

热铆温度对20Mn2冷拉盘条钢锚杆疲劳性能的影响

万桥^{1, 2}, 王伟蔚^{1, 2}, 潘邻^{1, 2}, 黄烯望^{1, 2}, 唐星宇^{1, 2}, 杨殊^{1, 2}, 李长春^{1, 2}

1. 中国机械总院集团武汉材料保护研究所 湖北武汉 430030

2. 特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室 湖北武汉 430030

摘要: 为选择合适的20Mn2冷拉盘条钢锚杆热铆温度以保证冷拉盘条锚栓的疲劳性能, 分别对200℃ (低温热铆)、500℃ (中温热铆)、800℃ (高温热铆) 3种热铆温度工艺下的冷拉盘条锚杆进行疲劳试验, 分析热铆温度对冷拉盘条锚杆疲劳性能影响。结果表明: 不同热铆温度工艺下冷拉盘条锚杆疲劳性能差异明显, 其中500℃热铆温度工艺疲劳性能最优。

关键词: 预埋槽道锚杆; 疲劳性能; 热铆温度

The effect of hot riveting temperature on the fatigue performance of anchor bars for 20Mn2 steel cold drawn wire rods

WAN Qiao^{1, 2}, WANG Weiwei^{1, 2}, PAN Lin^{1, 2}, HUANG Xiwang^{1, 2}, TANG Xingyu^{1, 2},
YANG Shu^{1, 2}, LI Changchun^{1, 2}

1. China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, Hubei, China

2. State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology, Wuhan 430030, Hubei, China

Abstract: To select the appropriate hot riveting temperature for 20Mn2 steel cold drawn wire rod anchor bolts to ensure their fatigue performance, fatigue tests were conducted on cold drawn wire rod anchor bolts at three different hot riveting temperature processes: 200℃ (low-temperature hot riveting), 500℃ (medium temperature hot riveting), and 800℃ (high-temperature hot riveting). The effect of hot riveting temperature on the fatigue performance of cold drawn wire rod anchor bolts was analyzed. The results showed that there were significant differences in the fatigue performance of cold drawn wire rod anchor bolts under different hot riveting temperature processes, with the 500℃ hot riveting temperature process having the best fatigue performance.

Keywords: embedded channel anchor rod; fatigue performance; hot riveting temperature

1 序言

高、载荷稳定、后期维护成本低和耐久性好等优势

盾构管片预埋槽道技术因其环保、安装精度

使得其在高速铁路与地铁隧道中的应用越来越广

基金项目: 国家自然科学基金——基于多孔结构表面调控技术的铝碳复合材料开发及其载流摩擦学性能研究 (52275208)。

第一作者: 万桥, 高级工程师, 研究方向为金属材料与制品的耐久性能研究与评价, E-mail: 895881917@qq.com。

泛。国内地铁领域对预埋槽道的应用尚处于起步阶段。槽道技术涉及到结构、材料、防火与防腐性能等多个方面^[1]。

预埋槽道锚杆主要功能是连接槽道钢与混凝土并起固定作用，其一端与槽道钢成形，另一端则与混凝土锚固连接，是预埋槽道在混凝土中起锚固作用的核心受力部位。因此，预埋槽道锚杆连接工艺的好坏直接决定预埋槽道锚杆与槽道钢连接处受力的大小，对于预埋槽道整体的受力情况至关重要。TB/T 3329—2013《电气化铁路接触网隧道内预埋槽道》对预埋槽道性能做出详细规定^[2]。

王辉锦^[3]对锚杆的冷铆及热铆工艺对不锈钢预埋槽道疲劳性能做了研究，认为热铆工艺优于冷铆工艺。姚斌等^[4, 5]对压铆和旋铆工艺及不同铆接温度对不锈钢预埋槽道疲劳性能做了研究，认为压铆相比旋铆有更好的疲劳性能，不锈钢锚杆铆接加热温度控制在700~900℃，铆接接头具有更好的疲劳性能。

目前，市场上普遍采用Q355B钢制作槽道锚杆，20Mn2冷拉盘条钢因其加工成本低，性能与Q355B钢相当，已经被市场广泛接受，将逐渐替代Q355B钢，因此十分有必要开展热铆对性能影响的研究工作。本文旨在研究以20Mn2冷拉盘条钢为锚杆，Q355B钢为槽道钢的热铆连接工艺在不同热铆温度下的疲劳性能，通过对比200℃（低温热铆）、500℃（中温热铆）、800℃（高温热铆）3种热铆温度下冷拉盘条钢锚杆的疲劳性能，分析热铆温度对20Mn2冷拉盘条钢锚杆疲劳性能的影响。

2 试验材料与方法

2.1 试验样品

基材为Q355B的30/20预埋槽道钢及20Mn2冷拉盘条钢锚杆的化学成分，分别见表1和表2。

表1 20Mn2冷拉盘条钢锚杆化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.19	0.24	1.65	0.014	0.007	0.024	0.009

表2 Q355B槽道钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.17	0.33	1.42	0.020	0.004	<0.0005	0.012

2.2 样品成形

将 $\phi 10\text{mm}$ 的20Mn2冷拉盘条钢锚杆与Q355B基材的预埋槽道钢分别在200℃、500℃与800℃的温度下进行热铆连接。连接完成后，采用机械加工单独将铆接后的锚杆取出。机械加工后的锚杆见图1。

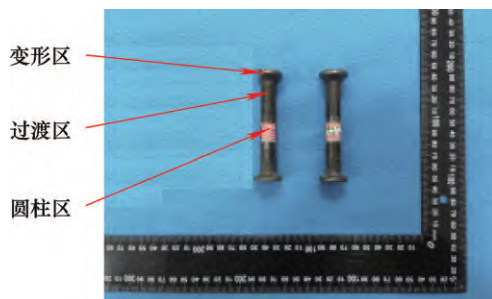


图1 机械加工后的锚杆

2.3 测试分析

采用DMI8-C徕卡金相显微镜和WHV-1MDT自动转塔数显显微维氏硬度计观察3种连接工艺的预埋槽道锚杆的金相组织及不同部位的维氏硬度。采用ETM205D微机控制电子万能试验机对不同热铆温度下的20Mn2冷拉盘条钢锚杆进行拉伸试验。采用HDT-105B微机控制疲劳试验机对500℃热铆工艺的锚杆试样进行疲劳试验。采用电子显微镜对3种热铆连接工艺下的疲劳断口进行形貌分析，研究热铆温度对20Mn2冷拉盘条钢锚杆疲劳性能的影响。

3 结果与讨论

3.1 金相组织检测

不同热铆温度下20Mn2冷拉盘条钢锚杆金相组织，热铆锚杆圆柱区、过渡区及变形区的金相组织检测结果见表3。

从图2~图10可知，20Mn2钢冷拉盘条钢锚杆在200℃、500℃与800℃的铆接工艺下，圆柱区组织均为粒状珠光体沿冷拉方向带状分布，表面铆接加热对圆柱区组织并未造成明显影响；变形区组织从铁素体+片状珠光体（珠光体沿冷拉方向带状分布）向铁素体+片状珠光体带状分布特征消失的特征转变，进而形成均匀的铁素体+珠光体组织，表面铆接加热对变形区的组织造成了明显影响。过渡区的组织为铁素体+片状珠光体+粒状珠光体，表明铆接加热对过渡区的影响小于变形区。

从图7、图10可知，500℃热铆变形区和800℃

表3 金相组织检测结果

热钎温度/℃	部位	组织
200	圆柱区	粒状珠光体沿冷拉方向带状分布 (见图2)
	过渡区	铁素体+片状珠光体; 变形较冷墩区小 (见图3)
	变形区	铁素体+片状珠光体; 珠光体沿冷拉方向 带状分布 (见图4)
500	圆柱区	粒状珠光体沿冷拉方向带状分布 (见图5)
	过渡区	铁素体+片状珠光体+粒状珠光体 (见图6)
	变形区	铁素体+片状珠光体; 带状分布特征消失 (见图7)
800	圆柱区	铁素体+片状珠光体; 珠光体沿冷拉方向 带状分布 (见图8)
	过渡区	铁素体+片状珠光体+粒状珠光体 (见图9)
	变形区	铁素体+珠光体; 组织均匀 (见图10)

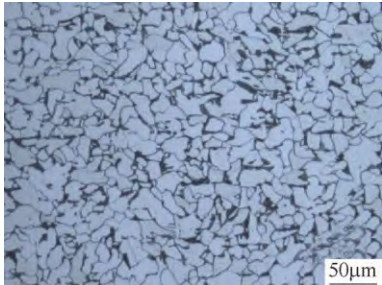


图2 200℃热钎圆柱区 (横向, 200×)

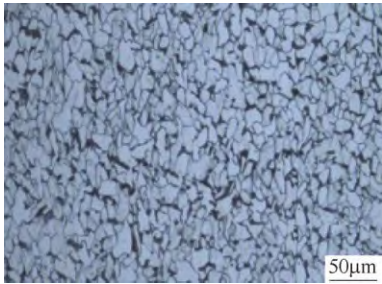


图3 200℃热钎过渡区 (横向, 200×)

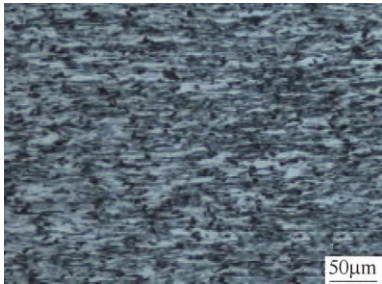


图4 200℃热钎变形区 (横向, 200×)

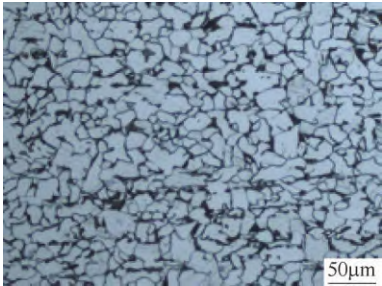


图5 500℃热钎圆柱区 (横向, 200×)

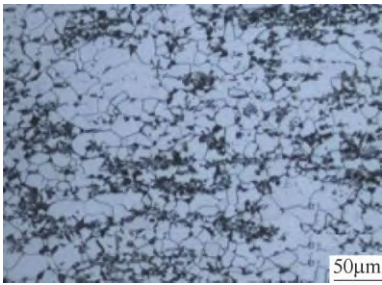


图6 500℃热钎过渡区 (横向, 200×)

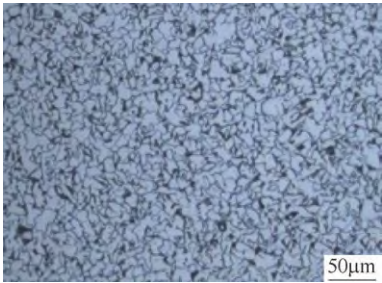


图7 500℃热钎变形区 (横向, 200×)

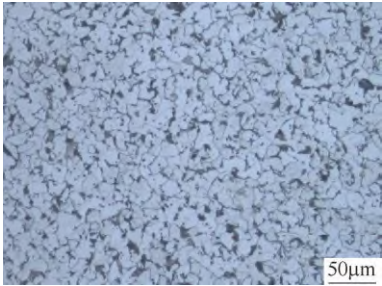


图8 800℃热钎圆柱区 (横向, 200×)

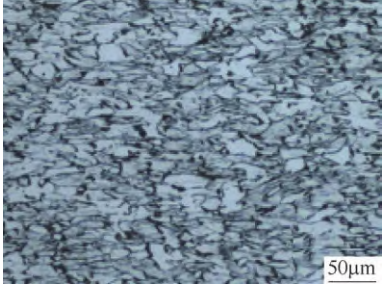


图9 800℃热钎过渡区 (横向, 200×)

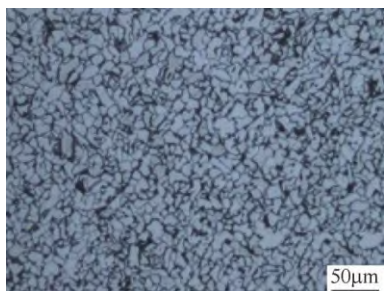


图10 800℃热铆变形区(横向, 200×)

热铆变形区的组织均为铁素体+珠光体,表明在500℃温度下变形区产生了回复与再结晶,而在800℃的温度下变形区发生了奥氏体化转变。

3.2 拉伸试验与硬度检测

对不同热铆温度下20Mn2冷拉盘条钢锚杆进行拉伸试验,应力-应变曲线如图11所示。

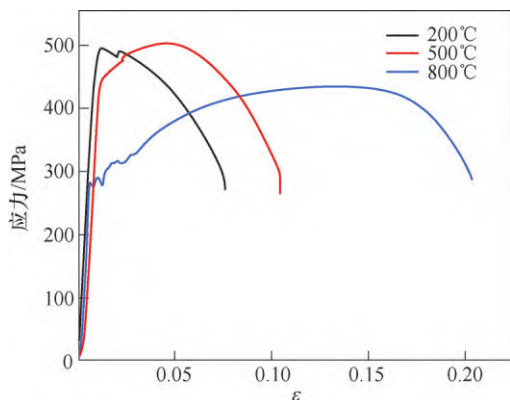


图11 不同铆接温度工艺拉伸试验应力-应变曲线

从图11可知,20Mn2冷拉盘条钢锚杆在200℃、500℃与800℃的铆接工艺下,拉伸试验抗拉强度大小依次为:200℃铆接工艺≈500℃铆接工艺>800℃铆接工艺;屈服强度大小依次为:200℃铆接工艺>500℃铆接工艺>800℃铆接工艺;拉伸试验断后伸长率大小依次为:800℃铆接工艺>500℃铆接工艺>200℃铆接工艺。

热铆锚杆圆柱区、过渡区及变形区的硬度分布如图12所示。

从图12可知,变形区的硬度大小依次为:200℃铆接工艺>500℃铆接工艺>800℃铆接工艺,拉伸试验的断裂区域均为变形区,硬度大小与对应的抗拉强度大小顺序基本一致,200℃铆接工艺与500℃铆接工艺强度接近的原因是200℃铆接时内应力大,导致拉伸试验时塑性降低发生脆断。

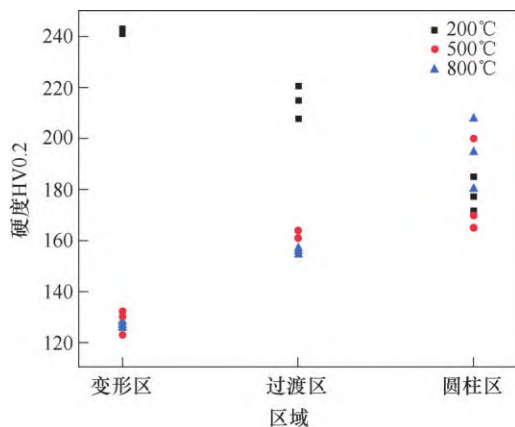


图12 不同区域硬度分布

从图12可知,过渡区的硬度大小依次为:200℃铆接工艺>500℃铆接工艺>800℃铆接工艺。对比图5~图7可看出,过渡区组织中片状珠光体数量大小依次为:200℃铆接工艺>500℃铆接工艺>800℃铆接工艺。在成分相同的条件下,片状珠光体的硬度要高于粒状珠光体。因此,过渡区200℃铆接工艺硬度最高,800℃铆接工艺硬度最低。

从图12可知,圆柱区硬度大小依次为:800℃铆接工艺>200℃铆接工艺>500℃铆接工艺。从金相组织上看,圆柱区组织均为粒状珠光体沿冷拉方向带状分布,铆接加热对圆柱区组织并未造成明显影响,因此圆柱区的硬度大小主要取决于原材料的轧制变形状态,其硬度在150~200HV,主要原因是冷拉工艺造成的硬度不均匀。

3.3 疲劳试验

不同热铆温度工艺下锚杆疲劳试验的S-N曲线如图13所示。

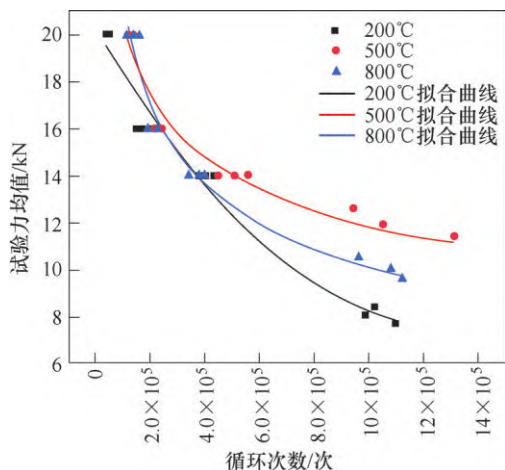


图13 不同热铆温度工艺下锚杆疲劳试验的S-N曲线

对不同热钎温度下20Mn2冷拉盘条钢锚杆进行疲劳试验（频率为3Hz），结果见表4。

从图13、表4可知，500℃ 钎接工艺条件下的锚杆疲劳性能最优，200℃ 钎接工艺条件下的锚杆疲劳性能最差，失效部位均为变形区。800℃ 的钎接工艺

锚杆的疲劳性能优于200℃ 的钎接工艺锚杆，差于500℃ 的钎接工艺锚杆。

500℃ 钎接工艺下20Mn2冷拉盘条钢锚杆疲劳断口微观和宏观形貌如图14、图15所示。

从图14、图15可看出，裂纹从锚杆表面开始萌

表4 疲劳试验结果

热钎温度/℃	试验力均值/kN	试验力幅值/kN	波形	样品数量/个	次数/万次	失效部位
200	20	6.0	正弦波	3	5.1、4.8、3.9	变形区
	16	4.8	正弦波	3	15、17、20	变形区
	14	4.2	正弦波	3	38、40、43	变形区
	8.4	2.5	正弦波	1	102	变形区
	8.0	2.4	正弦波	1	98	变形区
	7.6	2.3	正弦波	1	110	变形区
500	20	6.0	正弦波	3	12、14、14	变形区
	16	4.8	正弦波	3	21、22、24	变形区
	14	4.2	正弦波	3	45、51、56	变形区
	12.6	3.9	正弦波	1	94	变形区
	12	3.6	正弦波	1	105	变形区
	11.4	3.4	正弦波	1	131	变形区
800	20	6.0	正弦波	3	14、16、12	变形区
	16	4.8	正弦波	3	19、22、24	变形区
	14	4.2	正弦波	3	38、40、34	变形区
	9.6	2.9	正弦波	1	112	变形区
	10	3.0	正弦波	1	108	变形区
	10.5	3.2	正弦波	1	96	变形区

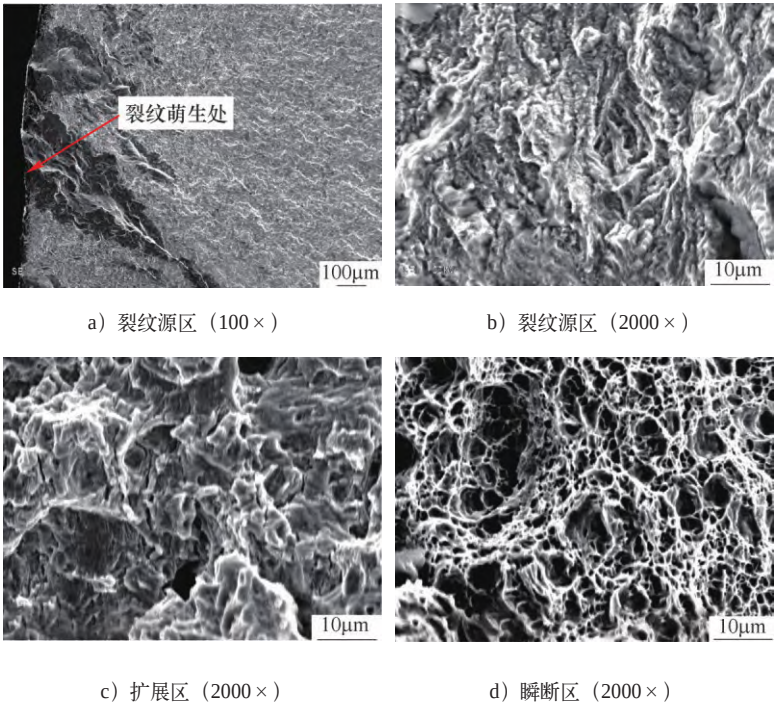


图14 500℃ 钎接工艺下断口微观形貌

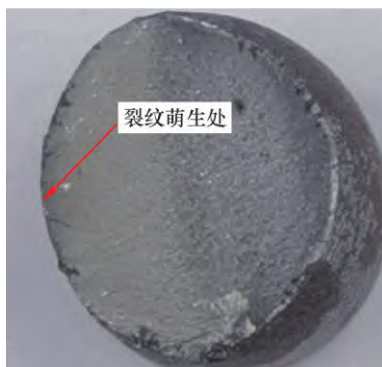


图15 500℃ 钎接工艺下断口宏观形貌

生逐渐向内扩展。裂纹源区为解理形貌；扩展区为解理与韧窝混合的准解理形貌，可见到与裂纹扩展方向垂直的疲劳条带；瞬断区为大量的韧窝形貌，锚杆断裂符合疲劳断裂的特征。200℃ 钎接工艺下 20Mn2 冷拉盘条钢锚杆断口宏观形貌如图16所示。对比图15与图16可看出，500℃ 宏观断口裂纹扩展区面积>200℃ 宏观断口裂纹扩展区面积，200℃ 疲劳断裂发展比500℃ 下更加迅速。

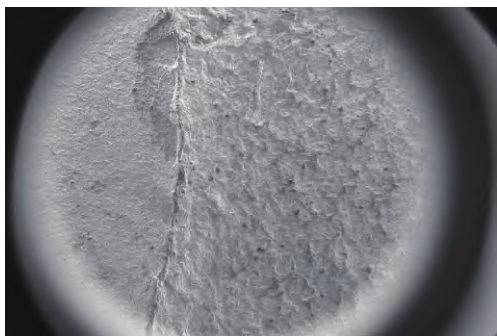


图16 200℃ 钎接工艺下断口宏观形貌

4 结束语

1) 锚杆钎接变形区为疲劳断裂的主要区域。从疲劳寿命上看，首先500℃ 钎接工艺条件下锚杆疲劳性能最好，其次是800℃ 钎接工艺条件下锚杆，而200℃ 钎接工艺条件下的锚杆疲劳性能最差。

2) 20Mn2 冷拉盘条钢锚杆在200℃、500℃ 与800℃ 的钎接工艺下，疲劳断裂区域（变形区）组织从沿冷拉方向带状分布的铁素体+珠光体组织向分布均匀的铁素体+珠光体组织转变。500℃ 热钎锚杆和800℃ 热钎锚杆疲劳断裂区域的组织均为铁素体+珠光体，变形区在500℃ 的温度下组织完成了回复与再结晶，而在800℃ 的温度下变形区组织发生了奥氏

体化转变，其内应力得到了充分释放。

3) 在不同钎接温度下，锚杆变形区域金相组织结构发生转变、内应力发生变化是导致钎接锚杆疲劳性能产生变化的主要原因。在500℃ 钎接工艺下的变形区组织完成了回复与再结晶，但内应力并未完全释放，从而在增加塑性的同时保持了较高的屈服强度，因此疲劳性能最好。

参考文献：

- [1] 李智明. 电气化铁路接触网隧道内预埋槽道论和试验研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
- [2] 中铁电气化局集团有限公司. 电气化铁路接触网隧道内预埋槽道：TB/T 3329—2013 [S]. 北京：中国铁道出版社，2013.
- [3] 王辉绵. 不锈钢槽道疲劳性能研究[J]. 山西冶金，2024，47（1）：18-19，22.
- [4] 姚斌，谈琦，代启宏. 钎接工艺对3020不锈钢预埋槽道疲劳性能的影响[J]. 工程与建设，2022，36（6）：1797-1801.
- [5] 杨俊芬，焦瑞婕，钟炜辉，等. 轴向荷载作用下小规格拉铆钉和普通螺栓疲劳性能对比研究[J]. 建筑结构进展，2024，26（3）：41-51.

MW 20241019