

介质长度对钢轨-高锰钢辙叉闪光焊接头性能影响的研究

李威, 张志国, 王振伟, 王建轩, 孙晓旭

中铁山桥集团有限公司 河北秦皇岛 066205

摘要: 为了探究奥氏体不锈钢介质的长度对钢轨-高锰钢辙叉闪光焊接头性能的影响, 以不同介质长度的闪光焊接头为研究对象, 通过采取力学性能试验、金相显微镜与扫描电镜观察等手段对钢轨-高锰钢辙叉闪光焊接头力学性能和微观组织进行分析。结果表明: 闪光焊接头的抗拉强度与介质长度呈现出负相关的趋势, 冲击吸收能量与介质长度呈现出正相关的趋势; 不同介质长度闪光焊接头在焊接过程中受到的热冲击与顶锻效果存在区别, 介质长度更短的接头受到的影响相对更加严重, 从而导致了介质区域的组织形貌特征差异。

关键词: 闪光焊; 奥氏体不锈钢介质; 力学性能; 微观组织

Study on the influence of length of welding insert on the performance of flash welding joint of rail steel-high manganese steel frog

LI Wei, ZHANG Zhiguo, WANG Zhenwei, WANG Jianxuan, SUN Xiaoxu

China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

Abstract: In order to explore the influence of length of austenitic stainless steel welding insert on the flash welding performance of rail steel-high manganese steel frog, taking the flash welded joints with different insert lengths as the research objects, the mechanical properties and microstructure of the rail steel-high manganese steel frog flash welded joints were analyzed by means of mechanical property tests, metallographic tests, electron microscope observation and other methods. The results show that the tensile strength of the flash welded joints presents a negative correlation trend with the post-welding length of the insert, while the impact absorption energy presents a positive correlation trend with the post-welding length of the insert. There are differences in the thermal impact and upsetting force received by the flash welded joints with different insert lengths during the welding process. The joints with a shorter insert length are relatively more severely affected, resulting in differences in the microstructure morphology characteristics of the insert area.

Keywords: flash welding; austenitic stainless steel insert; mechanical properties; microstructure

第一作者: 李威, 工程师, 从事道岔焊接工艺与加工工艺方面的研究工作, E-mail: liwei607@163.com。

1 序言

道岔是一种使机车车辆从一股道转入到另一股道的连接设备，既是诸多铁路基础设施中的关键环节，也是薄弱环节。近年来，随着我国铁路运输向高速化、重载化方向发展，无缝化铁路已经成为主流趋势，辙叉与钢轨的焊接也随之成为实现无缝化的关键技术。

高锰钢辙叉与高碳钢钢轨两种材料在化学成分、显微组织、物理性能方面存在较大差异。高锰钢辙叉的材料为ZGMn13，组织为单相奥氏体，其高温下的线膨胀系数是碳素钢的2倍，且在热影响区停留时间过长容易导致碳化物析出，严重降低材料的冲击韧度与抗拉强度，因此在焊接过程中要控制热输入量，加快冷却速度^[1, 2]；钢轨材料为U71Mn钢，组织以珠光体为主，冷却速度过快会导致马氏体组织的生成，造成材料塑性下降，因此焊后要求

缓冷^[3]。基于上述材料特性可知，高锰钢辙叉与高碳钢钢轨难以实现直接的焊接，在焊接过程中需要加入性能介于二者之间的不锈钢材料作为介质来实现连接，利用闪光对焊的方式将二者焊接在一起^[4, 5]。不锈钢介质为单相奥氏体组织，其性能对焊接过程中的热量十分敏感，而介质的长度对于焊接接头区域的热传导具有重要影响，进而影响接头的性能。本文通过采用多种长度不锈钢介质进行焊接试验，比较对应的接头性能，从而判定介质长度对钢轨-高锰钢闪光焊接头性能的影响，最终选择出较为合适的介质长度应用到生产过程之中。

2 试验方法

2.1 原材料及试件制备

闪光焊接头试件采用U71Mn钢轨和ZGMn13高锰钢辙叉，介质采用单相奥氏体不锈钢，3种材料的化学成分和力学性能见表1。

表1 3种材料的化学成分和力学性能

材料	化学成分（质量分数，%）								力学性能		
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	抗拉强度 /MPa	冲击吸收能量 KU ₂ /J	硬度 HBW
钢轨	0.60~0.80	—	≤0.10	≤0.02	0.70~1.20	0.15~0.58	≤0.025	≤0.025	≥880	—	260~300
高锰钢	1.0~1.3	—	—	—	12.0~14.0	0.30~0.80	≤0.04	≤0.03	≥735	≥118	≤229
不锈钢 介质	0.07~0.10	17.0~19.0	9.0~11.0	1.5~2.0	4.0~5.0	≤0.3	≤0.02	≤0.01	≥580	≥160	≥160

分别采用35mm、40mm、45mm、50mm、55mm、60mm、65mm共7种不同长度的不锈钢介质进行闪光焊试验，接头形式如图1所示。使用SchlatterGAA100/580型道岔闪光焊机，采用同种焊接参数对不同长度的介质进行焊接，保证顶锻力

与焊接功率一致。在试件焊接过程中参照实际生产流程，首先按试验设定的长度对不锈钢介质进行标记，将U71Mn钢轨与不锈钢介质进行焊接，为了防止钢轨区域冷却速度过快产生马氏体组织，采用焊后空冷的方式将焊接接头冷却至室温，之后按标记

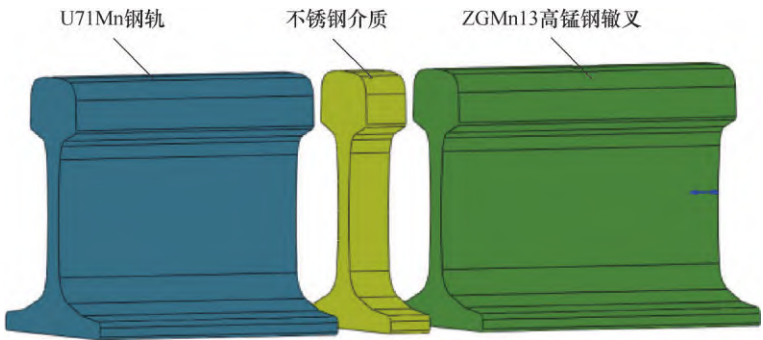


图1 闪光焊接头形式

将对应长度的介质切断并与ZGMn13高锰钢进行焊接，焊后为了防止高锰钢与奥氏体不锈钢介质区域析出过量碳化物，采用远端风冷的方式对焊接接头进行冷却。

2.2 性能测试及组织观察

对焊后试件进行打磨与无损检测，合格后采用电火花线切割分别制备轨头、轨腰、轨底不同区域的试样（拉伸、冲击、金相）。采用万能试验机进行拉伸试验；采用冲击试验机进行常温冲击试验；对金相试样进行打磨抛光，采用质量分数为4%的硝酸酒精腐蚀液对钢轨侧与高锰钢侧进行腐蚀，采用王水腐蚀液对介质进行腐蚀，随后使用OLYMPUS-GX51金相显微镜进行金相分析；采用ZEISS EVO-18扫描电镜进行微观组织观察。

拉伸试验与冲击试验取样方法按TB/T 1632.1—2014《钢轨焊接 第1部分：通用技术条件》规定执行，以介质中心为基准，轨头、轨腰、轨底分别取样。拉伸试样采用圆形横截面，长度为150mm，平行段尺寸为10mm，夹持段尺寸为15mm，标距覆盖焊接接头两侧熔合线及母材；冲击试样为U形切口，长度为55mm，截面为10mm×10mm方形，开口位置设置在介质中心，拉伸试样与冲击试样具体取样位置如图2、图3所示。

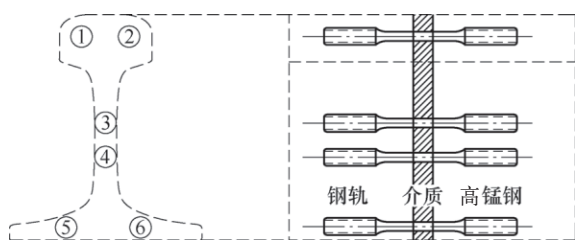


图2 拉伸试样取样位置

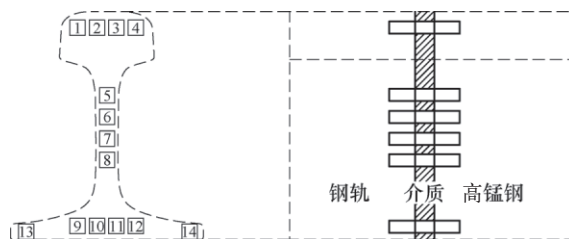


图3 冲击试样取样位置

3 试验结果及分析

3.1 接头金相组织分析

不同长度介质的闪光焊接头结构形式一致，均是由钢轨、不锈钢介质、高锰钢辙叉3部分组成，并通过闪光焊缝相连接，接头的金相组织如图4所示。

U71Mn钢轨的组织为珠光体。在闪光焊过程中，沿钢轨母材至钢轨-介质熔合线所受的热影响逐渐加重，使得钢轨临近熔合线区域的过热区晶粒粗大，其塑性与韧性弱于钢轨母材，由于冷却速度较低，因此钢轨一侧热影响区转变为珠光体，并未出现马氏体组织。钢轨-介质熔合线处在闪光焊接过程中发生了局部熔化，温度升高到液相线以上又迅速冷却，在顶锻力作用下钢轨与介质紧密连接，形成了铁素体-奥氏体层，并在冷却过程中残留了部分 δ -铁素体，聚集在熔合线附近呈黑色链状分布^[6]。不锈钢介质的组织为均匀的奥氏体组织，其晶粒度约为6.5级，在焊接过程中受到高温影响，钢轨-介质熔合线周边的奥氏体发生了重新结晶，其晶粒尺寸明显长大，晶粒度降低至4.5级；介质中部区域由于距离熔合线较远，受到的热冲击较小，因此奥氏体组织仍保留了原有的晶粒形态。ZGMn13高锰钢具有加工硬化的特性，在闪光焊过程中由于顶锻力的影响，高锰钢受到剧烈冲击，原有的奥氏体晶

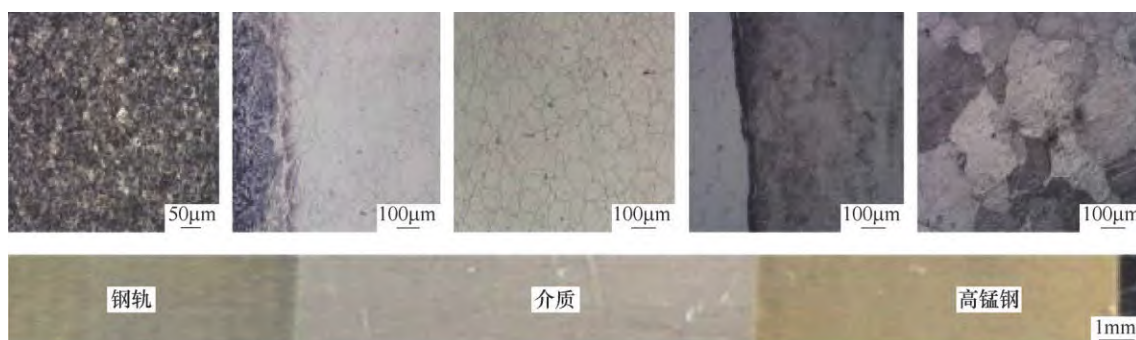


图4 闪光焊接头金相组织

粒内出现了大量的位错和亚结构，发生了动态再结晶，因此使高锰钢的热影响区范围内奥氏体晶粒得到细化^[7]。

由于介质长度差异，不同长度介质的闪光焊接

头在焊接过程中受到的热冲击与力学状态也各不相同，因此造成了介质区域金相组织的差异，以介质长度为35mm、65mm的闪光焊接头为例进行分析，其介质区域电镜形貌如图5所示。

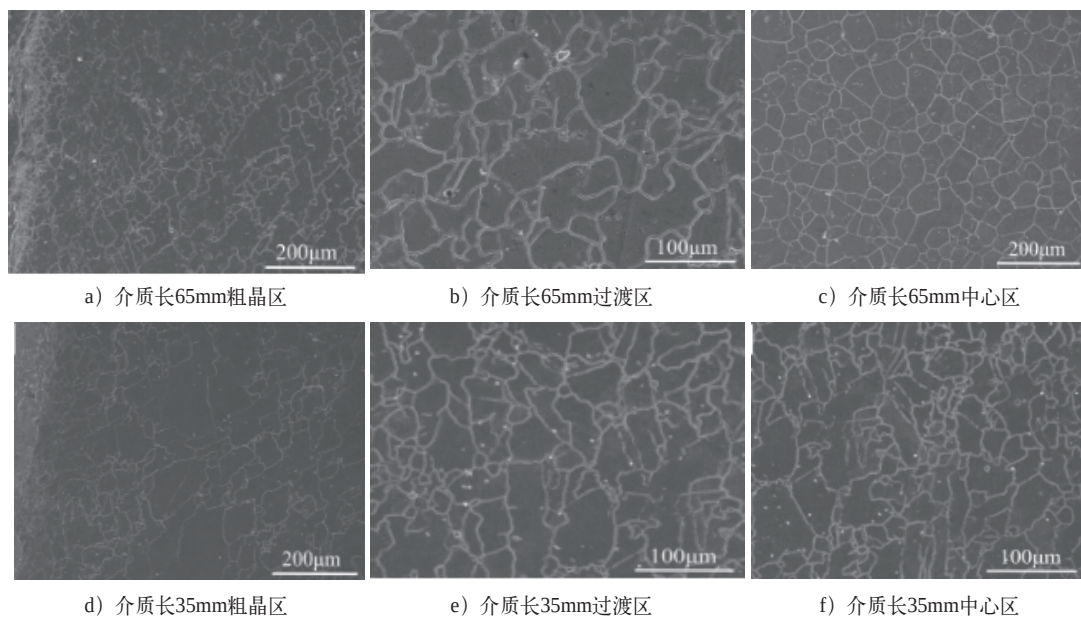


图5 闪光焊接头介质区域电镜形貌

图5a~c所示为介质长度65mm的接头介质区域，其中图5a所示区域为粗晶区域，焊接过程中该区域受到焊接热影响较大，熔化后重新结晶的奥氏体晶粒尺寸较粗大；相邻的区域为过渡区域（见图5b），该区域焊接过程中温度超过了奥氏体化温度，且同时受到顶锻力的影响，部分晶粒发生了动态再结晶，大晶粒向小晶粒的转变较为明显，并出现了位错孪晶结构；图5c所示中心区域则为晶粒均匀的奥氏体区域，该区域距离熔合线较远，未受到较大焊接影响，晶粒尺寸与介质原材料保持一致。图5d~f为介质长度35mm的接头介质区域，该接头介质区域焊后长度较短，介质整体均受到严重的焊接热影响与顶锻作用，因此只存在粗晶区域与过渡区域，介质中心区域不存在晶粒均匀的奥氏体组织。由此可见，在闪光焊过程中，介质区域奥氏体组织由于硬度较低，且受到焊接热影响，因此晶粒形态发生变化，熔合线周边出现了粗晶区域和过渡区域，随着介质长度的增加，均匀分布的奥氏体晶粒区域随之出现并逐渐延长。

3.2 接头力学性能分析

使用7种不同长度的介质进行闪光焊，由于在焊接过程中受到焊接热和顶锻力的影响，介质发

生了明显的塑性变形，焊后的介质长度缩短至6~38mm。对不同长度介质闪光焊接头进行拉伸与冲击试验，由于不锈钢的抗拉强度远低于两种母材，因此拉伸试件的断裂位置大部分处于不锈钢区域，少部分断裂在钢轨与介质焊接熔合线处，介质存在明显的塑性变形，拉伸断裂试件宏观形貌如图6所示。



图6 拉伸断裂试件宏观形貌

不同介质长度闪光焊接头力学性能试验结果如图7所示。由图7a可知，闪光焊接头的抗拉强度与介质焊后长度呈现出负相关的趋势，随着焊后介质长度的增加，抗拉强度逐渐降低。这种现象是由于介质在闪光焊过程中先后分别与U71Mn钢轨和ZGMn13高锰钢辙叉进行连接，受到了两次顶锻力的作用，而不锈钢介质的硬度与强度低于二者，因此在顶锻力的作用下发生了显著的塑性变形，导致

了不锈钢介质发生加工硬化, 接头整体强度获得提升, 而随着介质长度的增加, 加工硬化效果降低, 介质强度无明显提升, 因此呈现出图7a中的状态。由图7b可知, 闪光焊接头的冲击吸收能量与介质焊后长度呈现出正相关的趋势, 随着焊后介质长度的增加, 接头的冲击吸收能量逐渐上升。这种现象受到两方面原因的影响, 一方面, 顶锻力导致的加工硬化增强了介质强度, 同时也会影响材料的韧性, 介质长度较短的接头受到加工硬化影响较大, 冲击吸收能量显著降低; 另一方面, 受到焊接热量的影响, 焊缝附近的介质发生了重新奥氏体化, 奥氏体晶粒显著粗大, 使抗冲击能力下降, 而奥氏体不锈钢的导热性能较差, 越短的不锈钢介质受到的影响越严重, 因此冲击性能下降得相对更加明显。

4 结束语

1) 闪光焊过程的热输入使得熔合线周边金属发

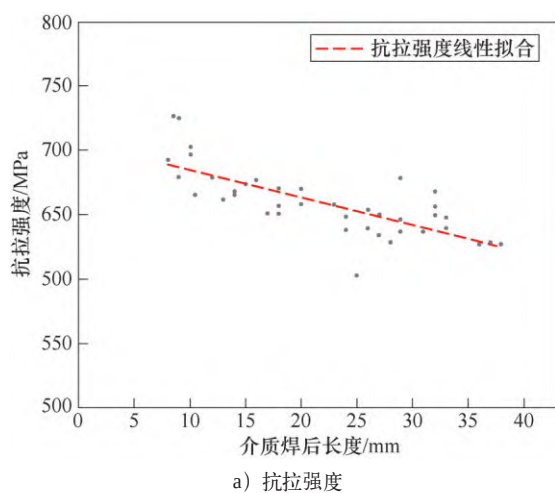
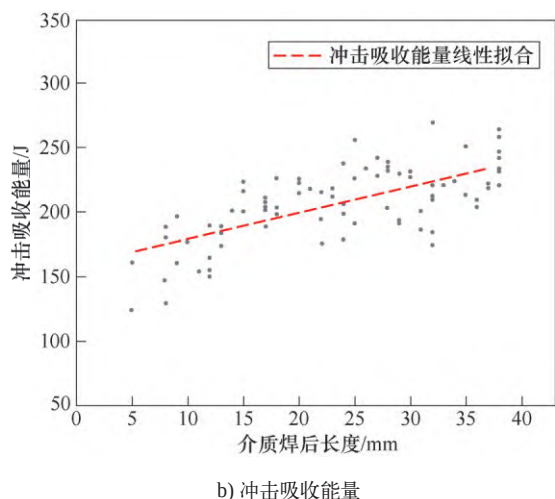


图7 不同介质长度闪光焊接头力学性能试验结果

生了熔化与重新结晶, 钢轨一侧仍为珠光体组织, 未出现马氏体; 奥氏体介质晶粒显著长大, 并在熔合线附近出现部分 δ -铁素体组织; 高锰钢一侧原有奥氏体晶粒在焊接过程中得到细化。

2) 介质长度为65mm的闪光焊接头介质由熔合线至介质中心按照晶粒分布特征依次为粗大晶粒区域、大晶粒向小晶粒转变的过渡区域、晶粒尺寸均匀的中心区域; 介质长度为35mm的闪光焊接头介质整体均受到严重的焊接热影响与顶锻作用, 不存在晶粒尺寸均匀的区域。由此可见, 介质长度更短的闪光焊接头在焊接过程中组织受到的影响相对更加严重。

3) 在闪光焊过程中, 受到顶锻力的影响, 不锈钢介质发生了加工硬化, 介质区域的强度得到提升, 从而造成闪光焊接头的抗拉强度与介质焊后长度呈现出负相关的趋势, 随着焊后介质长度的增加, 接头抗拉强度逐渐降低。

4) 受到加工硬化和奥氏体晶粒长大的影响, 闪光焊接头的冲击吸收能量与介质焊后长度呈现出正相关的趋势, 随着焊后介质长度的增加, 接头的冲击吸收能量逐渐上升。

参考文献:

- [1] 常宝璇, 朱可, 杨宇诗, 等. 高锰钢热物理性质的热分析[J]. 材料科学, 2021, 11 (3): 7.
- [2] 廖宗喜. 高锰钢的焊接性研究[J]. 科技与创新, 2015 (18): 104.
- [3] 张继明, 张福成, 胡白桃. ZGMn13钢辙叉与U71Mn钢轨闪光焊接接头组织[J]. 金属热处理, 2001 (9): 39-41.
- [4] KUCHUK-YATSENKO S I, SHVETS Y V, KAVUNICHENKO A V. Flash butt welding of railway frogs through cast austenitic insert[J]. The Paton Welding Journal, 2015 (8): 5-7.
- [5] 徐安友. 高锰钢辙叉与钢轨的焊接[J]. 铁道工程学报, 2003 (3): 86-89.
- [6] KUCHUK-YATSENKO S I, KAVUNICHENKO O V, 马萍, 等. 辙叉与钢轨间采用奥氏体钢过渡的闪光焊工艺和设备[J]. 铁道建筑, 2017, 57 (12): 102-105.
- [7] 裴荣鹏. 高锰钢辙叉与U71Mn钢轨闪光对焊接头组织分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43 (23): 57-60.

(收稿日期: 20250209)