

# Study on Welding Joint Defects and Properties of 65Mn Spring Steel

Sansheng Jiang, Yingchao Liu, Kejing Huang

School of Mechanical and Electronic Engineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing  
Email: 82503@bvca.edu.cn

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Apr. 15<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2020

---

## Abstract

In order to study the welding properties of 65Mn spring steel, the welding joints of 65Mn spring steel were studied with the simulation of welding composition, welding process, welding defects detection and notches sensitivity. The results show that the main phase compositions of the welded joint of 65Mn spring steel were Martensite/Bainite duplex structure; the post weld cooling time of 65Mn steel was 180s for each weld bead; the defects distribution in the weld zone of the No.3 Blade welding joint were relatively concentrated. There are a lot of defects in the weld zone of 65Mn steel. There were three main types of defects: round or oval white spots, macroscopic slag inclusion and linear distribution micro-cracks. The average notch sensitivity ratios of 65Mn steel and 65Mn steel welded joints are more than one, and they are not sensitive to the notch.

## Keywords

65Mn Spring Steel, Welding Joint, Numerical Simulation, Notch Sensitivity

---

# 65Mn弹簧钢焊接接头缺陷及焊接性能研究

蒋三生, 刘英超, 黄可京

北京农业职业学院机电工程学院, 北京  
Email: 82503@bvca.edu.cn

收稿日期: 2020年4月2日; 录用日期: 2020年4月15日; 发布日期: 2020年4月22日

---

## 摘要

为了研究65Mn弹簧钢的焊接性能, 采用焊接成分模拟、焊接过程模拟、焊接缺陷检测以及缺口敏感性等对65Mn弹簧钢焊接接头进行了研究。结果表明: 65Mn弹簧钢焊接接头的主要相成分为马氏体/贝氏

体复相组织；65Mn钢焊接每一焊道设置的焊后冷却时间为180 s；刀片3焊接接头的焊缝内缺陷分布较为集中；65Mn钢焊接焊缝区存在大量缺陷，缺陷主要有三类：呈圆形或椭圆形的白色斑点、宏观的夹渣等缺陷、线性分布的微观裂纹；65Mn钢和65Mn钢焊接接头的缺口敏感度均值大于1，均对缺口均不敏感。

## 关键词

65Mn弹簧钢，焊接接头，数值模拟，缺口敏感性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

65Mn 钢的强度、硬度、弹性和淬透性均高于 65 号钢，具有过热敏感性和回火脆性倾向，水淬有形成裂纹倾向[1]，其退火态可切削性尚可，但冷变形塑性低，焊接性差。65Mn 钢主要应用于机械、交通等部门，常见的零部件有受中等载荷的板弹簧，直径达 7~20 mm 的螺旋弹簧及弹簧垫圈、弹簧环，磨床主轴、弹簧卡头、精密机床丝杆、切刀、螺旋辊子轴承上的套环、铁道钢轨等高耐磨性零件[2]。

由于 65Mn 钢是高碳钢，含碳量高、强度高、耐磨性好，但是焊接性相对较差，焊接热影响区容易出现脆硬马氏体，在接头中容易出现热裂纹。当接头中含有较多的扩散氢，焊件刚度较大和焊条选用不当时，还容易产生冷裂纹，所以焊接弹簧钢的焊接在国内外都属于一个难题[3]。

目前，65Mn 弹簧钢的主要焊接方法有手工电弧焊、电渣焊、电阻焊、钨极氢弧焊、激光焊接等。65Mn 弹簧钢的手工电弧焊通常采用 J426、J427、A302、A307 等焊条进行焊接，焊前局部预热 300℃ 以上，预热区的宽度在焊缝两侧各 50 mm 以上。焊接后，对焊接接头进行 350℃~400℃ 的回火处理，然后缓慢冷却，减少焊接应力和焊缝扩散氢含量，防止出现焊接裂纹[4]。山东大学高伟[5]尝试采用钨极氢弧焊的方法对 65Mn 钢丝进行了焊接试验，研究表明当焊接电流为 10 A 时可得到外形完美的柱状焊接接头，但接头非常脆硬。采用加热温度，保温的后续热处理工艺可以适当地降低接头脆性及硬度。但由于钨电极载流能力的限制，所焊接的工件厚度有限，焊接速度和生产率都比较低。激光器发明后，激光焊接弹簧钢得以研究和应用，取得了一定的焊接效果，并应用于工业生产中[6]。激光焊接技术为弹簧钢的焊接开创了一个新的局面。由激光束形成的焊缝质量高，且操作灵活，因而在工业中得到广泛应用。目前，已经把激光焊接技术广泛的用于汽车、飞机等弹簧钢部件的焊接中[7]。

65Mn 钢的含碳量过高、存在热影响区大、热脆性严重等问题，为了探寻解决农用璇耕机刀片(65Mn 材质)失效后的焊接修复问题，本文对刀片状的 65Mn 钢焊接试样进行焊接，研究焊接接头的性能和特征，以便对 65Mn 钢的焊接进行工艺指导。

## 2. 实验

### 2.1. 实验材料

实验材料为 65Mn 弹簧钢，化学成分如表 1 所示。焊接材料选用 J707 焊条，化学成分如表 2 所示。

**Table 1.** Chemical composition of 65Mn spring steel**表 1.** 65Mn 弹簧钢化学成份

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
含量 wt. %	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.30	≤0.25

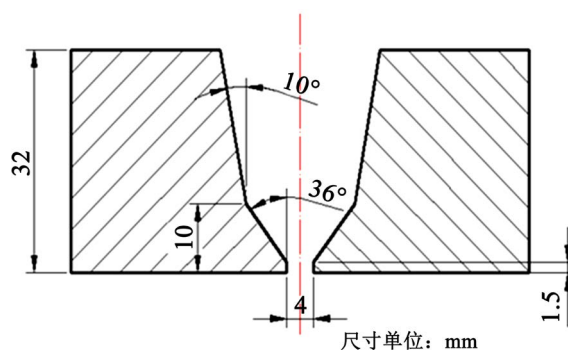
**Table 2.** Composition of J707 welding Material**表 2.** J707 焊接材料成分

元素	C	Si	Mn	S	P	Mo
含量 wt. %	0.12	0.50	1.7	0.015	0.010	0.40

## 2.2. 实验方法

### (1) 焊接试验

焊接试验用钢焊接接头采用对接形式，坡口为双边 V 型，如图 1 所示。采用手工钨极氩弧焊焊接打底焊接，然后采用手工电弧焊及多道焊接技术填充和盖面，每焊道的宽度 ≤ 4 倍所用焊条直径，厚度 ≤ 所用焊条直径。共焊接三组平行试样，进行相关检测。

**Figure 1.** Welding groove**图 1.** 焊接坡口

### (2) 焊接成分及焊接数值模拟

采用 Thermo-Calc 软件系统对 65Mn 弹簧钢焊接熔覆金属的相组成以及高温相组成随时间的变化进行了模拟计算；采用 ANSYS 软件对 65Mn 弹簧钢焊接温度场和焊接温度热循环过程进行了数值模拟。

### (3) 焊接缺陷检测

对 65Mn 弹簧钢焊接接头焊缝进行了相控阵超声检验，相控阵超声波检测仪使用奥林巴斯 MX2，探头使用 5L128-0.8 × 12-SD11，以扇形扫查显示缺陷分布状态。

### (4) 缺口敏感性

材料的缺口敏感性通常用缺口敏感度 NSR (notch sensitivity ratio) 来表征， $NSR = R_{bn}/R_n$ ，其中  $R_{bn}$ 、 $R_n$  分别为带缺口试样和无缺口等截面光滑试样的抗拉强度，分别从 65Mn 弹簧钢焊接接头母材和焊缝无缺陷区域取样。

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 焊接成分模拟

Thermo-Calc 软件系统是目前被广泛应用的大型商业化计算热力学软件，它包括了欧洲共同体热化学

科学组(SGTE)共同研制的物质和溶液数据库、热力学计算系统和热力学评估系统,强大的计算功能以及准确的热力学信息来源使其成为钢铁材料研发的有效工具[8]。本研究采用该软件对 65Mn 弹簧钢焊接材料(化学成分见表 1)的高温相组成进行了模拟计算,结果显示高温相的主要成分为马氏体/贝氏体复相组织。

### 3.2. 数值模拟

利用 ANSYS 软件计算之后,通过 ANSYS 软件的后处理功能就可以得到所需要的结果。

#### (1) 焊接温度场分布云图

图 2 为第一焊道在焊接第 10、29 和 180 s 时的温度场分布云图,可以看出,施加热源后,热源所在处温度迅速升高,温度场开始形成,在  $t = 29$  s 时准稳态温度场基本形成,不再发生变化,等温线形状表现为以焊接方向为对称轴的椭圆形,焊接热源前方等温线密集,温度梯度大;焊接热源后方等温线稀疏,温度梯度较小。

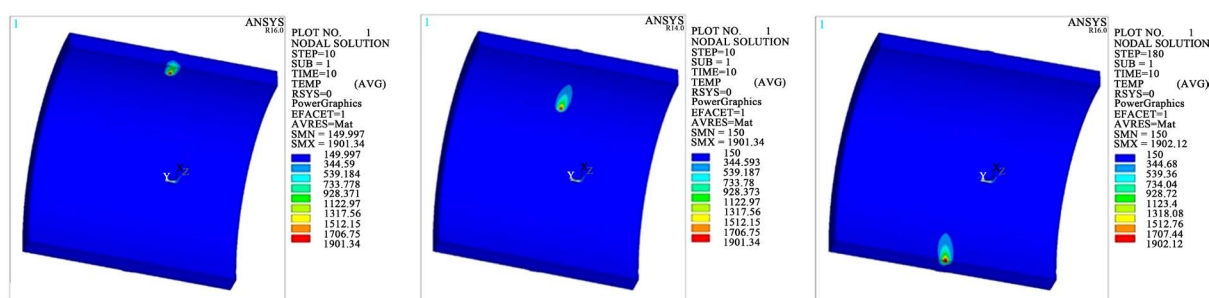


Figure 2. Temperature distribution nephogram of the first pass in 10 s, 29 s and 180 s during welding

图 2. 焊接过程中第一焊道在 10 s、29 s、180 s 的温度场分布云图

图 3 为最后一焊道在焊接第 20、33 和 180 s 时的温度场分布云图,可以看出,与第一道焊道的温度场分布云图类似,在施加热源后的第 33 s (即  $t = 33$  s) 热源所在处准稳态温度场形成。由于焊接速度较快,焊道较窄,管道壁较厚,所以温度场分布云图中热源区域相对较小。

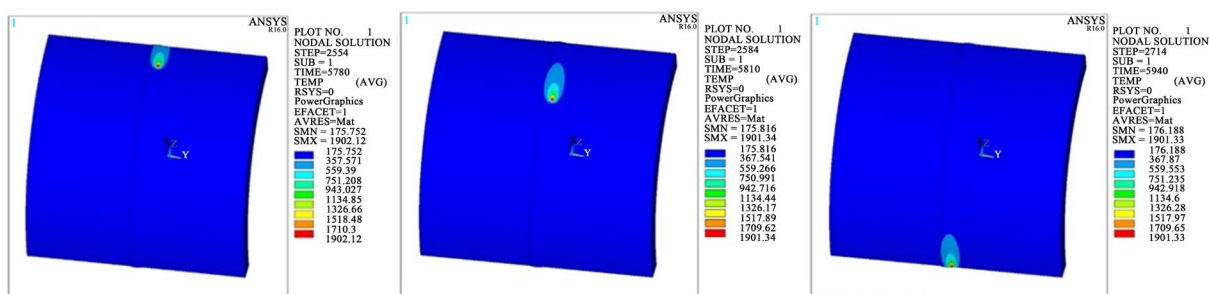


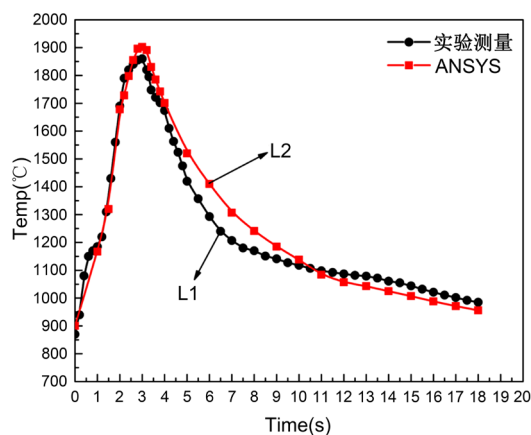
Figure 3. Temperature distribution nephogram of the last pass in 10 s, 33 s and 180 s during welding

图 3. 焊接过程中最后一焊道在 10 s、33 s、180 s 的温度场分布云图

由于 65Mn 钢焊接的最佳层间温度在  $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$  之间,所以在进行下一道焊接时,上一焊道起焊位置的温度应在  $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$  之间,故为每一焊道设置的焊后冷却时间为 180 s。

#### (2) 焊接温度热循环曲线

图 4 给出了模拟的熔合区第 9379 号节点的焊接温度热循环曲线(L2)与用红外线热成像仪实际测得的焊接温度热循环曲线(L1)的高温部分,总体来看,两条曲线吻合较好,说明本课题所建模型是准确的,焊接温度场的模拟结果是可靠性。



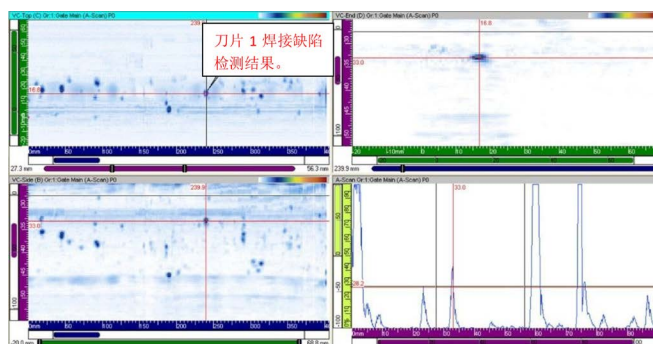
**Figure 4.** Thermal cycle curves of welding temperature of the simulated and measured fusion zone  
**图 4.** 模拟与实测的熔合区焊接温度热循环曲线

### 3.3. 焊接接头缺陷检测及分析

采用相控阵超声的方法对焊接接头进行了宏观缺陷检测，并应用金相分析的方法对缺陷的显微形貌及特征进行观察分析。

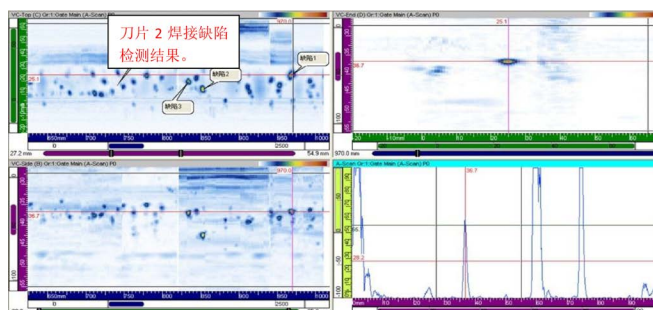
#### (1) 相控阵超声检测结果

对三种刀片的焊接接头取样焊缝进行了相控阵超声检验，探头使用 5L128-0.8×12-SD11 探头，取样焊缝内部存在多处点状缺陷(见图 5~7)，其中刀片 3 的焊接接头的焊缝内缺陷分布较为集中。选取三处较为典型的缺陷进行具体描述，见表 3。



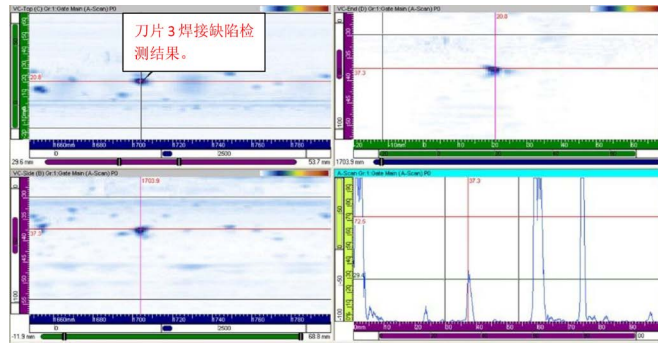
**Figure 5.** Phase array detection result of welding seam of No.1 Blade welded joint

**图 5.** 刀片 1 焊接接头焊缝相控阵检测结果



**Figure 6.** Phase array detection result of welding seam of No.2 Blade welded joint

**图 6.** 刀片 2 焊接接头焊缝相控阵检测结果



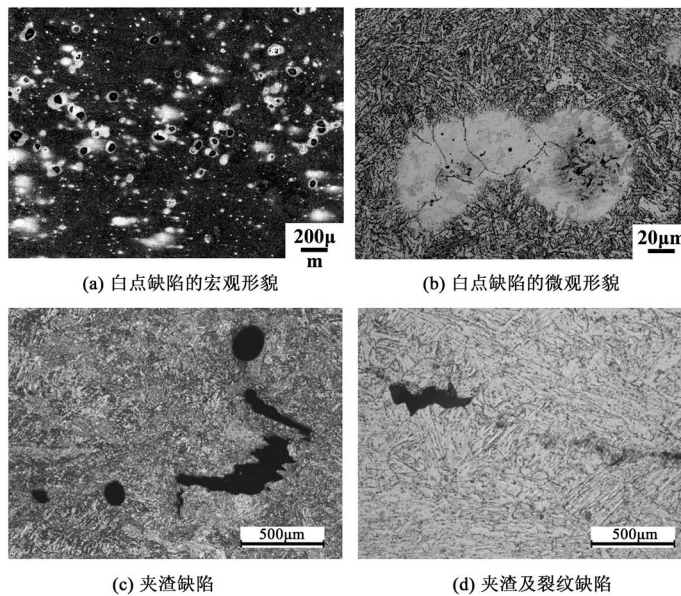
**Figure 7.** Phase array detection result of welding seam of No.3 Blade welded joint  
**图 7.** 刀片 3 焊接接头焊缝相控阵检测结果

**Table 3.** Analysis of partial defect size in phased array inspection  
**表 3.** 相控阵检验部分缺陷尺寸分析

编号	焊缝深度	水平位置	周向宽度	深度宽度	水平宽度
刀片 1	28 mm	焊缝中心	6mm	3 mm	1 mm
刀片 2	18 mm	焊缝中心	5 mm	3 mm	1 mm
刀片 3	22 mm	焊缝中心	4 mm	2 mm	1 mm

(2) 缺陷的显微形貌及特征分析

通过相控阵超声对焊缝进行检验，发现焊缝区存在大量缺陷。图 8 显示出了光学显微镜下焊缝区缺陷的典型形貌。可以看出，缺陷从形态上看，主要有三类：一种为呈圆形或椭圆形的白色斑点(见图 8(a))，斑点密度大约为 35 个/mm<sup>2</sup>，一些斑点内有发丝状裂纹存在(见图 8(b))，裂纹在斑点内部呈放射状分布，这种缺陷的数量较多；一种为宏观的夹渣等缺陷(图 8(c))；一种在光学显微镜下显示为线性分布的微观裂纹(图 8(d))，数量较少。



**Figure 8.** Morphology of defects in Weld Zone under optical microscope  
**图 8.** 光学显微镜下焊缝区缺陷的形貌

综上,通过对试验所用 65Mn 钢焊接接头进行了超声探伤,结果发现焊接接头中存在大量的缺陷,且缺陷主要集中于焊缝中心区域。通过显微镜对缺陷进行观察分析,结果表明缺陷主要有两类:一类是冷裂纹,一类是夹渣。

冷裂纹具有延迟特征,主要形成因素是氢含量高,所以也称为氢致裂纹,裂纹尺寸多在 10~20  $\mu\text{m}$  之间,发现的最大裂纹长度为 260  $\mu\text{m}$ 。通过分析,认为这些裂纹主要是冷裂纹。冷裂纹的形成,除了氢含量高以外,还与材料本身的淬硬倾向、结构拘束应力有关。65Mn 钢本身淬硬倾向大,易产生冷裂纹。另外,在我国范围内,65Mn 钢为弹性钢,设计厚度比较厚,增加了焊接过程中产生的焊接残余应力,拘束应力增加。如果焊后回火不够充分,将导致焊缝残余应力过大,提高了产生焊接冷裂纹的倾向,如果回火过程过于充分,导致焊缝组织的马氏体相消失,晶粒长大,则会导致焊接接头的高温性能显著下降,蠕变裂纹扩展速率将大大提高。这就要求对焊接的预热温度、焊接参数以及焊后的回火温度和时间进行严格控制,确保焊缝的综合性能良好。冷裂纹区域的颜色明显有别于无缺陷区域,呈圆形或椭圆形的白色斑点,且氢含量明显高于缺陷少的区域。

夹渣缺陷的形态既有长宽比接近 1:1 的圆形夹渣,也有近似于裂纹形态的夹渣缺陷,缺陷中含有较多的 Si、Ca、Ti 等焊接熔渣成分。夹渣缺陷从解剖尺寸约在 0.1~1.5 mm 之间,由于通过解剖方法测量缺陷尺寸时,往往是对缺陷的某一截面尺寸进行测量,难以获得缺陷的最大尺寸,所以实际缺陷尺寸往往大于测量值。

### 3.4. 65Mn 钢及其焊接接头缺口敏感性的对比研究

材料的缺口敏感性通常用缺口敏感度 NSR (notch sensitivity ratio)来表征,定义  $NSR = R_{bn}/R_n$ ,其中  $R_{bn}$ 、 $R_n$  分别为带缺口试样和无缺口等截面光滑试样的抗拉强度。当 NSR 的值在 1 附近或比 1 大时,表示材料对缺口不敏感,因为带缺口试样的抗拉强度大于或约等于光滑试样的抗拉强度;当 NSR 的值明显小于 1 时,表示材料对缺口敏感,因为带缺口试样的抗拉强度显著小于光滑试样的抗拉强度,且 NSR 值越小表示对缺口越敏感。表 4 给出了 65Mn 钢和 65Mn 钢焊接接头缺口敏感性试验结果,可以看出 65Mn 钢和 65Mn 钢焊接接头的 NSR 值大于 1,说明它们对缺口均不敏感。

Table 4. Notch sensitivity of 65Mn steel

表 4. 65Mn 钢的缺口敏感性

试样类型	缺口敏感度 NSR	平均值
65Mn 钢试样	1.37、1.36、1.38	1.37
65Mn 钢焊接接头试样	1.34、1.35、1.35	1.35

## 4. 结论

- (1) 对焊接成分进行了数值模拟,确定了合金焊接的主要相成分为马氏体/贝氏体复相组织。
- (2) 通过数值模拟,确定了 65Mn 钢焊接下一道焊接时,上一焊道起焊位置的温度应在 150 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$  之间,每一焊道设置的焊后冷却时间为 180 s。同时从焊接模拟曲线可以看出,焊接温度场的模拟结果具有可靠性。
- (3) 对三种刀片的焊接接头取样焊缝进行了相控阵超声检验,刀片 3 的焊接接头的焊缝内缺陷分布较为集中。
- (4) 65Mn 钢焊接焊缝区存在大量缺陷,缺陷主要有三类:呈圆形或椭圆形的白色斑点、宏观的夹渣等缺陷、线性分布的微观裂纹。
- (5) 65Mn 钢和 65Mn 钢焊接接头的 NSR 值大于 1,均对缺口均不敏感。

## 基金项目

北京市教委科技计划一般项目(项目编号: KM201812448005)。

## 参考文献

- [1] 田亚强, 杨子旋, 宋进英, 等. 控轧控冷工艺对冶金锯片用 65Mn 钢表面氧化皮的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(7): 14-17.
- [2] 刘其斌, 李宾. 65Mn 弹簧钢的激光焊接组织及性能[J]. 焊接学报, 2009(9): 109-112+122.
- [3] 陈永平, 杜随更, 高漫. 65Mn 弹簧夹头摩擦焊接头组织分析[J]. 焊接技术, 2014(11): 14-16.
- [4] 刘金源, 李祥龙. 65Mn 弹簧钢盘条相变组织分析[J]. 物理测试, 2019, 37(1): 24-29.
- [5] 高伟, 刘镇昌, 葛培其, 等. 65Mn 钢丝的焊接[J]. 焊接, 2002, 10(5): 25-28.
- [6] 刘其斌, 李宾. 65Mn 弹簧钢的激光焊接组织及性能[J]. 焊接学报, 2009(9): 109-112+122.
- [7] 陈连生, 柳松, 宋进英, 等. 锯片用 65Mn 钢热变形特性研究[J]. 钢铁钒钛, 2012(3): 88-92.
- [8] 何燕霖, 李麟, 叶平, 等. Thermo-Calc 和 DICTRA 软件系统在高性能钢研制中的应用[J]. 材料热处理学报, 2004, 24(4): 73-77.