

含孔洞缺陷焊接接头放电强化及疲劳寿命分析

付宇明¹, 赵华洋^{1,2}, 杜文连¹, 李艳芳¹, 郑丽娟¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 内蒙古民族大学 机械工程学院, 内蒙古 028043)

摘 要: 针对焊接接头中存在的孔洞等形式的缺陷, 利用自制的 ZL-2 型超强脉冲放电装置对含孔洞缺陷的 9CrSi 合金工具钢焊接接头进行了电磁热强化试验, 并在自制的疲劳试验机上对放电前后焊接接头的疲劳寿命进行了对比分析, 从理论上计算了含孔洞缺陷焊接接头放电瞬间的综合应力强度因子. 结果表明, 放电电压对疲劳寿命的影响存在最优值, 在 5.5 kV 脉冲放电电压作用下, 放电后的焊接接头平均疲劳寿命比放电前提高了 10% 以上, 理论计算的热电应力强度因子为负值, 削弱了裂纹扩展的驱动力, 进而延长了试件的疲劳寿命.

关键词: 电磁热效应; 孔洞; 止裂; 疲劳寿命; 焊接接头

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)04-0031-04

0 序 言

合金工具钢是在碳素工具钢的基础上加入铬、钼、钨等合金元素以提高淬透性、韧性、耐磨性和耐热性的一种钢种, 它主要用于制造量具、刀具、耐冲击及一些特殊用途的工具, 日益得到广泛的应用. 在机械制造业中最广泛使用的是冲压模具, 随着工业生产的发 展对模具钢性能提出了更高的要求, 从而使模具的制造费用不断增加. 9CrSi 作为制造模具的合金材料, 其焊接性能较差, 在焊接过程中由于受高温作用焊接接头内部组织遭到破坏, 在焊缝中易形成裂纹、孔洞、夹杂、未焊透等缺陷, 而裂纹是致命性缺陷, 一旦出现, 模具只能报废, 这严重影响了模具的使用寿命. 近年来, 对焊接接头内部的缺陷进行修复以及修复后的疲劳寿命问题一直是人们关注的焦点.

电磁热止裂技术作为一种新兴的非平衡处理技术, 将其应用在焊接领域, 修复带有缺陷的焊接接头具有重要的实际应用价值^[1]. 通过前期工作发现焊接接头电磁热止裂后抗拉强度、抗弯强度、断后伸长率均有所提高, 同时止裂后, 缺陷附近微观组织明显细化, 出现强韧性均好的白亮层组织, 进一步阻止了裂纹的扩展^[2-4]. 文中选用含孔洞缺陷的低合金工具钢 9CrSi 对接焊焊接接头, 旨在分析焊接接头电磁热强化及强化后的疲劳寿命, 对电磁热技术在焊接领域的发展具有重要意义.

1 放电前后应力强度因子分析

1.1 放电瞬间电热应力强度因子

以含球形孔洞缺陷的对接焊焊接接头为例进行分析, 如图 1 所示.

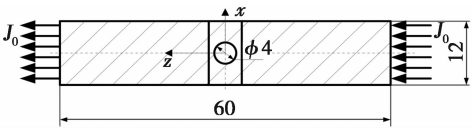


图 1 含球形孔洞缺陷的焊接接头 (mm)
Fig. 1 Welded joint containing spherical void defects

由文献[5]知电流绕圆形孔洞电流密度分布为

$$J_r = -\sigma^* \frac{\partial V}{\partial r} = J_0 \sin\theta \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \tag{1}$$

$$J_\theta = -\sigma^* \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = J_0 \cos\theta \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \tag{2}$$

圆形热源的热源功率为

$$q(r_0, 0, \varphi) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sigma^*} J^2(r_0, 0, \varphi) d\varphi = \frac{8\pi J_0^2}{\sigma^*} \tag{3}$$

由楞次定律知圆形热源上任意一点的热源强度

$$Q = \frac{16\pi^2 J_0^2 r_0}{\sigma^*} \tag{4}$$

式中: J_0 为通入的电流密度; J_θ 为绕流时极坐标下的角分量; J_r 为绕流时极坐标下的径向分量; σ^* 为电导率; V 为电流势函数; r_0 为孔洞缺陷的半径; φ 为点热源 的极角坐标.

由文献[6]可知, 半径为 r_0 的圆形缺陷在点

收稿日期: 2015-04-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105325); 河北省自然科学基金资助项目(E2014203223, E2015203217)

(0, r_0) 处的应力强度因子为

$$K_Q = \frac{qE\alpha_l}{4}\sqrt{\pi r_0}\left(3 + \log \frac{4}{5r_0^2}\right) \tag{5}$$

$$q = -Q/2\pi\lambda \tag{6}$$

式中: λ 为热导率; α_l 为线膨胀系数; q 为点 (0, r_0) 处热源功率; E 为弹性模量.

将式 (4) 和式 (6) 代入式 (5) 得出孔洞缺陷通电瞬间产生的电热应力强度因子为

$$K_Q^T = -\frac{16\pi J_0^2 r_0 E a_l}{2\pi\sigma^* \lambda}\sqrt{\pi r_0}\left(3 + \log \frac{4}{5r_0^2}\right) \tag{7}$$

1.2 焊接残余应力强度因子

焊接的影响,使得内部已存在残余应力的作用,并在缺陷附近引起应力集中,此应力集中引起的应力强度因子即为残余应力强度因子. 残余应力包括由不均匀的热膨胀和热收缩引起的热应力和由组织转变引起的相变应力. 假设在放电过程中残余应力场不发生重分布,且残余应力的分布函数为 $\sigma(x)$. 对于平板对接焊缝,其残余应力分布形式为^[7]

$$\sigma(x) = \sigma_0(1 - x^2)/(1 + x^4) \tag{8}$$

式中: σ_0 为焊缝中心线处的残余应力最大值. 对于孔洞缺陷的焊接接头,由残余应力引起的应力强度因子可由权函数方法获得. 残余应力强度因子为^[8]

$$K_r = \int_0^{r_0} h(x, a) \sigma(x) dx \tag{9}$$

式中: $h(x, a)$ 为权函数. 如果纵向残余应力关于焊缝中心对称分布,且在板厚方向皆相同,则

$$K_r = \frac{1}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^{r_0} \frac{\sigma_0(1 - x^2)}{(1 + x^4) \sqrt{1 - (x/r_0)^2}} dx \tag{10}$$

1.3 综合应力强度因子

均匀外载荷拉应力作用下产生的机械载荷强度因子表达式为

$$K_T = 2\delta \sqrt{\frac{r_0}{\pi}} \tag{11}$$

在弹性条件下,电热应力引起的应力强度因子、外载荷引起的应力强度因子和焊接残余应力引起的应力强度因子的线性叠加构成断裂驱动力. 综合应力强度因子为

$$K = -\frac{16\pi J_0^2 r_0 E a_l}{2\pi\sigma^* \lambda} \sqrt{\pi r_0}\left(3 + \log \frac{4}{5r_0^2}\right) + 2\delta \sqrt{\frac{r_0}{\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^{r_0} \frac{\sigma_0(1 - x^2)}{(1 + x^4) \sqrt{1 - (x/r_0)^2}} dx \tag{12}$$

式中: δ 为拉伸应力. 从式 (12) 可看出,由放电引起的电热应力强度因子为负,且综合应力强度因子减小,证明试件不会由于放电过程而使缺陷失稳,并且试件会向不利于缺陷扩展的方向转变,使试件焊接接头处缺陷扩展的可能性大大减小^[9].

2 放电强化试验

2.1 理论依据

孔洞缺陷可处理成广义埋藏裂纹缺陷,应用放电强化是可行的. 在向含孔洞缺陷的焊接接头中通入强脉冲电流时,在球形截面上形成绕流现象,在欧姆效应作用下产生了大量焦耳热,温升瞬间超过材料熔点,冷却后形成焊口,并且其周围发生有利于提高金属性能的组织变化,达到强化的效果.

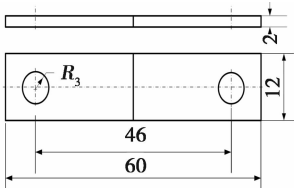
2.2 试样的制备

选取低合金工具钢 9CrSi 材料,加工试件尺寸如图 2 所示,对接焊,不开坡口,焊后缓冷至室温. 所有试件均为氩弧焊焊接且焊接工艺相同,焊后不进行热处理. 焊前对试件表面进行打磨处理以消除线切割痕迹,减少加工划痕对放电效果的影响.

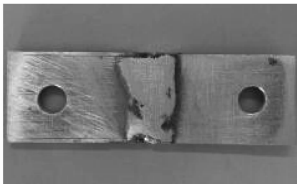
表 1 9CrSi 的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 9CrSi

Cu	Si	Mn	Cr	P	S
0.90	1.50	0.50	1.10	0.025	0.025



(a) 焊接件尺寸



(b) 焊接接头

图 2 9CrSi 焊接接头 (mm)

Fig. 2 9CrSi welded joint

2.3 试验方案与设备

采用 TZ-2H 超声波探伤仪对焊后试件进行探伤. 根据探伤图,选出含孔洞缺陷的试件若干,分成 A、B、C 三组. A 组试件 15 个分成五组,放电电压分别为 4.5、5、5.5、6 和 6.5 kV,探究放电电压的最优值, B 组试件 5 个进行同一电压下放电强化试验,放电电压为 5.5 kV, C 组 5 个试件不进行强化试验. 强化试验是在自制的 ZL-2 型超强脉冲电流发生装置上完成的,其工作原理如图 3 所示. 放电时间约为 25 μ s,脉冲放电电流的波形如图 4. 试件经脉冲放电后,焊接接头部分温度非常高,而基体部分的温度几乎不变,这由于在脉冲放电瞬间,电流在焊接接头内部缺陷处产生绕流现象,使得缺陷周围电流密度集中,在电热效应的作用下产生大量焦耳热.

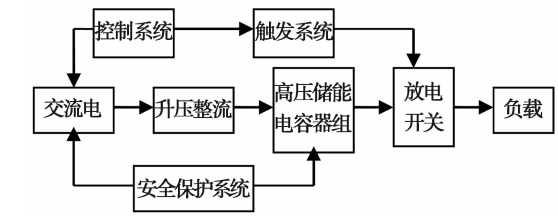


图 3 高压脉冲装置工作原理

Fig. 3 Working principle of high voltage pulse device

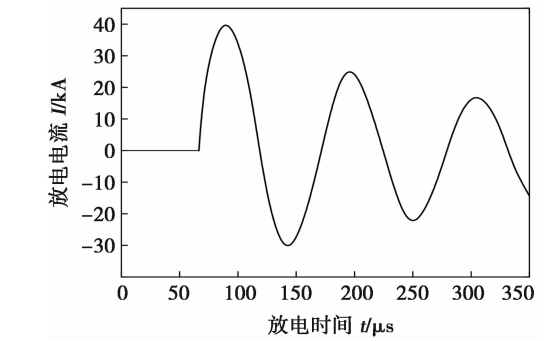


图 4 脉冲电流波形

Fig. 4 Pulse current waveform

3 疲劳寿命测试

3.1 疲劳试验及设备

试验所用试件为经放电强化的 A 组、B 组和未经强化的 C 组,试验中加载方式为三点弯曲,试件加载示意图如图 5。加载频率为 6 Hz,加载应力为 20 MPa,应力比 $R=0$,试验环境为静态空气介质。疲劳试验条件相同,以试件断裂时的循环周次作为接头的疲劳寿命。图 6 为疲劳裂纹宏观形貌。

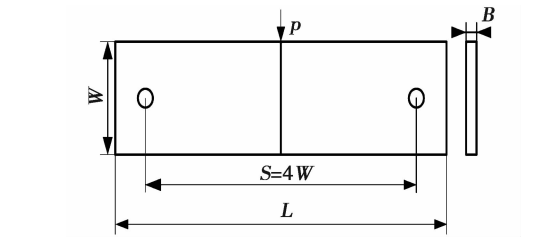


图 5 三点弯曲加载示意图

Fig. 5 Loading diagram of three point bending

3.2 疲劳试验数据分析

根据得到的寿命数据,求得不同电压下试件平均疲劳寿命,绘制柱状图如图 7 所示。分析可得,放电电压存在最优值,当脉冲电压为 5.5 kV 时,接头的疲劳寿命最高,超过或低于该值时焊接试件的疲劳寿命均有不同程度的下降。

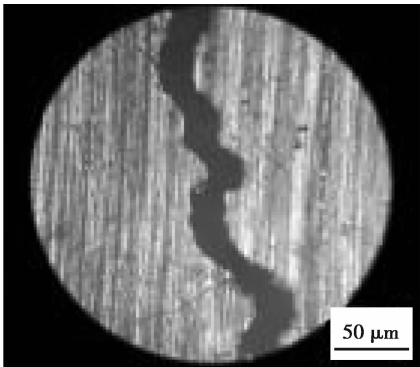


图 6 疲劳裂纹宏观形貌

Fig. 6 Macro morphology of fatigue crack

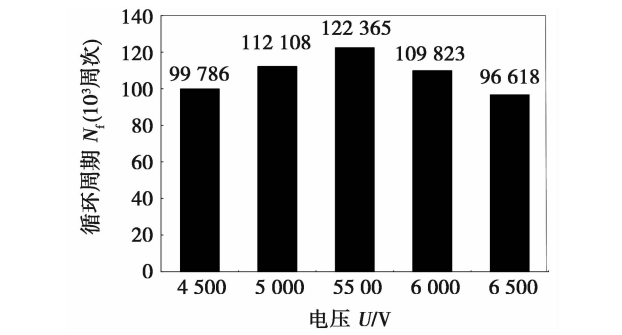


图 7 不同放电电压下 9GrSi 试件平均疲劳寿命

Fig. 7 Average fatigue life of 9GrSi specimen under different discharge voltage

对 B、C 两组焊接试件进行疲劳性能对比试验,结果如表 2 所示。由于试验试件数目及试验条件的限制,很难对 9CrSi 焊接接头的疲劳寿命进行准确的定量分析,在这里仅作定性分析。

表 2 强化前后焊接接头疲劳寿命 N_f (周次)			
Table 2 Fatigue life of the welded joints			
试件编号	疲劳寿命 N_f (周次)		寿命提高率 C (%)
	强化前 (C)	强化后 (B)	
1	104 494	125 360	19.97
2	107 896	119 837	11.07
3	112 398	124 768	11.01
4	108 349	129 637	19.65
5	98 395	112 903	14.74
平均	106 306	122 501	15.23

分析得出,强化后试件的疲劳寿命均比未经放电强化的试件高,每组均提高 10% 以上;经放电强化试件的平均疲劳寿命比未经强化试件平均寿命提高了 15.23%,表明试件经脉冲放电后,接头的疲劳寿命有所提高,接头的疲劳强度得到改善。

4 接头疲劳寿命影响机理

综合第一部分理论分析及第三部分的疲劳寿命试验结果可知:由于强脉冲电流使缺陷附近产生负的应力强度因子,削弱了缺陷扩展的驱动力,从而改善焊接接头的疲劳强度且有效提高焊接接头的疲劳寿命,同时也说明了负的应力强度因子可以抑制缺陷的扩展,提高疲劳寿命。

向带有缺陷的焊接接头中通入强脉冲电流时,由于缺陷附近的电流绕流集中效应,在焊接接头的热影响区发生了超高速的冲击淬火,使焊接缺陷处的组织晶粒细化,晶粒细化可以提高金属的微量塑性抗力,使塑性变形均匀分布,因而会延缓疲劳裂纹的形成,从而提高了焊接接头的疲劳强度,同时经脉冲电流处理使位错运动的阻力减小,材料中储存的弹性应变能被释放出来,消除或减小了残余应力,因此认为试件损伤向有利于材料性能的方向发展^[10]。另一方面脉冲电流形成的电动力促使金属内部损伤处的晶粒克服畸变处阻力,向恢复原位运动,使畸变缓解或者消失,从而使损伤愈合。当畸变不能回复原位时则在损伤处形成焊口,遏制损伤的扩展,提高了疲劳寿命^[11]。

5 结 论

(1) 理论分析部分推导出了脉冲放电瞬间裂纹尖端的综合应力强度因子,表明由脉冲放电引起的电热应力强度因子为负值,削弱了试件断裂的驱动力,从而提高焊接接头的疲劳寿命。

(2) 不同放电电压条件下的寿命试验分析表明,放电电压对疲劳寿命的影响存在最优值,含孔洞缺陷的 9CrSi 焊接接头的最佳放电强化电压为 5.5 kV。

(3) 9CrSi 试件经 5.5 kV 电压放电强化后,焊接接头的平均寿命达到最大值,比未强化试件提高了 10% 以上,有效地改善了焊接接头的疲劳强度。

参考文献:

- [1] 付宇明, 柴 璇, 郑丽娟, 等. 2Cr13 焊接构件埋藏裂纹电磁热止裂及力学性能强化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 58–63.
- Fu Yuming, Chai Xuan, Zheng Lijuan, *et al.* Electromagnetic thermal crack arrest and mechanical properties of 2Cr13 welded components with spatially embedding cracks[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 58–63.

- [2] 郑丽娟, 向 龙, 刘会莹, 等. 异种钢焊接接头脉冲放电强化与力学性能分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1492–1495.
- Zheng Lijuan, Xiang Long, Liu Huiying, *et al.* Pulse current discharge for strengthening welded joints of dissimilar steel and analysis of mechanical properties[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1492–1495.
- [3] 付宇明, 郑丽娟, 何大川, 等. 45 钢焊接接头电磁热强化及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 5–8.
- Fu Yuming, Zheng Lijuan, He Dachuan, *et al.* Strengthening of welded joint of 45 steel by electromagnetic heat effect and mechanical its performance analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 5–8.
- [4] 张洪潮, 于 静, 郝胜智, 等. 电磁场的热效应在再制造毛坯裂纹止裂中的应用[J]. 中国机械工程, 2013, 49(7): 21–28.
- Zhang Hongchao, Yu Jing, Hao Shengzhi, *et al.* Application of electromagnetic heat effect on arresting the crack in remanufacturing blank[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 21–28.
- [5] 郑丽娟, 周红梅, 刘会莹, 等. 含埋藏孔洞缺陷金属构件电磁热止裂强化分析[J]. 中国机械工程, 2012, 11(23): 1285–1288.
- Zheng Lijuan, Zhou Hongmei, Liu Huiying, *et al.* Analysis on crack arresting and strengthening of metal structures embedding hole defects using electromagnetic heating[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 11(23): 1285–1288.
- [6] Zhang X Z, Hasebe N. Basic singular thermoelastic solutions for a crack[J]. International Journal of Fracture, 1993, 62(2): 97–118.
- [7] Terada H. Stress intensity factor analysis and fatigue behavior of a crack in the residual stress field of welding[J]. Journal of ASTM International, 2005, 2(5): 107–117.
- [8] 瞿伟廉, 何 杰, 陈 波. 对接焊缝残余应力强度因子对疲劳裂纹扩展的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 116–119.
- Qu Weilian, He Jie, Chen Bo. Influences of welding residual stresses on fatigue crack growth of butt weld plate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 116–119.
- [9] Shi Haifang, Zhang Weiqiang. Effects of electromagnetic stirring on microstructures of solidified aluminum alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(5): 1171–1174.
- [10] 王景鹏, 贺笑春, 王宝全, 等. 脉冲电流作用下 40Cr 钢淬火残余应力的消除[J]. 材料研究学报, 2007, 11(1): 267–269.
- Wang Jingpeng, He Xiaochun, Wang Baoquan, *et al.* Residual stress release in quenched 40Cr steel under electro pulsing[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 11(1): 267–269.
- [11] 杨文智. 45#钢试件疲劳损伤电热修复的试验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.

作者简介: 付宇明, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事电磁热止裂强化技术的研究。发表论文 90 余篇。
Email: mec9@ysu.edu.cn