

卷取温度对 CSP 铁素体轧制低碳钢组织性能的影响

王承剑, 胡学文, 彭 欢, 吴志文, 余宣洵

(马鞍山钢铁股份有限公司 技术中心, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 采用不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺生产低碳钢, 通过显微组织、微观析出物、位错密度及性能测试研究了卷取温度对 CSP 铁素体轧制低碳钢组织和性能的影响。研究表明: 试样组织均由较粗的铁素体+少量珠光体组成, 析出物为 Al、Ti、Si 的氧化物或氮化物, 部分还与 MnS 复合; 卷取温度由 700 °C 下降至 620 °C 时, 屈服强度和抗拉强度分别增加了 31.6 和 25.9 MPa, 硬度波动范围由 12 HRB 上升至 25 HRB。提高卷取温度可以促进铁素体晶粒均匀化长大、降低位错密度, 能够有效降低强度并提高性能的均匀性。

关键词: 卷取温度; 铁素体轧制; 显微组织; 力学性能; 位错

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.023

中图分类号: TG335.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0158-05

Influence of coiling temperature on microstructure and properties for low carbon steel rolled by CSP ferrite

Wang Chengjian, Hu Xuewen, Peng Huan, Wu Zhiwen, Yu Xuanxun

(Technology Center, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China)

Abstract: Low carbon steel was produced by CSP ferrite rolling process under different coiling temperatures, and the influences of coiling temperature on the microstructure and properties of CSP ferrite-rolled low carbon steel were studied by microstructure, micro-precipitation, dislocation density and performance tests. The research results show that the sample structure is composed of coarser ferrite and a small amount of pearlite, the precipitates are oxides or nitrides of Al, Ti and Si, and some are also compounded with MnS. When the coiling temperature drops from 700 °C to 620 °C, the yield strength and the tensile strength increase by 31.6 and 25.9 MPa, respectively, and the hardness fluctuation range increases from 12 HRB to 25 HRB. Thus, increasing the coiling temperature can promote the growth and homogenization of ferrite grains, reduce the dislocation density, effectively reduce the strength and improve the uniformity of performance.

Key words: coiling temperature; ferrite rolling; microstructure; mechanical properties; dislocation

低碳钢是薄板坯连铸连轧 (Compact Strip Production, CSP) 产线的重要钢种之一, 被广泛应用于冷轧基料及各种冷成形部件的制造^[1-3]。但由于 CSP 的特点, 与常规流程产线相比, 产品的强度更高^[4-7], 显著影响材料的冲压性能。作为世界钢铁行业在热轧领域的前沿工艺之一的铁素体轧制工艺技术可以应用于 CSP 流程并显著降低低碳钢产品的强度^[8-10], 国内宝钢、武钢、首钢和马钢等均已实现该工艺的工业化生产。

相对于常规工艺, CSP 铁素体轧制工艺生产的

低碳钢的屈服强度下降 15%~25%, 氧化铁皮厚度降低 30%~50%, 并能显著降低轧机的负荷及电耗^[11]。然而由于其本身的工艺特点, CSP 铁素体轧制温度的工艺窗口窄、奥氏体向铁素体转变的临界区域材料的组织性能受温度影响的敏感性大, 奥氏体向铁素体相转变的不一致性导致 CSP 铁素体轧制低碳钢的性能均匀性相对较差, 下道冷轧镀锌工序时易产生边浪, 制约 CSP 铁素体轧制工艺的批量推广和应用^[12]。

因此, 本文通过对不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺得到的热轧钢卷的显微组织、微观析出物和位错密度进行分析, 并对试验卷的力学性能及硬度进行测试, 研究了卷取温度对 CSP 铁素体轧制低碳钢组织和性能的影响, 为 CSP 铁素体轧制工艺的批量推广和应用提供基础数据参考。

收稿日期: 2021-08-25; **修订日期:** 2021-11-30

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目 (18030901075)

作者简介: 王承剑 (1992-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 15949551089@163.com

1 试验材料及方法

选用的材料为某钢厂热轧商品材 SPHC 热轧钢板 (以下简称试验钢), 试验钢的化学成分如表 1 所示, 原始组织如图 1 所示。由图 1 可见, 试样典型原始组织为铁素体 (白色)+极少量的珠光体 (黑色)。

表 1 SPHC 试验钢的化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of SPHC test steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Als
≤0.070	≤0.050	0.08~0.30	≤0.025	≤0.015	0.020~0.060

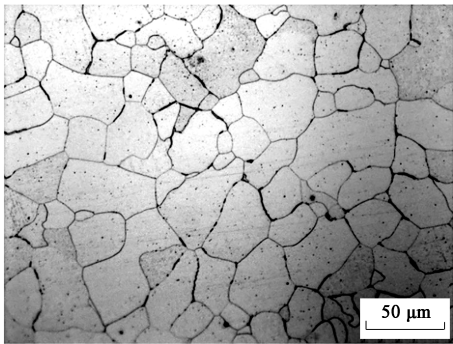


图 1 SPHC 试验钢原始组织
Fig. 1 Original structure of SPHC test steel

本试验固定板坯的厚度为 64 mm, 加热炉出炉温度设定为 (1100±20) °C, 终轧温度设定为 (800±20) °C, 采用后段冷却模式, 累计压下率为 95%, 设定不同的终冷温度, 即 700、660 和 620 °C, 获得

不同卷取温度工艺的热轧钢卷。轧制完成后, 按照标准 GB/T 2975—2018^[13] 取样, 进行力学性能和硬度测量试验。利用金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 以及透射电镜 (TEM) 对试样的显微组织、微观析出物和位错密度进行分析观察, 研究卷取温度对 CSP 铁素体轧制低碳钢组织和性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 卷取温度对试验钢显微组织的影响

图 2 为卷取温度为 700、660 和 620 °C 的 CSP 铁素体轧制工艺得到的对应试验钢的显微组织。从图 2 可以看出, 组织主要由较粗的铁素体晶粒+极少数的珠光体组成。一部分珠光体沿着铁素体晶界呈长条状分布, 少数珠光体分布在晶粒内部。CSP 铁素体轧制 SPHC 钢在终轧后形成了许多尺寸较大的形变铁素体晶粒, 同时还有少量的细小再结晶晶粒, 经过高温卷取后发生回复或静态再结晶和晶粒长大, 轧后形成的形变铁素体晶粒随着卷取温度的升高, 晶粒尺寸进一步增大, 最终形成了粗大的铁素体组织^[14]。此外, 随着卷取温度由 620 °C 提高至 700 °C, 铁素体晶粒增大 1 级, 并且细小的铁素体晶粒明显减少。

利用透射电镜分析不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺得到的热轧板的微观析出物形貌, 析出物的形貌及 A 点、B 点、C 点的能谱分析结果如图 3 所示。对于不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺得到的热轧板, 通过复型观察到的析出物没有明显的区别, 析出物尺寸在 30~70 nm 范围内波动, 通过能

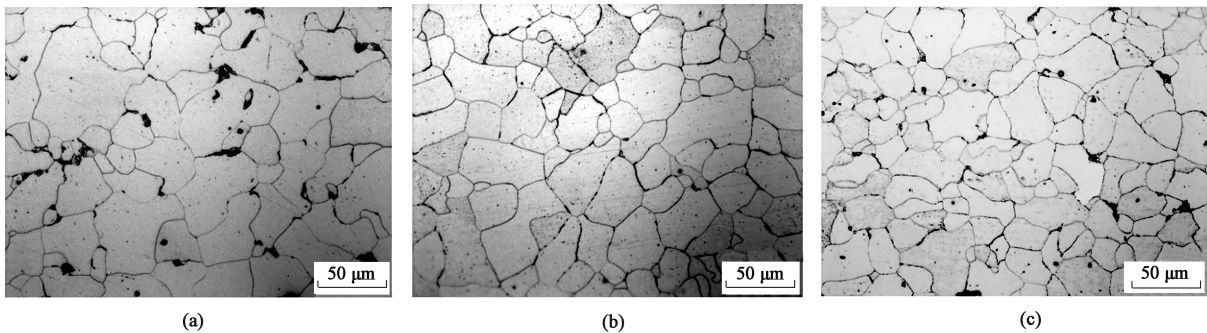


图 2 不同卷取温度 CSP 铁素体轧制工艺下试验钢的金相组织
(a) 700 °C (b) 660 °C (c) 620 °C

Fig. 2 Microstructures for test steel under CSP ferrite rolling process at different coiling temperatures

谱分析结果显示试样组织析出物与卷取温度无明显联系, 均为 Al、Ti、Si 的氧化物或氮化物, 部分还与 MnS 复合。

2.2 卷取温度对试验钢性能的影响

为了减少取样及检验过程带来的误差, 按照标准 GB/T 2975—2018^[13] 对不同卷取温度 CSP 铁素体

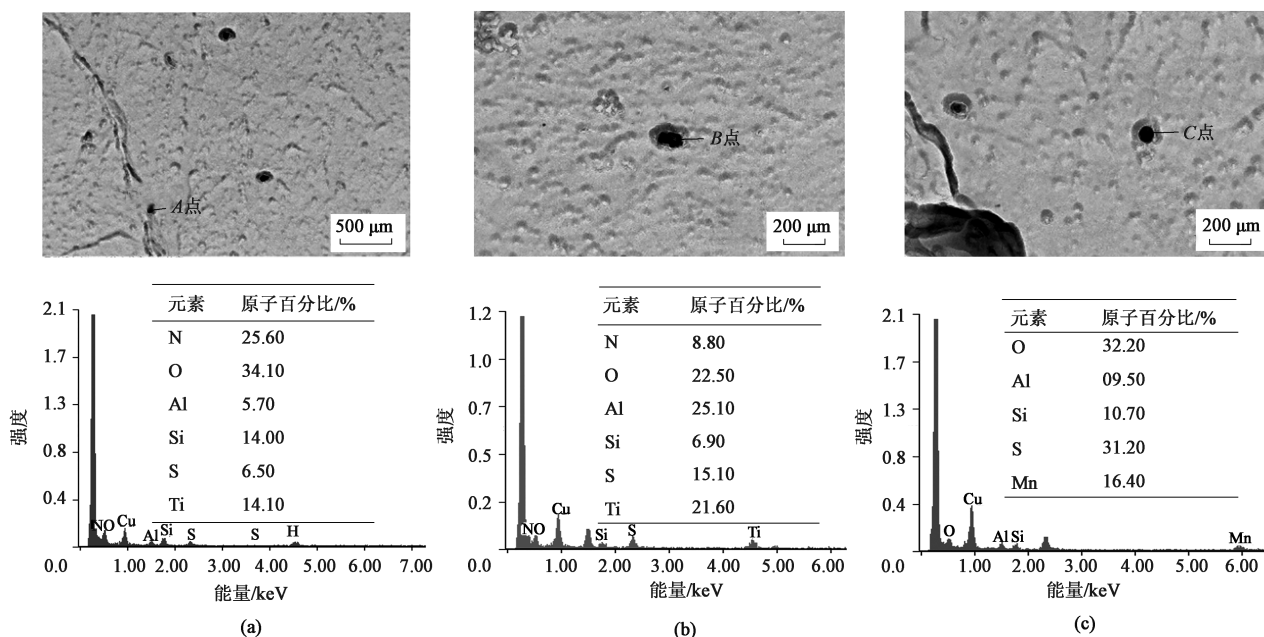


图 3 不同卷取温度 CSP 铁素体轧制工艺析出物 TEM 形貌及能谱分析

(a) 700 °C (b) 660 °C (c) 620 °C

Fig. 3 TEM morphologies and energy spectrum analysis of precipitates under CSP ferrite rolling process at different coiling temperatures

轧制工艺得到的试样沿宽度方向取 8 块试样进行力学性能和硬度测量试验, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 采用 700 °C 卷取温度 CSP 铁素体轧制工艺得到的样品的性能最差, 屈服强度为 214.7 MPa, 抗拉强度为 331.2 MPa, 伸长率为 41.5%。随着卷取温度的降低, 伸长率均值无明显变化, 屈服强度和抗拉强度均呈上升趋势, 分别增加了 31.6 和 25.9 MPa, 不利于产品的冲压性能。分析认为卷取温度较高时, 铁素体晶粒粗大、均匀, 随着卷取温度的降低, 铁素体的长大速度减慢, 铁素体晶粒细化, 铁素体晶粒尺寸变小, 同时珠光体趋于弥散细

小, 珠光体的片层间距也逐渐减小。因此, 宏观上随着卷取温度的下降, 屈服强度和抗拉强度逐渐增加。图 4b 为不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺试样在全宽度方向的硬度分布, 随着卷取温度的下降, 试样硬度均值变化较小, 分别为 55.2、54.7 和 56.9 HRB, 但是硬度波动呈现上升趋势; 卷取温度由 700 °C 下降至 620 °C, 试样在全宽度方向的硬度波动由 12 HRB 上升至 25 HRB。相关研究表明^[14], 轧后形成的形变铁素体晶粒经过高温卷取会发生回复或静态再结晶和晶粒长大, 并且细小的铁素体晶粒明显减少; 此外, 高的卷取温度有利于位错密度

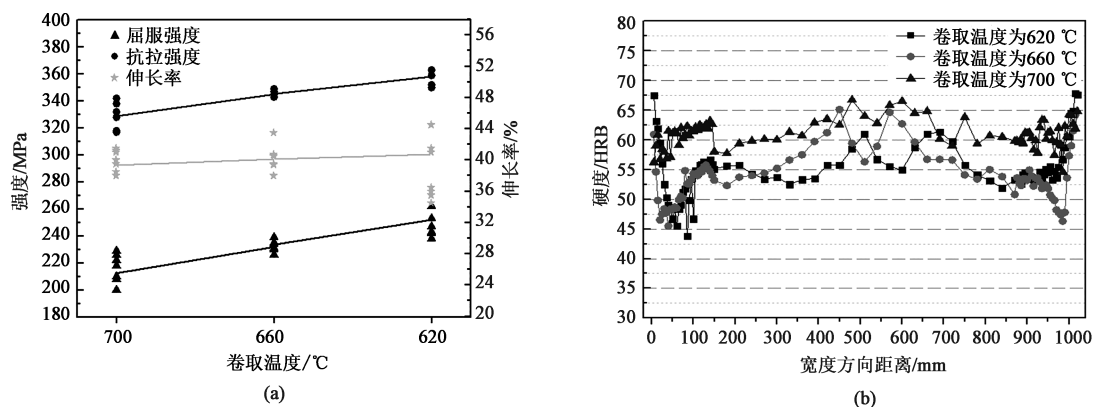


图 4 不同卷取温度的 CSP 铁素体轧制工艺下试样的性能对比

(a) 力学性能 (b) 硬度

Fig. 4 Property comparison of samples under CSP ferrite rolling process at different coiling temperatures

(a) Mechanical properties (b) Hardness

下降,提升板卷性能的均匀性。由此可以看出,提高卷取温度可以有效改善热卷在宽度方向的性能波动,提高全板宽度方向硬度的均匀性。

为了进一步验证卷取温度在CSP铁素体轧制工艺中对试样力学性能的影响,采用透射电镜观察试样的位错情况,试样双面磨光至60 μm ,冲成 $\Phi 3\text{ mm}$ 的小圆片,然后进行电解双喷,观察到的位错如图5所示。图5为不同卷取温度的CSP铁素体轧制工艺得到的试验样板的位错密度对比,

可以看出随着CSP铁素体轧制热轧板的卷取温度从700 $^{\circ}\text{C}$ 降低至620 $^{\circ}\text{C}$,试样的位错密度逐渐增大。位错密度的增加使得材料本身产生强烈的交互作用,位错之间以及其他因素抑制位错运动,提高材料的性能,所以宏观上随着卷取温度的下降,屈服强度和抗拉强度逐渐增加。此外,随着卷取温度的下降,位错密度分布亦呈现聚集状态,所以硬度波动有所增加,不利于全宽度方向上性能的均匀性。

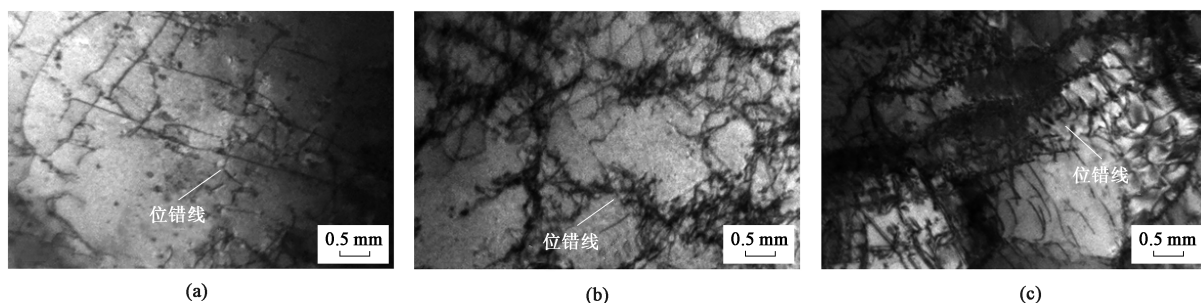


图5 不同卷取温度CSP铁素体轧制工艺下试样的位错密度对比

(a) 700 $^{\circ}\text{C}$ (b) 660 $^{\circ}\text{C}$ (c) 620 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Dislocation density comparison of samples under CSP ferrite rolling process at different coiling temperatures

3 结论

(1) 不同卷取温度CSP铁素体轧制工艺下的试样组织主要由较粗的铁素体+少量沿晶界分布的长条状珠光体+少量分布在晶粒内部的珠光体组成。析出物均为Al、Ti、Si的氧化物或氮化物,部分氧化物或氮化物还与MnS复合。

(2) 随着卷取温度由700 $^{\circ}\text{C}$ 下降至620 $^{\circ}\text{C}$,硬度、伸长率均值无明显变化,屈服强度和抗拉强度均呈上升趋势,分别增加了31.6和25.9 MPa;硬度波动范围呈上升趋势,由12 HRB上升至25 HRB。

(3) 提高卷取温度可以促进铁素体晶粒均匀化长大、降低位错密度,能够有效降低材料的强度并提高性能的均匀性。

参考文献:

- [1] 毛新平,高吉祥,柴毅忠.中国薄板坯连铸连轧技术的发展[J].钢铁,2014,49(7):49-60.
Mao X P, Gao J X, Chai Y Z. Development of thin slab casting and direct rolling process in China [J]. Iron & Steel, 2014, 49 (7): 19-60.
- [2] 曹建国.薄板坯连铸连轧工艺与设备[M].北京:化学工业出版社,2017.

- Cao J G. Thin Slab Continuous Casting and Rolling Technology and Equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [3] 康永林,温德智,吴光亮,等.薄板坯连铸连轧生产冷轧基板的工艺与组织性能分析[J].山东冶金,2006,(2):6-10.
Kang Y L, Wen D Z, Wu G L, et al. Investigation on the processing microstructure properties of plate by TSCR for colding rolling [J]. Shandong Metallurgy, 2006, (2): 6-10.
- [4] 张志鸿,李成亮,曹晓恩,等.DC06超低碳钢铁素体轧制工艺生产实践[J].轧钢,2021,38(3):104-108.
Zhang Z H, Li C L, Cao X E, et al. Production practice of the ferrite rolling of ultra-low carbon steel DC06 [J]. Steel Rolling, 2021, 38 (3): 104-108.
- [5] 周旬,王晓东,王建功,等.铁素体区轧制工艺在半连续轧机上的应用研究[J].轧钢,2019,36(1):25-30.
Zhou X, Wang X D, Wang J G, et al. Research on key technologies of ferrite zone rolling process in semi-continuous rolling mill [J]. Steel Rolling, 2019, 36 (1): 25-30.
- [6] Liu Y Z, Hu X W, He G N, et al. The deformation behavior of steel SPHC during ferrite rolling in CSP process [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 29: 498-503
- [7] 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 X Q, Xing W, Lu F Q, 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.
- [8] 蔡珍,韩斌,刘洋,等.铁素体区轧制工艺应用现状及发展策略分析[J].轧钢,2013,30(6):41-44.

- Cai Z, Han B, Liu Y, et al. Application status and development strategies of ferrite rolling [J]. Steel Rolling, 2013, 30 (6): 41-44.
- [9] 王建功, 赵虎, 夏银锋, 等. 常规热连轧线 Ti-IF 钢铁素体轧制工艺研究与应用 [J]. 钢铁, 2017, 52 (10): 65-71.
- Wang J G, Zhao H, Xia Y F, et al. Development of application of ferrite rolling to Ti-IF steel in hot continuous rolling line [J]. Iron and Steel, 2017, 52 (10): 65-71.
- [10] 周博文, 樊雷, 李显, 等. 铁素体轧制对普通冷钢板组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2021, 46 (5): 138-143.
- Zhou B W, Fan L, Li X, et al. Effect of ferrite rolling on microstructure and properties of steel plate cold-rolled common [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (5): 138-143.
- [11] 封勇. CSP 线铁素体轧制与奥氏体轧制钢板的组织性能比较 [J]. 金属材料与冶金工程, 2010, 38 (2): 25-27.
- Feng Y. Research on the microstructure and properties of LC steel of ferrite rolling and austenite rolling in CSP [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2010, 38 (2): 25-27.
- [12] Rudolf Kawalla, Wolfgang Lehnert. Hot rolling in ferrite region [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002, 31 (4): 281-287.
- [13] GB/T 2975—2018, 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备 [S].
- GB/T 2975—2018, Steel and steel products—Location and preparation of test pieces for mechanical testing [S].
- [14] 胡学文. CSP 流程铁素体轧制关键技术及材料软化机理研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- Hu X W. The Key Technologies of Ferrite Rolling and Softening Mechanism of Steel Produced on CSP Process [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

关于开展第十二期“锻压企业质量工程师”培训班 (有色金属及高温合金锻造工艺与标准) 的通知 (第三轮)

为促进我国锻压企业实行规范化生产, 提高企业生产技术水平、管理水平和市场竞争能力, 满足各企业对质量管理体系和安全生产管理体系的需求, 同时, 提高锻压企业技术人员和质量管理人员对相关国家与行业标准的理解和使用能力, 全国锻压标准化技术委员会经研究决定, 自 2013 年起, 在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训与认证工作, 以及锻压标准宣贯工作。为配合此项工作, 本标委会将按“模锻”、“自由锻”、“特种成形”、“冲压”等专题陆续举办相关培训班, 截止目前已成功举办十一期, 取得了很好的效果, 得到广大锻压企业认可和支持。

第十二期“‘锻压企业质量工程师’培训班——有色金属及高温合金锻造工艺与标准”将于 2022 年举办。请各单位尽快报名, 有关事宜通知如下:

一、报名条件

具备中专及以上学历的企业负责人、质量主管、安全卫生主管、标准化工作人员和锻压专业技术人员。

符合报名条件的上述人员, 须由本人填写报名表, 并经单位审核同意后方可报名。

二、培训内容

- (1) 有色金属及高温合金锻造技术、工艺、装备发展现状与发展趋势
- (2) 锻造车间安全生产与环境保护
- (3) 有色金属及高温合金锻造模拟技术及优化设计
- (4) 高温合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析
- (5) 铝合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(6) 镁合金、锆合金和铜合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(7) 钛合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(8) 有色金属及高温合金锻件的缺陷分析与控制

(9) 企业参观与讨论

(10) 考试与测评

三、主讲教师

我国锻压领域知名专家、企业负责人、高级工程师、现场管理人员、知名院校教授等。

四、培训时间及地点

培训时间: 2022 年 10 月 28—31 日。

培训地点: 安徽省芜湖市新百陵大酒店。

五、报名方式

欲参加培训的学员, 请您填好回执表 (登陆网站 <http://www.fstjournal.net> 下载), 通过 E-mail 发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

六、联络方式

全国锻压标准化技术委员会

联系人: 林玉彤、魏 巍、金 红

地 址: 北京市海淀区学清路 18 号 709 室 (100083)

电 话: 010-62920652; 18811346037; 13439515704

E-mail: fst_linyutong@163.com;

dyjsjournal@163.com;

duanya2005@126.com

全国锻压标准化技术委员会