 陈芙蓉, 高云喜. 7A52 铝合金单双丝焊工艺对比分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 67-70.
- [11] 张传臣, 陈芙蓉, 高云喜. 高强铝合金 7A52 焊缝中焊接缺陷的产生及控制[J]. 热加工工艺, 2007, 36(11): 18-20.
- [12] 贾翠玲, 陈芙蓉. 超声冲击工艺参数对装甲铝合金焊接应力影响的有限元分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 9-12.

- [13] 陈超,陈芙蓉,解瑞军,等. 高能喷丸处理对 7A52 铝合金表面微观组织结构及性能的影响[J]. 材料导报,2017,31(14):96-99.
- [14] 何静,陈芙蓉,解瑞军,等. 7A52 超硬铝合金焊接参数与人工时效参数的优化[J]. 热加工工艺,2009,38(3):91-92.
- [15] 田红雨,陈芙蓉,解瑞军,等. 7A52 铝合金双丝 MIG 焊接温度场数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2010,33(3):22-25.
- [16] 邱小明. 超声冲击对 7A52 铝合金焊接接头组织及性能的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2014.
- [17] 刘红伟,周琦,朱军,等. 7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程,2006,29(3):57-60.
- [18] 傅志红,贺地求,周鹏展,等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的组织分析[J]. 焊接学报,2006,27(5):65-68.
- [19] 周鹏展,钟掘,贺地求. 7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊[J]. 中国有色金属学报,2006,16(6):964-969.
- [20] 马志华,陈东高,刘红伟,等. 30 mm 厚 7A52 铝合金搅拌摩擦焊接组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程,2014(2):63-65.
- [21] 马志华,刘桂强,陈东高,等. 焊接速度对 Al-Zn-Mg 高强铝合金搅拌摩擦焊接头组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2014(19):179-180.
- [22] 刘红伟,李京龙,马冰,等. 7A52 铝合金 FSW 与双丝 MIG 焊接接头性能比较研究[J]. 热加工工艺,2011,40(9):117-119.
- [23] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:北京机械工业出版社. 1997.
- [24] LIN Y, LU J, WANG L, et al. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel[J]. Acta Materialia, 2006, 54(20): 5599-5605.
- [25] TIAN J W, VILLEGAS J C, YUAN W, et al. A study of the effect of nanostructured surface layers on the fatigue behaviors of a C-2000 superalloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2007(468-470): 164-170.
- [26] CHEN CHAO, CHEN FURONG, ZHANG HUIJING. Surface Nanocrystallization of 7A52 Aluminum Alloy Welded Joint by Aging and Ultrasonic Impact Compound Treatment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(9): 2637-2641.
- [27] WANG T, YU J, DONG B. Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(16-17): 4777-4781.
- [28] 胡兰青,李茂林,王科,等. 铝合金表面纳米化处理及显微结构特征[J]. 中国有色金属学报,2004,14(12):2016-2020.
- [29] 胡兰青,李茂林. 铝合金表面高能喷丸纳米化过程中析出相的返溶[J]. 材料热处理学报,2005,26(3):22-24.
- [30] 马晋芳,胡兰青,许并社. 高能喷丸过程中的物质转移现象[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(4):744-746.
- [31] 胡兰青,马晋芳,许并社. Al-Zn-Mg 合金的表面纳米晶化及其热稳定性研究[J]. 材料热处理学报,2007,28(S1):343-347.
- [32] SHENG X F, XIA Q X, CHENG X Q, et al. Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 261-267.
- [33] 周新远,汪勇,宋占永,等. 喷丸强化对 7A52 铝合金组织性能影响[J]. 功能材料,2013(S2):355-358.
- [34] CHO K T, YOO S, Lim K M, et al. Effect of Si content on surface hardening of Al Si alloy by shot peening treatment [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011(509):265-270.
- [35] YONG SEOG NAMA, YOO IN JEONGB, BYUNG CHEOL SHIN, et al. Enhancing surface layer properties of an aircraft aluminum alloy by shotpeening using response surface methodology[J]. Materials & Design, 2015(83):566-576.
- [36] 田龙,张伟. 表面纳米化对 7055 铝合金耐磨性能的影响[J]. 科学技术与工程,2013,12(35):10608-10612.
- [37] GAO Y K, WU X R. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9):3737-3747.
- [38] 陈勃,高玉魁,吴学仁,等. 喷丸强化 7475-T7351 铝合金的小裂纹行为和寿命预测[J]. 航空学报,2010,31(3):519-525.
- [39] MAJZOABI G H, AZADIKHAH K, NEMATI J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 516(1-2): 235-247.
- [40] Černý I, Sís J, Mikulová D. Short fatigue crack growth in an aircraft Al-alloy of a 7075 type after shot peening[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 243(12):20-27.
- [41] BENEDETTI M, FONTANARI V, BANDINI M, et al. High- and very high-cycle plain fatigue resistance of shot peened high-strength aluminum alloys: The role of surface morphology[J]. International Journal of Fatigue, 2015(70):451-462.
- [42] KIKUCHI S, NAKAMURA Y, NAMBU K, et al. Effect of Shot Peening using Ultra-fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy under Rotating Bending[J]. Materials Science & Engineering A, 2015(652):279-286.
- [43] OGURI K. Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(8):1395-1399.

- [44] 郭超亚,鲁世红. 铝合金超声喷丸残余应力场[J]. 中国表面工程,2014,27(2):75-80.
- [45] 李鹏,刘道新,关艳英,等. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料,2015,39(1):86-89.
- [46] 李东,陈怀宁,刘刚,等. SS400 钢对接接头表面纳米化及其对疲劳强度的影响[J]. 焊接学报,2002,23(2):18-21.
- [47] 李东,陈怀宁,刘刚,等. SS400 钢焊接接头表层组织纳米均一化及硬度均一化处理[J]. 金属学报,2001,37(9):980-984.
- [48] 李东,陈怀宁,徐宏. 表面纳米化对 SS400 钢焊接接头应力腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报,2009,30(3):65-68.
- [49] 孙建春,盛光敏,王越田,等. 工业纯铁表面不锈钢改性研究[J]. 稀有金属材料与工程,2011(S2):379-383.
- [50] 孙建春,盛光敏,王越田,等. 工业纯铁表面自纳米化及其表征[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(1):62-66.
- [51] 卢志明,高红刚,卢沛,等. 高能喷丸参数对 304 不锈钢表面性能的影响[J]. 金属热处理,2012,37(6):44-48.
- [52] 王虎,詹肇麟,吴云霞,等. 高能喷丸对 ST12 钢表面性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(S2):184-187.
- [53] 王虎,詹肇麟,吴云霞,等. ST12 钢高能喷丸后表面等离子渗钛[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):183-186.
- [54] LU Z,SHI L,ZHU S,et al. Effect of high energy shot peening pressure on the stress corrosion cracking of the weld joint of 304 austenitic stainless steel[J]. Materials Science & Engineering A,2015(637):170-174.
- [55] CRUCHLEY S,TAYLOR M P,DING R,et al. Comparison of chromia growth kinetics in a ni-based superalloy,with and without shot-peening[J]. Corrosion Science,2015(100):242-252.
- [56] 温爱玲,陈春焕,郑德有,等. 高能喷丸表面纳米化对工业纯钛组织性能的影响[J]. 表面技术,2003,32(3):16-18.
- [57] 温爱玲,王生武,杨军勇,等. 高能喷丸表层纳米化对纯钛旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 材料开发与应用,2007,22(4):11-14.
- [58] 杨磊,赵秀娟,陈春焕,等. 纯钛高能喷丸表面纳米化后粗糙度的分析[J]. 重工与起重技术,2006,19(4):43-46.
- [59] 张聰惠,赵西成,兰新哲,等. 高能喷丸后 TC4 合金表面组织性能研究[J]. 铸造技术,2006,27(10):1082-1084.
- [60] 温爱玲,闫秀侠,任瑞铭,等. 高能喷丸时间对 TC4 疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺,2009,38(14):127-129.
- [61] LIU Y G,LI H M,LI M Q,et al. Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening[J]. Materials & Design,2015(65):120-126.
- [62] YU S,LIU D,ZHANG X,et al. Effects of combined plasma chromizing and shot peening on the fatigue properties of a Ti6Al4V alloy[J]. Applied Surface Science,2015(353):995-1002.
- [63] STATNIKOV E. Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment. IIW Doc. XIII-2004-04.
- [64] 王荣,杨峰,顾晓波. 超声冲击改善焊接接头残余应力的研究[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2009,23(4):304-307.
- [65] 宋宁霞. 超声金属表面纳米化及摩擦磨损性能研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [66] 王东坡,宋宁霞,王婷,等. 纳米化处理超声金属表面[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2007,40(2):228-233.
- [67] 李占明,朱有利,王侃,等. 2A12 铝合金焊接接头超声冲击强化机理分析[J]. 焊接学报,2008,29(9):55-58.
- [68] 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.
- [69] 李占明,朱有利,王侃. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头组织的影响[J]. 金属热处理,2008,33(7):53-56.
- [70] 李占明,朱有利,杜晓坤,等. 2A12 铝合金焊接接头超声冲击处理前后拉伸性能分析[J]. 装甲兵工程学院学报,2012,26(3):79-83.
- [71] 王东坡,宋宁霞,王婷,等. 纳米化处理超声金属表面[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2007,40(2):228-233.
- [72] 向学建,黄元林,朱有利,等. 超声冲击对 Q370qE 钢焊接接头组织结构的影响[J]. 热加工工艺,2011,40(9):122-124.
- [73] 于影霞,何柏林,夏松松,等. 超声冲击对 AZ91D 镁合金耐腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺,2015(20):138-141.
- [74] 李东,樊钊,廖礼宝,等. J507 堆焊层超声冲击表面纳米化[J]. 焊接学报,2009,30(1):101-104.
- [75] 严铿,聂洁,于怀东,等. 超声冲击处理对灰铸铁焊接冷裂纹影响[J]. 焊接学报,2007,28(11):78-80.
- [76] 刘小渝. 超声波冲击消除钢结构桥梁焊接残余应力的试验研究[J]. 中国铁道科学,2008,29(5):46-50.
- [77] 荣豪,周伟,陈辉,等. 超声冲击对 SMA490BW 耐候钢焊接残余应力的影响[J]. 电焊机,2011,41(11):65-67.
- [78] 王荣,杨峰,顾晓波. 超声冲击改善焊接接头残余应力的研究[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2009,23(4):304-307.
- [79] 江明明,何柏林. 超声冲击对 SMA490BW 耐候钢十字焊接接头疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺,2018,47(5):50-53.
- [80] 谢学涛,何柏林. 结构钢焊接接头的超高周疲劳行为研究进展[J]. 热加工工艺,2017,46(21):5-8.
- [81] 封亚明. 6082 铝合金焊接接头疲劳性能的研究[D]. 南昌:华东交通大学,2018.
- [82] 谢学涛. 超声冲击对 P355NL1 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响[D]. 南昌:华东交通大学,2018.
- [83] 何柏林,金辉,张枝森,等. SMA490BW 钢对接接头高周疲劳性能的机理探究[J]. 材料导报,2018,32(12):2008-2014.

- [84] 岑耀东,陈芙蓉. 超声冲击处理冷轧钢板缝焊接头的疲劳性能[J]. 焊接学报,2017,38(6):115-119.
- [85] 邓彩艳,牛亚如,龚宝明,等. 承载超声冲击下焊接接头疲劳性能的改善[J]. 焊接学报,2017,38(7):72-76.
- [86] GALTIER A,STATNIKOV E S. The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behaviour of welded joints in high-strength steel[J]. *Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde*,2004,48(5-6):61-66.
- [87] 王东坡,张玉凤,霍立兴. 超声冲击处理焊接接头焊趾区材料的疲劳性能[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2001,34(1):13-17.
- [88] OKAWA T,SHIMANUKI H,FUNATSU Y,et al. Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment[J]. *Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde*,2012,57(2):235-241.
- [89] JANOSCH J J,KONECANY H,DEBIEZ S,et al. Improvement of fatigue strength in welded joints (in HSS and in aluminium alloys) by ultrasonic hammer peening[J]. *International Journal of Fatigue*,1996(10):725.
- [90] 赵小辉,王东坡,王惜宝,等. 承载超声冲击提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报,2010,31(11):57-60.
- [91] GALTIER A,STATNIKOV E S. The Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behaviour of Welded Joints in High-Strength Steel[J]. *Welding in the World Le Soudage Dans Le Monde*,2004,48(5-6):61-66.
- [92] YEKTA R T,GHAHREMANI K,WALBRIDGE S. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds[J]. *International Journal of Fatigue*,2013,55(10):245-256.

Review on 7A52 Aluminum Alloy Welding and Its Welded Joint Surface Nanocrystallization

Chen Furong, Jia Cuiling

(School of Materials Science and Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: As a typical Al-Zn-Mg-Cu series aluminum alloys, 7A52 aluminum alloy is widely used in the structure of the aircrafts, rockets, light armored vehicles and ships with its excellent mechanical properties and high specific strength, which is often present in the form of weldments during practical applications. However, due to the low melting point of aluminum alloy, large heat transfer coefficient and high thermal expansion rate, when welded by conventional fusion welding process, this alloy may have such defects as weld cracks, pores and softening of welded joints. Moreover, the unevenness of the welded joint is the main cause of failure in service. Therefore, how to improve the strength of the welded joint and realize the uniformity of the microstructure of the welded joint is one of the key problems in the welding of the high-strength aluminum alloy. The surface nanotechnology is expected to solve this problem, thereby improving the overall performance of the welded joint. This paper reviews the research results at home and abroad in recent years. Based on the overview of 7A52 aluminum alloy, it focuses on the comparison of the alloy TANDEM MIG, electron beam welding, friction stir welding, laser welding, plasma welding and composite welding. At the same time, it discusses the research status of surface nanocrystallization of metal and its welded joints in details, especially elaborating the use of high-energy shot peening and ultrasonic impact treatment to achieve surface nanocrystallization and improve the current situation and development trend of welding fatigue strength. It points out that improving the strength coefficient of joint is the key research direction of aluminum alloy welding in the future, and ultrasonic impact treatment technology is one of the important methods to realize the nanometerization of welded joint surface.

Key words: 7A52 aluminum alloy; weld joint; surface nanocrystallization; high energy shot peening; UIT