

焊后热处理对 4Cr5MoSiV 模具钢修补焊接头组织和性能的影响

徐和林¹, 王江华²

(1. 西南交通大学希望学院, 四川 成都 610400;

2. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:采用 TIG 焊对 4Cr5MoSiV 模具钢进行修补焊, 并对其进行淬火和调质的焊后热处理, 利用扫描电镜、显微硬度计和拉伸试验机对 3 种状态(焊态、淬火态和调质态)接头的组织、硬度和拉伸性能进行观察和测量。结果表明, 焊态下焊缝组织主要为粗大的马氏体、奥氏体与析出碳化物。淬火处理后的焊缝组织主要为马氏体。调质处理后的焊缝组织主要为回火马氏体和少量的析出碳化物。焊态试件的焊缝区硬度平均值约 648.7 HV0.1; 淬火态试件的焊缝区硬度有所上升, 平均值约 670.1 HV0.1; 调质态试件的焊缝区硬度值下降, 约为 481.7 HV0.1, 与母材区硬度接近, 且硬度均匀。接头经焊后热处理后抗拉强度和伸长率均得到显著提升, 其中调质态接头抗拉强度和伸长率达到 1270 MPa 和 11.3%, 比焊态分别提升了 29% 和 30%。

关键词:4Cr5MoSiV 模具钢; 修补焊; 焊后热处理; 组织; 力学性能

中图分类号:TG156.1 **文献标志码:**A **文章编号:**0254-6051(2025)03-0064-05

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2025.03.010

Effect of post weld heat treatment on microstructure and properties of repair welded joints of 4Cr5MoSiV die steel

Xu Helin¹, Wang Jianghua²

(1. Southwest Jiaotong University Hope College, Chengdu Sichuan 610400, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Repair welding was performed on 4Cr5MoSiV die steel by using TIG welding, followed by post weld heat treatment of quenching and quenching and tempering. The microstructure, hardness, and tensile properties of the joints in three states (welded, quenched and quenched and tempered) were observed and measured by means of scanning electron microscope, microhardness tester, and tensile testing machine. The results indicate that the weld seam microstructure in as-welded state is mainly composed of coarse martensite, austenite, and precipitated carbides. After quenching the weld seam microstructure is mainly martensite, while its microstructure in the quenched and tempered state is mainly tempered martensite and a small amount of precipitated carbides. The average hardness of the weld zone in the as-welded specimens is about 648.7 HV0.1. The hardness of the weld zone in the quenched specimens increases, with an average value of about 670.1 HV0.1, and the hardness is uniform. The hardness value of the weld zone in the quenched and tempered specimens decreases to about 481.7 HV0.1, which is close to that of the base metal zone, and the hardness is also uniform. After post weld heat treatment, both the tensile strength and elongation of the joints are significantly improved. Among them, the tensile strength and elongation of the quenched and tempered joint reach 1270 MPa and 11.3%, which are 29% and 30% higher than those of the as-welded joint, respectively.

Keywords: 4Cr5MoSiV die steel; repair welding; post weld heat treatment; microstructure; mechanical properties

模具钢是用来制造各类模具的钢种, 其性能优劣对模具的质量与使用寿命有着重要影响。当前通过热处理工艺提高热锻模具钢的强韧性和耐磨性是热锻模具钢的发展趋势^[1]。模具在使用过程中受力复杂, 且工作环境如温度冷热交替变化大, 因此, 模具钢的常见失效形式有断裂、开裂、局部剥落等, 进而导致整套模

具不能正常使用甚至报废。为此, 对模具局部缺陷进行修补是工程应用的常用手段, 也是模具钢材的研究热点之一^[2]。

模具钢补焊方面的工程应用已较为成熟。在实际工程应用中, 较多依赖工程技术人员对模具钢材性能的掌握程度, 以及焊接等相关操作人员的经验。在理

收稿日期: 2024-12-07 修订日期: 2025-01-18

基金项目: 四川省重点研发计划(2023YFG0166); 国家自然科学基金青年基金(61603238)

作者简介: 徐和林(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为机械强度、机械产品设计, E-mail: xuhelin168@sina.com

引文格式: 徐和林, 王江华. 焊后热处理对 4Cr5MoSiV 模具钢修补焊接头组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(3): 64-68.

Xu Helin, Wang Jianghua. Effect of post weld heat treatment on microstructure and properties of repair welded joints of 4Cr5MoSiV die steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(3): 64-68.

论研究方面,许多学者对该工艺进行了深冷的研究。富学慧等^[3]阐述了补焊在模具件维修中的应用,总结了补焊在模具维修中的优势。曾平^[4]对 5CrNiMo 模具钢的焊接性能展开了研究,测定了接头的力学性能参数,研究发现补焊接头的性能可达到设计和使用要求。于锁清等^[5]采用激光锻造电弧技术对 H13 模具钢接头及性能展开了深入研究,将仿真获得的较优焊接参数作为焊接试验的输入,进而对激光锻造电弧焊接接头硬度进行分析。

4Cr5MoSiV1 与 4Cr5MoSiV 钢为常用热作模具钢材料,两者在材料成分上前者含 V 量要高于后者;在性能方面,前者高温性能优于后者,但淬透性差于后者。现有文献资料较多侧重于 4Cr5MoSiV1 钢的研究,包括回火温度、高温预回火以及其他加工方式(如冷拔)等对 4Cr5MoSiV1 钢性能的影响^[6-8]。而关于 4Cr5MoSiV 钢的相关研究和报道则相对比较少,刘建睿等^[9]对 4Cr5MoSiV 钢表层采用不同的离子渗氮工艺参数进行了研究,获得了最佳的工艺参数,同时提高了表面硬度。文献^[10]分析了稀土硅对 4Cr5MoSiV 钢性能的影响,结果表明稀土硅铁合金的添加能够提高材料的强度、耐磨性与冲击性能。焊后热处理能够降低接头残余应力、改善接头力学性能,而关于 4Cr5MoSiV 模具钢的焊接接头性能及焊后热处理方面的报道较少。因此,本文对 4Cr5MoSiV 模具钢的修补焊接展开研究,利用工程常用的 TIG 焊进行试验并分析焊接接头的性能,具有较强的工程应用意义。

1 试验材料与方法

本文所采用的试验材料为 4Cr5MoSiV 模具钢,具体化学成分如表 1 所示。该钢碳含量在 0.33%~0.43% 之间,属于中碳钢,较高的碳含量使 4Cr5MoSiV 钢的塑性较低,冷脆性、时效敏感性和淬透性较高。因此,该钢焊接性能一般,焊接时需严控焊接工艺。

表 1 4Cr5MoSiV 模具钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 4Cr5MoSiV die steel (mass fraction, %)

C	Cr	Mo	Si	Mn	V	Ni	Cu
0.33 ~ 0.43	4.75 ~ 5.50	1.1 ~ 1.6	0.8 ~ 1.2	0.2 ~ 0.5	0.3 ~ 0.6	≤0.25	≤0.3

模具钢焊接修补的实际应用中,通常沿焊缝进行铣削加工,完全去掉焊缝后再进行补焊。因此,为模拟模具钢实际工作状态,利用线切割和角磨机进行修补焊试样的制备,试样尺寸如图 1 所示,试样厚 5 mm,并

确保坡口内平整。

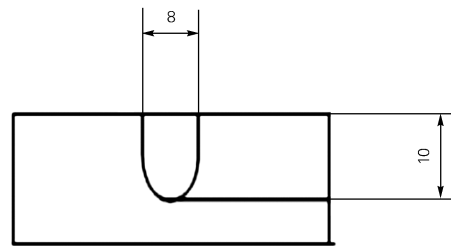


图 1 焊接试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welded specimen

采用 TIG(钨极氩弧)焊对 4Cr5MoSiV 模具钢进行修补焊试验,焊丝为 4Cr5MoSiV 钢焊丝,直径 $\phi 2$ mm,化学成分与母材相同,依据 AWS D1. 1/D1. 1M-2020 *Structural Welding Code-Steel*、实施经验以及现有文献^[8-9],焊接时保护气体选择 99.9% Ar,气流量为 15 L/min,焊接电流为 140~150 A。因 4Cr5MoSiV 模具钢易出现如夹渣等焊接缺陷,焊接前需将坡口及周边区域的铁锈、氧化皮、油污等清理干净,焊丝采用丙酮清理表面并吹干^[11-13]。

焊接完成后,采用数控线切割沿焊接样横截面切取试样,用于焊后淬火和调质处理,具体工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊后热处理工艺参数

Table 2 Process parameters of post weld heat treatment

热处理	工艺参数
淬火	1030 °C × 30 min, 油冷
调质	1030 °C × 30 min, 油冷 + 500 °C × 120 min, 空冷

焊态、淬火态和调质态试样经表面打磨抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀后,利用 Phenom XL 台式扫描电镜进行组织观察;采用 HV-1000 型显微硬度计测量试样横断面上不同位置的显微硬度,载荷为 0.98 N,保载时间 15 s,测量位置从表面至内部 2 mm,每隔 0.5 mm 测量一次;利用 INSTRON-5567 型电子式万能材料试验机进行拉伸性能测试,拉伸试样尺寸如图 2 所示,利用 Phenom XL 台式扫描电镜对拉伸断口形貌进行观察。

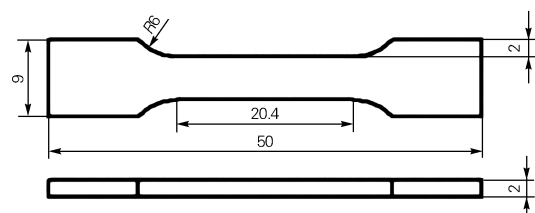


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图 3 为不同状态焊接接头焊缝区域的显微组织。图 3(a) 为 4Cr5MoSiV 模具钢的组织, 主要为回火马氏体和部分索氏体。4Cr5MoSiV 模具钢经焊接后的组织如图 3(b) 所示, 焊缝组织主要由粗大的马氏体、奥氏体和析出碳化物组成, 组织存在明显的枝晶偏析现象, 大量的碳化物分布在马氏体基体上, 且这些碳化物沿奥氏体晶界呈断续网状分布。由图 3(c) 可以看出, 1030 °C

保温过程中接头奥氏体化更加彻底, 经油冷后得到较多的片状马氏体和板条马氏体, 接头焊缝区域沿原奥氏体晶界分布的碳化物大幅减少, 且仍留有一定的偏析现象, 如晶界附近的白色块状区域。这是因为 4Cr5MoSiV 钢中含有 Cr 元素, Cr 有较强的抗腐蚀能力, 故在金相腐蚀后呈现一定的亮白色特征。图 3(d) 为调质处理后的焊缝组织, 接头淬火后再进行 500 °C 的高温回火, 回火过程使马氏体转化成回火马氏体, 同时还存在少量的析出碳化物, 晶粒得到细化, 组织更加均匀。

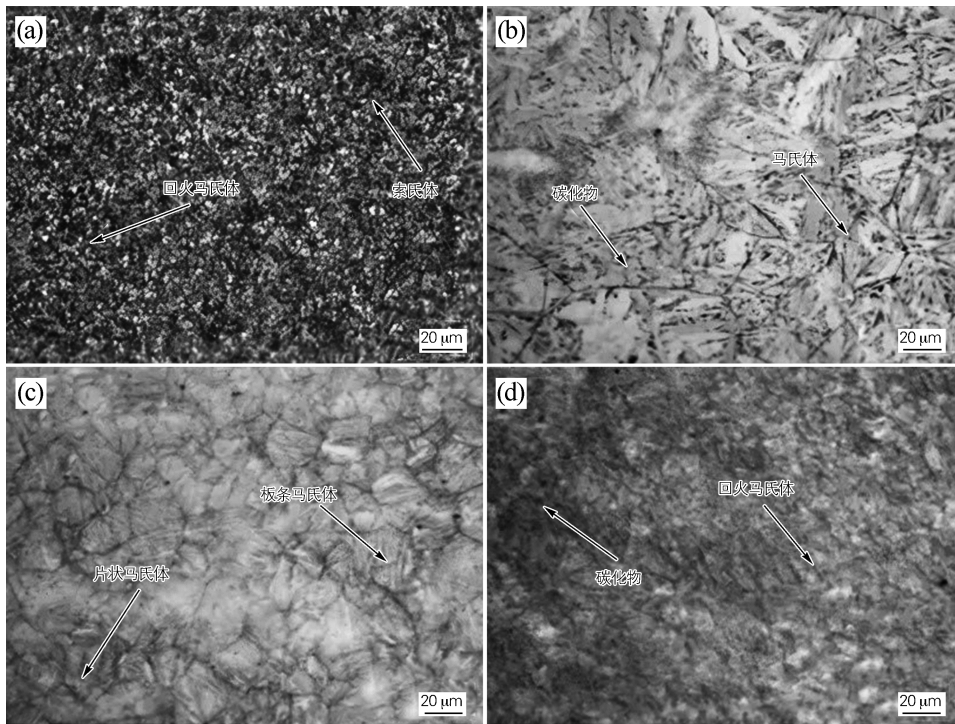


图 3 不同状态 4Cr5MoSiV 钢焊缝的显微组织

(a) 母材; (b) 焊态; (c) 淬火态; (d) 调质态

Fig. 3 Microstructure of the 4Cr5MoSiV steel weld seam in different states

(a) base matel; (b) welded; (c) quenched; (d) quenched and tempered

2.2 硬度

图 4 为不同状态 4Cr5MoSiV 钢焊接接头的硬度。由图 4 可见, 焊态接头硬度在离焊缝中心 3.5 mm 内处于一个较高水平, 平均值约 648.7 HV0.1, 这是由于焊缝区域的组织由粗大的马氏体、奥氏体与析出碳化物组成, 其硬度值较大。而热影响区是母材与焊缝的过渡区域, 组织成分变化较大, 且较母材和焊缝组织而言不太均匀, 组织成分主要是马氏体和残留奥氏体, 因此, 硬度值在热影响区出现了较大的变化。经淬火处理后, 整个焊接接头区域的硬度值呈现小幅上升, 离焊缝中心 3.5 mm 内的焊缝区域硬度平均值约为 670.1 HV0.1, 较焊态提高了 21.4 HV0.1。这是由于淬火保温过程奥氏体化更加彻底, 油冷后焊缝区域组织主要是板条状马

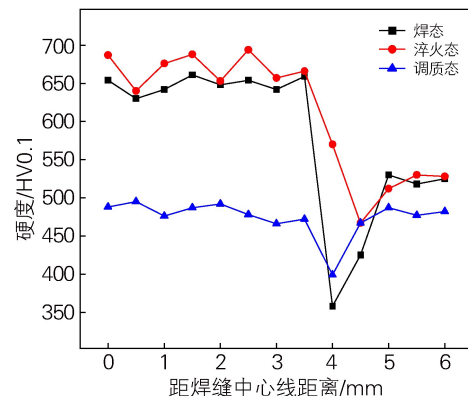


图 4 不同状态 4Cr5MoSiV 钢焊接接头的硬度

Fig. 4 Hardness of the 4Cr5MoSiV steel welded joints in different states

氏体、片状马氏体和奥氏体造成。经调质处理后,离焊缝中心3.5 mm内焊接接头硬度值约为481.7 HV0.1,相比焊态下降约167 HV0.1。硬度与母材区接近,分布更加均匀。这是由于接头淬火后经500℃高温回火使马氏体转化成回火马氏体,同时还存在少量的析出碳化物,使得硬度大幅降低。

2.3 拉伸性能

表3给出了3种状态焊接接头的拉伸性能测试结果。由表3可见,焊态、淬火态、调质态接头的抗拉强度和伸长率呈上升趋势,调质处理后的平均抗拉强度为1270 MPa,比焊态提高了29%;伸长率比焊态提升了30%。进一步对3种状态试样的拉伸断口进行观察发现,3种状态接头试样的断口形貌较为类似(见图5),都存在较多韧窝,焊态试样韧窝较

小、数量较多;淬火态试样韧窝略微变小,但局部有凹陷的抗;调质态试样韧窝最大,且深度较深。韧窝越大表明在拉伸过程中所承受的拉力越大,韧窝越稳定,拉伸性能越好,这与拉伸试验获得的结果保持一致。

表3 不同状态4Cr5MoSiV钢焊接接头的拉伸性能
Table 3 Tensile properties of the 4Cr5MoSiV steel welded joints in different states

热处理状态	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa	伸长率/%	平均伸长率/%
焊态	1008,959,990	986	8.8,8.4,8.9	8.7
淬火态	1050,1013,1042	1035	9.5,9.7,9.1	9.4
调质态	1278,1320,1211	1270	10.8,11.3,11.9	11.3

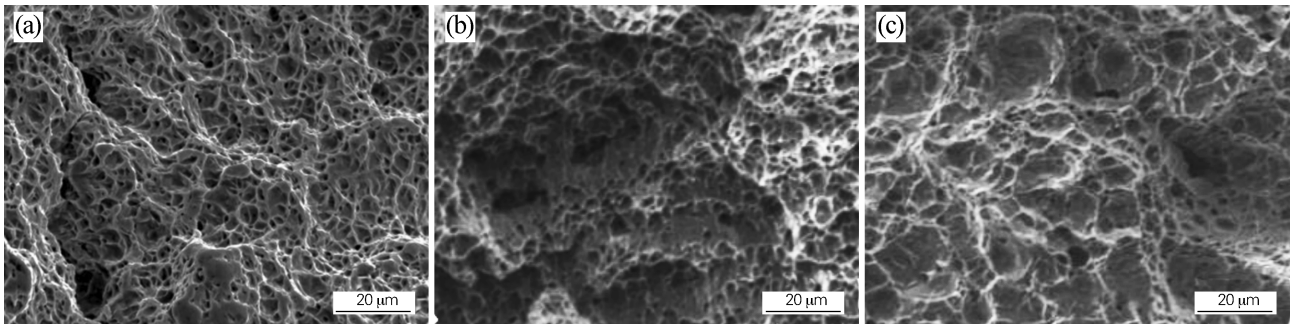


图5 不同状态4Cr5MoSiV钢焊接接头的拉伸断口形貌
(a)焊态;(b)淬火态;(c)调质态

Fig. 5 Tensile fracture morphologies of the 4Cr5MoSiV steel welded joints in different states
(a) welded; (b) quenched; (c) quenched and tempered

3 结论

1) 4Cr5MoSiV钢焊接接头焊态焊缝组织主要由粗大的马氏体、奥氏体和析出碳化物组成,有明显的枝晶偏析现象,大量的碳化物分布在马氏体基体上;经焊后淬火处理后,焊缝组织主要是马氏体,沿原奥氏体晶界分布的碳化物大幅减少,且仍留有一定的偏析现象;调质处理后的焊缝组织主要是回火马氏体和少量的析出碳化物,晶粒更加细化,组织更加均匀。

2) 4Cr5MoSiV钢焊接接头焊态焊缝区的平均硬度为648.7 HV0.1,经焊后淬火处理后,焊缝区平均硬度值为670.1 HV0.1,调质处理后焊缝区平均硬度值为481.7 HV0.1。

3) 4Cr5MoSiV钢焊接接头焊态抗拉强度为986 MPa,伸长率为8.7%;经淬火处理后,抗拉强度为1035 MPa,伸长率为9.4%;调质处理后,抗拉强度为1270 MPa,伸长率为11.3%。

参考文献:

- [1] 樊明强,赵英利,王超,等.国内热锻模具钢的发展现状[J].河北冶金,2024(5):9-13.
Fan Mingqiang, Zhao Yingli, Wang Chao, et al. The development status of hot forging die steel in China[J]. Hebei Metallurgy, 2024(5):9-13.
- [2] 赵柏森.热作模具钢特性及焊接修复应用现状[J].热加工工艺,2013,42(17):9-12.
Zhao Bosen. Application status of welding repair of hot-working die steel and its properties[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(17):9-12.
- [3] 富学慧,张富尧.补焊在模具件维修中的应用[C]//2021第十六届全国不定形耐火材料学术会议.2021:1-3.
- [4] 曾平.热作模具钢5CrNiMo焊接性及补焊接头性能研究[J].金属加工(热加工),2017(4):58-60.
- [5] 于锁清,张莉萍,王傲冰.热处理对汽车覆盖件用模具钢修复接头组织和性能的影响[J].热加工工艺,2017,46(23):246-249.
Yu Suoqing, Zhang Liping, Wang Aobing. Effects of heat treatment on microstructure and properties of repair joint of die steel for automobile panel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(23):246-249.

- [6] 邱宇, 袁飞, 曾元松, 等. 4Cr5MoSiV1 热作模具钢的热变形行为与热加工图[J]. 机械工程材料, 2021, 45(2): 71-77.
Qiu Yu, Yuan Fei, Zeng Yuansong, et al. Hot deformation behavior and hot processing maps of 4Cr5MoSiV1 hot working die steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(2): 71-77.
- [7] 王要利, 张彦敏, 宋克兴, 等. 回火温度对 4Cr5MoSiV1Ti 钢组织性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(S2): 24-28.
Wang Yaoli, Zhang Yanmin, Song Kexing, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of 4Cr5MoSiV1Ti steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(S2): 24-28.
- [8] 韩文奎, 张彦敏, 王要利, 等. 高温预回火对 4Cr5MoSiV1Ti 模具钢冲击韧性的影响[J]. 模具工业, 2019, 45(12): 32-35, 41.
Han Wenkui, Zhang Yanmin, Wang Yaoli, et al. Influence of high temperature pretempering on impact toughness of 4Cr5MoSiV1Ti die steel[J]. Die & Mould Industry, 2019, 45(12): 32-35, 41.
- [9] 刘建睿, 严宏志, 李算, 等. 离子渗氮工艺参数对 4Cr5MoSiV 钢表层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 199-205.
Liu Jianrui, Yan Hongzhi, Li Suan, et al. Effect of ion nitriding process parameters on surface properties of 4Cr5MoSiV steel [J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 199-205.
- [10] 叶四友, 范宏训, 李怀军. 稀土硅铁合金对 4Cr5MoSiV 钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(24): 50-51.
Ye Siyou, Fan Hongxun, Li Huaijun. Influence of RE Si-Fe alloy on microstructure and mechanical properties of 4Cr5MoSiV steel[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(24): 50-51.
- [11] 孙辉. 铸造模具钢焊接修复工艺研究[J]. 中国金属通报, 2017(1): 62-63.
- [12] 黄尚猛. Cr12 模具钢合金激光熔覆层的组织和性能研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(1): 161-165.
Huang Shangmeng. Study on microstructure and properties of alloy layer prepared by laser cladding on surface of Cr12 die steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(1): 161-165.
- [13] 田玉新. 热处理工艺对 H13 钢热疲劳性能的影响[J]. 热处理, 2018, 33(6): 42-48.
Tian Yuxin. Effect of heat treatment processes on thermal fatigue behavior of H13 steel[J]. Heat Treatment, 2018, 33(6): 42-48.
- [14] 周宋泽, 汪小锋, 陈剑斌. 低温回火时间对 GCr15 钢组织演变与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 64-71.
Zhou Songze, Wang Xiaofeng, Chen Jianbin. Effect of low temperature tempering time on microstructure evolution and mechanical properties of GCr15 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(5): 64-71.
- [15] 吴方俊, 邓小云, 揭晓华, 等. 热作模具用 H13 和 Dievar 钢的热疲劳性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 165-172.
Wu Fangjun, Deng Xiaoyun, Jie Xiaohua, et al. Thermal fatigue properties of H13 and Dievar steels for hot-work die [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(3): 165-172.

关于开展《热处理行业规范条件》达标企业推荐申报工作的通知

为提高热处理行业能源利用率,降低污染排放,淘汰落后技术和工艺,遏制低水平重复建设及恶性竞争,贯彻落实《关于利用综合标准依法依规推动落后产能退出的指导意见》、《机械行业绿色供应链管理企业评价指标体系》等文件精神,做好淘汰落后产能工作,促进行业高质量发展,参照中国热协团体标准《热处理行业规范条件》(T/CHTA003-2020)和《〈热处理行业规范条件〉管理办法》等文件,中国热协 2025 年继续在全行业开展《热处理行业规范条件》达标企业申报咨询工作。

申报热处理行业规范条件达标企业的单位应具备以下条件:

- (一)具有独立法人资格(无独立法人资格的热处理车间及热处理分厂可由具备法人资格的上级企业申报);
- (二)符合国家和本地区有关法律、法规、土地利用总体规划和产业发展规划;
- (三)无国家规定应淘汰的落后生产工艺和装备;
- (四)企业自查符合《热处理行业规范条件》具体要求;
- (五)申请之日前 2 年内无生产安全事故、无重大环境污染事故。

拟申报企业请参照《〈热处理行业规范条件〉管理办法》,认真填写《热处理行业规范条件达标企业申报书》(详见附件),并报送中国热协秘书处。形式审查合格后将组织行业专家进行现场审核,经审查符合规范条件要求的企业,在中国热处理行业协会网站上进行公示。公示期内无异议,报中国热协理事(常务理事)会批准,由中国热处理行业协会以“热处理行业规范条件达标企业”公告发布。

扫描二维码下载附件:①《热处理行业规范条件》(T/CHTA003-2020);②《〈热处理行业规范条件〉管理办法》;③热处理行业规范条件达标企业申报书。

联系人:石向东(13121925209,微信同号),朱光明(13581524688,微信同号)

E-mail:shixd@chta.org.cn 地址:北京市海淀区首体南路 12 号科技楼 518 室

