

文章编号:1005-0523(2016)06-0001-14

焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述

王东坡, 龚宝明, 吴世品, 张 海, 冯延焉

(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 对焊接接头与结构疲劳延寿技术的相关现状和进展进行全面叙述, 一方面依据相关国际规范介绍了焊趾打磨、TIG 熔修、锤击、针式冲击等传统经典焊接结构疲劳延寿技术的使用方法与技巧, 同时超声冲击和低相变点材料疲劳延寿技术的最新研究进展也进行了详细论述。认为今后相当长一段时间, 在国际上关于焊接结构疲劳延寿新技术的研究仍然是热点之一。锤击与超声冲击工艺性缺陷的产生机理及其影响因素; 低相变点焊缝韧性提升与残余奥氏体稳定性问题及其母材稀释对低相变点焊缝组织演变影响问题; 疲劳延寿处理结构与评价问题、复杂载荷条件下疲劳延寿效果稳定性及其保障问题等今后要继续开展相关研究工作, 推动焊接结构疲劳延寿技术在高端装备制造产业中越来越广泛应用。

关键词: 焊接结构; 疲劳延寿; 超声冲击; TIG 熔修; 磨削

中图分类号: TG405 **文献标志码:** A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.06.001

疲劳是焊接结构最主要破坏形式。例如高速机车车体和转向架的疲劳问题已成为影响铁路行车安全和使用寿命的重要损伤机制; 水轮机、燃气轮机等动力装备叶盘或叶片的疲劳损伤问题迄今也没有得到妥善解决; 液压挖掘机等焊接结构件的疲劳寿命问题已成为工程机械行业市场竞争力的重要体现; 飞机机翼、发动机等关键部件的焊接接头疲劳寿命问题同样困扰着航空制造领域的技术人员; 深海浮式平台 SCR 立管与张力腿等海洋工程关键部件环焊缝的疲劳断裂问题更是成为其制造过程最难跨越的技术壁垒。

为了保证焊接结构服役可靠性, 国内外疲劳设计规范普遍规定须以接头疲劳强度作为整体结构强度校核指标而不采用基本金属的数据, 显然这在材料利用率方面造成极大浪费, 也增加了制造周期和成本。即使如此, 焊接接头仍然会过早发生疲劳失效, 造成巨大经济损失。

一般认为焊接结构疲劳断裂事故多发原因有以下几点: 目前要求承受动载的焊接结构越来越多, 设计载荷越来越大, 有向高速、重载、超长寿命方向发展的趋势, 导致对焊接结构承受动载能力的要求越来越高; 虽然焊接接头承受静载能力一般不低于母材, 而承受交变载荷能力与母材相比较差, 这是引起焊接接头过早疲劳失效的主要因素。

正是因为焊接结构疲劳问题严重, 使得对可靠性要求极高的行业还不能使用焊接工艺制造其关键承力构件, 影响了焊接工艺在某些重要结构中应用推广的深度和范围。

研究表明: 焊接结构疲劳性能较低是由于接头存在应力集中、焊接缺陷和残余拉伸应力等多方面因素共同作用所致, 而疲劳裂纹则常发生于接头焊趾和角焊缝焊根等部位。有鉴于此, 如果在焊接过程或焊后采用某种工艺措施, 一方面改善焊缝几何外形, 增加焊趾过渡半径, 降低焊趾应力集中程度; 另一方面调节残余应力场, 降低焊趾残余拉伸应力, 甚至产生残余压缩应力, 则必然可大幅度延长焊接结构的疲劳寿命, 增加其安全可靠。

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275343, 51375331)

作者简介: 王东坡(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 中国焊接学会焊接结构与制造专委会委员。2008年入选教育部新世纪优秀人才资助计划。长期从事大型焊接构析断裂力学试验与评定、焊接结构延寿理论及方法、金属表面超声纳米化加工理论、超长寿命区间焊接接头的疲劳行为研究。2002年获中国高校科技发明二等奖1项; 2004年获天津市自然科学一等奖1项; 作为项目负责人完成国家自然科学基金项目、军工项目等数10项; 发表EI和SCI论文60余篇。

目前,TIG熔修法、焊趾磨削法、局部机械加工法、锤击法、局部加热法等已成为提高焊接结构疲劳强度的传统方法^[1-3]。其中TIG熔修、焊趾磨削及锤击法的实际应用最为成熟,近年来已被陆续列入AWS、IIW、DNV等国际权威机构的相关疲劳设计规范当中,为其应用推广彻底扫清了障碍。

焊后疲劳性能改善处理方法可分为两种:焊趾轮廓改善方法和引入有利的残余应力。前者可降低或消除焊趾缺陷,减少局部应力集中,实现了焊缝轮廓之间平稳过渡,如焊趾和焊缝机械打磨、TIG等离子熔修。后者主要目的是消除焊缝焊趾区高拉伸残余应力,并诱导焊缝处形成残余压应力^[4],其中锤击和针式冲击是最著名的两种方法。

1 焊接结构传统疲劳延寿技术回顾

1.1 磨削与焊趾打磨技术^[4]

有关资料证明:在没有明显缺陷前提下,机加工焊缝余高直至平滑,可使接头疲劳强度增加到和母材金属一样。对接接头机加工可采用机床来进行,而角接头只能采用磨削工具,打磨过程及工具如图1,图2所示。

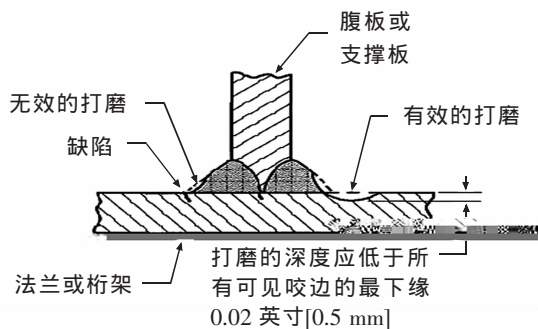


图1 磨削工具打磨过程与基本要领

Fig.1 Process and basic requirement of grinding

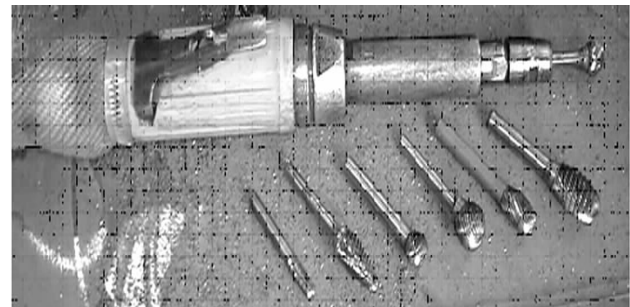


图2 高速电力驱动砂轮

Fig.2 High speed grinding wheel by electric driving

实践表明:该方法可显著改善接头疲劳强度,但实际应用效果却明显低于实验室得到的结果。原因在于:磨削焊趾时不可避免地在焊趾部位留有划痕,这些划痕虽浅但却很尖锐,可能严重降低接头疲劳强度,特别是与应力方向垂直时。为了获得较大疲劳强度提高量,需小心对焊趾进行打磨以达到光滑程度并注意打磨方向。实验室试件的焊缝较短并不强求效率,质量容易达到理想程度,而实际结构焊缝很长,存在焊缝交叉,很难做到整个结构打磨质量都能满足要求;另外,实际焊接结构较为复杂,有些焊缝并不利于打磨工作实施。

该方法通过打磨去除导致疲劳裂纹起裂的焊趾缺陷及获得焊趾平滑过渡几何外形(降低焊趾应力集中)来提高接头的疲劳性能。如果接头存有未焊透缺陷,裂纹将不在焊趾起裂而转移到根部,此时焊趾打磨反而会降低疲劳强度。

IIW与AWS等机构推荐了相关焊趾打磨工艺参数,其中IIW推荐了如下工艺参数:打磨工具转速为 $15\ 000\sim 40\ 000\ \text{转}\cdot\text{min}^{-1}$;气动工具压力 $5\sim 7$ 大气压;对于 $10\sim 50\ \text{mm}$ 中厚板,推荐磨头直径 $10\sim 25\ \text{mm}$;打磨区域根部直径不小于 $0.25t$ (t 为板厚)。

IIW与AWS等机构同时也对焊趾打磨细节提出了。例如要求:打磨前需采用钢丝刷将焊缝表面金属熔渣清理干净;打磨时,工具在高度方向和主板之间保持 $45\sim 60^\circ$ 夹角,如图3所示;尽量将打磨工具与打磨移动反方向焊缝夹角保持在 $30\sim 45^\circ$ 之间;打磨深度至少达到可见咬边缺陷底部以下 $0.5\ \text{mm}$;

对于 $40\ \text{mm}$ 以下板厚,最大打磨深度不超过 7% 板厚;而 $40\ \text{mm}$ 以上板厚,最大打磨深度不超过 $3\ \text{mm}$,焊缝打磨表面距离 W 至少等于焊角尺寸 $1/2$,如图4,图5所示;在满足要求前提下,尽量采用较小打磨深度。一般将打磨深度控制在 $1\ \text{mm}$ 之内;对于大 β 比管接头(β =支管直径/弦管直径),由于最大应力位于焊缝表面且位置略偏离焊趾,要求打磨深度约为咬边底部以下 $0.5\ \text{mm}$, $r/t0.25$, $r/d4$ (其中, d 为打磨深度, r 为打磨半径),如图6所示。

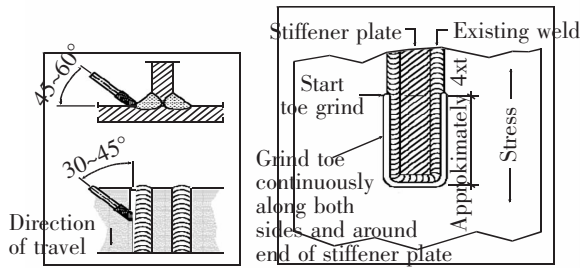


图 3 打磨工具角度与方向
Fig.3 Angle and direction of grinding

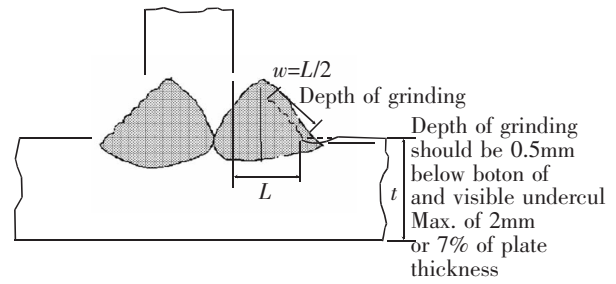


图 4 打磨深度与表面距离控制要求
Fig.4 Requirement of depth of grinding

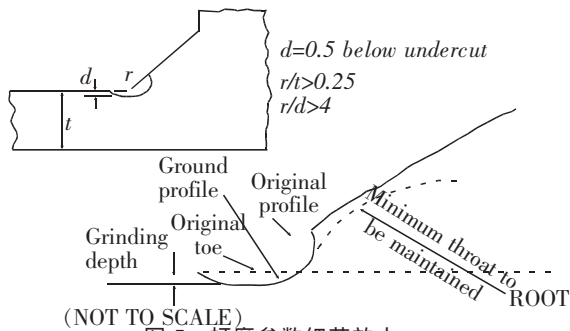


图 5 打磨参数细节放大
Fig.5 Grinding parameters

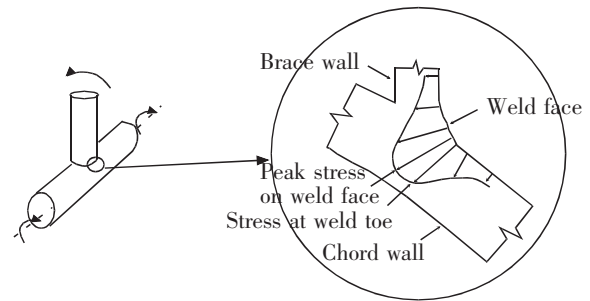


图 6 管接头打磨参数控制要求
Fig.6 Grinding parameters of pipe weld joints

对于过渡角比较陡的角焊缝或厚板 T 型接头,IIW 建议打磨分两步进行:首先借助一个小球形磨头工具打磨出一个焊趾定位准确的沟槽;然后,再使用较大直径磨头完成整个打磨工作,如图 7 所示。实践证明:在同样质量情况下,两步法打磨比一步法打磨效率更高。

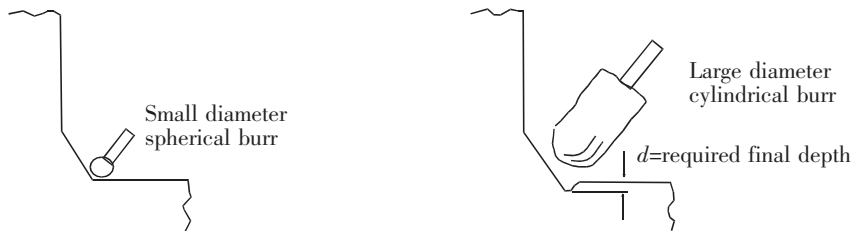
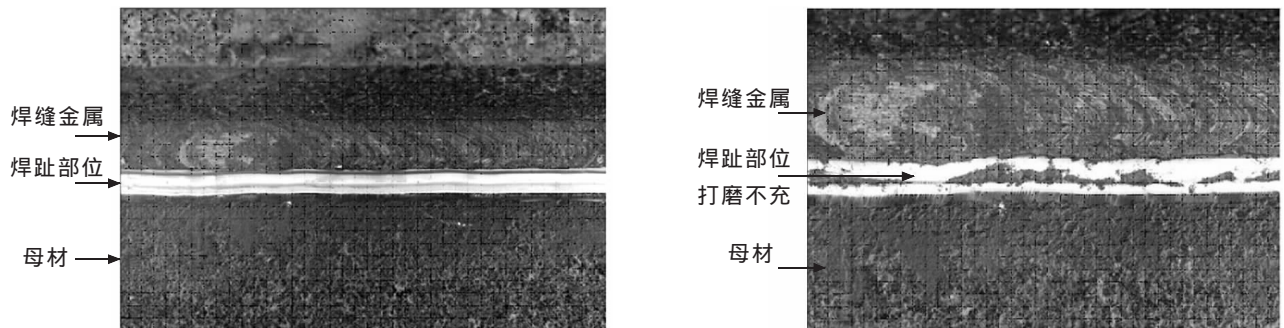


图 7 两步法打磨过程示意图
Fig.7 Sketch map of two-step burring process

研究表明:打磨质量的控制对实际改善效果的影响是极其关键的,不仅要求焊趾金属表面应尽可能打磨平滑,还要求打磨后无明显原始焊趾痕迹存在并且所有打磨痕迹均垂直于焊趾中心线,图 8 展示了正确和错误的焊趾打磨事例。



(a) 正确的焊趾打磨效果 (b) 错误的焊趾打磨效果

图 8 正确与错误焊趾打磨案例
Fig.8 Correct and incorrect weld toe grinding

AWS D1.1 也对焊趾打磨进行了相关规定,与 IIW 要求大致相同,具体要点如下:

焊趾打磨应当沿焊趾中心线进行; 推荐使用碳化钨高速磨头; 尖端半径最小值应按照标准推荐选取,更大半径会带来更好的处理效果; 打磨深度最小值不应小于从表面算起的 0.8~1.0 mm 或者在最深咬边位置以下 0.5~0.8 mm,最大值不应大于 2 mm 或 5%板厚二者中的较大值; 应保证打磨痕迹与焊趾线垂直; 最后处理一道应该较轻微以便得到高表面质量; 打磨后应对焊缝进行目测并通过磁粉或渗透检测。

相关标准均提示:如果打磨焊缝金属材料表面发生了点蚀,机械打磨的好处基本上就消失了;因此注意对打磨金属表面充分保护。

焊趾打磨法优点是:操作工具简单,成本低,操作要领容易掌握,技术成熟,适合处理横向焊缝及纵向焊缝端部,也适于低周疲劳结构,是当前应用最广的焊接结构疲劳延寿技术。而缺点是:打磨效率较低,工作量大,劳动强度高,存在安全防护等问题。

IIW(IIW-XIII-2460-13/XV-1440-13)对焊趾打磨处理接头与结构的疲劳设计强度规定如下(热点应力表征):无论是低强钢($\sigma_s < 355$ MPa)还是高强钢($\sigma_s \geq 355$ MPa),承载角焊缝的 FAT 均为 112 MPa,非承载角焊缝的 FAT 均为 125 MPa;对于铝合金,承载角焊缝的 FAT 为 45 MPa,非承载角焊缝的 FAT 为 50 MPa。由此可见,打磨的改善效果还是非常显著的。

1.2 锤击与针式冲击技术^[4]

锤击与针式冲击在实际工程焊接结构中应用广泛,其提高焊接接头疲劳性能的原理是在焊趾部位反复锤击会引入压缩残余应力。优点是使用方便,成本低,效果好。缺点是可控性较差,效果不够稳定,质量不容易保证;执行机构重,劳动强度大;处理效率低,噪声大。

IIW 和 AWS 对该方法适用范围和使用方法进行了详细规定,要点如下:

适用于板厚 4 mm 以上钢材和 8 mm 以上铝材; 所引入残余应力大小取决于接头在锤击过程中是承受拉伸载荷还是压缩载荷;对于承载焊接部件,如果锤击或冲击部位是承受的是拉应力,那么锤击或冲击效果会很好;如果焊接部件在锤击或冲击过程中承受压缩载荷,那么就会减弱其疲劳延寿效果; 实施处理前去掉焊缝表面残留杂质; 如果焊趾表面凹凸不平,那么锤击时发生塑性变形的金属就会叠加在原始焊趾上,从而留下类似于冷裂纹形状的缝隙,如图 9 所示,这会导致实际接头疲劳性能低于原始接头;因此,建议锤击前对接头进行打磨以改善其形状,从而形成一个能使锤击枪平稳移动的通道; 锤击与针式冲击过程产生严重噪声和飞溅;因此需要采用护耳用具和眼罩; 将锤击或冲击工作头精确定位于焊趾部位,以保证两侧金属(包括焊缝和母材)都能产生塑性变形; 要求锤击与针式冲击枪和金属板材表面呈 45°角,大约垂直于行进方向,如图 10 所示; 由于冲击过程中会发生跳跃,导致跳过某些部位。为了达到全部覆盖以及获得平滑过渡表面,一般需要多次处理,通常为 4 次; 每一次锤击速度设为 50~100 mm·min⁻¹,对于高强钢速度需要慢一些;而针式冲击处理速度则一般推荐 800 mm·min⁻¹。

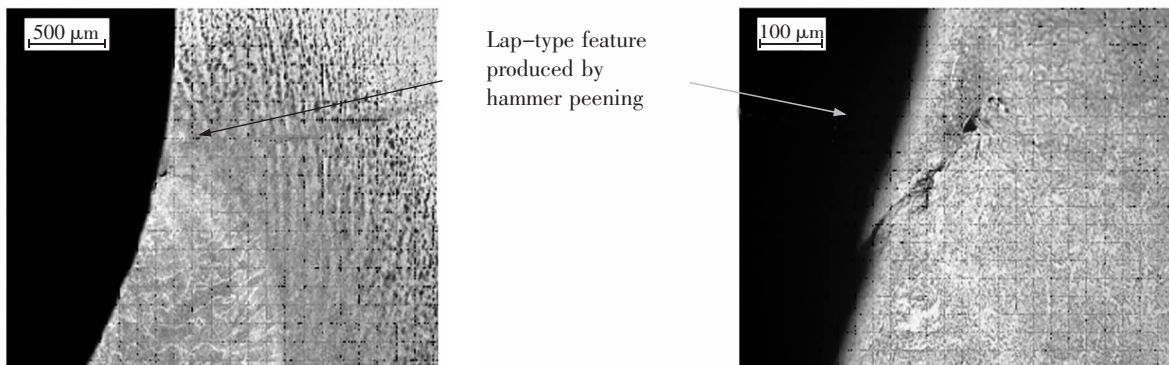


图 9 锤击处理焊接接头“叠形缺陷”

Fig.9 The “fold defect” of weld joints after hammer peening

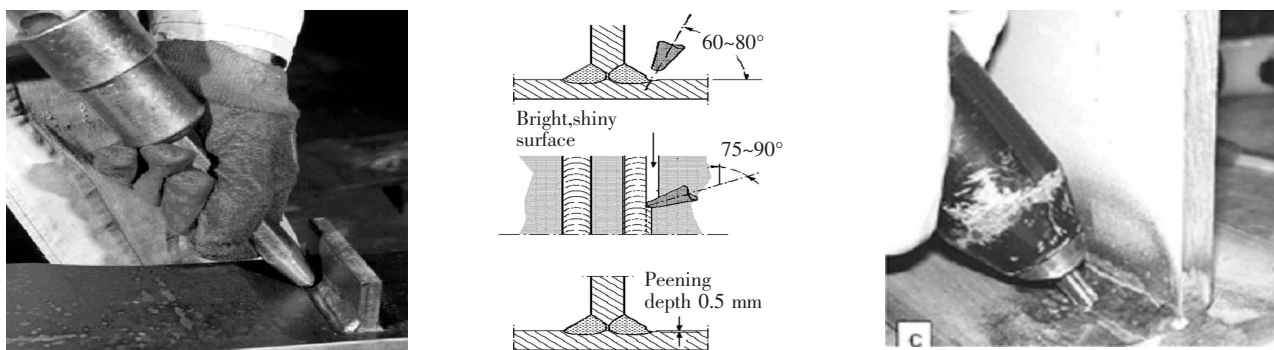
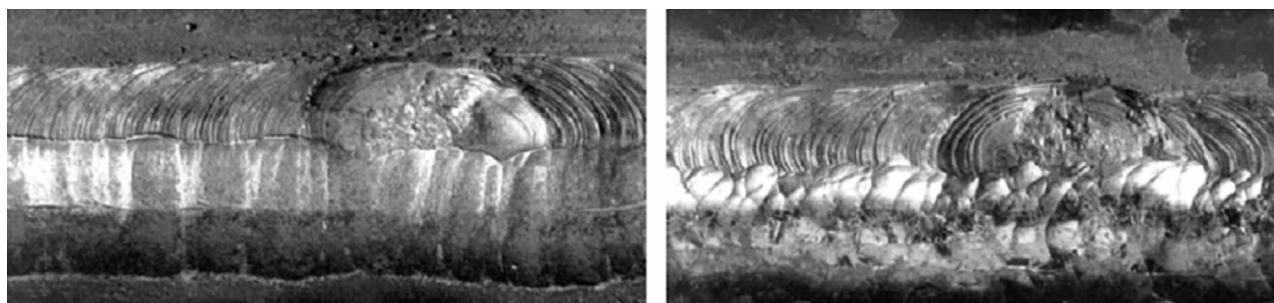


图 10 锤击与针式冲击处理过程

Fig.10 Processing of hammer and needle impact peening

研究表明:锤击工作头端部直径会影响锤击处理后金属材料表面质量;一般来说,直径越小,焊趾部位被锤击处理到的可能性就越大,最终焊趾会消失;直径如果过大(大于 12 mm),锤击头通常不会作用在焊趾部位上,而是作用在焊趾一侧母材上;一般希望用大直径锤击头,采用较少锤击道数来达到期望效果,但是从检验角度来看,原始焊趾存在是非常不利的;因此需要选择合适直径锤头。



(a) 合格:充分覆盖,表面光滑

(b) 不合格:有独立压痕,覆盖率不够

图 11 锤击或冲击钢制接头焊趾实例对比

Fig.11 Comparison of hammer and peening of steel weld joints

在任何情况下,处理后焊缝一旦受到高值平均拉伸应力作用,锤击或针式冲击处理都将失去效果。实际中,如果要解决这个问题,就需要在焊缝承受拉伸载荷过程中进行承载锤击或针式冲击处理。为达到最大效果,锤击或针式冲击处理形成的压缩残余应力应至少和试件所承受最小应力一样大。

焊趾区域是否经过了正确锤击或针式冲击(也就是说表面完整地处于压缩残余应力状态之下)并不能明显看出来,并且由于很难区分焊趾区域残留痕迹和类裂纹叠形缺陷;因此,采用小直径或者小直径和较大直径的锤击工作头综合使用是最好选择,确保所有原始焊趾痕迹都被处理清除掉。

一般情况下,当锤击或针式冲击处理表面光滑、压痕均匀、原始焊趾痕迹都消失时候,被确认为锤击或针式冲击处理较为彻底。作为参考:最佳压痕深度 0.5 mm,最小 0.3 mm,最大不超过 1 mm。如果怀疑有“叠形缺陷”产生则需要仔细检查,目前磁粉检测铁素体钢锤击或针式冲击处理叠形缺陷得到成功应用(图 12)。

IIW 和 AWS 对锤击和针式冲击能够产生有益效果予以确认:对于屈服强度高于 350 MPa 钢材,冲击强化 FAT(2×10^6 次循环时对应疲劳强度)为原始焊态的 1.6 倍,而疲劳寿命提高 4 倍;屈服强度低于 350 MPa 的钢材,其 FAT 提高 1.3 倍而疲劳寿命则提高了 2.2 倍。

AWS D1.1 标准则对锤击或针式冲击适用范围进行了界定: 锤击或针式冲击适用于疲劳载荷谱中最大名义压缩应力小于 $0.25\sigma_s$ 的情况; 处理接头设计 S-N 曲线的有效应力范围依赖于外载应力比 R : 如 $R < 0$, 则有效应力范围等于疲劳强度改善系数乘 $\Delta\sigma$; 如 $0 < R < 0.4$, 则有效应力范围等于疲劳强度改善系数乘最大应力 σ_{\max} ; 如果 $R > 0.4$, 则针状冲击没有任何改善效果。

1.3 TIG 熔修技术^[4]

TIG 熔修提高疲劳强度思想来源于:TIG 焊接头疲劳强度较高的现象。于是有人使用 TIG 焊炬将焊缝金

属沿焊趾重新熔化消除熔渣楔块与咬边等焊接缺陷,改善了焊趾外形,使焊缝与母材之间形成平滑过渡,减少了应力集中,从而提高接头疲劳性能,如图13所示^[6]。

TIG 熔修法优点之一是可以很好改善含咬边缺陷接头疲劳强度。此外,优点还有:处理效率很高,噪音较小,处理效果好,适于低周疲劳性能改善。

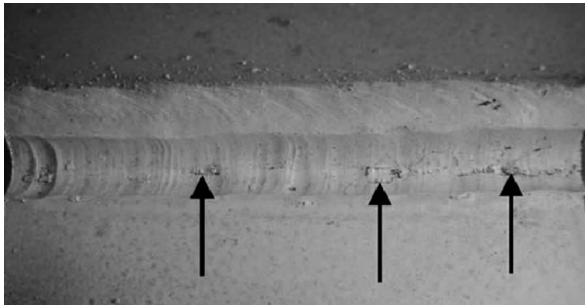


图12 锤击后焊趾处“叠形缺陷”磁粉检查

Fig.12 Magnetic particle inspection of the "fold defect" at the toe after hammering

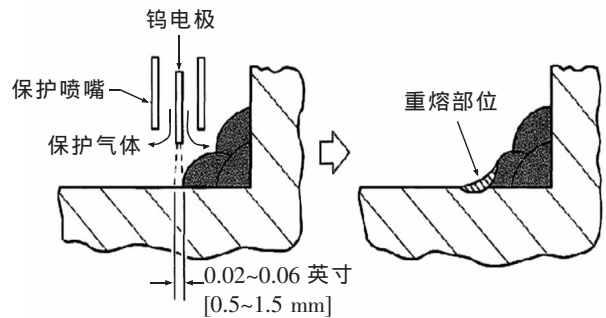


图13 TIG 熔修过程示意图

Fig.13 Schematic diagram of TIG dressing

TIG 熔修法缺点也很明显: 需要保护气体,导致野外施工困难; 准备工作繁多,熔修前需要仔细清理待处理焊缝表面,去除杂质;需经常打磨电极,保证端部尖锐程度;处理高强度钢种需要预热; 为了防止可能出现过度硬化有时需重熔两次以上; 存在熄弧与重新起弧问题,处理不当会影响重熔焊道质量和外形,使处理接头疲劳性能低于焊态,对操作者技能要求较高; 横焊、立焊、仰焊时效果较差。

国际焊接学会推荐 TIG 熔修可适用于屈服强度低于 900 MPa、厚度大于 10 mm 的钢制焊接接头,服役在无腐蚀或有保护的腐蚀环境中。值得注意的是,TIG 熔修对表面状态十分敏感;因此,在处理之前要仔细检查熔修部位,去除油污、铁锈等。如果表面清理不够会导致气孔出现,反而恶化接头疲劳性能^[4,7-9]。再者,其他参数如焊接速度、焊接电流、电弧位置及保护气,都会影响局部重熔的效果和疲劳性能^[10]。

TIG 熔修效果与电弧形状密切相关,而电弧形状又依赖于电极尖端形状和条件。如果尖端被污染或磨损(氧化),将导致电弧集中,从而使重熔区变窄和对焊道形状产生不利影响。

当 TIG 熔修碳含量超过 0.12% 的钢结构时,应考虑是否在热影响区会形成淬硬区,因而对焊缝金属进行二次 TIG 重熔回火。

IIW 推荐 TIG 熔修时使用高热输入,这使热影响区硬度值较低,且熔修效率高。需要注意的是:较大电流和过低熔修速度通常会产生咬边或很差焊缝轮廓,影响熔修效果。

研究表明:最佳熔修条件与重熔位置相关。为获最佳熔修结果,相对原焊趾位置重熔区域须仔细定位。通常,当电弧中心距焊趾较近时,如图14(a)所示,熔修效果较好。

当 TIG 熔修电弧位置过于接近焊道,则可能导致一个新焊趾形成,如图14(b)和(c)所示。如果获到图14(b)及(c)所示熔修焊道形状,应考虑相应补救措施。

TIG 熔修需注意原始焊趾是否被完全重熔。经验表明:如存在部分未熔修焊趾区域,则疲劳性能与原始

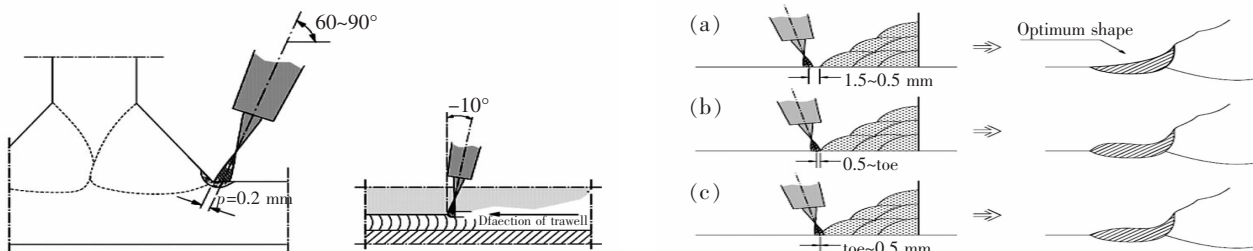


图14 TIG 熔修重熔区域位置选择原则示意

Fig.14 Location selection principle of TIG dressing zone

焊态接头是相同的。

熔修起弧和熄弧时可能造成弧坑或不良焊道形状,严重影响熔修效果。此时可通过使起弧点位于熄弧点之后 6 mm 位置已予避免,如图 15(a)所示;另外,也可先在焊道上起弧再移动到焊趾处,如图 15(b)所示;也可在焊道上熄弧,如图 15(c)所示。

研究表明:熔修处理焊缝效果能否最佳也取决于原始焊缝几何形状。另外,熔修实际效果还与服役条件有关,如果熔修金属表面产生一定程度腐蚀,那么 TIG 熔修益处将减少。

国际焊接学会对 TIG 熔修疲劳性能改善效果评价规定如下:中低强度级别钢(屈服强度小于 355 MPa)的承载角接头热点应力 FAT 值为 112 MPa,非承载角接头 FAT 值为 125 MPa;高强度钢(屈服强度大于 355 MPa)的承载角接头 FAT 值为 112 MPa,非承载角接头 FAT 值为 125 MPa;铝合金的承载角接头 FAT 值为 45 MPa,非承载角接头 FAT 值为 50 MPa^[4]。

关于 TIG 熔修,最近仍然有人进一步开展研究。例如, Yidirim 总结了 311 组公开发表的文献中数据,获得如下结论:发现 IIW 推荐使用固定 S-N 曲线斜率 $m=3$ 往往获得较为保守的试验结果,采用 $m>3$ 拟合 TIG 熔修法改善焊接接头疲劳数据似乎能获得更合理的疲劳设计特征强度值,但是需要更多试验结果来验证该结论;疲劳强度改善效果,即 FAT 值变化跟试样几何形状和材料强度级别有重要联系;采用合理的评估方法对准确描述 TIG 熔修改善效果极其关键,如缺口应力法、结构热点应力法或断裂力学方法等;强度级别较高的试验数据相对较为缺乏;因此,TIG 熔修方法的效果及评价方法仍有待研究。

2 焊接结构疲劳延寿新技术

2.1 低相变点焊接材料疲劳延寿技术

2.1.1 低相变材料疲劳延寿技术原理

TIG 熔修、焊趾打磨、锤击等传统焊接结构疲劳延寿技术的共同缺点表现为:它们均属于焊后处理工艺措施。对于大型焊接结构件,焊缝数量巨多,这样会大大增加劳动量和成本^[11];同时此类方法对于改善角焊缝根部疲劳开裂效果并不理想,基本没有作用。

低相变点(low transformation temperature, LTT)焊接材料是一种利用焊缝金属在较低温度下(M_s 点低于 350℃),通过马氏体相变产生的体积膨胀降低焊缝及周围母材的残余拉应力甚至产生残余压缩应力,从而提高焊接接头疲劳强度的新型焊接材料。

在过去 20 年,LTT 焊接材料得到了国内外高度关注。研究表明:LTT 材料可在焊态条件下降低焊接区域残余拉应力,甚至产生残余压缩应力,无需增加任何焊后措施、效率高、成本低,避免了耗时且昂贵的焊后消应力热处理^[12-13];同时对于改善角焊缝根部疲劳裂纹效果明显。此外,LTT 焊接材料还可有效降低高强钢冷裂纹敏感性,降低焊前预热温度或免除焊前预热^[14-15];通过调整 LTT 焊接材料配方,对于控制焊接变形也有良好效果^[16]。

2.1.2 LTT 焊接材料设计原理

焊接过程中,钢铁材料从高温到室温冷却过程中,奥氏体(A)向铁素体(F)、贝氏体(B)和马氏体(M)转变,由于微观结构和形态不同,造成它们比容各不相同;组织转变温度越低,所获得的转变组织比容越大^[11],

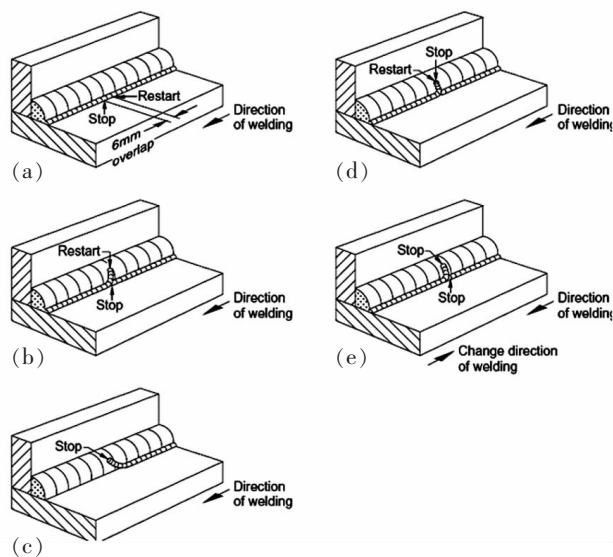


图 15 TIG 熔修过程起弧和熄弧技巧

Fig.15 TIG dressing technique of arc striking and stabilizing

其中奥氏体-马氏体转变相变膨胀最大;因此,基于马氏体转变产生相变膨胀原理设计 LTT 焊接材料是较为理想的选择。

室温焊接残余应力由焊接热收缩应力和相变应力共同决定。室温下的焊接残余应力与相变开始温度密切相关,若组织转变在高温,材料处于完全塑性状态,相变体积膨胀不会产生相变应力,也不影响室温残余应力。若相变开始温度在 350~600 °C 之间,此时材料处于弹塑性状态,组织转变体积膨胀产生部分相变应力,但是相变结束后热收缩继续进行,使压缩应力降低并逐渐转变为拉伸应力。若相变开始温度大约在 100~350 °C,以保证膨胀应变结束温度在室温附近,不再发生相变结束后的热收缩或只有较小热收缩,从而在室温下可以获得残余压缩应力^[11]。此外,考虑到高碳马氏体力学性能差;因此,LTT 焊接材料合金体系设计室温转变应以低碳马氏体为主。

2.1.3 LTT 焊接材料研究进展

早在 60 年代,前苏联焊接专家就提出了利用相变膨胀产生压缩应力来提高焊接结构疲劳强度的设想。遗憾的是这种思想没有得到足够重视,可能与下述原因有关: 焊缝金属中加入了大量 Mn 引起焊缝金属脆化,力学性能急剧下降; 由于当时原材料质量限制,其含碳量高达 0.16%~0.2%,致使焊接性较差; 大量 Mn 会带来焊接健康方面问题^[11]。

最早报道 LTT 焊接材料研究成果的是日本国家金属研究所 Akihiko Ohta 教授等人,他们在 1998 年国际焊接学会年会上提出低相变点焊丝的研究报告^[17],其主要化学成分为 10Cr-10Ni。报告中将低相变点焊丝用于高强钢 HT580 和 HT780 纵向非承载角焊缝,其疲劳强度提高 100%。随后将 LTT 焊丝用于施焊箱形梁四条纵向角焊缝,结果发现:低温相变材料焊接梁的疲劳强度提高约 30%,也充分显示了这种方法的有效性^[18]。Chitoshi MIKI 研制了 3 种低相变点焊条^[19],其熔敷金属化学成分为 Cr15-Ni7、Cr13-Ni9 和 Ni19,在没有预热情况下有效地提高了焊接接头的疲劳强度,虽然疲劳强度提高程度没有超声冲击法效果好,但是优于 TIG 熔修和焊趾打磨。J.Eckerlid(SSAB 瑞典钢铁公司),L.Karlsson(ESAB 伊萨焊材)在 2002 年国际疲劳学会的研究报告^[20]提出采用 TIG 焊丝和 SMAW 焊条的 LTT 焊接材料用于角焊缝,疲劳性能可以提高 25%~90%,裂纹起裂位置从焊趾向焊缝根部转移。

日本 Ohta 和 TWI 的 S.J.Maddox 等^[21]的研究结果表明:母材强度级别越高,LTT 焊材的疲劳性能改善效果越明显。2004 年霍立兴等^[22]研制了不同 M_s 的 LTT 焊条,研究表明: M_s 为 180 °C 时,相变膨胀应变最大,可以获得最大残余压应力。2011 年,赵小辉、王东坡等^[23]采用 LTT 合金粉用于低合金钢焊接接头喷熔修形,疲劳强度比原始焊态提高了 70%。

Denis Thibault 等^[24]关于 LTT 焊接材料 410NiMo 用于超级马氏体不锈钢焊接的研究表明:多层多道焊的最后一道焊缝纵向残余应力为压应力,其余焊缝纵向为残余拉应力;多层多道 LTT 焊缝的裂纹敏感性高于热影响区 HAZ。

Kromm A 等^[25-26]研究发现: M_s 点是影响低相变焊缝残余应力分布的主要因素;在服役过程中载荷达到奥氏体屈服强度时会发生应力诱发马氏体转变。

Bhatti A A 等^[27]研究报告发现:LTT 焊接材料在低名义应力水平条件下改善疲劳性能效果明显;改善变幅载荷条件下疲劳性能的效果并不明显。

Scandella Fabrice 等^[28]在 2013 年第 5 届疲劳设计会议上提出:采用马氏体不锈钢焊接材料(EN ISO 17633-A-T Z 16 5 1, $M_s=225$ °C)可用于提高低合金钢焊接结构疲劳强度。

ALGHAMDI T 等^[29]建立了 LTT 焊接接头残余应力有限元模型 并发现: M_s 相近的 LTT 材料,其焊接变形和残余应力并不一定相同, M_s 非预测相变残余应力大小和分布唯一指标。

Ramjaun T I,Ooi S W 等^[30]研究发现:考虑母材稀释问题,高合金含量有利于改善 LTT 单道焊接头疲劳性能;但对多道焊高合金含量没有好处,这是由于焊缝马氏体转变不完全,致使 HAZ 区周围存在大量残余拉应力区所致;将 LTT 材料用于不锈钢焊接时,母材对 LTT 焊缝稀释作用会导致合金成分偏高而不发生马氏体转变,从而不产生压应力;母材稀释作用主要是通过改变 M_s 点,而非通过组织来影响残余应力的^[12]。

Kromm A 等开始关注 LTT 焊接材料力学性能及焊接性,通过调整 Cr, Ni, Mn 含量获得不同配方的 LTT 焊丝,研究发现:Cr, Ni, Mn 含量高易出现凝固裂纹。

2.2 超声冲击疲劳延寿技术

2.2.1 超声冲击疲劳延寿技术原理

超声冲击处理(ultrasonic impact treatment)是在喷丸技术基础上发展起来,极具应用前景的喷丸类金属表面强化技术。它以大功率超声波为驱动力,通过换能器将电能转换为机械能,并通过变幅器放大/聚能后驱动冲击针撞击金属材料表面,使其发生塑性变形进而降低焊趾应力集中程度,形成表面残余压缩应力,进而大幅度提高材料或焊接接头疲劳性能。

超声冲击装置^[32-33]由功率超声波发生器和执行机构构成。功率超声波发生器的主要功能包括输出一定功率和频率的交流电并配有振速和频率跟踪系统;执行机构即超声冲击枪包括换能器、变幅杆和冲击针三部分。工作原理:功率超声波发生器将工频交流电转换为超声频交流电,激励换能器并将其转换为同频机械振动,变幅杆将换能器输出振动幅度放大,传递给冲击头,在一定压力下撞击金属材料表面,图 16 为超声冲击设备和冲击枪结构图^[34-35]。

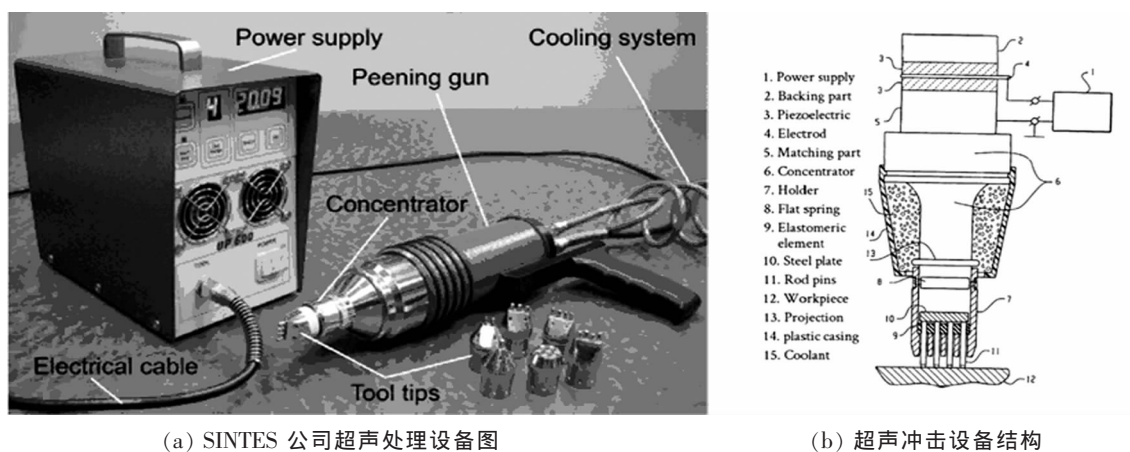


图 16 超声冲击设备实物图

Fig.16 The graph of ultrasonic impact equipment

2.2.2 超声冲击技术发展过程

超声冲击处理起源于直接利用超声振动使表面产生变形的技术,最初是在 20 世纪 50 年代由俄罗斯科学家 Mukhanov 和 Golubev 首先提出的。他们利用超声换能器输出的振动加工处理材料,使被处理材料表层产生了一薄层塑性变形,并使变形层微观形态和残余应力分布情况发生了改变^[36]。随后 Krylov 和 Polischuk 在 1960 年对已有超声振动设备进行了改造,在超声换能器输出端和待处理材料之间放置了一枚自由运动小球体^[37],使激振系统振动冲击代替了换能器对工件的直接处理,但处理过程中小球随机运动产生的冲击频率低于系统激振频率。虽然改进后设备可增加材料塑性层变形厚度,由于球体过度自由运动使之无法保证塑性变形层深度的均匀性。

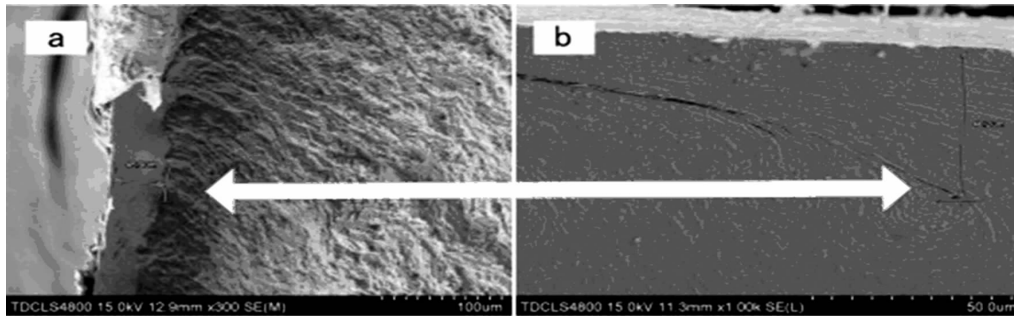
在 20 世纪 70 年代初期,Statnikov 等发明了超声冲击方法并且取得了相应专利权。使用磁致伸缩振动系统取代了原有压电式超声振动系统,用于焊接结构焊接残余应力消除和疲劳性能及抗应力腐蚀性提高。由于该技术初期主要用于军工领域;因此很长一段时间处于保密状态,直到 20 世纪 90 年代国际焊接领域才逐渐认识到该技术。此后,乌克兰、俄罗斯和法国的研究机构联合进行了超声冲击技术的完善和实用化研究,2000 年左右,在美国成功实现了商业化。我国超声冲击技术研发始于 1995 年,并于 1997 年研制成功第一台压电式超声冲击装备,使国际超声冲击设备研发进入磁致伸缩和电致伸缩并行发展的阶段。目前,该技术在航空航天、海洋工程、桥梁建造、工程机械、轨道交通等领域被广泛应用,并成功地向表面工程^[38]、铝合金结构矫形^[39]、辅助 3D 打印等方向拓展。

2.2.3 超声冲击技术最新研究进展

Nascimento 等^[40]发现,超声冲击处理作为电镀前处理工艺可以有效去除电镀过程中形成的拉应力,抑制表面镀层微裂纹产生。法国空客公司、中航工业集团等国际航空巨头已成功将超声冲击技术用于飞机机身或机翼壁板矫正。Guo^[41-42]讨论了超声冲击成形原理,正试图将该技术应用于运载火箭贮箱等薄壁铝合金结构的成形工艺过程。何柏林等^[43]研究发现:超声冲击使材料表层组织中产生高密度位错缠结和位错墙,相比其他塑性变形技术可更有效细化晶粒。王东坡等^[38]利用改造后的超声冲击装置实现了45#钢表面纳米化。

2009年,王婷等^[44]提出超声冲击处理焊接接头的S-N设计曲线斜率推荐值应为 $m=10$,超声冲击接头疲劳强度与平均应力有关等观点。2010年,超声冲击技术被纳入美国公路铁路桥梁设计规范当中并加以推广应用^[45]。2012年,Yildirim H C等^[46]总结了超声冲击处理接头疲劳强度的大量数据,得出其设计S-N曲线斜率为 $m=5$ 较为合适。2013年,日本Rana Tehrani Yekta等^[47]发现:超声冲击质量水平可严重地影响其疲劳性能,过冲击或欠冲击均可能造成超声冲击处理改善结构疲劳性能的效果不佳。

Liu^[48]在研究二次超声冲击处理过程中发现:超声处理后焊接接头表层存在类裂纹缺陷(如图17所示),是疲劳裂纹起裂首选位置。Abdullah^[49]在超声冲击试样中同样也发现了类裂纹缺陷,如图18所示。说明在超声冲击处理焊趾区域出现这种叠形类裂纹缺陷是几乎不可避免的,对接头疲劳延寿效果产生不利的影响。

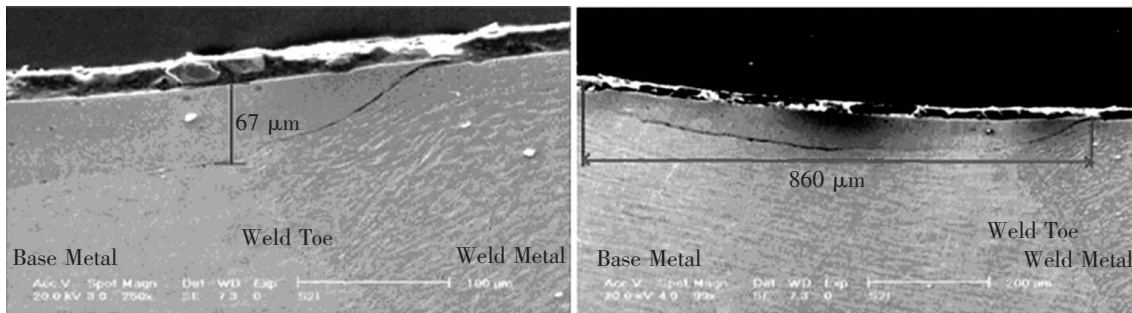


(a) 冲击后试样疲劳断面照片

(b) 冲击后试样剖面图

图17 超声冲击处理类裂纹缺陷

Fig.17 SEM micrographs



(a)

(b)

图18 冲击后试样损伤剖面图

Fig.18 SEM micrographs of cross-section of the specimen with UIT damage

霍立兴等^[50]研究了复杂荷载下超声冲击改善焊接接头疲劳性能实施效果并发现:变幅荷载下超声冲击处理焊接接头的疲劳寿命显著减少,变幅荷载加载条件下累积损伤系数 D 设定为0.5的作法,不适合超声冲击处理焊接接头与结构。

近年研究表明:超声冲击不仅可提高新建结构疲劳寿命,对于服役结构疲劳性能改善作用可能更明显。Maddox等^[51]发现:已经服役一段时间的接头焊趾经过承载冲击处理后,焊趾部位裂纹停止了增长,疲劳失效位置从焊趾转移到焊根,这说明冲击处理可以作为焊接接头裂纹修复手段,抑制原有疲劳裂纹扩展。Kudryavtsev Y等^[52]对经历50%预期疲劳寿命的疲劳加载焊接接头进行了超声冲击处理,发现其疲劳强

度提高程度比直接超声冲击高30%,但原因解释尚存在一定疑问。张海等^[53]研究发现:随着接头疲劳预加载时间增长,将产生更深的疲劳裂纹,使得非承载超声冲击处理的改善效果明显降低;同时采用有限元分析手段对超声冲击作用于含裂纹焊接接头冲击过程进行了模拟发现:超声冲击提高疲劳性能机制包括产生压缩残余应力及改变裂纹发展方向两方面,这两个因素的有利作用都随着裂纹增长而不断降低。冯延焉等^[54]对超声冲击产生类裂纹叠形缺陷的机制进行研究并发现:叠形缺陷是不可避免的,原始缺陷深宽比、冲击处理角度对叠形缺陷形成起关键的作用。

3 焊接结构与接头疲劳延寿技术发展趋势分析

综上所述,再结合近年来一些疲劳延寿技术的发展现状,对焊接结构与接头疲劳延寿技术的发展趋势进行简单地分析和判断,现简述如下:

焊接结构疲劳延寿接头的设计和评价问题可能继续成为未来疲劳延寿技术的热点之一,目前现有设计规范将其设计S-N曲线强制规定为 $M=3$ 是不合适的,具体数值尚需大量研究,需要积累更多试验数据。

焊趾打磨前处理技术的重要性可能会得到更深刻的理解,成为未来进一步提高TIG熔修、超声冲击、锤击等疲劳延寿技术实施效果的重要手段之一。

疲劳延寿处理后施加腐蚀防护措施,也是保证服役在腐蚀性环境的焊接结构疲劳性能可靠性的重要方面,应在今后引起高度重视。

有限元数值模拟技术是研究超声冲击、锤击、针式冲击工艺缺陷的形成机理,探讨复杂载荷条件下的疲劳延寿机制等科学问题的有效手段,今后该研究方法可能受到普遍关注。

由于类裂纹叠形缺陷是超声冲击、锤击、针式冲击等喷丸类疲劳延寿技术不可避免的工艺性缺陷,此时接头疲劳寿命评估演变为微裂纹缺陷在压缩应力条件下的疲劳扩展问题。有鉴于此,利用断裂力学理论预测上述喷丸类强化实施效果,开展抗疲劳设计也是未来值得期待的发展方向之一。当然,如果可以采用某种工艺措施避免或消除喷丸类强化表面类裂纹缺陷,则可以进一步提高其疲劳延寿效果,并保证其实施效果在复杂服役条件下的稳定性。

近年来,尽管LTT焊接材料获得了极大地发展,但是依然存在一些焊接问题尚未完全解决,如焊缝金属冲击韧性较低问题。目前,各国仍在寻求提高焊缝金属冲击韧性的途径,一方面通过调整 M_s 来改善焊缝金属冲击韧性;另一方面,通过提高焊缝金属纯净度,降低含碳量提高焊缝金属冲击韧性。低碳高镍低相变点焊接材料可以获得马氏体和残余奥氏体的混合组织,是目前低相变点焊接材料改善冲击韧性的主要研究方向。

此外,关于LTT焊缝金属组织转变热力学和动力学的研究尚不深入;LTT焊缝金属中马氏体和奥氏体的组织形态及分布对力学性能的影响,残余奥氏体稳定性及其在服役条件下的转变行为(温度和载荷对残余奥氏体转变为马氏体的影响);LTT焊接接头熔合区的腐蚀问题;LTT焊接材料的焊接性,尤其焊缝成型质量,如何获得较小的过渡角;焊接工艺参数优化,焊接气体配比(N、O含量对焊缝力学性能的影响)对综合性能的影响。

4 总结

截至目前,国际上焊趾打磨、TIG熔修、锤击、针式冲击等传统经典焊接结构疲劳延寿技术已纳入相关行业的疲劳设计规范当中,超声冲击也进入美国公路铁路桥梁设计规范加以推广应用,但关于焊接结构疲劳延寿新技术的学术研究仍然没有停止的迹象,反而发表的学术论文越来越多,这一方面反映出其重要性得到学术界与工业界的高度认可;另一方面则说明关于系列疲劳延寿技术的研究还不够深入,一些深层次问题尚未得到彻底解决。如锤击和超声冲击工艺性缺陷的产生机理,表面损伤机制及其影响因素;低相变点焊缝韧性不足、残余奥氏体稳定性及其在服役条件下的转变行为、母材稀释对低相变点焊缝组织演变及其形态的影响;疲劳延寿处理结构设计及评价问题、复杂载荷条件下疲劳延寿效果稳定性及其保障问题等。需

要今后继续开展上述相关问题的研究工作,推动焊接结构疲劳延寿技术在高端装备制造产业中越来越广泛应用。

参考文献:

- [1] T R 格内尔. 焊接结构的疲劳[M]. 北京:机械工业出版社,1988:284-285.
- [2] 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,2000:358-363.
- [3] MADDOX S. Fatigue strength of welded structures[M]. Cambridge:Woodhead Publishing,1991.
- [4] HAAGENSEN P, MADDOX S. IIW recommendations on methods for improving the fatigue lives of welded joints[M]. Cambridge:Woodhead Publishing Ltd,2013.
- [5] WATKINSON F, BODGER PH, HARRISON JD. The fatigue strength of welded joints in high strength steels and methods for its improvement[M]. UK:The Welding Institute,1971.
- [6] DNV-RP-C203. Recommended practice for fatigue design of offshore steel structures[M]. Det Norske Veritas, Norway,2010.
- [7] VAN ES S, KOLSTEIN M, PIJERS R, et al. TIG-dressing of high strength butt welded connections[J]. Physical Testing and Modelling Proc Eng,2013,66:126-37.
- [8] PIJERS R. Fatigue strength of welded connections made of very high strength cast and rolled steels[D]. Delft:Delft University of Technology,2011.
- [9] HOBACHER A. IIW recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. New York:WRC,2009.
- [10] FRICKE W. IIW recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis[M]. Cambridge:Woodhead Publishing Ltd,2012.
- [11] 王文先. 低相变点焊条及其在改善焊接接头疲劳性能中的应用研究[D]. 天津:天津大学,2002.
- [12] OOI SW, GARNHAM JE, RAMJAUN TI. Review:low transformation temperature weld filler for tensile residual stress reduction [J]. Materials & Design,2014,56(4):773-781.
- [13] KROMM A, DIXNEIT J, KANNENGIESSER T. Residual stress engineering by low transformation temperature alloys-state of the art and recent developments[J]. Welding in the World,2014,58(5):729-741.
- [14] ZENITANI S, HAYAKAWA N. Development of new low transformation temperature welding consumable to prevent cold cracking in high strength steel welds[J]. Science & Technology of Welding & Joining,2007,12(6):516-522.
- [15] PAQUIN M, THIBAUT D. Assessment of cold cracking tests for low transformation temperature martensitic stainless steel multipass welds[J]. Welding in the World,2015,59(4):1-12.
- [16] THOMAS SH, LIU S. Analysis of low transformation temperature welding (LTTW)consumables - distortion control and evolution of stresses[J]. Science & Technology of Welding & Joining,2014,19(5):392-401.
- [17] OHTA A, WATANABE O. Fatigue strength improvement by using newly developed low transformation temperature welding material[J]. Welding in the World,199,43(6):38-42.
- [18] OHTA A, WATANABE O. Fatigue strength improvement of box weld by using low-temperature transformation welding material [J]. Welding International,2000,14(10):801-805.
- [19] MIKI C, ANAMI K, HIGUCHI Y. Fatigue strength improvement by additional welding with low temperature transformation welding material[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers,2002(710):311-319.
- [20] ECKERLID J, NILSSON T, KARLSSON L. Fatigue properties of longitudinal attachments welded using low transformation temperature filler[J]. Science & Technology of Welding & Joining,2003,8(8):353-359.
- [21] OHTA A, SUZUKIN, MADDOX S J. Fatigue strength improvement of lap welded joints by low transformation temperature welding wire-superior improvement with strength of steel[J]. Welding in the World,2003,47(31):38-43.
- [22] LIXING H, DONGPO W, WENXIAN W. Ultrasonic peening and low transformation temperature electrodes used for improving the fatigue strength of welded joints[J]. Welding in the World,2004,48(3/4):34-39.
- [23] ZHAO X H, WANG D P, DENG C Y. Research on fatigue behavior of welded joint spraying fused by low transformation temperature alloy powder[J]. Materials & Design,2014,53(1):490-496.

- [24] THIBAUT D,BOCHER P,THOMAS M. Residual stress and microstructure in welds of 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2009,209(4):2195-2202.
- [25] KROMM A,KANNENGIESSER T. In-situ-phase analysis using synchrotron radiation of low transformation temperature (LTT) welding material[J]. *Bmc Bioinformatics*,2009,10(1):1-11.
- [26] ALTENKIRCH,GIBMEIER J,KROMM A. In situ study of structural integrity of low transformation temperature (LTT)-welds[J]. *Materials Science & Engineering A*,2011,528(161):5566-5575.
- [27] BHATTI A A,BARSOUM Z,KROMM A. Fatigue strength improvement of welded structures using new low transformation temperature filler materials[J]. *Procedia Engineering*,2013,66C:192-201.
- [28] SCANDELLA F,CAVALLIN N,GRESSEL P. Use of martensitic stainless steel welding ionsumable to substantially improve the fatigue strength of low alloy steel welded structures[J]. *Procedia Engineering*,2013,66:108-125.
- [29] ALGHAMDI T,LIU S. Low transformation temperature welding consumables for residual stress management;a numerical model for the prediction of phase transformation-induced compressive residual stresses[J]. *Welding Journal*,2014,93(12):458-471.
- [30] RAMJAUN T I,STONE H J,OOI S W. Effects of dilution and baseplate strength on stress distributions in multipass welds deposited using low transformation temperature filler alloys[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*,2014,19(6):461-467.
- [31] KROMM A,KANNENGIESSER T. Properties and weldability of modified low transformation temperature filler wires[J]. *Welding in the World*,2015,59(3):413-425.
- [32] 王东坡,霍立兴,张玉凤,等. 提高焊接接头疲劳强度的超声冲击方法[J]. *焊接学报*,1999,20(3):158-163.
- [33] 王东坡. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法实验装置的研制[D]. 天津:天津大学,1997.
- [34] MALAKI M,DING H. A review of ultrasonic peening treatment[J]. *Materials & Design*,2015,87:1072-86.
- [35] PROKOPENKO G I,KOZLOV O I,KLEIMAN J I,et al. Device for ultrasonic peening of metals:US Patent,US6467321-B2[P], IntegrityTesting Laboratory,Inc,United States,2002.
- [36] MUKHANOV I,GOLUBEV Y M. Strengthening steel components by ultrasonically vibrating ball[J]. *Vestn Mashin*,1966,11:2-53.
- [37] KRYLOV N,POLISCHUK A. The use of ultrasonic equipment for metal structure stabilization[J]. *Basic Physics of Industrial Ultrasonic Applications,Part*,1970,70.
- [38] 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*,2007,40(2):228-233.
- [39] 增元松,黄遐,李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. *塑性成形学报*,2006,13(3):23-29.
- [40] NASCIMENTO MP,SOUZA RC,PIGATIN WL,et al. Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel[J]. *International Journal of Fatigue*,2001,23(7):607-18.
- [41] GUO C,HU S,WANG D,et al. Finite element analysis of the effect of the controlled parameters on plate forming induced by ultrasonic impact forming(UIF)process[J]. *Applied Surface Science*,2015,353:382-90.
- [42] GUO C,WANG Z,WANG D,et al. Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models[J]. *Applied Surface Science*,2015,347:596-601.
- [43] 何柏林,于影霞,史建平,等. 超声冲击对转向架用 16MnR 钢焊接接头疲劳性能的影响[J]. *中国铁道科学*,2011,32(5):96-99.
- [44] WANG TING,WANG DONGPO,HUOLIXING,et al. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT)[J]. *International Journal of Fatigue*,2009,31:644-650.
- [45] AASHTO LRFD. *Bridge Construction Specifications*[M]. 3rd Editon,2010.
- [46] YILDIRIM H C,MARQUIS G B. Overview of fatigue data for high frequency mechanical impact treated welded joints[J]. *Welding in the World*,2012,56:82-96.
- [47] RANA TEHRANI YEKTA,KASRA GHAREMANI,SCOTT WALBRIDGE. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds[J]. *International Journal of Fatigue*,2013,55:245-256.
- [48] LIU Y,WANG D,DENG C,et al. Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*,2014,66:155-60.
- [49] ABDULLAH A,MALAKI M,ESKANDARI A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening[J]. *Materials & Design*,2012,38:7-18.

- [50] HUO L, WANG D, ZHANG Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(1):95-101.
- [51] MADDOX SJ, DORE MJ, SMITH SD. A case study of the use of ultrasonic peening for upgrading a welded steel structure[J]. *Welding in the World*, 2011, 55(9):56-67.
- [52] KUDRYAVTSEV Y, KLEIMAN J, LUGOVSKOY A, et al. Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening[J]. *Welding in the World*, 2007, 51(7/8).
- [53] ZHANG HAI, WANG DONGPO, XIA LIQIAN, et al. Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80:278-287.
- [54] FENG Y, HU S, WANG D, et al. Formation of short crack and its effect on fatigue properties of ultrasonic peening treatment S355 steel[J]. *Materials & Design*, 2016, 89:507-515.

Research Review on Fatigue Life Improvement of Welding Joint and Structure

Wang Dongpo, Gong Baoming, Wu Shipin, Zhang Hai, Feng Yanyan

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The current status and development of fatigue life improvement technology of welding joint and structure was reviewed in this paper. The specifications for the practical use of the traditional welding improvement methods such as weld toe grinding, TIG dressing, hammer peening and needle peening were introduced according to the international guidelines. The recent development about the methods of ultrasonic peening and low transformation temperature welding material were also discussed in details. It is thought that the fatigue life improvement technology of welding structure is still the international focus for a quite long period in future. More researches need to be conducted in the following areas: the mechanism and influencing factors of defects forming during hammer peening and ultrasonic peening process; the toughness increase of welding metal, the stability of retained austenite and the effect of base metal dilution on the microstructure of weld metal for low transformation temperature welding material; the design and evaluation of the structure treated by the improvement methods; the stability of the fatigue life improvement under complex load. It maintains that fatigue life improvement technology can be more widely used in high-end manufacturing industries.

Key words: welding structure; fatigue life; ultrasonic peening; TIG dressing; grinding

(责任编辑 刘棉玲)