



喷射成形技术在高合金工具钢中的应用及研究进展

迟宏宵¹, 刘继浩^{1,2}, 马党参¹, 周 健¹, 谷金波¹

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083)

摘 要: 喷射成形是制备高性能高合金化工具钢的一种先进工艺技术, 具备短流程、成本低、绿色化的技术优势。目前, 喷射成形制备高合金工具钢在国内已逐步实现规模产业化。本文重点介绍了国内外喷射成形高合金工具钢的发展及研究进展; 总结了喷射成形高速钢、模具钢的微观组织和力学性能特征; 提出未来喷射成形高合金工具钢的发展应注重利用数字化、智能化等控制技术进一步提高产品的质量和性能稳定性, 系统研究及建立合金成分-工艺参数-组织性能特征-服役应用的关系, 并通过探索新工艺和新方法, 发挥喷射成形的工艺优势及应用前景。

关键词: 喷射成形工艺; 高合金工具钢; 组织特性; 力学性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00108 中图分类号:TF142.1

Application and Research Progress of Spray Forming Technology in High Alloy Tool Steel

Chi Hongxiao¹, Liu Jihao^{1,2}, Ma Dangshen¹, Zhou Jian¹, Gu Jinbo¹

(1 Institute for Special Steels, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Spray forming is an advanced process technology for preparing high-performance and high alloy tool steel, which has the advantages of short process, low cost, and green technology. At present, the application of spray forming in high alloy tool steel in China has gradually achieved large-scale industrialization. This article focuses on the development and research progress of spray formed high alloy tool steel both domestically and internationally; Summarized the microstructure and mechanical properties of spray formed high-speed steel and mold steel; and proposed that the future development of spray forming technology in high alloy tool steel should focus on using digital and intelligent manufacturing technologies to further improve product quality and performance stability. To systematically study and establish the relationship between alloy composition, process parameters, microstructure and property characteristics and service application, and exploring new processes and methods to leverage the technological advantages and application prospects of spray forming.

Key Words: Spray Forming Technology; Tool Steel; Microstructure Characteristic; Mechanical properties

喷射成形工艺是采用高压的惰性气体(一般要高于 0.5 MPa)将合金液流直接打碎雾化成为几微米至上百微米的小液滴,液滴在高速气流的作用下加速飞行并迅速冷却凝固的一种快速凝固工艺技术^[1-2]。高合金工具钢是加工及成形制造领域关键原材料,随着加工技术、切削速度以及被加工金属性能的不断提高,更高性能和更高合金化是工具钢材料的发展趋势。由于其成分的特殊性,高合金工具钢的微观组织通常含有大量的一次、二次碳化物第二相,组织中大量的一次碳化物往往是决定材料性能的核心因素^[3-5]。目前高端高合金工具钢的工业化生产技术主要采用传统电渣重熔以及粉末冶金工艺生产^[6-7]。电渣重熔工艺作为工具钢最常用的生产工艺,由于始终无法克服浇注过程缓慢的冷

却速率,而引起碳化物粗大、不均匀分布等问题,成为限制其向更高性能化、高合金化发展的瓶颈^[8]。粉末冶金工艺是快速凝固工艺,可有效解决传统冶金工艺的偏析和高合金化问题,使工具钢各项性能均获得极大提升,但粉末冶金工艺工序复杂、流程长、生产成本低。与电渣重熔和粉末冶金相比,喷射成形工具钢的工序步骤明显减少,可省去电渣重熔的二次重熔步骤,也可省去粉末冶金制备过程中粉末筛分、装罐、包套、脱气、热等静压等步骤。因此,喷射成形是生产高性能高合金化工具钢的一种短流程、低成本、绿色化制备技术。

喷射成形技术的概念最早于 1968 年由 Singer 教授提出,经过几十年的发展历程,已证明该工艺原则上适合任何合金系列材料的制备^[9-11]。目前,

国内河冶科技、天工国际、江苏豪然、正达新材料等公司均有较为完整的工业化喷射成形工具钢产线,具备规模化的生产能力。但喷射成形工艺由于技术难度大,仍然存在较大的发展和进步空间^[12-13]。一方面,由于喷射成形工艺试验参数较多且相互影响,即使可通过数值模拟等技术缩小工艺参数窗口,但仍局限于产品的成形性方面。其二,大量研究仍停留在雾化、成形、致密化、合金化等方面,没有充分的数据积累,以建立起实验参数-组织-性能-应用的数据集成。本文针对喷射成形技术在高合金工模具钢的应用现状,着重介绍了喷射成形高合金工具钢的微观组织与力学性能研究进展。

1 喷射成形在高合金工具钢的应用现状

1.1 喷射成形技术原理及特点

喷射成形工作原理如图1所示,熔融金属或合金在惰性气氛中通过借助高压惰性气体雾化成液滴颗粒,并直接喷到基板上,产生撞击、粘结、凝固而形成沉积坯。由于雾化液滴颗粒尺寸通常在 $10\sim 500\ \mu\text{m}$ 不等,不同颗粒尺寸的液滴在雾化阶段将呈现不同凝固状态:小尺寸液滴通常以固相颗粒存在,较大尺寸液滴仍含有一定比例液相。正因如此,喷射成形过程应是一个动态热平衡过程,沉积表面通常以糊状区的形式存在,使残余液相能够填充已凝固颗粒之间的缝隙,达到致密化的效果^[14]。对于喷射成形工艺而言,材料制备的优势体现在组织细小均匀、成分均匀,偏析程度低、高致密度、工序简单、成本低等方面。

1.2 喷射成形工艺在高合金工具钢中的应用

国外对喷射成形工具钢的发展早已具备工程

化。英国 Aurora 钢铁公司于1980年利用喷射成形技术制备出高合金工具钢,并在 Osprey 工艺的基础上发展了“控制喷射沉积法”(CSD)。1989年,英国特冶产品公司、丹麦 Danish 钢厂、德国 Mannesmann Demag 公司和 Osprey 公司相互合作,制定了适合于工业化生产高合金钢的喷射成形工艺流程。1993年启动的欧洲煤钢共同体(ECSC)二期项目中建成一台 R&D 喷射成形设备,可制备直径 $400\ \text{mm}$ 、长 $1\ \text{m}$ 的高合金工模具钢。1998年 Dan Spray 公司将设备再度升级,建成世界上规模最大($5\ \text{t}$ 熔炼炉)的喷射成形设备,可用于直径 $\phi 500\ \text{mm}$ 、长 $2.5\ \text{m}$ 、重 $4\ \text{t}$ 钢锭的生产。2006年, Uddeholm 公司将 Dan Spray 公司收购,并开发了 TOUGHTEC、ROLTEC、WEARTEC 等高耐磨性喷射成形高合金工具钢商业品牌^[15]。

国内有关喷射成形技术最早报道可以追溯到1987年,在第六届国际快冷金属会议上,中科院金属所张永昌宣读了有关喷射成形 Al-Si-Cu 合金的研究报告。在钢铁材料研究方面,章靖国教授、孙德胜教授等首先从事了对高碳高合金工模具钢及轴承钢的相关研究。宝钢于2001年引进了 $5\ \text{kg}$ 的喷射成形设备,在进行材料生产、研究的同时,自主集成了国内首台 $100\ \text{kg}$ 多功能喷射成形设备。2016年,吴立志等实现了初步的工业生产,成功制备出直径 $550\ \text{mm}$ 喷射沉积坯,用于生产 $\phi 120\sim\phi 350\ \text{mm}$ 喷射成形高性能工具钢产品,碳化物尺寸 $\leq 15\ \mu\text{m}$ 、 $w[\text{O}]\leq 50\times 10^{-6}$ 、淬回火硬度 $\geq 67\ \text{HRC}$ 、纵向抗弯强度 $\geq 3\ 500\ \text{MPa}$ ^[16]。河冶科技是国内率先实现喷射成形刀具生产产业化的企业,目前已拥有较为成熟的 HSF620、HSF835 与 HSF680 等刀具材料牌号。HSF620 钢与传统 M2 高速钢成分相近,但就抗弯强度和冲击韧性而言,相比于传统 M2 高速钢分别提高了25%和80%。HSF620 钢主要应用于大截面拉刀。HSF835 钢是河冶科技在 M35 的基础上自主设计研发的新材料,具有极为优异的耐磨性和强韧性,主要用于拉刀、滚刀、剃齿刀等齿轮刀具。HSF680 钢属于高钒无钴刀具材料,V 含量高达8%,具有极好的耐磨性,可作为制造切削非金属材料刀具用钢。张海军等^[17]利用喷射成形工艺技术完成了精冲模具用钢的研发与应用,产品质量达到国际领先水平。2020年,河冶科技股份有限公司、冶金工业规划研究院、汉江工具有限责任公司联合起草、发布了喷射成形高速工具钢的团体标准,不仅

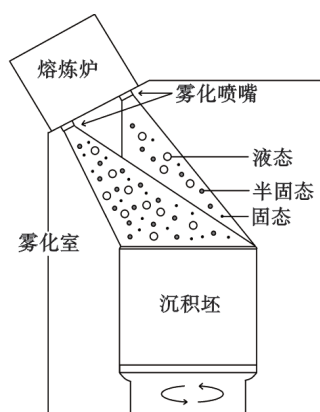


图1 喷射成形工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of the spray forming

强化了上下游企业的衔接和联系,而且,更有利于推广喷射成形高速工具钢的应用与发展。目前,国内河冶科技、天工国际均已经建设 5 t 级的喷射成形设备,在高合金工具钢市场已表现出强有力的竞争、发展潜力^[18]。

2 喷射成形高合金工具钢的研究现状

在实现利用喷射成形工艺制备出成形性好、成分均匀、致密度高的工具钢材料后,国内外诸多研究者对喷射成形工具钢的组织特征、力学性能等方面进行了大量的研究工作。

2.1 高速钢

Ikawa 等^[19]对比研究了喷射成形和传统熔铸高速钢轧辊材料(2.5%C,6.0%V)的组织与性能。相比于熔铸工艺常见的粗大条、块状碳化物,喷射成形所制备材料的组织中碳化物呈弥散颗粒状分布,且尺寸低于 10 μm ,不仅拥有更为优异的综合力学性能,同时使用寿命也超过普通熔铸轧辊的 2~3 倍。

Igharo^[20]在对 Osprey Metals 公司生产的沉积态 $\phi 130\text{ mm}$ 、锻后 $\phi 90\text{ mm}$ 的 M2 高速钢的研究中发现,沉积坯组织中碳化物呈网状和颗粒状分布于晶界位置,厚度及直径约为 1 μm ;锻后晶间碳化物呈弥散颗粒状分布。沉积态、锻后退火态样品组织中,碳化物主要为 M_6C 、MC 型两类碳化物。喷射成形工艺制备高速钢能明显改善碳化物的分布状态。性能方面,喷射成形试验钢的硬度与传统工艺 M2 高速钢相近,具有与粉末冶金 M2 钢相近的各向同性。

Ernst 等^[21]研究了 Dan Spray 公司的喷射成形 1.29C-3.97Cr-5.9W-5.06Mo-4.23V 高速钢,坯料尺寸 $\phi 500\text{ mm}$,长 2 190 mm,重 3 460 kg。经 1 180 $^\circ\text{C}$ 锻造至 $\phi 223\text{ mm}$,退火组织中碳化物呈弥散的颗粒状分布,但大颗粒碳化物数量较多,直径约 6 μm 。性

能方面虽远不及粉末冶金工艺制备的同成分高速钢,但各向同性较好。其退火组织,力学性能如图 2 所示。

Mesquita^[22-23]对 Osprey Metals 公司制备的 $\phi 400\text{ mm}$,重 970 kg 的 M3 高速钢,进行了组织性能的研究。沉积态组织中碳化物呈块状、颗粒状分布。虽然喷射成形工艺能明显改善高速钢组织中的碳化物分布,但在锻造退火处理过程中,易出现碳化物异常长大的情况。也因此,导致硬度、强度均低于铸锻和粉末冶金工艺。但相比于铸锻件,喷射成形工艺表现出更优异的等向性,如图 3 所示。

Rodenburg^[24]研究了 Danspray 公司制备的沉积坯 $\phi 500\text{ mm}$,长 2 m 的 3 t 级 AISI M3:2 高速钢的热加工行为,通过微观组织分析和有限元模拟,给出了该温度范围内的断裂应力值和碳化物破裂的临界应变。值得注意的是,在对沉积态组织的观察中,发现碳化物主要以块状 M_6C 和球状 MC 型碳化物组成,碳化物颗粒尺寸较大,约为 10 μm 。

Zhang 等^[25]利用北京航空材料研究所的喷射成形设备制备了重 150 kg,直径约 $\phi 300\text{ mm}$ 的 T15 坯料。其沉积态及热机械处理(热等静压和热锻)后的组织,如图 4 所示。沉积态及热机械处理后的 T15 试验钢组织中,碳化物类型均主要以 MC 与 M_6C 两种碳化物组成,MC 型碳化物占比较高、尺寸较大,约 8 μm ,呈弥散的颗粒状分布;而 M_6C 型碳化物在晶界呈链、薄膜状分布。袁华利用喷射成形工艺制备的沉积坯直径 $\phi 300\text{ mm}$,长 350 mm,锻后直径 $\phi 38\text{ mm}$ 的 2 060 高速钢棒材,与 Zhang^[25]的研究结果出现相同的情况,虽然减少了共晶形貌的 M_6C 碳化物的形成,但 MC 型碳化物不仅尺寸较大,约 7 μm ,且数量多、占比高。

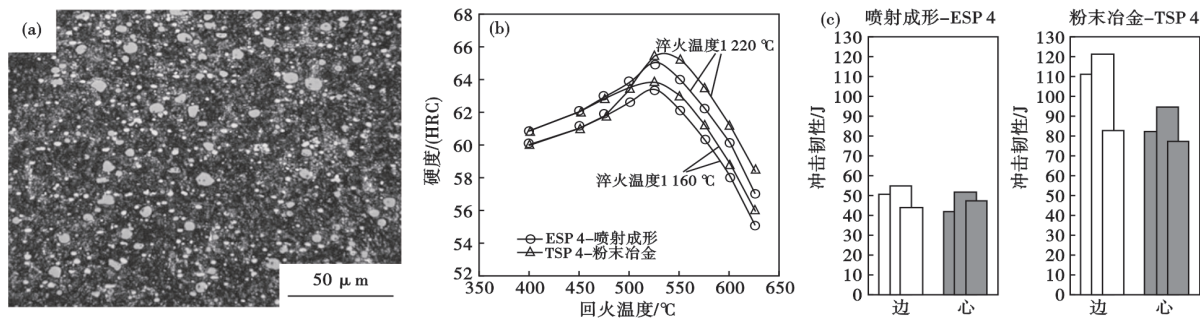


图 2 喷射成形(ESP4)及粉末冶金(TSP4)组织性能研究:(a)ESP4退火组织,(b)ESP4、TSP4硬度数据,(c)ESP4、TSP4边部、心部冲击弯曲线能

Fig. 2 Study on the microstructure and properties of spray forming (ESP4) and powder metallurgy (TSP4): (a) ESP4 annealing structure; (b) ESP4 and TSP4 hardness data; (c) ESP4, TSP4 edge and center impact bending energy

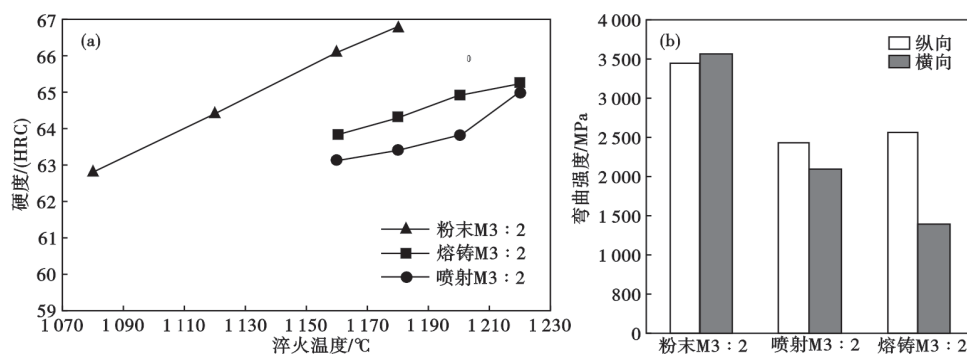


图3 喷射成形、电渣重熔、粉末冶金M3高速钢性能对比:(a)硬度,(b)弯曲强度

Fig. 3 Performance comparison of spray forming, electroslag remelting, and powder metallurgy M3 high speed steel : (a) hardness , (b) bending strength

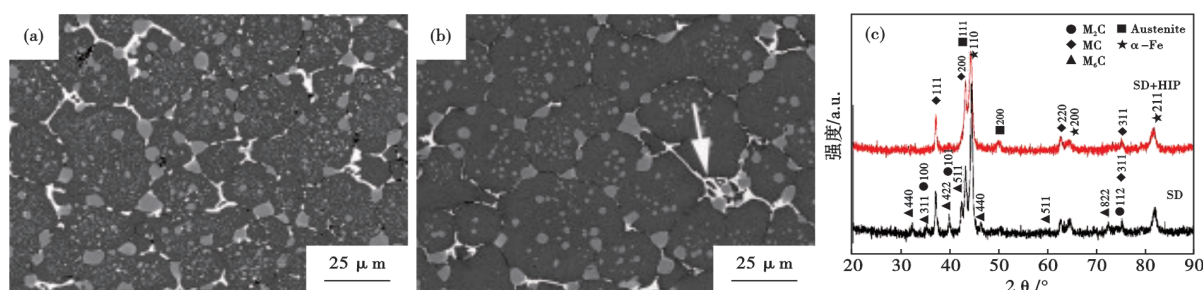


图4 喷射成形T15实验钢组织:(a)沉积态,(b)锻后退火,(c)XRD图谱

Fig. 4 Microstructure of Spray Forming T15 : (a) deposited , (b) annealing after forging , (c) XRD spectrum

卢林、王和斌等^[26-27]在北京科技大学25 kg的喷射成形设备上对钨合金化的M3型高速钢进行制备与研究。由于沉积坯尺寸规格相对较小,沉积态组织中碳化物主要以片状M₂C型及块状MC型碳化物组成。M₂C型碳化物厚度约1 μm,MC型碳化物尺寸约5 μm。钨合金化M3(1.15~1.3C-6.0W-5.0Mo-4.0Cr-2.75V-0.5Nb)高速钢刀具使用寿命是传统铸锻M2高速钢的3倍,是国产粉末烧结ASP23的1.3倍。

河冶科技股份有限公司^[28-31]采用双喷双扫喷射成形设备,通过雾化气体N₂喷射制备φ500 mm, M35、M4、2060等系列高速钢。经锻后,上述高速钢退火组织中碳化物均以颗粒状弥散分布。强度、韧性方面虽不及同成分粉末冶金工艺,但远高于电渣重熔工艺,且拥有最为优异的耐磨性。但需要注意的是,组织中存在较大尺寸的MC型碳化物约10 μm。

从上述研究结果中,可以看出,在利用喷射成形工艺制备高速钢时,容易出现组织异常长大的情况,部分碳化物(以MC型碳化物为主)颗粒尺寸较大,因而导致材料的强韧性时常低于传统铸锻件。Peter Kjeldsteen^[29]指出,通过进一步控制沉积参数,可对碳化物的形态、尺寸进一步优化。

Pi等^[30]建立了W18Cr4V高速钢喷射成形过程中的综合数值模型,通过Matlab、Ansys和Thermo-calc软件对沉积坯糊状区固相率,沉积坯的形状和温度场演变过程进行了计算,并建立了糊状区固相率与雾化气体初速度、气液比、沉积距离与过热度的预测公式,进一步提升了产品的成形质量与组织,如图5所示。

Lee等^[31-32]利用喷射成形技术,研究了成分为Fe/1.3C/3.1V/5.0Mo/6.4W/4.1Cr/7.9Co在不同过热度(140、200 °C)下的试验钢的组织及力学性能,如图6所示。在200 °C过热度条件下,晶界位置形成的碳化物为M₂C型碳化物,成板条状,彼此不连续;在140 °C过热条件下,晶界位置形成的碳化物转变为M₆C。M₂C型碳化物由于亚稳定的特性,使其在后续退火、锻造以及热处理过程中更易熔断、细化,因而具有更高的强韧性。雾化过程中,由于较高的冷却速率,小尺寸已凝固的液滴通常由初生奥氏体以及MC型碳化物组成,Serna^[33]认为雾化阶段形成的MC型碳化物,是喷射成形工艺MC型碳化物占比较高的原因。此外,在后续的沉积凝固阶段,一方面由于缓慢的冷却速率,使得雾化组织中的MC型碳化物在沉积阶段发生长大,出现上述结果中碳化物异

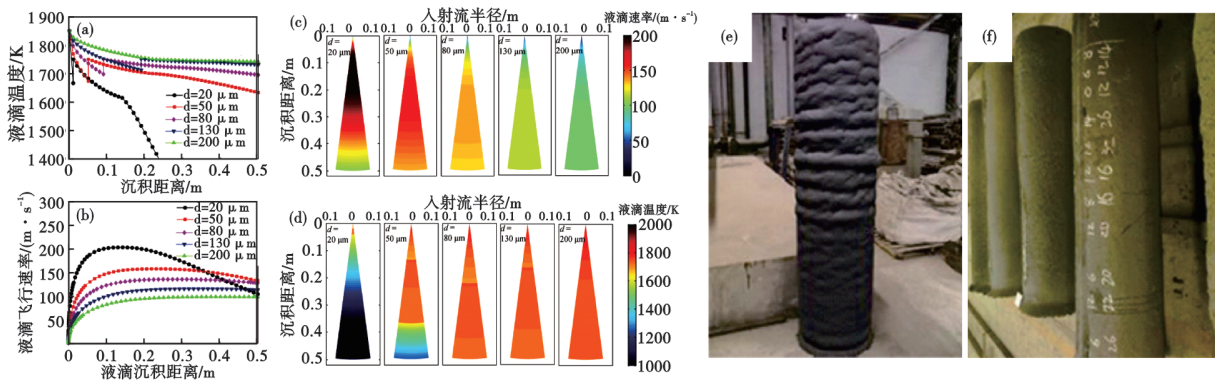


图 5 W18Cr4V 高速钢在喷射成形过程中单个液滴沉积行为的建模结果及生产验证:(a)温度,(b)速率,(c)速率分布,(d)温度分布,(e)、(f)过热度 150 K、100 K(气液比 0.55,沉积距离 300 mm,雾化气初速度 0.5 m/s 条件下)
 Fig. 5 Modeling results and production validation of single droplet deposition behavior of W18Cr4V high-speed steel during SF process : (a) temperature , (b) rate , (c) rate distribution , (d) temperature distribution ; (e) , (f) superheat degree 150 K, 100 K (under the condition of gas-liquid ratio 0.55, deposition distance 300 mm, and initial atomization velocity 0.5 m/s)

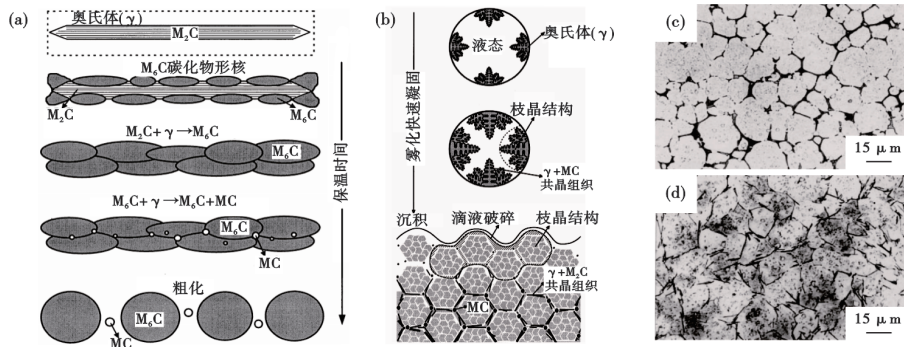


图 6 喷射成形工艺雾化沉积过程及组织特征:(a) M_2C 碳化物分解示意图,(b)喷射成形雾化沉积过程组织演变,(c)140 °C 过热组织,(d)200 °C 过热组织
 Fig. 6 Atomization deposition process and microstructure characteristics of spray forming : (a) schematic diagram of M_2C carbide decomposition , (b) evolution of microstructure during spray forming and atomization deposition process , (c) microstructure of 140 °C overheated , (d) microstructure of 200 °C overheated

常长大的情况;另一方面,表面糊状区在雾化液滴的冲击作用下,使得成分趋于均匀化,能有效抑制粗大莱氏体网的形成,一定程度上改善组织中碳化物的分布状态。因而相比于传统铸锻件以及粉末冶金工艺,喷射成形工艺制备的高速钢拥有更为优异的耐磨性^[34]。

针对喷射成形易产生环状偏析问题,刘继浩^[35]研究认为,喷射成形工艺在制备大规格尺寸材料的前提下,不应简单考虑为一种快速凝固技术。在雾化液滴的作用下,沉积坯表面将以糊状区的形式存在,由于沉积阶段的缓慢冷却速率,糊状区及以下区域温度将持续处于较高温,此时部分合金元素相将由固相向周围液相中发生扩散,使得液相变得富质,形成环状偏析;锭型偏析则是由于柱状晶向等轴晶转变而引起的(CET区),如图7所示。

上述研究结果表明,利用喷射成形工艺制备高速钢时,材料的组织特征虽同样受工艺参数、样品规格等一系列因素影响,但总结其技术特征,可概括为两点:1、能够明显改善组织中碳化物的分布状态,减少粗大网状共晶碳化物的形成;2、有更高占比的MC型碳化物形成倾向,这也是喷射成形高速钢具有更优异耐磨性的主要因素。

2.2 冷作模具钢

Ernst等^[36]比较了Dan Spray生产的喷射成形(沉积坯:φ500 mm)和铸造X155CrVMo12-1(AISI D2)的显微组织和力学性能。喷射态材料的显微组织虽仍以碳化物网络为特征,但比铸态材料的显微组织细得多。经热轧后的喷射成形试验钢的组织中碳化物长度为25~30 μm;而铸造材料的碳化物长度在35~45 μm。通过冲击弯曲试验,喷射成型材

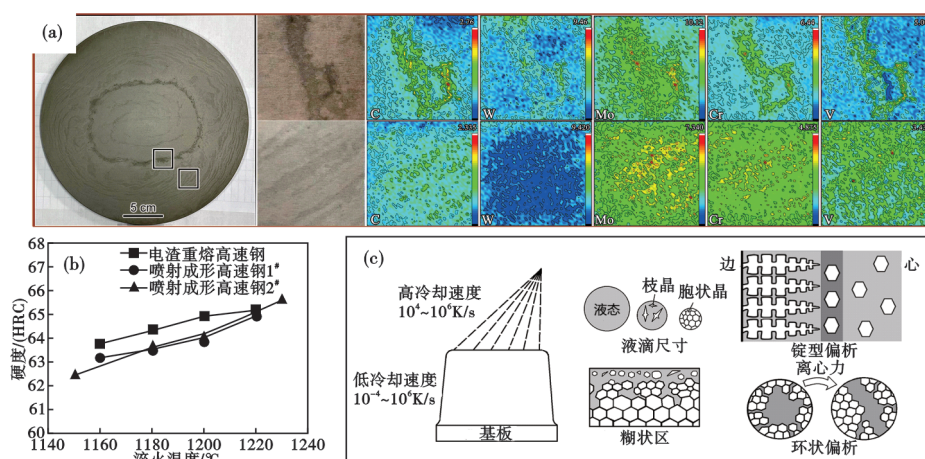


图7 大截面尺寸喷射成形M3高速钢偏析形貌及合金元素分布:(a)环状偏析元素分布,(b)喷射成形高速钢力学性能,(c)环状偏析成因

Fig. 7 Segregation morphology and alloy element distribution of M3 high-speed steel formed by spray forming with large cross-sectional size: (a) distribution of ring-shaped segregation elements, (b) mechanical properties of spray formed high-speed steel, (c) formation of circular segregation

料的韧性是铸造材料的两倍。在静态弯曲试验中,喷射成形材料的性能也优于铸造材料。

Schulz等^[37]对 $\phi 200$ mm的喷射成形与铸锻D2冷作模具钢的研究中发现,两种工艺生产的试验钢微观组织的最大区别在于碳化物的分布,而非粒径尺寸。除此之外,Schulz在对沉积坯 $\phi 500$ mm,锻后 $\phi 105$ mm的喷射成形1.2379冷作模具钢的微观组织观察中发现,试验钢表面碳化物尺寸分布在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,中心区域碳化物的平均尺寸为 $25 \sim 30 \mu\text{m}$,喷射成形试验钢在整个截面内拥有较高程度的组织均匀性^[38]。由此,可以看出利用喷射成形工艺生产冷作模具钢时,一方面有利于改善组织中的碳化物分布,另一方面还能保证材料整体拥有较高程度的组织均匀性。与传统铸锻及粉末冶金工艺生产的AISI D2钢相比,喷射成形试验钢具有更为优异的耐磨性。他认为,细小均匀、弥散分布的

碳化物,对磨料磨损几乎没有抵抗力。网状结构中较大的碳化物不能提高耐磨性,因为网状结构不能保护基体免受磨损。当碳化物达到一定的尺寸并在钢中均匀分布时,可达到最佳的耐磨性。相应的磨损机理如图8所示。

Sandberg等^[39]对比了喷射成形工艺制备的Roltec (1.4C-4.6Cr-3.2Mo-3.7%V)和Weartec (2.8C-7.0Cr-2.3Mo-8.9V)与常规铸锻工艺的D2、D6钢的组织与力学性能。Roltec和Weartec钢组织中的碳化物尺寸在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$,而D2、D6碳化物尺寸在纵向和横向上分别达到了 $100 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 。喷射成形材料不仅硬度高(SF: $61 \sim 63\text{HRC}$, CF: $58 \sim 61\text{HRC}$),而且还具有更为优异的冲击韧性。Weartec的耐磨性优于D2和D6,而Roltec的耐磨性与D2相当。

李栋等^[40]对比了喷射成形与传统熔炼D2钢的组织与性能,发现喷射成形工艺极大的细化、改善

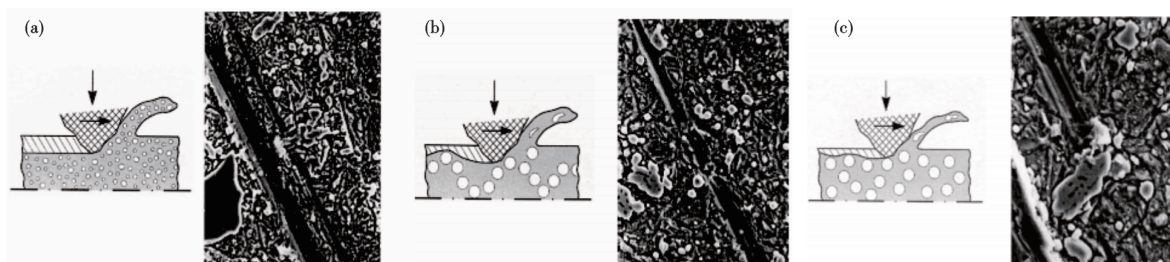


图8 碳化物颗粒尺寸对耐磨性的影响:(a)弥散分布的小尺寸碳化物,(b)网状分布较大尺寸碳化物,(c)弥散分布较大颗粒尺寸碳化物

Fig. 8 Effect of carbide particle size on wear resistance: (a) dispersed small-scale carbides, (b) large size carbides distributed in a network, (c) large particle size carbides with dispersed distribution

了组织中碳化物的粒径与分布,使得相同热处理工艺制度下喷射成形 D2 钢无论横、纵向均优于传统熔铸工艺。

米永旺等^[41]利用喷射成形工艺技术制备了合金成分为 1.9C-0.6W-1.0Mo-20Cr-4V-0.05N 的耐蚀耐磨钢 HSF340,在 1 180 °C 淬火+540 °C 回火后,硬度可达 57HRC,冲击韧性 22.5 J,在稀释王水(5% HNO₃+1% HCl)介质中年腐蚀速率为 10.95 mm/y;同等试验条件下,磨损损失量不超过 D2 钢的 0.4 倍。

康少付等^[42]利用喷射成形工艺制备了合金成分为 1.1C-7.0Cr-2.5V-2.5W 的冷作模具钢,并与电渣重熔工艺进行耐磨性的对比。锻后退火组织中,喷射成形试验钢组织中碳化物均匀细小且弥散分布,尺寸约 1~2 μm,而电渣重熔试验钢,粗大的网状碳化物仍呈不规则块状形貌存在。性能方面,喷射成形试验钢硬度较电渣重熔材料高出 1HRC,耐磨性提高 47%。

上海交通大学颜飞^[43]对喷射成形高合金 Vanadis4 冷作模具钢的研究结果表明,喷射成形工艺制备的 Vanadis4 冷作模具钢碳化物颗粒细小且均匀分布,与粉末冶金工艺制备的材料具有相近的组织特征。经锻造和热处理后,材料的韧性更是优于同成分的粉末冶金钢,有望取代传统粉末冶金在高合金冷作模具钢生产方式。

根据上述研究结果,可以发现,在利用喷射成形工艺制备冷作模具钢时,材料的组织、性能往往具有更明显的提升。究其原因,应与其合金成分及组织特征相关。以 Cr 等合金元素为主的冷作模具钢,凝固过程中形成的碳化物主要以 M₇C₃ 为主,喷射成形工艺能够一定程度上细化网状莱氏体组织,并在锻造过程可进一步破碎、细化。而 W、Mo、V 为主的高速钢中,碳化物类型通常以 M₆C(M₂C)与 MC 型碳化物为主,细化的作用效果往往在 M₆C 型碳化物上得以呈现。由于工艺本身具有形成更高占比的 MC 型碳化物倾向,而这类碳化物又很难在后续

过程中进一步细化,因而,大量研究结果中均发现组织中 MC 型碳化物不仅占比高,且尺寸相对粗大。虽然大尺寸、弥散分布的 MC 型碳化物有利于耐磨性的提升,但对硬度、强韧性等其他力学性能会有一些的不利影响^[44]。

3 总结及展望

利用喷射成形工艺制备高合金工具钢,其性能通常介于传统铸锻工艺与粉末冶金工艺技术之间,但工艺成本低,流程短,具有很大的发展潜力。关于喷射成形工艺技术的发展应重点考虑以下几个方面。

3.1 建立起合金成分-工艺参数-组织性能特征-服役应用的关系

喷射成形是一个涉及到熔体雾化、液滴沉积和锭坯凝固等复杂工艺参数的技术,工艺参数将直接影响产品的质量和性能特征。不同成分特征的材料,所需的制备工艺参数以及材料组织性能特征和服役性能也存在明显差异,因此应加强开展“合金成分-工艺参数-组织性能特征-服役应用”的关系系统研究。

3.2 提高产品的质量性能稳定性

为提高产品的质量稳定性和一致性,一方面应加强对关键设备零部件的研发与改造升级,如高品质扫描型双喷嘴以及高自由度的沉积器等;另一方面,应发展数字化、智能化制造技术,结合在线数字监控控制系统等,实现对沉积、成形过程和工艺监测、调整的精细化控制;此外,应进一步解决过喷粉以及雾化气的回收和再利用问题,以进一步降低生产成本。

3.3 探索新工艺和新方法

基于喷射成形技术的特点和现有产业化规模,进一步开发新的工艺技术,例如多层沉积技术、原位反应雾化喷射沉积成形、近净成形技术等,使其更适合应用于多种材料的使用以及各种形状预成型坯的开发,进一步发挥喷射成形的工艺优势及应用前景。

参考文献

- [1] Singer A R. Recent development in the spray forming of metals: Part I [J]. MPR, 1986, 2: 109-122.
- [2] Singer A R. Recent development in the spray forming of metals: Part I [J]. MPR, 1986, 3: 223-336.
- [3] Boccalini M, Goldenstein H. Solidification of high speed steels [J]. International Materials Reviews, 2001, 46(2): 92-115.
- [4] 朱喜达, 陆家生, 赵勇智, 等. 冷作模具钢(Cr12MoV)短流程生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 10-13.
- [5] Wang Y J, Chu S J, Mao B, et al. Microstructure, residual stress, and mechanical property evolution of a spray-formed vanadium-modified high-speed steel processed by post-heat treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1521-1533.
- [6] 谢志彬, 邵青立, 张国平, 等. 快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢

- 160 mm×160 mm铸坯工艺及质量[J]. 特殊钢, 2019, 40(1): 47-51.
- [7] 刘友荣. 降低工模具钢电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(4): 34-37.
- [8] 赵志刚, 颜慧成, 仇圣桃, 等. 冷却速率对M2高速工具钢铸锭凝固组织的影响[J]. 特殊钢, 2014, 35(3): 45-48.
- [9] 陈佳艺, 朱雷敏, 殷子豪, 等. 高速钢的生产和质量控制技术[J]. 上海金属, 2022, 44(2): 8-14+23.
- [10] 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.
- [11] 黄进峰, 张程, 连勇, 等. 两种制备工艺对含钨高速钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(8): 130-135.
- [12] 李荣, 程光辉, 郭江. 热处理对喷射成形GCr15轴承钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2016, 37(4): 49-51.
- [13] 樊文军, 张胤, 韩翠珍. GCr15钢喷射成形沉积坯孔形成及致密度的分析[J]. 特殊钢, 2012, 33(1): 1-4.
- [14] 汪杰, 魏宽, 徐轶, 等. 喷射成形技术在高速钢中的应用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(10): 48-52.
- [15] 崔成松, 章靖国. 喷射成形快速凝固技术制备高性能钢铁材料的研究进展(四)——喷射成形钢铁材料的工业化生产及展望[J]. 上海金属, 2012, 34(5): 47-50.
- [16] 吴立志. 喷射成形高性能工具材料产业化制备技术开发. 河北省, 河冶科技股份有限公司, 2016-05-21.
- [17] 张海军. 高韧高耐磨高寿命汽车锁具系列精冲模具钢开发. 河北省, 河冶科技股份有限公司, 2020-12-04.
- [18] 皮自强, 路新, 贾成厂, 等. 喷射成形高速钢的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(5): 379-384.
- [19] Ikawa Y, Itami T, Kumagai K, et al. Spray Deposition Method and Its Application to Production of Mill Rolls [J]. Tetsu-to-Hagane, 1989, 75(5): 766-773.
- [20] Igharo M, Wood J V. Investigation of M2 High Speed Steel Produced by Osprey Process [J]. Powder Metallurgy, 1989, 32(2): 124-131.
- [21] Ernst I C, Duh D. ESP4 and TSP4, a comparison of spray formed with powdermetallurgically produced cobalt free high-speed steel of type 6W-5Mo-4V-4Cr [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(22): 6831-6834.
- [22] Mesquita R A, Barbosa C A. Spray forming high speed steel—Properties and processing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383(1): 87-95.
- [23] Mesquita R A, Barbosa C A. High-speed steels produced by conventional casting, spray forming and powder metallurgy [A]. Materials Science Forum [C]. Trans Tech Publications Ltd, 2005: 244-250.
- [24] Rodenburg C, Krzyzanowski M, Beynon J H, et al. Hot workability of spray-formed AISI M3; 2 high-speed steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 386(1-2): 420-427.
- [25] Zhang G Q, Yuan H, Jiao D L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of T15 high speed steel prepared by twin-atomiser spray forming and thermo-mechanical processing [J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 558: 566-571.
- [26] 王和斌. 喷射成形M3型高速钢碳化物演变规律及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [27] 卢林. 喷射成形含钨M3型高速钢组织性能优化与应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [28] 杜文华, 张海军, 默雄, 等. 喷射成形高速钢HSF8610组织与性能研究[J]. 河北冶金, 2021, 310(10): 37-40.
- [29] Kjeldsteen P. Development of high alloyed tool steels using spray forming on an industrial scale [J]. Powder Metallurgy, 2003, 46: (4), 297-298.
- [30] Pi Z Q, Xin L, Yuan W, et al. Simulation of jet-flow solid fraction during spray forming [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2017, 24(6): 657-669.
- [31] Lee E S, Park W J, Jung J, et al. Solidification microstructure and M2C carbide decomposition in a spray-formed high-speed steel [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1998, 29: 1395-1404.
- [32] Lee E S, Park W J, Baik K H, et al. Different carbide types and their effect on bend properties of a spray-formed high speed steel [J]. Scripta Materialia, 1998, 39(8): 1133-1138.
- [33] Serma M M, Rossi J L. MC Complex carbide in AISI M2 High-speed Steel [J]. Materials Letters, 2009, 63(8): 691-693.
- [34] Hanlon D N, Rainforth W M, Sellars C M. The rolling/sliding wear response of conventionally processed and spray formed high chromium content cast iron at ambient and elevated temperature [J]. Wear, 2003, 255: 956-966.
- [35] 刘继浩, 周健, 武会宾, 等. 喷射成形M3高速钢偏析成因及凝固机理[J]. 金属学报, 2023, 59(5): 599-610.
- [36] Ernst I C, Duh D. Properties of cold-work tool steel X155CrVMo12-1 produced via spray forming and conventional ingot casting [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39 (22) : 6835-6838.
- [37] Schulz A, Matthaer-Schulz E, Spangel S, et al. Analysis of spray formed tool steels [J]. Materialwiss. Werkst., 2003, 34 (5) : 478-483.
- [38] Schruoff I, Schüler V, Spiegelhauer C. Advanced tool steels produced via spray forming [A]. Proceedings of the 6 th International Tooling Conference [C]. Sweden, 2002: 1159
- [39] Sandberg O, Jonson L. New generation of tool steels made by spray forming [A]. In: Proceedings of the 6 th International Tooling Conference. The Use of Tool Steels: Experience and Research [C]. Karlstad: Karlstad University, 2002: 2.
- [40] 李栋, 孙宗林, 辛栋梅, 等. 喷射成形与传统熔炼D2组织性能对比研究[J]. 河北冶金, 2015, 235(7): 19-22.
- [41] 米永旺, 李惠, 张巍, 等. 喷射成形耐蚀耐磨钢HSF340组织与性能研究[J]. 河北冶金, 2017, 259(7): 6-9+32.
- [42] 康少付, 刘允中. 喷射成形高合金工具钢微动干摩擦磨损性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 127-130.
- [43] 颜飞. 喷射成形高合金Vanadis4冷作模具钢的组织与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [44] 刘继浩, 迟宏宵, 武会宾, 等. 喷射成形M3高速钢热处理过程中组织的演变和硬度偏低问题[J/OL]. 材料研究学报: 1-11. DOI 10.11901/1005.3093.2022.493.