建筑用 SQ460FRW 耐火耐候钢的热处理与组织性能研究①

林超楠[1]，李智[2]，苏雅婷[3]，杜小洁[4]
（1.湄洲湾职业技术学院，福建 莆田 351100；2.福建理工大学，福建 福州 350118；3.厦门大学，福建 厦门 361005；4.安徽工业大学，安徽 马鞍山 243002）

摘　要：为了考察热轧态 SQ460FRW 钢的抗震耐火性能，模拟火灾环境对热轧态 SQ460FRW 钢实施了 250～650 ℃、保温 1 h 的热处理，并对不同热处理态 SQ460FRW 钢的微观组织演变和抗震耐火性能进行了分析。结果表明，高温热处理前后 SQ460FRW 钢中都可见粒状贝氏体和铁素体，但是组织中马氏体/奥氏体小岛组织分解程度不同；内耗法测得 250～650 ℃热处理后，SQ460FRW 钢的 SKK 峰值从 3.926×10^{-4} 逐渐减小至 1.348×10^{-4}，碳化物析出量（体积分数）逐渐从 8.78%增加至 65.96%。相较于热轧态 SQ460FRW 钢，低温（250 ℃）和中温（350 ℃）热处理后 SQ460FRW 钢的强塑性变化不大，450 ℃及以上温度热处理后 SQ460FRW 钢屈服强度明显上升、屈强比增大，550 ℃及以下温度热处理后 SQ460FRW 钢屈强比小于 0.85。250～550 ℃/1 h 热处理后，SQ460FRW 钢的拉伸性能符合 GB/T 19879—2023 和 GB/T 28415—2023 对抗震耐火钢的要求，550 ℃热处理时 SQ460FRW 钢具有更高的强度。建筑用 SQ460FRW 钢在不同热处理温度（250～650 ℃）下的屈强比与室温内耗具有线性负相关性。

关键词：建筑用钢；热处理；抗震耐火钢；模拟火灾温度；组织演变；拉伸性能；抗震性能
中图分类号：TG146.2；TG156.5　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.030
文章编号：0253-6099（2026）01-0181-05

Heat Treatment and Microstructure Properties of SQ460FRW Refractory and Weathering Steel for Construction

LIN Chaonan[1], LI Zhi[2], SU Yating[3], DU Xiaojie[4]
(1.*Meizhouwan Vocational and Technical College*, *Putian* 351100, *Fujian*, *China*; 2.*Fujian University of Technology*, *Fuzhou* 350118, *Fujian*, *China*; 3.*Xiamen University*, *Xiamen* 361005, *Fujian*, *China*; 4.*Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243002, *Anhui*, *China*)

Abstract: In order to investigate the seismic and fire resistance performance of hot-rolled SQ460FRW steel, the steel was kept at a temperature range from 250 ℃ to 650 ℃ for 1 hour to simulate fire environment, and the microstructure evolution and seismic and fire resistance performance of SQ460FRW steel after different heat treatment were analyzed. The results show that granular bainite (GB) and ferrite (F) can be observed in SQ460FRW steel before and after high-temperature heat treatment, but the degree of decomposition of martensite/austenite (M/A) islands in microstructure is different. After heat treatment at 250－650 ℃, internal friction curve of SQ460FRW steel shows that the SKK peak gradually decreases from 3.926×10^{-4} to 1.348×10^{-4}, and the carbide precipitation gradually increases from 8.78% to 65.96%. Compared to hot-rolled SQ460FRW steel, SQ460FRW steel has little change in its strength and plasticity after heat treatment at low-temperature (250 ℃) and medium temperature (350 ℃), but has remarkably higher yield strength and increased yield ratio after heat treatment at or above 450 ℃. It is shown that SQ460FRW has its yield ratio less than 0.85 after treatment at or below 550 ℃. After treatment at 250－550 ℃ for 1 h, SQ460FRW steel can have its tensile properties up to the requirements for earthquake and fire resistant steel in GB/T 19879—2023 and GB/T 28415—2023 standards, and it can have higher strength after treatment at 550 ℃. It is concluded that after SQ460FRW steel for construction is heat-treated at 250－650 ℃, its yield ratio exhibits a negative linear correlation with room-temperature internal friction.

① **收稿日期**：2025-07-25
基金项目：教育部“十四五”教育科研规划全国重点课题（230467106）；福建省中青年教师教育科研项目课题（JAT2207013）
作者简介：林超楠（1985—），男，福建莆田人，高级工程师，主要研究方向为建筑材料。E-mail：chaonan85@ sina.com

Key words: steel for construction; heat treatment; fire resistant and weathering steel; simulated fire temperature; microstructure evolution; tensile performance; earthquake resistant behaviour

建筑领域中钢材扮演着不可或缺的角色,其重要性源于其高强度、高刚度、良好的耐腐蚀性、稳定的质量以及绿色环保特性[1]。建筑用钢在使用过程中可能会面临地震、火灾等自然灾害的考验。为了最大程度地保障建筑物的安全以及人民的生命财产安全,现代建筑用钢不仅需要满足传统建筑用钢在强度、塑性等指标上的要求[2],还必须从服役安全性和使用寿命等方面出发,进一步提高其抗震和耐火性能[3]。特别是近年来,随着高层及超高层建筑和大跨度建筑的快速发展,兼具高强度韧性、良好抗震性(低屈强比)和耐火性能的建筑用钢成为行业关注的焦点[4]。目前,通过成分设计、冶金工业优化、控轧控冷以及热处理等手段开发出的 SQ460FRW 钢板,已经展现出较高的强塑性和抗低温冲击性能[5],并在超高层建筑和大跨度体育场馆中得到了成功应用,而关于 SQ460FRW 钢抗震耐火性能的研究相对较少。为了开发具有良好抗震性能和耐火性能的建筑用钢,本文通过模拟火灾温度,考察了热轧态 SQ460FRW 钢板在 250~650 ℃下的微观组织演变和力学性能,并采用内耗法对其在不同火灾温度条件下的抗震性能进行了分析,研究结果有助于高性能抗震耐火钢的开发与推广应用。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

选取热轧态 SQ460FRW 钢板为实验原料,其实测化学成分如表 1 所示。

表 1 热轧态 SQ460FRW 钢板化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of hot-rolled SQ460FRW steel plate %

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.047	0.25	1.01	0.010	0.004	0.39
Mo	**Ti**	**Nb**	**Cr**	**Ni**	**Fe**
0.24	0.012	0.036	0.46	0.42	余量

1.2 模拟火灾温度的热处理

先将 SQ460FRW 热轧钢板加工成长 550 mm、宽 330 mm、厚 20 mm 的长方体试样,表面经过清水冲洗、吹干后置于 DZF-6050 型真空烘箱中进行 80 ℃/15 min 的烘干处理,取出后空冷至室温;模拟火灾环境对经过预处理的 SQ460FRW 钢试样进行 250~650 ℃、保温 1 h 的热处理,所用热处理炉为卡博莱特盖罗(Carbolite Gero) MTF 管式炉,达到设定时间后从炉膛中取出,在空气中冷却至室温。

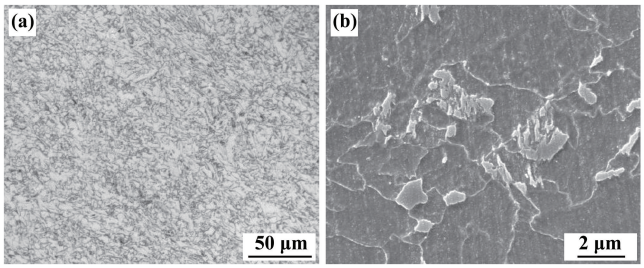
1.3 测试方法

使用线切割方法将不同热处理工艺下的钢板试样加工成块状,采用 120#~1200#砂纸逐级打磨、金刚石研磨膏抛光后,用体积分数 3.5%的硝酸酒精溶液腐蚀试样块,然后在蔡司 Axio Observer.A1m 型光学显微镜和 TESCAN VEGA 型钨灯丝扫描电子显微镜下观察微观组织;根据 GB/T 228.1—2021,在 Zwick ProLine Z010NT 型万能材料试验机上进行室温拉伸性能测试,结果取 6 组试样的平均值。参照 GB/T 13665—2007,使用 GEP-100 型多功能内耗测试仪对 SQ460FRW 钢板试样(Φ1.8 mm×70 mm)进行内耗实验,记录不同温度下的室温内耗并计算碳化物析出量。

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 为热轧态 SQ460FRW 钢板的显微组织。从图 1(a)可见,热轧态钢板组织由粒状贝氏体(GB)和铁素体(F)组成;从图 1(b)可见,马氏体/奥氏体小岛组织主要分布在 F 边界处,按照尺寸将马氏体/奥氏体岛(M/A)分为不大于 2 μm、大于 2 μm 两类,其中,尺寸不大于 2 μm 的 M/A 组织多呈粒状或不规则多边形状,尺寸大于 2 μm 的 M/A 组织主要呈团簇形态。



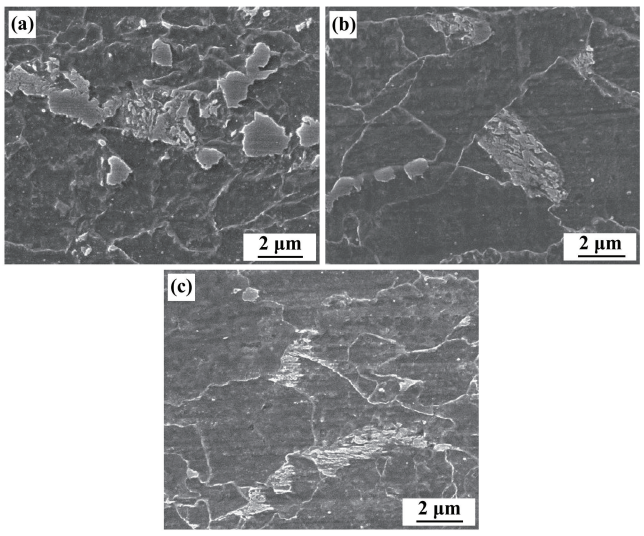
(a) 金相组织;(b) 扫描电镜显微组织

图 1 热轧态 SQ460FRW 钢板的显微组织

Fig. 1 Microstructure of hot-rolled SQ460FRW steel plate

图 2 为低温和中温热处理后建筑用钢的显微组织。对热轧态 SQ460FRW 钢板进行 250 ℃低温热处理后,显微形貌并未发生明显改变,仍然由 GB+F 组成,但是尺寸较大的 M/A 组织已逐步分解。经过 350 ℃和 450 ℃中温热处理后,尺寸大于 2 μm 的 M/A

组织分解程度加大,尺寸不大于 2 μm 的 M/A 组织数量增多,组织仍然由 GB+F 组成。

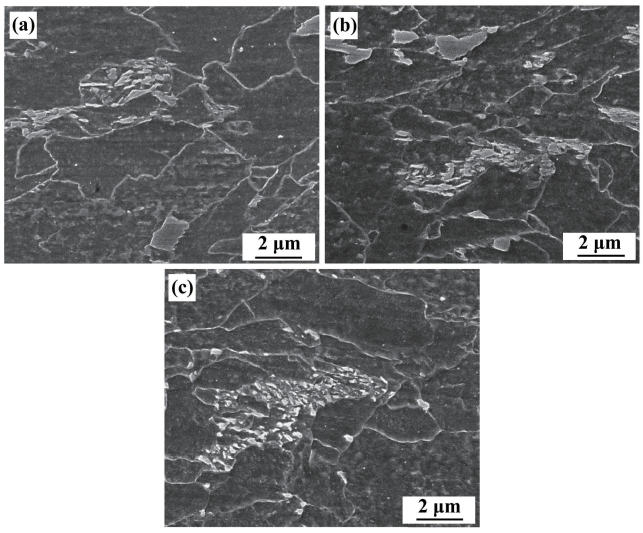


(a) 250 ℃; (b) 350 ℃; (c) 450 ℃

图 2　低温和中温热处理后 SQ460FRW 钢的显微组织

Fig. 2　Microstructure of SQ460FRW steel after heat treatment at low and medium temperatures

图 3 为高温热处理后建筑用钢的显微组织。对热轧态 SQ460FRW 钢板进行 550~650 ℃高温热处理后,M/A 组织进一步分解,热处理温度达到 650 ℃时,基体组织中的 M/A 组织已基本分解成粒状,尺寸大于 2 μm的 M/A 团簇状组织基本消失。可见,虽然高温热处理后 SQ460FRW 钢的组织仍然为 GB+F,但是粒状贝氏体中 M/A 已基本分解完成,F 组织发生了不同程度长大。



(a) 550 ℃; (b) 600 ℃; (c) 650 ℃

图 3　高温热处理后 SQ460FRW 钢的显微组织

Fig. 3　Microstructure of SQ460FRW steel after heat treatment at high temperatures

2.2　拉伸性能

热轧态和热处理态 SQ460FRW 钢的室温拉伸性能测试结果如表 2 所示。相较于热轧态 SQ460FRW 钢,低温(250 ℃)和中温(350 ℃)保温 1 h 热处理后,SQ460FRW 钢的屈服强度($R_{p0.2}$)、抗拉强度(R_m)、断后伸长率(A)较为相近,屈强比($R_{p0.2}/R_m$)介于 0.763~0.790。450 ℃及以上热处理时,基体组织中尺寸较大的 M/A 组织逐渐分解,尺寸不大于 2 μm 的 M/A 组织数量增多,$R_{p0.2}$明显上升,R_m 增幅相对较小,屈强比有所上升。随着温度从 250 ℃上升至 650 ℃,SQ460FRW 钢的 $R_{p0.2}$和 R_m都表现为先增大后减小,而 A 逐渐降低。600 ℃时取得 $R_{p0.2}$和 R_m最大值,热处理温度的升高会使得团簇状组织逐渐分解成尺寸细小的粒状[6],且基体组织中尖角多边形的马氏体/奥氏体小岛组织逐渐圆钝化,SQ460FRW 钢的强度有所增大[7],但是过高的温度(650 ℃)会使得 F 组织发生明显粗化和长大[8],SQ460FRW 钢的强度减小。

表 2　热轧态和热处理态 SQ460FRW 钢的室温拉伸性能

Table 2　Room-temperature tensile performance of hot-rolled and heat-treated SQ460FRW steel

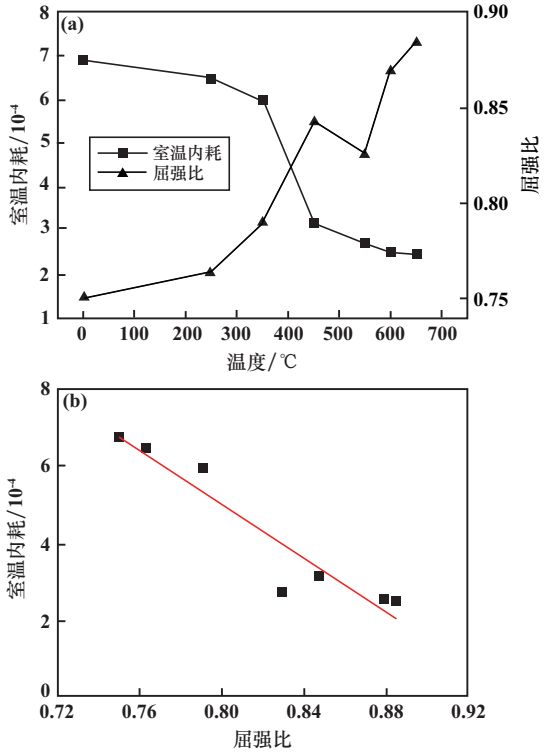
T/℃	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	$R_{p0.2}/R_m$
热轧态	451.63	602.60	21.1	0.749
250	462.56	606.09	20.7	0.763
350	472.77	598.41	20.5	0.790
450	520.43	614.42	20.0	0.847
550	513.41	619.46	19.8	0.829
600	554.37	630.42	19.6	0.879
650	546.43	617.26	19.2	0.885
GB/T 19879—2023 (Q460GJ)	460~590	570~720	≥18	≤0.85
GB/T 28415—2023 (Q460FR)	460~600	≥570	≥18	≤0.85

根据 GB/T 19879—2023《建筑结构用钢板》和 GB/T 28415—2023《耐火结构用钢板和钢带》对 Q460GJ 和 Q460FR 钢屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和屈强比的要求(如表 2 所示)可知,热处理温度 250~550 ℃时 SQ460FRW 钢的 $R_{p0.2}$、R_m、A 和 $R_{p0.2}/R_m$ 均符合标准要求,且 550 ℃时 SQ460FRW 钢的 R_m 最大。表 2 结果表明,在经历了 550 ℃及以下火灾温度后,SQ460FRW 钢的拉伸性能仍然符合 GB/T 19879—2023 和 GB/T 28415—2023 标准对建筑结构用钢板和耐火结构用钢板的要求。

2.3　抗震耐火性能

图 4 为不同热处理温度下建筑用钢的室温内耗与屈强比关系曲线。室温内耗是钢材在室温下由于内部

缺陷或应力引起的能量损耗现象,屈强比是建筑结构抗震设计中的重要参数,屈强比的高低对结构的抗震性能有显著影响。从图 4(a)可知,不同温度热处理后的热处理态 SQ460FRW 钢的室温内耗都低于热轧态 SQ460FRW 钢的室温内耗,且热处理态 SQ460FRW 钢的室温内耗随着温度升高而降低;不同温度热处理后的热处理态 SQ460FRW 钢的屈强比都高于热轧态,且热处理 SQ460FRW 钢的屈强比随着温度升高整体呈增大趋势。从图 4(b)可知,随着屈强比增加,SQ460FRW 钢的室温内耗逐渐减小,即二者基本呈现线性负相关性。采用 SQ460FRW 钢的建筑结构在地震作用下,较低屈强比的钢材塑性变形能力更强,能够吸收更多的地震能量,提高建筑结构的延展性,减少结构在地震作用下的损伤,从而提升结构的安全性和抗震性能[9-11];而较高的室温内耗会使钢材的弹性模量降低、塑性变形增加,从而可以吸收地震作用下的振动能量并将其转化为热能,减少结构的振动,增强抗震性能[12]。热处理温度升高会增加 SQ460FRW 钢的屈强比并降低室温内耗,这两个参数对抗震性能的影响规律具有一致性,也说明 SQ460FRW 钢在经历 1 h、550 ℃及以下温度热处理时仍然具有较好的抗震性能。



(a) 室温内耗-温度-屈强比; (b) 室温内耗-屈强比拟合曲线

图 4 不同温度下 SQ460FRW 钢室温内耗与屈强比关系曲线

Fig. 4 Relationship between room-temperature internal friction and yield ratio of SQ460FRW steel at different temperatures

表 3 为热轧态和热处理态 SQ460FRW 钢的室温内耗和碳化物析出量(体积分数)统计结果,其中 Snoek-Ke-Koster(SKK)峰高根据室温内耗-温度曲线拟合得到,并根据 SKK 峰高计算得到热轧态和不同温度热处理态 SQ460FRW 钢的碳化物析出量[13]。热轧态 SQ460FRW 钢的 SKK 峰值为 4.320×10^{-4}、碳化物析出量为 0。温度从 250 ℃升高至 650 ℃时,SQ460FRW 钢的 SKK 峰值从 3.926×10^{-4}减小至 1.348×10^{-4}、碳化物析出量从 8.78%增加至 65.96%,与热轧态 SQ460FRW 钢相比,热处理态 SQ460FRW 钢的 SKK 峰值更小、碳化物析出量更大。究其原因,这是热轧态 SQ460FRW 钢中的 C 元素主要以固溶形式分布在 M/A 组织中[14],不同温度热处理后 M/A 组织会发生分解并以碳化物形式析出,且温度不同,M/A 组织分解程度不同,碳化物析出量也会存在差异,较高的热处理温度下,SQ460FRW 钢中 M/A 组织分解更加充分[15],相应地,碳化物析出量更大。由 SKK 峰高计算得到的热轧态和不同温度热处理态 SQ460FRW 钢的碳化物析出量与前述的显微组织观察结果相吻合。

表 3 热轧态和热处理态 SQ460FRW 钢的室温内耗和碳化物析出量

Table 3 Internal consumption at room temperature and carbonate precipitation of hot-rolled and heat-treated SQ460FRW steel

T/℃	室温内耗/10^{-4}	SKK 峰高/10^{-4}	碳化物析出量(体积分数)/%
25	6.867	4.320	—
250	6.473	3.926	8.78
350	5.984	3.495	18.51
450	3.159	1.886	54.82
550	2.735	1.572	61.91
600	2.526	1.436	63.98
650	2.472	1.348	65.96

3 结论

1) 热轧态和 250~650 ℃热处理后 SQ460FRW 钢的组织都为 GB+F,经低温、中温和高温热处理后基体组织中的 M/A 组织分解程度不同;250~650 ℃热处理后,SQ460FRW 钢的 SKK 峰值从 3.926×10^{-4}逐渐减小至 1.348×10^{-4},碳化物析出量从 8.78%逐渐增加至 65.96%。

2) 相较于热轧态 SQ460FRW 钢,低温(250 ℃)和中温(350 ℃)热处理后 SQ460FRW 钢的强塑性变化不大,屈强比介于 0.763~0.790。450 ℃及以上温度热处理后,SQ460FRW 钢的屈服强度明显上升,屈强比有

所上升,550 ℃及以下热处理后 SQ460FRW 钢的屈强比在 0.85 以下。

3) 250~550 ℃/1 h 热处理后,SQ460FRW 钢的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和屈强比均符合 GB/T 19879—2023 和 GB/T 28415—2023 标准要求,且 550 ℃热处理时 SQ460FRW 钢的抗拉强度更大。随着屈强比增加,SQ460FRW 钢室温内耗逐渐减小,二者基本呈线性负相关。

参考文献(References):

[1] 宋振东,王学敏,谢振家,等. 建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢组织性能研究[J]. 包钢科技, 2024,50(2):58-62.
SONG Zhendong, WANG Xuemin, XIE Zhenjia, et al. Study on microstructure and properties of high-strength anti-seismic fire-resistant H beam for building structure[J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2024,50(2):58-62.

[2] 魏杰,赵丽丽. 钒钛微合金化对建筑用钢成形性能的影响[J]. 锻压技术, 2021,46(11):244-249.
WEI Jie, ZHAO Lili. Influence of vanadium titanium microalloying on formability for construction steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2021,46(11):244-249.

[3] KIM J, YU G, KIM S, et al. Microstructural and mechanical characterization of low-alloy fire- and seismic-resistant H-section steel[J]. Metals, 2024,14(4):374.

[4] 戴忠伟,何宜柱,杜晓洁. 模拟火灾温度对 Q460FRW 钢组织和抗震性能的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(4):37-41.
DAI Zhongwei, HE Yizhu, DU Xiaojie. Effect of simulated fire temperature on microstructure and anti-seismic performance of Q460FRW steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021,46(4):37-41.

[5] 魏露杰. 690 MPa 级建筑结构用抗震耐火钢的组织调控机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
WEI Lujie. Study on the microstructure controlling for 690 MPa grade anti-seismic and fire-resistant construction steels[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

[6] 陆春祥,林田子,曹建春,等. 回火时间对高强抗震耐火钢板组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022,47(1):156-162.
LU Chunxiang, LIN Tianzi, CAO Jianchun, et al. Effect of tempering time on mechanical properties and microstructure of high strength anti-seismic fire-resistant steel plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(1):156-162.

[7] 王志明,吕尚霖,王鑫,等. 建筑结构用抗震耐蚀耐火钢 Q460FRW 低温冲击韧性性能分析[J]. 钢结构(中英文), 2021,36(3):28-33.
WANG Zhiming, LYU Shanglin, WANG Xin, et al. Analysis on the impact resistance of Q460FRW for building structure at low temperature[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2021,36(3):28-33.

[8] 赵夏清,邢炜,卢凤奇,等. 高层建筑抗震钢板的轧制工艺与组织性能[J]. 锻压技术, 2021,46(1):186-190.
ZHAO Xiaqing, XING Wei, LU Fengqi, et al. Rolling technology and microstructure and properties on seismic steel plate for high-rise buildings[J]. Forging & Stamping Technology, 2021,46(1):186-190.

[9] 李敏,姚玉梅,李俊杰,等. 淬火-配分处理对齿轮轴用钢组织性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):170-174.
LI Min, YAO Yumei, LI Junjie, et al. Effect of quenching and partitioning treatment on microstructure and properties of steel for gear shafts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):170-174.

[10] 张丽凤,王社则,田博彤. 冷轧汽车中锰钢的逆相变退火与组织性能研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):159-162.
ZHANG Lifeng, WANG Sheze, TIAN Botong. Microstructure & properties of cold rolled medium manganese steel used in automobile after austenitic reverse transformation by annealing[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):159-162.

[11] 邱俊锋,陆春祥,林田子,等. 回火温度对高强抗震耐火钢板组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022,43(6):101-109.
QIU Junfeng, LU Chunxiang, LIN Tianzi, et al. Influence of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of high strength anti-seismic fire-resistant steel plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022,43(6):101-109.

[12] OLIVEIRA A P, FERREIRA T, COELHO R T, et al. Effect of building direction and heat treatment on the wear behavior of H13 tool steel processed by laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,33:9802-9810.

[13] XUZ L, YANG L, DU X J, et al. Fire resistance and seismic performance study of a high-strength construction steel using creep and internal friction analysis[J]. Metals, 2021,11(7):1045.

[14] 牛延龙,刘清友,贾书君,等. 控冷工艺下组织及 M/A 岛对管线钢韧性的影响[J]. 钢铁, 2020,55(6):91-100.
NIU Yanlong, LIU Qingyou, JIA Shujun, et al. Influence of microstructure and M/A island evolution on toughness of pipeline steel under controlled cooling process[J]. Iron and Steel, 2020,55(6):91-100.

[15] 梁炫,侯廷平,张东,等. 中碳 Nb 合金化钢液析碳化物的析出行为[J]. 金属学报, 2025,61(4):653-664.
LIANG Xuan, HOU Tingping, ZHANG Dong, et al. Precipitation behavior of primary carbides in medium carbon Nb-alloyed steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025,61(4):653-664.

引用本文:林超楠,李智,苏雅婷,等. 建筑用 SQ460FRW 耐火耐候钢的热处理与组织性能研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):181-185.
LIN Chaonan, LI Zhi, SU Yating, et al. Heat treatment and microstructure properties of SQ460FRW refractory and weathering steel for construction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):181-185.