

· 形变与相变 ·



## 电渣重熔、粉末冶金及喷射成形 V4 系高速钢 的组织与性能对比

徐辉霞<sup>1</sup>, 曾 涛<sup>1</sup>, 房孝杰<sup>1</sup>, 谷金波<sup>2,3</sup>, 邸英南<sup>2,3</sup>

(1 天工国际有限公司, 丹阳 212300; 2 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081;

3 先进特殊钢全国重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:**以 V4 系高速钢为研究对象, 分别经电渣重熔、粉末冶金和喷射成形三种不同工艺制备, 系统对比工艺差异大尺寸模块显微组织及性能的影响, 并综合分析喷射成形工艺的比较优势。实验结果表明, 电渣重熔 V4 钢存在严重的碳化物偏析, 呈现网状和带状分布, 碳化物不均匀度达 8 级, 大颗粒碳化物尺寸约为 11.1~11.7  $\mu\text{m}$ ; 粉末冶金 V4 钢组织最为均匀, 碳化物不均匀度为 0 级, 碳化物尺寸仅 3.0  $\mu\text{m}$ ; 喷射成形 V4 钢碳化物不均匀度为 1 级, 碳化物尺寸为 9.0  $\mu\text{m}$ , 组织均匀性显著优于电渣重熔钢。经相近热处理工艺处理后, 三种钢硬度均达到 62 HRC 以上。其中, 喷射成形 V4 钢硬度为 62.8 HRC, 略低于粉末冶金 V4 钢 (63.8 HRC) 和电渣重熔 V4 钢 (63.6 HRC), 但其耐磨性能最佳, 磨损量仅为 0.036 g。综上所述, 喷射成形 V4 钢组织均匀性、耐磨性均接近粉末冶金 V4 钢, 且成本相对来说更具优势, 经此研究结果可为 V4 系高性能高速钢的制备工艺选择提供理论与实验的参考依据。

**关键词:**电渣重熔; 粉末冶金; 喷射成形; V4 系高速钢; 碳化物; 耐磨性能

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.N260123 **中图分类号:** TG316.1

## Comparative Study on Microstructure and Properties of V4-Series High-Speed Steel Manufactured by Electroslag Remelting, Powder Metallurgy and Spray Forming

Xu Huixia<sup>1</sup>, Zeng Tao<sup>1</sup>, Fang Xiaojie<sup>1</sup>, Gu Jinbo<sup>2,3</sup>, Di Yingnan<sup>2,3</sup>

(1 Tiangong International Co., Ltd., Danyang 212300, China; 2 Special Steel Research Institute of Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3 State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Beijing 100081, China)

**Abstract :** Taking V4 high-speed steel as the research subject, we employed three different processes—electroslag remelting, powder metallurgy, and spray forming. The effects of process differences on the microstructure and properties of large-sized modules were systematically compared, and the comparative advantages of the spray forming process were comprehensively analyzed. Experimental results showed that electroslag-remelted V4 steel exhibited severe carbide segregation, presenting a network-like and banded distribution with a carbide inhomogeneity reaching grade 8 and large carbide particle sizes of approximately 11.1  $\mu\text{m}$  to 11.7  $\mu\text{m}$ ; powder-metallurgy V4 steel exhibited the most uniform microstructure, with a carbide inhomogeneity of grade 0 and a carbide size of only 3.0  $\mu\text{m}$ ; spray-formed V4 steel exhibited a carbide inhomogeneity of grade 1 and a carbide size of 9.0  $\mu\text{m}$ , with significantly better microstructure uniformity than electroslag-remelted steel. After similar heat treatment processes, all three steels achieved hardness above 62 HRC. Among them, spray-formed V4 steel exhibited a hardness of 62.8 HRC, slightly lower than that of powder-metallurgy V4 steel (63.8 HRC) and electroslag-remelted V4 steel (63.6 HRC), but it exhibited the best wear resistance with a wear loss of only 0.036 g. In summary, spray-formed V4 steel demonstrated microstructure uniformity and wear resistance comparable to powder-metallurgy V4 steel, while also offering relatively greater cost advantages. These findings provide theoretical and experimental references for the selection of preparation processes for V4 series high-performance high-speed steel.

**Key Words :** Electroslag Remelting; Powder Metallurgy; Spray Forming; V4-Series High-Speed Steel; Carbides; Wear Resistance

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3713300)

作者简介: 徐辉霞(2002—), 女, 本科, 工程师; **E-mail :** 1302030510@qq.com; **收稿日期:** 2026-08-03

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

高速钢具有高硬度、良好的红硬性和耐磨性能,在刀具和工模具等机加工领域具有极为重要的地位<sup>[1-2]</sup>。随着制造业向着高精度和高效率方向发展,对高速钢的金相组织形貌和耐磨性有着更高的要求<sup>[3]</sup>。传统高速钢的生产制备主要是电渣重熔工艺路线,但由于其高合金含量和冷却凝固速度相对较慢,电渣重熔钢组织极易产生粗大的莱氏体共晶碳化物偏析,形成网状或带状组织,严重损害材料的热加工性能和韧性<sup>[4-5]</sup>。

为克服晶粒粗大、碳化物偏析等缺陷,在高速钢生产领域引入了粉末冶金制备技术。该工艺通过雾化制粉得到细小金属颗粒,再通过热等静压成形,可有效细化碳化物并使其均匀分布,同时改善偏析,显著提高材料性能<sup>[6]</sup>。然而,粉末冶金工艺流程复杂,设备投资大,生产成本短时期难以降低,限制其进一步在更大范围发展推广<sup>[7-8]</sup>。

喷射成形技术作为一种先进的快速凝固与近净成形一体化工艺,为高性能高速钢的制备提供了新思路<sup>[9]</sup>。该技术将液态金属雾化与沉积成形结合,一步完成冶金成形,在细化晶粒、消除偏析的同时显著缩短了工艺流程。已有研究表明,喷射成形高速钢在组织均匀性和使用性能方面可达到甚至超越同成分的粉末高速钢<sup>[10]</sup>。尽管我国在喷射成形工模具钢产业化方面已取得长足进步,但针对高碳高钒类型高速钢,尤其是新型喷射成形 V4 钢,将其与同成分的粉末冶金 V4 钢及电渣重熔 V4 钢进行大尺寸条件下组织与性能的系统对比研究,尚鲜有报道。

以喷射成形 V4 钢为核心研究对象,选取化学成分相近的粉末冶金 V4 钢和电渣重熔 V4 钢作为对比材料,系统对比关于不同生产工艺路线对大尺寸模块的金相组织、硬度和耐磨性能的影响,希望为喷射成形高性能高速钢的工艺优化和应用推广提供实验参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

实验选用三种钢材:喷射成形 V4 钢、粉末

冶金 V4 钢和电渣重熔 V4 钢,均取自规格为 200 mm×300 mm 的模块。三种钢的化学成分见表 1,均属于高碳高钒型高速钢,其中, $w[\text{Cr}]$  为 4.66%~4.77%, $w[\text{V}]$  为 3.64%~3.76%, $w[\text{Mo}]$  为 3.48%~3.50%,具有良好的可对比性。

### 1.2 试验方法

三种钢均采用相近的淬火+回火热处理制度:喷射成形 V4 钢和粉末冶金 V4 钢的工艺为 1 150 °C 淬火+560 °C 回火,电渣重熔 V4 钢的工艺为 1 120 °C 淬火+560 °C 回火,回火均进行 3 次,每次保温 2 h。

金相试样经研磨、抛光后,采用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,使用光学显微镜(OM)观察各试验钢的退火态及淬回火态显微组织。依据 GB/T 14979—1994《钢的共晶碳化物不均匀度评定法》评定共晶碳化物不均匀度级别,并利用图像分析软件测量大颗粒碳化物的尺寸。

硬度测试采用洛氏硬度计(HRC)进行,测试载荷为 150 kgf,保载时间为 5 s。每个试样随机选取 5 个测试点,去除最大值和最小值后取平均值作为最终硬度值。

耐磨试验在室温、无润滑条件下进行,以氮化硅陶瓷球(硬度 80~90 HRC)为对磨副,试验力 100 N,转速 100 r/min,旋转半径 30 mm,试验时间 30 min。试验前、后分别用丙酮超声清洗试样并烘干,采用精度为 0.001 g 的分析天平称量试样质量,以磨损失重(磨前质量与磨后质量之差)评价材料的耐磨性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 退火组织对比

电渣重熔 V4 钢的退火组织如图 1 所示,其组织呈现出典型的熔炼铸造高速钢特征,共晶碳化物分布极不均匀,不均匀度达 8 级,存在严重的带状偏析。电渣锭头部的大颗粒碳化物尺寸为 11.1  $\mu\text{m}$ ,尾部达到 17.7  $\mu\text{m}$ ,碳化物尺寸表现出显著的方向性和位置差异性。该组织特征因为电渣重熔工艺冷却凝固速度缓慢、合金元素偏析严重<sup>[5]</sup>。粗大不

表 1 试验钢化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of test steel

| 钢号     | C    | Si   | Mn   | P     | S     | W    | Mo   | Cr   | V    | Co   | Ni   | Cu   |
|--------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 粉末钢 V4 | 1.37 | 0.43 | 0.47 | 0.026 | 0.004 | 0.07 | 3.50 | 4.66 | 3.71 | 0.02 | 0.21 | 0.13 |
| 电渣钢 V4 | 1.46 | 0.42 | 0.36 | 0.015 | 0.001 | 0.08 | 3.48 | 4.70 | 3.64 | 0.03 | 0.14 | 0.08 |
| 喷射钢 V4 | 1.40 | 0.40 | 0.43 | 0.017 | 0.003 | 0.12 | 3.50 | 4.77 | 3.76 | 0.03 | 0.12 | 0.07 |

均匀分布的碳化物会严重降低材料韧性,增加脆性,容易在后续热处理和使用过程中引起应力开裂,对材料性能产生负面影响。

粉末冶金V4钢的退火组织如图2所示,其共晶碳化物不均匀度达到0级,大颗粒碳化物尺寸仅为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ ,仅为电渣重熔V4钢的1/4~1/6。在其横向和纵向截面,碳化物均以细小颗粒状均匀弥散分布。这种突出的组织均匀度因为粉末冶金工艺是将钢液雾化制粉并热等静压成形,在这一过程中金属液滴迅速冷却从而抑制了粗大共晶碳化物的形成<sup>[7]</sup>。

喷射成形V4钢的退火组织如图3所示,其共晶碳化物不均匀度为1级,大颗粒碳化物尺寸为 $9.0\text{ }\mu\text{m}$ 。与电渣重熔钢相比,喷射成形V4钢组织均匀度提升显著,无宏观偏析,碳化物呈均匀弥散状分布于晶界和晶内。与粉末冶金V4钢相比,两者碳化物分布形态相似,均为弥散颗粒状,仅喷射成形

V4钢的碳化物尺寸略大,这与喷射成形工艺的冷却速率介于雾化制粉与传统铸造之间有关<sup>[6,9]</sup>。

## 2.2 淬回火组织对比

三种钢的淬火+回火组织如图4所示,热处理后,三种钢的组织均转变为回火马氏体基体上分布着碳化物的典型形态。电渣重熔V4钢即使经过热处理,其组织中仍可观察到因组织遗传性而残留的碳化物不均匀分布。相比之下,粉末冶金V4钢和喷射成形V4钢均获得了均匀细小的回火组织,碳化物弥散分布在基体上。相比粉末高速钢,喷射成形高速钢仍存在大尺寸的共晶碳化物。喷射成形工艺所赋予的细小致密原始组织,为后续热处理中获得均匀细小的淬火马氏体、实现良好的强韧性配合提供了优越的先决条件。

## 2.3 力学性能对比

三种钢在各自热处理工艺下的硬度测试结果见表2,在相近的处理条件下,三种钢的硬度均达到

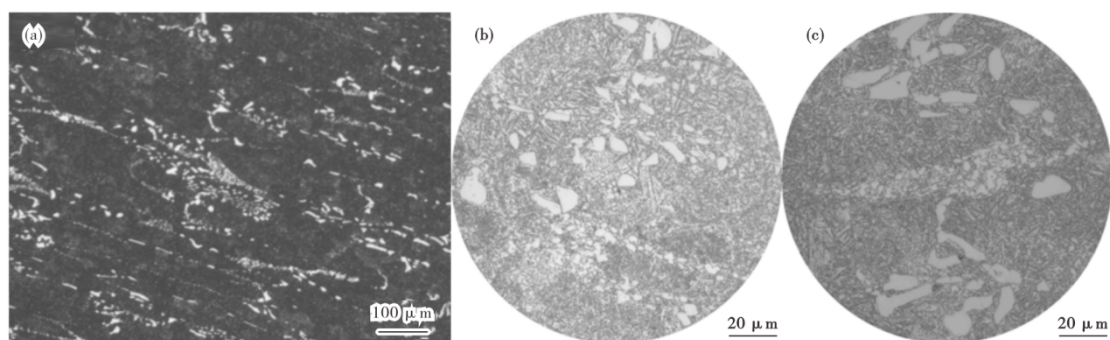


图1 (a)电渣钢V4共晶碳化物分布特征,(b)电渣锭头部碳化物形貌,(c)电渣锭尾部碳化物形貌

Fig. 1 (a) Distribution characteristics of eutectic carbides in ESR V4 steel, (b) Carbide morphology at the head of the ESR ingot, (c) Carbide morphology at the tail of the ESR ingot

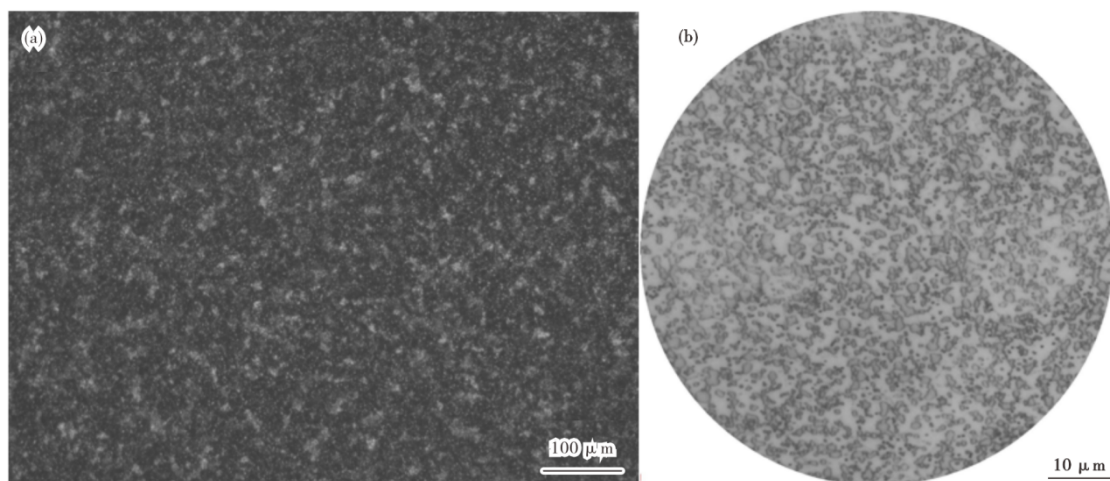


图2 粉末钢V4:(a)共晶碳化物分布,(b)大颗粒碳化物形貌

Fig. 2 Powder-metallurgy V4 steel: (a) distribution of eutectic carbides, (b) morphology of coarse carbides

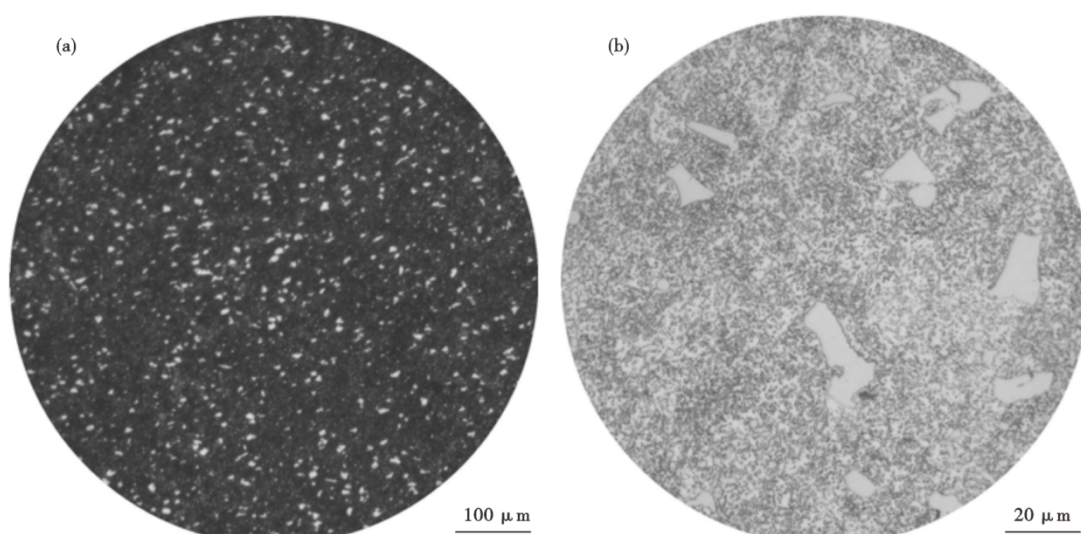


图3 喷射成形V4钢:(a)共晶碳化物,(b)大颗粒碳化物形貌  
Fig. 3 Spray-formed V4 steel: (a) eutectic carbides, (b) morphology of coarse carbides

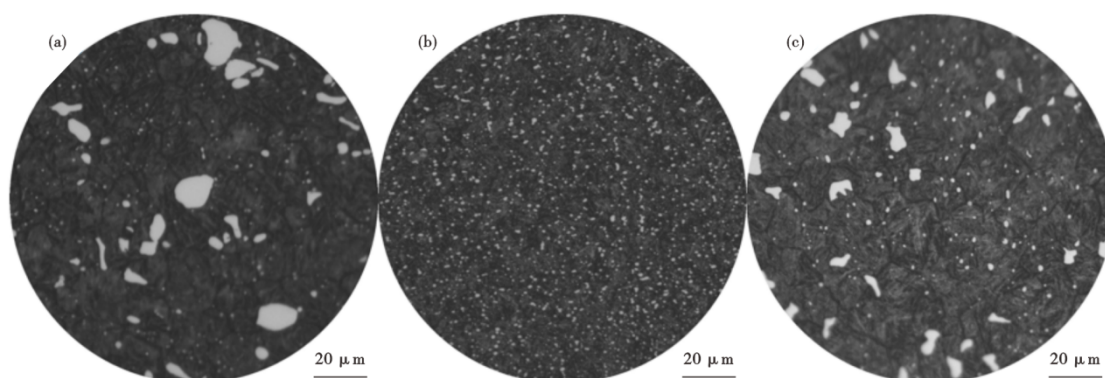


图4 不同制备工艺下试验钢回火组织形貌对比:(a)电渣工艺,(b)粉末冶金工艺,(c)喷射成形工艺  
Fig. 4 Comparison of tempered microstructures of test steels prepared by different processes: (a) ESR process, (b) powder metallurgy process, (c) spray forming process

了62HRC以上的高水平。其中粉末冶金V4钢的平均硬度最高,为63.8HRC;电渣重熔V4钢其次,为63.6HRC;喷射成形V4钢为62.8HRC。这一硬度结果和参考文献的结果一致<sup>[4,6]</sup>。虽然喷射成形钢的硬度最低,但是其硬度结果已经完全能满足绝大多数刀具、模具的使用要求,表明喷射成形工艺完全可以达到要求的材料的硬度性能要求。

耐磨实验结果见表3,喷射成形V4钢的磨损重量为0.036 g,结果表明,喷射成形V4钢耐磨性

优于粉末冶金V4钢(0.044 g)和电渣重熔V4钢(0.050 g)。喷射成形V4钢在相对低硬度的情况下具有更优秀耐磨性的现象,充分体现了喷射成形工艺制备的材料具有独特的组织优势,试验钢回火态组织形貌如图5所示。

研究表明,在喷射成形V4钢中占有一定比例的大尺寸,如VC的MC型碳化物且均匀分布,在磨损过程中起到主要的抗磨损作用,改善表面氧化

表2 试验钢热处理硬度

Table 2 Hardness of test steel after heat treatment

| 钢号    | 热处理温度/°C  | 硬度(HRC) |      |      | 平均硬度(HRC) |
|-------|-----------|---------|------|------|-----------|
| 粉末钢V4 | 1 150+560 | 63.8    | 63.6 | 64.0 | 63.8      |
| 电渣钢V4 | 1 120+560 | 63.9    | 63.7 | 63.1 | 63.6      |
| 喷射钢V4 | 1 150+560 | 62.0    | 62.8 | 63.7 | 62.8      |

表3 试验钢耐磨性能

Table 3 Wear resistance of test steel

| 钢号    | 平均硬度(HRC) | 磨样前质量/g | 磨样后质量/g | 磨损失重/g |
|-------|-----------|---------|---------|--------|
| 粉末钢V4 | 63.8      | 17.619  | 17.575  | 0.044  |
| 电渣钢V4 | 63.6      | 18.426  | 18.376  | 0.05   |
| 喷射钢V4 | 62.8      | 20.573  | 20.537  | 0.036  |

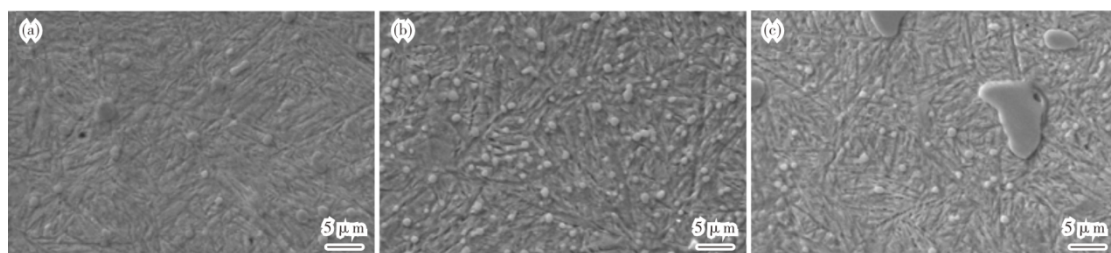


图5 试验钢回火态组织形貌:(a)粉末冶金V4钢,(b)喷射成形V4钢,(c)电渣重熔V4钢

Fig. 5 Microstructure morphology of the test steel after tempering: (a) powder-metallurgy V4 steel, (b) spray-formed V4 steel, (c) electroslag-re melted V4 steel

层的形成方式,阻碍裂纹在基体中扩散加重,从而有效提升耐磨性<sup>[10]</sup>。研究显示喷射成形高速钢中尺寸大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的MC碳化物数量高于粉末冶金高速钢,这是其耐磨性更好的主要原因,此外喷射成形高速钢的均匀组织也有利于磨损时接触应力均匀分布,摩擦表面不易发生塑性流变,减少局部受力集中导致疲劳剥落,进一步提高耐磨性能。

## 2.4 喷射成形工艺优势分析

热处理可以使高速钢获得更好的组织和力学性能。喷射成形V4钢的原始组织中碳化物细小且均匀弥散分布,这在淬火加热过程中碳化物均匀充分地固溶,从而获得高过饱和度的合金元素固溶体;而在回火过程中细小弥散的二次碳化物,尤其是MC型碳化物均匀析出,产生明显的二次硬化效应,同时,均匀细小的原始晶粒也有助于形成细小的淬火马氏体,兼顾良好的强度和韧性。与之相对比,电渣重熔V4钢因为碳化物偏析严重,淬火加热时碳化物溶入不均匀,易造成局部合金元素贫化或富集,进而影响回火时二次碳化物的均匀析出,最终导致组织和性能的不均匀性和不稳定性。基于喷射成形独特的工艺优势,喷射成形V4钢相较于传统铸造工艺,可以得到更均匀细小的等轴晶和弥散分布的碳化物,无宏观偏析,其组织均匀度优于电渣重熔V4钢,与粉末冶金V4钢相比,仅碳化物尺寸稍大。在62.8HRC硬度水平下喷射成形V4钢具有比粉末冶金V4钢和电渣重熔V4钢更优的耐磨性,可充分适用于对耐磨性和组织均匀性有严苛要求的使用场景。

在工艺的经济成本方面,喷射成形相对于粉末冶金的气雾化制粉、包套封装、热等静压等相关复杂工序,其快速凝固和近净成形高效结合,将流

转钢液直接喷射成坯件,极大缩减中间工序,显著降低时间与经济成本,同时,保持了材料的高纯净度和低气体含量,且有效避免粉末冶金中可能出现的制粉缺陷导致材料性能异常。据此可得出结论,喷射成形V4钢在组织性能上非常接近粉末冶金V4钢,在耐磨性方面优于粉末冶金V4钢,且全面优于电渣重熔V4钢的性能。在生产效率和工艺成本上则有明显的优势,生产时间短,工艺成本低。对于要求高耐磨性和高组织均匀度、强韧性,但不要求极端高硬度的刀具、模具等应用场景,喷射成形V4钢是一种兼顾优秀性能和高性价比的材料首选。

## 3 结论

1) 三种制备工艺对高速钢的显微组织影响显著。电渣重熔V4钢存在严重的碳化物偏析,呈带状分布,大颗粒尺寸达 $11.1\sim 17.7\text{ }\mu\text{m}$ ;喷射成形TSFX44钢与粉末冶金V4钢的碳化物均呈弥散颗粒状均匀分布,TSFX44钢碳化物不均匀度仅为1级,大颗粒尺寸为 $9.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

2) 在相近的热处理工艺下,三种高速钢硬度均超过了62HRC。喷射成形V4钢硬度为62.8HRC,相对其他两种工艺制备高速钢硬度略低,但已经可以满足绝大多数工业生产的使用场景。

3) 喷射成形V4钢耐磨性能具有极大优势,相对于粉末冶金V4钢磨损失重 $0.044\text{ g}$ 和电渣重熔V4钢磨损失重 $0.050\text{ g}$ ,其磨损失重仅为 $0.036\text{ g}$ ,体现出其优异的耐磨性能。

4) 喷射成形工艺兼具组织均匀、流程简短、成本较低的综合优势。TSFX44钢在组织和耐磨性上与粉末钢相当,在成本和工艺效率上优于粉末钢,在组织和性能上全面超越电渣钢,是一种综合性能优良的高性能高速钢材料。

## 参考文献

- [1] 邓玉昆. 高速工具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [2] 徐桂丽, 黄 鹏, 孙 溪, 等. 高速钢制备和热处理工艺的研究现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2020, 39(1): 70-77.
- [3] 宫书林, 张 煜, 宋美慧, 等. 高速钢的制备技术及应用的研究进展[J]. 冶金与材料, 2025, 45(9): 121-125.
- [4] 陈 伟, 侯兴慧, 徐 锐. 不同制备工艺对锻造高速钢轧辊组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(11): 167-170.
- [5] 占礼春, 迟宏宵, 马党参, 等. 电渣重熔连续定向凝固 M2 高速钢铸态组织的研究[J]. 材料工程, 2013, 41(7): 29-34.
- [6] 张海军, 杜文华, 辛栋梅. 喷射成形和粉末冶金工艺对高速钢 2030 组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(4): 400-406.
- [7] 秦 乾, 杨 芳, 陈存广, 等. 粉末高速钢的制备技术及发展方向[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(4): 67-75.
- [8] 郝 旭, 张德印, 贾宝瑞, 等. 粉末冶金法制备高速钢研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(6): 665-673.
- [9] 迟宏宵, 刘继浩, 马党参, 等. 喷射成形技术在高合金工具钢中的应用及研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 14-21.
- [10] 刘继浩, 迟宏宵, 武会宾, 等. 喷射成形工艺对 M3 高速钢碳化物特征及力学性能的影响[J]. 金属学报: 2025, , 61(8): 1229-1244.