

脉冲闪光对焊技术在高强环链生产中的应用

高杰¹, 王娟¹, 李亚江¹, 张占峰², 李行²

(1. 山东大学, 济南 250061; 2. 山东金恒力机械制造有限公司, 山东 泰安 271208)

摘要: 环链因其承载能力大、工作可靠、拆装方便并具有优良的传动性能, 因此被广泛用于矿山机械、海洋船舶和军事舰艇等。近年来, 随着海洋装备和煤矿机械的发展对环链的高强度和高韧性提出更高要求, 其焊接技术的发展和工艺水平也逐渐提高。闪光对焊作为一种高效、适用性强的固相焊接方法已被用于环链生产中。针对高强环链的结构特点, 总结了环链脉冲闪光对焊的工艺特点, 阐述了环链用钢材焊接技术的发展, 高强环链闪光对焊工艺及环链焊接缺陷与质量控制的研究现状, 展望了高强环链焊接的发展方向。

关键词: 闪光对焊; 环链; 高强钢

中图分类号: TG453

0 前言

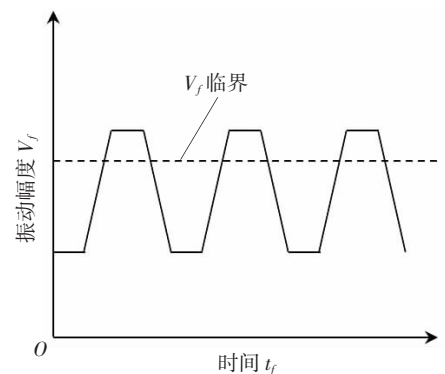
环链具有承载能力大、工作可靠、拆装方便、传动性能优良等特点, 被广泛用于矿山机械、海洋船舶和军事舰艇等。随着工程机械向高性能和大型化发展, 与之配套的环链规格和强度也在相应的增加^[1], 环链焊接技术也在不断地提高。

闪光对焊技术作为一种电阻焊方法被广泛用于机电、建筑、铁路、石油钻探和冶金工业等方面^[2]。其焊接热效率高, 接头质量好, 适用于碳钢、合金钢、不锈钢、铜及铜合金和钛及钛合金等多种金属的焊接, 对于复杂截面的焊接更具有其独特的优势, 非常适用于环链生产。然而传统的闪光对焊闪光过程中飞溅较多, 造成能量损失较高, 工人工作环境恶劣, 脉冲闪光对焊技术的发展很好地弥补了这些缺陷。国内的闪光对焊技术发展较晚, 高强度和大截面环链的高质量焊接技术落后, 抓住脉冲闪光对焊技术的发展趋势, 实现技术水平的较大提升对于高强环链生产有重要意义。文中总结了环链脉冲闪光对焊工艺特点, 环链用钢材的发展, 高强环链闪光对焊工艺及环链焊接缺陷与质量控制, 展望了高强环链焊接的发展方向。

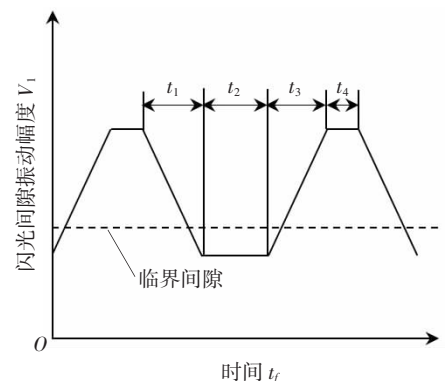
1 环链脉冲闪光对焊工艺特点

闪光对焊是将焊件在通电状态下相互靠近达到局部接触, 产生闪光, 短时间产生大量电阻热, 熔化触点,

加热附近区域, 在达到预定温度时通过快速施加顶锻力, 使高温金属产生塑性变形实现焊接的过程。脉冲闪光对焊与传统闪光对焊相比, 在工件送进的基础上叠加了一个往复振动, 使工件以脉冲方式送进^[3], 振动叠加行程如图 1a 所示。在闪光阶段, 由于叠加振动的影响, 触点被强行拉断, 此过程发生在图 1b 所示



(a) 叠加振动行程



(b) 闪光间隙的周期性变化

图 1 脉冲闪光对焊过程

收稿日期: 2019-02-26

doi:10.12073/j.hj.20190226002

t_3 阶段,因此不会产生液态过梁的爆断,有效的避免了因爆断产生的表面凹凸不平\加热不均匀和金属的飞溅等缺陷。从而使热效率显著提高,低功率高效地获得稳定的焊接接头。

环链闪光焊是指将链环编结成环状,在链环直臂中留下小间隙,链环肩部通以电流并使其待焊端面接近,经过闪光→顶锻→保压过程实现接头的焊接。环链具有特殊的结构和尺寸,一是在单口环链焊接时会产生环背分流,环背分流的产生会消耗功率,环链焊接相比直线型工件需要更高功率;环背分流产生的磁场会引起飞溅金属的偏转,加热会产生不均匀性,而脉冲闪光对焊大大减少了飞溅金属,因此对于环链焊接有其独特的优势。二是因为环链形状影响

会产生回弹抗力,所以与直线型工件相比需要更大的顶锻力,并需要延长保压时间。脉冲闪光对焊由于其加热的高效率,环背温度往往较低,因此与传统闪光对焊相比需要更大的顶锻力和更长的保压时间。

2 环链用钢材的发展

环链一般分为矿用圆环链和锚链,其中锚链又分为船用锚链和海洋系泊链,由于其服役环境不同,规格性能各有差异。其中 GB/T 12718—2009《矿用高强度圆环链》规定了 B,C,D 三个等级,GB/T 549—2017《电焊锚链》在 M1,M2,M3 的基础上,补充了 M4 级。矿用圆环链及电焊锚链的力学性能见表 1。

表 1 矿用圆环链及电焊锚链的力学性能

种类	级别	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	V 形缺口冲击试验	
				温度 T /℃	平均冲击吸收能量 KV_2 /J
矿用 圆环链	B	630	≥ 12	20	≥ 15
	C	800	≥ 12	20	≥ 15
	D	1 000	≥ 12	—	—
电焊锚链	M1	370 ~ 490	≥ 25	—	—
	M2	490 ~ 690	≥ 22	0	≥ 27
				0	≥ 60 (母材)
	M3	690	≥ 17	≥ -20	≥ 50 (焊缝)
					≥ 35 (母材)
					≥ 27 (焊缝)
					≥ 45 (母材)
	M4	770	≥ 12	- 20	≥ 33 (焊缝)

B 级圆环链钢材主要为 20Mn2,20MnVK 等,由于其强度性能低,正在逐渐的被淘汰,目前,C 级圆环链是市场的主流。国际上通常以 Mn-Ni-Cr-Mo 系钢作为 C 级矿用圆环链用钢,但是由于 Ni,Mo 贵金属的价格较高,部分钢材轧制后必须进行退火处理,为了减少成本,实现国产化,国内开发了 25MnVK 钢种。由于 25MnVK 淬透性差,大规格环链中容易在心部产生非马氏体组织,因此大部分小规格环链采用 25MnVK 钢,大规格环链采用 23MnNiMoCr54 钢制造。为了实现代替 23MnNiMoCr54 钢,文献[4]以 Mn,Mo 为主,进行 Nb 微合金化,细化热轧时的奥氏体晶粒,并添加少量的 Cr 保证钢的淬透性,开发了一种无需轧后退火的新型

低成本 Mn-Mo 系低碳马氏体钢,其拉伸性能、疲劳性能和冲击韧性均优于国家标准。最新的 GB/T 10560—2017《矿用焊接圆环链用钢》替代了先前 GB/T 10500—2008《矿用焊接圆环链用钢》,增加了 15CrNi6K, 20MnNiCrMo32K, 20NiCrMo33K, 23MnNiCrMo53K 等钢种,代表国内圆环链用钢逐渐与国际接轨的同时也不断开发国产钢种,实现不同强度梯度的完整性。

船锚用钢多为 CM490 和 CM690,可以达到 M2 与 M3 级标准,而主要应用于深海海洋工程系泊系统的高端系泊链用钢,市场更为广阔,其发展更为迅速。矿用钢材和系列环链用钢材的化学成分见表 2。从表中可以看出,矿用钢材和系列环链用钢材部分牌号有相近的化学

成分,从 R3 级别到 R5 级别,钢材 C 元素含量降低以提高其塑韧性,Mn 元素含量降低保证其回火韧性,在不超

过 2% 的范围内增加 Cr 元素,提升强度的同时保证韧性,同时避免损害其高温回火韧性。在严格控制 S,P 等有害元素含量的同时,调控 C,Mn,Cr,Mo 元素的含量,并辅

表 2 矿用钢材和系列环链用钢材的化学成分

类别	牌号	化学成分(质量分数,%)							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
矿用	20Mn2	0.17~0.24	0.17~0.37	1.40~1.80	—	—	—	≤0.030	≤0.030
	20NiCrMo	0.17~0.23	≤0.25	0.60~0.90	0.35~0.65	0.15~0.25	0.40~0.70	≤0.020	≤0.015
	20MnNiCrMo32	0.17~0.23	≤0.25	0.70~1.00	0.40~0.60	0.15~0.25	0.40~0.70		
	23MnNiMoCr54	0.20~0.26	≤0.25	1.10~1.40	0.40~0.60	0.50~0.60	0.90~1.10	≤0.015	≤0.012
系泊链用	R3(30Mn2)	0.25~0.35	0.15~0.35	1.40~1.90	≤0.60	≤0.20	≤0.30	≤0.025	≤0.025
	R3S(25MnCrMo)	0.20~0.30	0.15~0.30	1.20~1.75	≤0.80	≤0.50	≤0.70	≤0.025	≤0.025
	R4(23MnNiCrMo)	0.18~0.28	0.15~0.30	1.20~1.75	0.40~1.30	0.20~0.60	0.40~1.40	≤0.025	≤0.025
	R4S(21MnNiCrMo)	0.16~0.26	0.15~0.30	1.20~1.75	0.40~1.30	0.20~0.60	0.40~1.40	≤0.025	≤0.025
	R5(21Cr2NiMo)	0.16~0.26	0.15~0.30	0.70~1.75	1.20~2.00	0.20~0.60	0.50~1.40	≤0.025	≤0.025

3 高强环链闪光对焊工艺

闪光对焊生产的环链,不同规格的环链需要不同的编链及焊接工艺,目前国内主要有三种圆环链编链及焊接工艺:手工编链+冷态焊接、自动加热编链+冷态焊接、自动加热编链+热态焊接。手工编链+冷态焊接适用于尺寸规格较小,对性能要求不高的环链生产,随着环链强度规格提升,不可避免地需要加热来保证

其加工性能和焊接性。环链闪光对焊作为多参数影响的不连续过程,每个焊接参数都会对接头的成形和力学性能产生重要影响。国内外学者通过试验和理论相结合的方法,研究了各个参数对环链接头性能的影响。对于闪光过程来说,闪光长度不足或闪光速度太快时无法形成足够的液态金属,塑性区不足影响顶锻过程;二次空载电压过小,会使闪光过程不稳定,造成短路,过大会产

生较深的火口,顶锻时不能完全闭合。对于顶锻过程来说,顶锻量或顶锻压力较小时液态金属不能完全被挤出,容易残留在焊缝中形成铸态组织,影响接头的硬度和抗拉强度。Cetinkaya Cemil 等人^[5]对链条用钢 16MnCr5 进行闪光对焊试验,重点研究了顶锻压力对接头组织和力学性能的影响,环链直径为 18 mm,随着顶锻压力从 0.2 MPa 提升到 0.25 MPa 再到 0.3 MPa,接头中心区域硬度分别为 298 HV,330 HV,344 HV,接头的抗拉强度也从 670 MPa 提升到 698 MPa。在大规格环链上也表现出相近的规律,文献[6]通过控制单一变量研究了焊接参数对 R5 系泊链性能的影响,环链直径为 84 mm,顶锻量从 16 mm 增加到 23 mm,接头抗拉强度先增加后下降,在 19 mm 时取得最佳的抗拉强度。并且发现相同规格环链,更高级别产品需要更大的焊接参数,R5 系泊链钢和 R4 系泊链钢焊接参数对照见表 3。

表 3 R5 系泊链钢和 R4 系泊链钢焊接参数对照

规格	级别	烧化量 L_1/mm	顶锻量 L_2/mm	焊接速度 $v_f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	二次空载电压 U/V
φ84	R4	14	18	1.8	12.8
φ84	R5	16	19	1.8	12.8

同时,高强度焊接接头要保证其韧性,需要辅以配套的焊前焊后处理工艺,通过热循环或机械作用改变组织形态,使焊接接头获得所需的力学性能。Yasutomo Ichiyama 等人^[7]研究了高强钢闪光对焊两大难题:焊接裂纹的控制和焊缝韧性的改善。发现通过增加顶锻长度和施加焊前预热可以有效的控制焊接裂纹,三者的相对关系如图 2 所示。在闪光对焊过程中采用大的顶锻电流有利于氧化物夹杂的挤出,可以有效的提高焊缝的韧性,焊缝形貌对比如图 3 所示。

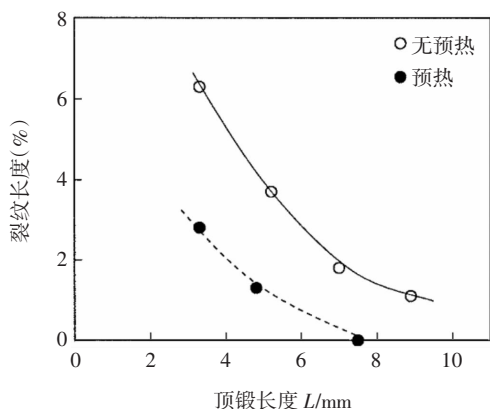


图2 预热和顶锻长度对裂纹长度的影响

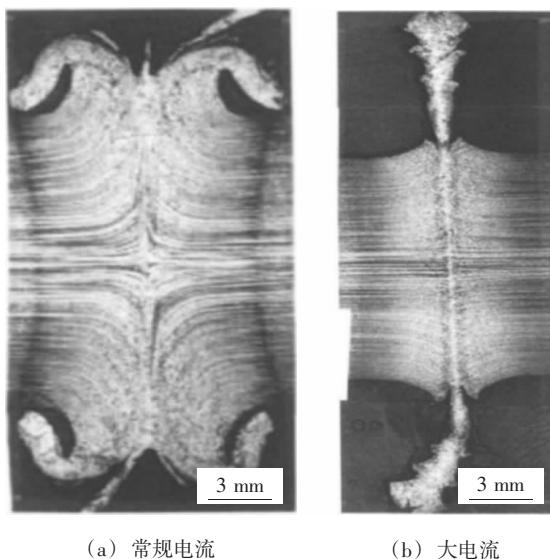


图3 环链闪光对焊焊缝的截面示意

除了焊前预热可以有效的控制裂纹的生成外,焊后热处理也可以有效的改善接头的塑韧性,避免产生淬硬组织,减少裂纹的生成倾向。原晓波^[8]分析了 M20Mn2 钢圆环链闪光对焊后热处理对组织性能的影响,锚链经连续式调质炉处理后,当淬

火冷却速度慢时,形成上贝氏体和 M-A 组元,损害接头的塑韧性。应该提高炉温,减少运行时间,抑制淬火中间产物和 M-A 组元的析出和数量,改善韧性。

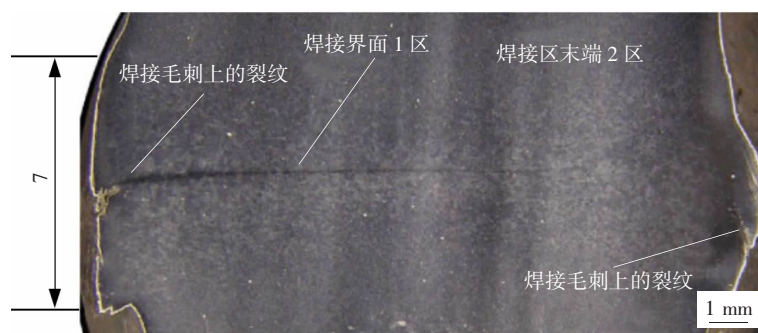
4 环链焊接质量控制

环链焊接接头因为加热冷却的高速度,闪光对焊挤压塑性变形的不均匀性,焊后挤出飞边引起应力集中等问题会成为薄弱环节。环链作为特殊的传动结构,每一环的焊接接头质量都会影响整根链条的性能。所以研究环链失效原因对于调整焊接工艺,保证焊接接头质量和高强环链的性能有重要意义。

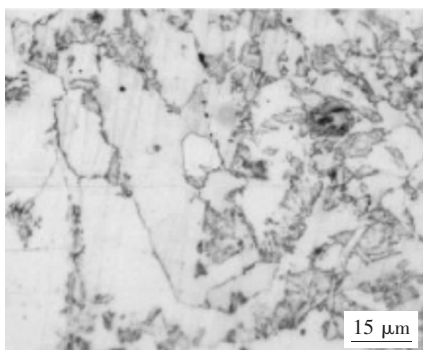
焊接接头出现铸态组织会大大削弱接头的性能,铸态组织出现的主要原因为二次空载电压过低、闪光速度过大、顶锻留量过小和顶锻力过小,残余液态金属不能完全被挤出而形成残留的铸态组织。Debashis Ghosh 等人^[9]研究了闪光对焊焊接的煤矿罐笼环链失效的原因,环链直径为 $\phi 32$ mm,属于中型环链。结果表明,由于焊接顶锻过程参数不当,使焊缝存在脱碳区和线性分布的夹杂,使接头的硬度和韧性下降,造成脆性断裂。而对于大规格的环链,同样存在液态金属挤出不足的问题,Sridhar Idapalapatia 等人^[10]对服役中的锚链失效原因进行了研究,环链直径为 73 mm,发现在断面存在三种区域,对其中区域分析发现,表面存在与油漆相近的化学成分,表明焊接后有裂纹存在,分析是闪光对焊参数不当引起的夹杂和脱碳造成的,另外焊接产生的毛刺会产生应力集中而引起裂纹。

Khaled Al-Fadhalah 等人对闪光对焊的车辆拖拽用 80 级环链失效进行了研究,失效原因主要由于焊接接头组织的不均匀性,如图 4 所示。焊接接头存在内部裂纹和外部裂纹,焊缝中心韧性断裂,外周脆性断裂。其中钢材的 Ni, Cr 和 Mo 含量不达标,使淬透性降低,焊后毛刺不去除,使用过程中载荷过大和腐蚀是造成断裂的主要原因。

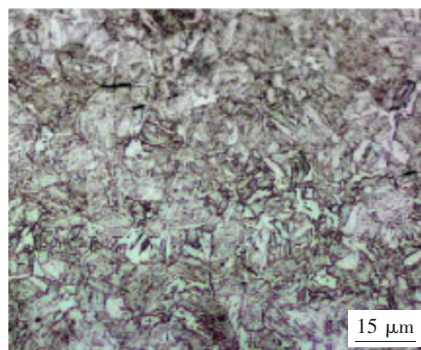
通过对环链的失效分析表明,无论对于何种规格的环链,顶锻量和顶锻压力要足够挤出残余液态金属,避免铸态组织的生成;焊后产生的毛刺必须去除,避免产生应力集中。此外,除焊接工艺的不当外,钢材生产过程合金元素控制不当,环链使用过程中操作不当而引起载荷异常,都会引起环链的失效。



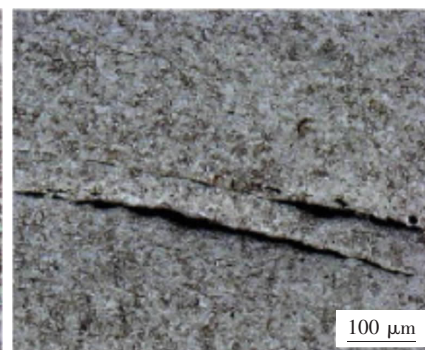
(a) 接头区特征



(b) 1区焊缝组织



(c) 2区淬火和回火马氏体组织



(d) 焊缝区域内部裂纹

图4 环链闪光对焊焊缝显微组织

5 结语

环链闪光对焊作为一种高效、适用性强的焊接方式,在海洋工程和煤矿机械等领域得到应用。高强度环链因其独特的传动结构对于国内舰艇、远洋船舶的发展有重要意义。实现环链闪光焊接过程在线控制、智能化和自动化,建立焊接参数与尺寸规格的优化选择关系,开发高效的脉冲闪光焊接方法,完善焊前焊后处理工艺,对于实现环链生产向大规格和高性能发展有重要意义。

参考文献

- [1] 王洪飞, 郜永花. 26 × 92 矿用高强度圆环链工艺探讨[J]. 科技创新与应用, 2014(27): 47 - 48.
- [2] 冯秋元, 李廷举, 丁志敏, 等. 闪光对焊技术研究现状及发展趋势[J]. 材料科学与工艺, 2008(1): 49 - 53.
- [3] 邹良甫, 张小路, 高成钢. 预热闪光焊与脉动闪光焊工艺比较[J]. 焊接, 2014(4): 64 - 66.
- [4] Wang Baoqi, Feng Wenchao, Guan Qin, et al. Development of new kind of steel for high strength round chain of grade C for mining[J]. Iron and Steel, 2010, 45(5): 76 - 80.
- [5] Cetinkaya Cemil, Arabaci Ugur. Flash butt welding applica-

tion on 16MnCr5 chain steel and investigations of mechanical properties[J]. Materials and Design, 2006, 27(10): 1187 - 1195.

- [6] 李剑, 张卫新, 朱桥良, 等. 超高强度 R5 系泊链焊接参数的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(13): 106 - 109.
- [7] Yasutomo Ichiyama, Shinji Kodama. Flash-butt welding of high strength steels[J]. Nippon Steel Technical Report, 2007(95): 81 - 87.
- [8] 原晓波. 改善船用锚链闪光焊接头组织和性能的研究[J]. 武汉造船, 2001(3): 17 - 20.
- [9] Debashis Ghosh, Shamik Dutta, Awdhesh Kumar Shukla, et al. Failure investigation of a cage suspension gear chain used in coal mines[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2015, 97(2): 1 - 8.
- [10] Sridhar Idapalapatia, Alfred R Akisanya, Kelvin K M Loh, et al. Failure analysis of a failed anchor chain link[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 89: 258 - 270.

第一作者简介: 高杰, 1995 年出生, 硕士; 主要从事高强钢焊接方向的研究。

通讯作者简介: 王娟, 1977 年出生, 博士, 教授; 主要从事先进材料及特种焊接技术方向的研究, 已发表论文 30 余篇。