

粉末冶金高速钢

Powder Metallurgy High Speed Steel

供稿|贾成厂¹, 吴立志²/JIA Cheng-chang¹, WU Li-zhi²

内容导读

高速钢是一种具有高硬度、高耐磨性和高耐热性的工具钢, 500℃仍能保持高的硬度, 且强度和韧性配合好, 可以用来制造复杂的薄刃和耐冲击的金属切削刀具, 也可制造高温轴承和冷挤压模具等。粉末冶金高速钢是采用粉末冶金工艺制备的高速钢, 碳化物呈极细小的颗粒均匀地分布于基体, 避免了熔炼法生产所造成的碳化物偏析而引起力学性能降低和热处理变形, 能够大幅度提高其使用寿命。

高速钢是一种具有高硬度、高耐磨性和高耐热性的工具钢, 也称为高速工具钢或锋钢。该种钢淬火时即使在空气中冷却也能硬化, 并且很锋利。

高速钢是一种成分十分复杂的合金钢, 其典型的合金元素有: 碳、铬、钨、钼、钒和钴。钨、钼、钴的作用是改善材料的高温性能, 使之能承受刀具和工件摩擦产生的热量, 还能提高高温耐磨性。含碳量一般为 0.70% ~ 1.65%, 合金元素总量达 10% ~ 25%。它在高速切削时, 即使温度达到 500℃仍能保持高的硬度, HRC 为 60 以上。这种性能称为红硬性, 是高速钢最主要的特性。而普通碳素工具钢经淬火和低温回火后, 在室温下虽有很高的硬度, 但当温度高于 200℃时, 硬度便急剧下降, 在 500℃硬度已降到与退火状态相当的程度, 完全丧失了

切削金属的能力, 这就限制了碳素工具钢制作切削工具用。而高速钢由于红硬性好, 弥补了碳素工具钢的致命缺点, 可以用来制造切削工具。

高速钢的工艺性能好, 强度和韧性配合好, 主要用来制造复杂的薄刃和耐冲击的金属切削刀具, 也可制造高温轴承和冷挤压模具等。

20 世纪 60 年代以后出现了粉末冶金高速钢, 碳化物呈极细小的颗粒均匀地分布于基体, 避免了熔炼法生产所造成的碳化物偏析而引起机械性能降低和热处理变形, 能够大幅度提高钢的使用寿命。

高速钢的发展历程

高速钢诞生以来, 对现代工业发展起到了重要作用。可以说

没有高速钢, 就没有现代的金属加工业。尽管从上世纪六十年代起, 硬质合金等材料崛起, 但是对于制造形状复杂、磨削困难的刀具, 如拉刀、剃齿刀、插齿刀等, 高速钢始终处于主导地位。特别是要求刀具具备高韧性时, 就非高速钢莫属了。

现代工具钢的发展可追溯到 1740 年, 英国人采用坩锅炉熔化得到成分均匀的高碳钢, 碳含量为 0.75%~1.50%, 制成机床切削工具, 切削速度为 5m/min。1868 年发展了 Mushet 自硬钢, 使切削低碳钢的速度达到 8m/min。典型成分为: C2.0%, W7%, Mn2.5%。

随着 19 世纪工业革命的进展, 工业用钢大量生产对机床和工具的要求日益迫切。19 世纪末, 在美国出现了低锰含铬的 Cr-W 系自硬钢。1898 年, 筛选出两

作者单位: 1.北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2.河冶科技股份有限公司, 河北 石家庄 050031

种成分的钢,一种是 Mushet 的 Mn-W 钢 (C 2.15%, Mn1.58%, W5.44%), 另一种是 Cr-W 钢 (C1.44%, Cr1.83%, W7.72%), 研究发现 Cr-W 钢经接近熔化温度淬火后得到最高的切削性能。1900 年巴黎世界博览会上工具钢的切削表演时,切削速度、吃刀深度和进刀量均可成倍提高,使生产能力提高 340%,引起了轰动,迄今公认这就是高速钢的正式诞生。

进入 20 世纪后,1903 年出现现代高速钢的原始成分: C0.7%、W14%、Cr4%; 1904 年美国科学家向高速钢中加入 0.3%V; 1910 年确立 T1 (W18Cr4V) 钢成分 (C0.75%、W18%、Cr4.0%、V1.0%), 切削中碳钢速度达 30 m/min; 1912 年德国科学家向钢中加入 3%~5% Co, 提高了钢的热硬度; 1918 年 3t 电弧炉试炼高速钢成功, 生产处理较大尺寸的钢锭和钢材; 1923 年加入钨量达 12%~15%, 切削速度达 40m/min 以上; 1932 年美国科学家发明了 Mo 代替 W 的高钼钢 M1; 1937 年美国科学家发明 W-Mo 系钢 M2; 1939 年美国发明高碳高钒钢, 称 Super HSS, 含钒 3%~5%, 淬回火硬度达 67~68HRC, 耐磨性好; 1953 年出现了易切削高速钢 (加硫); 1958~1963 年美国发明 M40 系列钢, 硬度达到 70HRC 的超硬 (Extra-hard) 钢, 最早为 M41 和 M42; 1965 年美国发明粉末冶金法生产高速钢; 1970 年瑞典 Stora-ASEA 粉末冶金高速钢投产; 电渣重熔高速钢开始用于大截面材生产; 高速钢用于

高载荷冷作模具日益增多; 1980 年物理气相沉积法 (PVD) 成功用于部分高速钢刀具的氮化钛涂层, 使用寿命成倍提高; 1990 年粉末高速钢新钢种热处理硬度达 70~72HRC。高速钢发展大事记见表 1。

高速钢刀具至今仍在加工业占有一席之地, 主要归功于其制造工艺上的一项巨大进步: 粉末冶金高速钢诞生。

粉末冶金高速钢的主要工艺过程是: 把已加入合金元素的预炼高速钢, 用感应炉熔化, 然后

表1 高速钢发展大事记

年份	重要事件
1898~1900	美国 F.W.Taylor 和英国 M.White 发明接近钢熔点的高温淬火和高温回火, 并以 Cr-W 钢 (C1.85%、W8%、Cr3.8%) 取代 Mushet 的 Mn-W 自硬钢, 从而创立了高速钢。切削中碳钢的切削速度达 20m/min。1900 年在巴黎国际博览会上表演高速切削成功
1910	确立 T1 (W18Cr4V) 钢成分 (C0.75%、W18%、Cr4.0%、V1.0%), 切削中碳钢速度达 30m/min
1912	德国 Becker 向钢中加入 3%~5% Co, 提高了钢的热硬度
1937	美国 W.Breelcor 发明 W-Mo 系钢 M2
1958~1963	平衡碳原理提出与应用, 美国发明 M40 系列钢, 硬度达到 HRC70 的超硬 (Extra-hard) 钢, 最早为 M41 和 M42
1965	美国 Crucible Steels 公司发明粉末冶金法生产高速钢
1970	瑞典 Stora-ASEA 粉末冶金高速钢投产
1980	氮化钛涂层的物理气相沉积法 (PVD) 成功用于部分高速钢刀具, 使用寿命成倍提高, 对高速钢的应用和发展具有重要意义
1982	日本 Nachi 开始生产预硬高速钢线材
1990	粉末高速钢新钢种热处理硬度达 HRC70~72; 综合性能优良的低合金高速钢重新受到重视和发展, 替代部分通用高速钢, 以节约合金资源
2003	日本 Nachi 采用 FM 工艺生产高速钢

粉末冶金高速钢的优点

高速钢自 1900 年问世以来, 高速钢的生产大多采用传统冶金方法, 即铸锭—锻轧工艺。由于钢的合金量高, 化学成分复杂, 铸锭尺寸大, 冷却速度缓慢等缘故, 在其凝固时不可避免地会产生粗大的莱氏体碳化物偏析组织。碳化物偏析是高速钢中存在的一个严重的质量问题, 偏析的存在不仅给钢的锻、轧等热加工造成困难, 而且还明显地损害了钢的各种性能, 限制了高速钢合金含量的增加, 影响了高速钢的发展。

用高压气体 (氩气或氮气) 喷射使之雾化, 再急冷而得到细小均匀的结晶组织 (粉末)。也可用高压水喷雾化形成粉末, 然后把颗粒装入一个大型的可压缩圆桶, 进行热等静压, 形成致密毛坯, 然后进行锻造或轧制, 制成刀具形状。图 1 是熔化高速钢的设备, 图 2 是热等静压法制备高速钢的流程图。

还可以采用喷射成形技术制备粉末冶金高速钢。喷射成形是制备新材料的一种半固态加工技术, 雾化后不是形成单个的粉末颗粒, 而是沉积为块状坯体。与

a. 真空感应炉 (3t, 真空度 7×10^{-4} mbar)

b. 电渣重熔炉 (3t, 铸锭直径600mm)

图1 高速钢熔化设备

粉末冶金工艺相比较工序比较简单, 不需要热等静压等设备昂贵的投资, 且所生产的材料具有与粉末冶金材料组织性能相似的特点。沉积块脱模后直接进行后续锻造, 其余热也得到了充分的利用。图3是喷射成形技术制备粉末冶金高速钢的示意图。

粉末冶金高速钢的最大特点是多种合金元素能在钢材内得到均匀分布, 解决了原来铸锭法炼钢的一个固有的合金元素在钢内偏析的难题。偏析造成产品的不一致性, 会影响材料的使用性能。此外, 粉末冶金方法可以使钢中的合金元素含量大大增加, 这在传统的铸锭炼钢工艺是做不到的。

粉末冶金高速钢组织均匀, 晶粒细小, 其碳化物分布均为1级, 碳化物晶粒尺寸在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 以下。比相同成分的熔铸高速钢具有更高的抗弯强度、韧性和耐磨性, 一般能高出20%~50%。同时还具有热处理变形小、锻轧性能和磨削性能良好等优点。粉

末高速钢中的碳化物含量大大超过熔铸高速钢的允许范围, 使硬度提高到67HRC以上, 从而使耐磨性能得到进一步提高。含钒5%时其可磨削性能相当于含钒2%的熔炼高速钢, 故粉末冶金高速

钢中允许适当提高钒含量。如果采用烧结致密或粉末锻造等方法直接制成外形尺寸接近成品的刀具、模具或零件的坯件, 更可取得省工、省料和降低生产成本的效果。粉末高速钢性能优越、使用寿命长, 适用于制造承受冲击载荷的刀具, 如铣刀、插齿刀、刨刀以及小截面、薄刃刀具、以及昂贵的多刃刀具如拉刀、齿轮滚刀、铣刀等, 具有显著的经济效益。

上个世纪60年代以来, 粉末冶金领域雾化法制取高质量预合金粉末得到了迅速发展, 加上冷、热等静压机的问世和应用, 使得采用粉末冶金工艺生产高性能合金材料成为可能, 粉末冶金高速钢就是采用这种全新工艺而得到新型高合金钢的成功先例。粉末

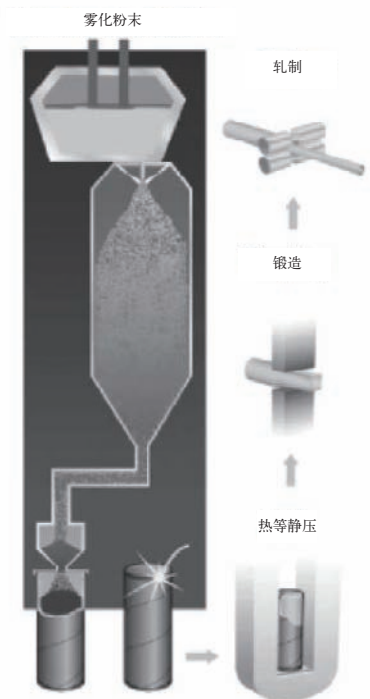


图2 热等静压法制备高速钢

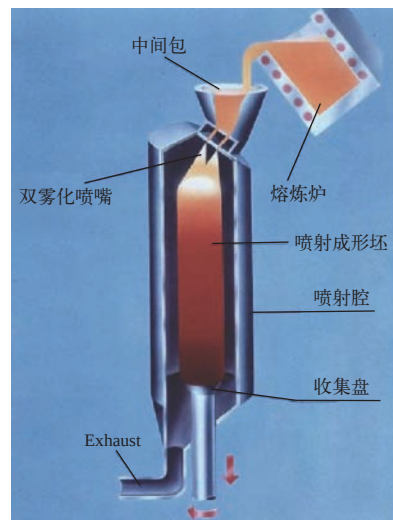


图3 喷射成形制备粉末冶金高速钢

冶金工艺不仅解决了传统冶金工艺中存在的问题,而且还开辟了一条一般铸锻工艺难于或不可能生产的超高合金含量的高速钢的新途径,粉末冶金高速钢作为一种新型钢类在高速钢中占有重要的地位。

高速钢的分类

高速钢按化学成分可分为普通高速钢及高性能高速钢;按制造工艺可分为熔炼高速钢及粉末冶金高速钢。

普通高速钢可满足一般需求,常见的普通高速钢有两种:钨系高速钢和钨钼系高速钢。

钨系高速钢(含钨9%~18%):典型牌号有W18Cr4V,经热处理后硬度可达63~66HRC,抗弯强度可达3500MPa,且可磨性好。

钨钼系高速钢(含钨5%~12%,含钼2%~6%):典型牌号为W6Mo5Cr4V2(美国牌号M2,国内俗称W6),可以取代钨系高速钢,具有碳化物细小分布均匀,耐磨性高,成本低等一系列优点。热处理后抗弯强度可达4700MPa,韧性及热塑性能够提高50%。常用于制造各种工具,例如钻头、丝锥、铣刀、铰刀、拉刀、齿轮刀具、锯片等,可以满足加工一般工程材料的要求,但其脱碳敏感性稍强。

牌号为W9Mo3Cr4V(无国际牌号,国内俗称W9)的普通高速钢是中国近几年发展起来的新品种。强度及热塑性略高于W6Mo5Cr4V2,硬度为63~64HRC,与韧性相配合,容易轧制、锻造,热处理工艺范围宽,

脱碳敏感性小,成本更低。

另一牌号为W5Mo2Cr4V(无国际牌号,国内俗称W5)的普通高速钢是06年发展起来的新品种,强度及热塑性略低于W9Mo3Cr4V,硬度为62~63HRC,与韧性相配合,容易轧制、锻造,热处理工艺范围宽,脱碳敏感性小,成本更低。

高性能高速钢具有更好的硬度和热硬性,通过改变高速钢的化学成分,提高性能,从而发展起来的新品种。高性能高速钢具有更高的硬度、热硬性,切削温度达650℃时,硬度仍可保持在60HRC以上。耐用性可以达到普通高速钢的1.5~3倍,适用于制造加工高温合金、不锈钢、钛合金、高强度钢等难加工材料的刀具。主要品种有4种,分别为高碳系高速钢、高钒系高速钢、含钴系高速钢和铝高速钢。

高碳系高速钢:牌号为9W18Cr4V,因含碳量高(0.9%),所以硬度、耐磨性及热硬性都比较好。用其制造的刀具在切削不锈钢、耐热合金等难加工材料时寿命可显著提高。

高钒系高速钢:牌号有W12Cr4V4Mo及W6Mo5Cr4V3(美国牌号M3),含钒量为3%~4%,耐磨性大大提高,但可磨性稍差。高钒系高速钢的使用及发展还需要依赖于磨削工艺及砂轮技术的发展。

钴高速钢主要用于制造切削难加工金属(如高温合金、钛合金和高强钢等)的刀具,有以下牌号:

a、W6Mo5Cr4VCo5(美国牌

号M35,国内称W6+钴)。钴能促进碳化物在淬火加热时更多地溶解在基体内,利用高的基体硬度来提高耐磨性。这种高速钢硬度、热硬性、耐磨性及可磨性都很好,热处理硬度可达65~67HRC。

b、W2Mo9Cr4VCo8(美国牌号M42)。含钒量不高(1%),含钴量高(8%),热处理硬度可达67~70HRC,采取特殊热处理方法,得到67~68HRC硬度,使其切削性能(特别是间断切削)得到改善,提高冲击韧性。钴高速钢可制成各种刀具,用于切削难加工材料效果很好,又因其磨削性能好,可制成复杂刀具,国际上用得普遍。但中国钴资源缺乏,钴高速钢价格昂贵。

铝高速钢:牌号为W6Mo5Cr4V2Al、W6Mo5Cr4V5SiNbAl等,主要加入铝(Al)、硅(Si)、铌(Nb)元素,来提高热硬性、耐磨性。适合中国资源情况,价格较低。热处理硬度可达到68HRC,热硬性也不错。但是这种钢易氧化及脱碳,可塑性、可磨性稍差,仍需改进。

高速钢的热处理工艺比较复杂,必须经过退火、淬火、回火等一系列热处理过程。退火的目的是为了消除应力,降低硬度,使显微组织均匀,便于淬火。退火温度一般为860~880℃。淬火一般分两阶段进行,先在800~850℃预热(以免引起大的热应力),然后迅速加热到淬火温度1190~1290℃,之后油冷或空冷或充气体冷却。工厂采用盐炉加热,现真空炉使用也相当广泛。淬火后因内部组织还保留

一部分(约30%)残余奥氏体没有转变成马氏体,这会影响高速钢的性能。为使残余奥氏体转变,进一步提高硬度和耐磨性,一般要进行2~3次回火,回火温度560℃,每次保温1h。

高速钢的国内外发展现状 与发展方向

20世纪70年代初,国外已有粉末冶金高速钢刀具商品。20余年来发展较快,在高速钢刀具材料中已占有一定份额。以ERASTEEL国际工业集团(瑞典与法国为主)为例,它的各种高速钢产品的总和在世界高速钢市场中占有30%的份额。它的高速钢产品中,熔炼高速钢有20个牌号,粉末冶金高速钢有8个牌号。

Carpenten粉末制品公司生产的一种名为Micro-MeltMaxanet的粉末高速钢,含钨13%,钴10%,钒6%,铬4.75%,含碳量达2.15%。若不采用粉末冶金法,不可能达到如此高的合金含量。他说:“也许我们用如此高合金含量的钢铸出了钢锭,也许这个钢锭在冷却和凝固时没有产生裂纹。但是最终内部结构不均匀的问题是无法避免的,钢锭将形成大块碳化物偏析。”

Crucible材料公司认为:粉末高速钢工艺的不同之处在于,喷雾制粒时迅速凝固,形成了特别细的碳化物,直径最大 $3\mu\text{m}$,平均 $1\mu\text{m}$ 。而铸锭工艺中形成的碳化物直径达到 $40\mu\text{m}$ 。

GriggrSteel公司的粉末高速钢开发中心,在合金元素大量加入高速钢的工艺方面,取得一系

列具体进展。“随着制作方法的不断改进,炼钢人员现在已能炼出含量越来越高的合金材料。而通过这些不同的合金成分,就可针对用途获得不同的特性。”

Carpenter公司的新型高合金高速钢Micro-MeltMaxanet,在测试温度为 $1000^{\circ}\text{F}(538^{\circ}\text{C})$ 时,其红硬性为63HRC。热处理参数为:奥氏体转变温度为 $2250^{\circ}\text{F}(1232^{\circ}\text{C})$,回火温度为 $1025^{\circ}\text{F}(552^{\circ}\text{C})$ 。与之对比的T-15常规高速钢,在类似条件下的红硬性为58HRC。

我国自20世纪70年代中期以来,亦对粉末冶金高速钢进行了研制。如冶金工业部钢铁研究总院有粉末冶金高速钢FW12Cr4V5(牌号为FT15)和FW10Mo5Cr4V2Co12(FR71),北京工具研究所有水雾化的W18Cr-4V(GF1)、W6Mo5Cr4V2(GF2)、W10.5Mo5Cr4V3Co9(GF3)。上海材料研究所有粉末冶金高速钢W18Cr4V(PT1)和W12Mo3Cr4V3N(PVN),机械性能和切削性能俱佳,在加工高强度钢、高温合金、钛合金和其他难加工材料中,发挥了优越性。

目前,我国在刀具和模具的制备上采用粉末冶金高速钢已经起步,并取得了较好的进展。安

泰科技股份有限公司、北京科技大学、航空材料研究院、河冶科技有限公司承担的北京市科委“十一五”科技项目“高性能粉末冶金高速钢的研究与开发”课题(课题编号:Z07000300700704)圆满通过了验收,目前已经投入试生产。本课题历时三年,采用“气雾化+HIP+精锻”工艺,重点解决了氧含量和夹杂物的控制工艺和相关装备的改造,产品氧含量小于 100×10^{-6} (100PPM)成品的室温硬度大于67HRC,抗弯性能大于4000MPa,综合性能与国外同类产品性能接近。

目前,世界粉末高速钢生产主要集中在7家企业,总产能约2.2万t左右。粉末冶金高速钢已占高速钢年产量的10%以上,美国应用粉末冶金高速钢比例超过15%。未来5年,我国对粉末冶金高速钢材料及制品的市场需求总量,加上出口额可达1500~2000t左右。

我国在粉末冶金高速钢领域与先进工业国家的主要差距在于:开发能力、主要产品水平、工艺水平与装备。

十二五期间我们有可能实现突破的重点技术包括:高速钢的粉末冶金制备技术、高速钢的喷射成形技术;大截面高速钢的制

表2 世界上主要厂家的高速钢产销量

国家地区	年产量, 万 t	主要生产厂家
欧美国家	3~5.5	Erasteel, Bohler, Latroble
日本	0.7~1.8	Hitachi, Nachi
俄罗斯和乌克兰	0.8~1.2	Electrostal, DSS
中国	6~8	河冶科技, 江苏天工, 江苏福达
其他	0.3~0.6	
合计	10.8~17.1	

备技术、300kg 盘重高速钢热轧盘条生产技术、小规格钢丝制备技术。

参考文献

- [1] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 1-16.
- [2] 赵建政, 贾志琦. 国内外高速钢发展现状. 科技情报开发与经济, 1997, 1: 13-15.
- [3] 和优锋, 邢书明, 戴安国. 高速钢坯料制备工艺的问题与对策. 热加工工艺, 2006, 35(17): 74-78.
- [4] Robert Riedl. The new development of high speed steel [J]. Steel Research, 1987, 58(8): 201-210.
- [5] 燕战秋. 高速钢的发展概况及研究动向. 武汉工学院学报, 1985, 5: 96-103.
- [6] 唐华生. 新的粉末高速钢及其应用. 特殊钢, 1989, 3: 25-30.
- [7] 于启勋. 高速钢刀具材料的发展和实验研究. 机械工程师, 2007, 11: 7-8.
- [8] 赵步青. 刀具新材料—粉末高速钢. 机械制造, 1997, 3: 32-33.
- [9] 周一志. 国外粉末高速钢的发展和应用. 武汉工学院学报, 1980, 2: 91-95.
- [10] 卢广锋, 方玉诚, 金成海. 粉末冶金高速钢T15工业制备技术. 粉末冶金工业, 2008, 10: 1-4.
- [11] 吴元昌. 第三代粉末冶金高速钢. 粉末冶金工业, 2006, 5: 55-56.
- [12] 吴元昌. 粉末冶金高速钢生产工艺的发展. 粉末冶金工业, 2007, 17: 30-36.
- [13] 陈顺民, 张庆, 祝新发. 粉末冶金高速钢的特性、热处理工艺及应用. 热处理, 2008, 23: 16-18.
- [14] Tornberg C, Bengtsson B O. ESH: A tundish metallurgical process improving the properties of PM tool steels [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1996, 25(1): 36-40.
- [15] Oliveria M M, Mascarenhas J, Wronsk A S. Supersolidus sintering and mechanical properties of water atomized Fe-2.3C-4.0Cr-7.0Mo-10.5Co-6.5V-6.5W high speed steel. Powder Metallurgy, 1993, 36(4): 281-284.
- [16] 李祖德, 李松林, 赵慕. 20世纪中、后期的粉末冶金新技术和新材料(2)——新材料开发的沿革与评价. 粉末冶金材料科学与工程, 2006, 12: 316.
- [17] 王洪海. 粉末冶金高速钢及其应用. 新技术新工艺, 1982, (01), 8-11.
- [18] Urrutibeaskoa I, Urcola J J. Powder Metallurgy, Sintering behaviour of grade M water atomized high speed steel powders under vacuum and nitrogen rich atmosphere. Powder Metallurgy, 1993, 36 (1): 47-54.
- [19] 韩凤麟. 2002年中国粉末冶金零件工业进展. 粉末冶金工业, 2003, 13: 23-26.
- [20] 吴元昌. 奥地利伯乐钢厂生产细颗粒高速钢粉. 粉末冶金工业, 2000, 10(4): 10-12.
- [21] Per Billgren. Hot Isostatic Pressing of High Speed Steel. Proceedings-First International High Speed Steel Conference, 1990: 115-118.
- [22] Berns H. The fatigue Behaviour of Conventional and Powder Metallurgy HSS. J. Powder Metallurgy International, 1987, 19(4): 22-26.
- [23] 陈云华, 张平, 卢柳林, 等. 非金属夹杂物对钢制零件产品质量的影响. 理化检验-物理分册, 2005, 11: 556-558.
- [24] GB/T 10561, 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法[S].
- [25] 刘新礼. 非金属夹杂物对钢的机械与工艺性能的影响. 甘肃冶金, 1999, 2: 17-18.
- [26] 苏平旺. 钢中的非金属夹杂物. 武钢技术, 1995, 6(33): 28-32.
- [27] 张爱梅. 非金属夹杂物对钢性能的影响. 物理测试, 2006, 24(4): 42-44.
- [28] 曾光廷, 李静媛, 罗学厚. 非金属夹杂物与钢的韧性研究. 材料科学与工程, 2000, 18(2): 87-90.
- [29] 张义文, 陈生大, 张宏, 等. 静电分离去除高温合金粉末中陶瓷夹杂的研究. 粉末冶金工业, 2000, 10 (4): 23-26.
- [30] 张家骏, 霍旭红. 物理选矿. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. 390-398.
- [31] Gessinger G H. Powder Metallurgy of Superalloys. London: Butterworths, 1984: 47-51.
- [32] 王盘鑫, 郑玉堂, 宫章汉, 等. Rene' 95和FGH95合金粉末中陶瓷夹杂的分析. 北京钢铁学院学报, 1987, 6: 59-66.
- [33] 胡本芙, 余泉茂, 何承群, 等. 分离FGH95合金粉末中陶瓷夹杂物的水淘析法有效性分析. 中国有色金属学报, 2002, 5(12): 950-955.
- [34] 董欣, 孙继华, 韩晓华, 等. 钢中非金属夹杂超声检测的计算机模拟. 科学技术与工程, 2009, 4(9): 1039-1042.
- [35] 梁伦龙. 气体分析法测定钢中氧化夹杂物分量探索. 重型机械科技, 2002, 1: 50-51.
- [36] 韩丽华. 钢中稳定氧化夹杂物的快速定量测定. 兵器材料科学与工程, 1988, 4: 44-47.
- [37] 吕佐明, 孙建平, 刘金源. 非金属夹杂物定量分析在生产中的应用. 南方金属, 2006, 6: 28-31.
- [38] Leica Qincs. User Manual Application Solutions for Steel Inclusion Rating. 2002.
- [39] 李宏. 钢中非金属夹杂物存在状态的不确定性与检测. 冶金分析, 2008, 28(9): 1-6.
- [40] 张毅, 郭君飞, 缪乐德. 钢中非金属夹杂物的分析研究进展. 宝钢技术, 2008, 2: 35-40.
- [41] 国为民, 吴剑涛, 张风戈, 等. 粉末高温合金中夹杂物特性及与不同成型工艺的关系. 材料导报, 2004, 11(18): 87-91.

作者简介

贾成厂, 男, 日本TOHOKU大学博士, 日本神奈川科技园博士后, 北京科技大学教授、博士生导师, 010-62334271, jcc@ustb.edu.cn, 主要社会兼职有中国复合材料学会理事、中国金属学会粉末冶金分会副理事长兼秘书长, 《复合材料学报》、《粉末冶金技术》、《粉末冶金工业》等期刊的编委。主编、参译学术专著12本, 获国家发明专利20余项, 获教育部科技进步二等奖等多项奖励, 发表学术论文130余篇, 其中被SCI检索50篇, 被EI检索107篇, 被他引150余次。

吴立志, 男, 河冶科技股份有限公司总工程师, 中国金属学会高速钢专业委员会主任委员, 2010年度石家庄市有突出贡献的中青年专家, 0311-88382028, 长期从事高速钢等领域的研究。承担国家级科研项目多项。