

M42 热处理中淬火温度对碳化物转变机制的影响

刘博文¹, 路新¹, 皮自强¹, 贾成厂¹, 郑伟², 吴立志², 张一帆¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 河冶科技股份有限公司, 河北 石家庄 500350)

摘要: 以精锻 M42 喷射成形高速钢为原料, 通过热处理正交试验, 优化了材料热处理工艺, 并分析了不同热处理制度下材料显微组织、硬度、抗弯强度及碳化物的演变规律。结果显示, 最佳热处理工艺为: 淬火保温温度 1180 °C, 回火温度 540 °C, 回火 3 次, 每次 1 h。该工艺下, M42 洛氏硬度达到 67.2 HRC, 抗弯强度达到 3115 MPa。淬火保温温度通过控制 M_6C 型碳化物的溶解量, 影响最终碳化物的尺寸。淬火温度为 1190 °C 时, M_6C 型碳化物充分溶解, 回火过程碳化物均匀弥散析出。

关键词: 喷射成形; M42; 热处理; 碳化物变化

中图分类号: TG142.45

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)03-0829-06

高速钢属于高碳钢, 通常合金元素含量较多, 具有高硬度、良好的耐磨性和优良的红硬性等特点, 被广泛应用于切削用刀具。传统铸造高速钢晶粒粗大、碳化物偏析严重, 使得高速钢在刀具领域发展受到限制。各种粉末冶金技术是获取工模具制品的重要方法。粉末冶金高速钢所得产品, 碳化物细小且均匀, 无碳化物偏析。同时可以加入大量的合金元素, 使其性能显著提高^[1-5]。但粉末冶金工艺复杂, 制备大件较为困难, 存在一定的限制。20 世纪 60 年代又产生了喷射成形工艺, 该工艺最早是 1968 年由英国 Swansea 大学 Singer 教授提出的, 在 1972 年获得专利, 1974 年由英国 Osprey Metals 公司应用于工业生产^[6,7]。

喷射成形的基本原理是: 将液态金属用高压惰性气体雾化成为细小的熔滴, 熔滴随着惰性气体飞行并且快速冷却, 在尚未完全凝固前沉积到具有一定形状的沉积基板上, 并且在基板上聚集、凝固成整体致密的坯件^[8,9]。相比于传统粉末冶金的方法, 喷射成形具有常规铸造一步成型的优点, 同时兼顾快速凝固和半固态成形的特点, 碳化物细小均匀^[10,11]。

目前, 关于喷射成形高速钢的研究主要集中在喷射成形工艺参数对沉积坯组织的影响, 进而改进和完善喷射成形工艺^[12,13]。而针对喷射成形高速钢热处理工艺过程的研究报道较少, 现有的研究表明通过调整热处理回火工艺喷射成形高速钢碳化物明显细化, 碳

化物尺寸甚至小于同等成分粉末冶金方法制备高速钢, 高速钢硬度及强度可得到明显改善^[9,14,15]。赵顺利、马超等人^[16,17]研究了喷射成形 M42 高速钢的热处理机理, 发现当淬火温度高于 1150 °C 时, 可以消除部分孔隙, 改善碳化物形态与分布。回火温度对二次碳化物析出影响较大。550 °C 以下, 随着回火温度升高, 高速钢硬度上升; 550 °C 以上, 随着回火温度升高, 碳化物逐渐粗化, 高速钢硬度下降, 最终得到的 M42 高速钢洛氏硬度为 66.5 HRC。前人对于喷射成形高速钢热处理过程性能与组织的研究集中于回火过程对于碳化物尺寸与力学性能的影响, 且针对喷射成形 M42 高速钢热处理工艺也缺乏系统研究。本研究以精锻 M42 喷射成形高速钢为原料, 对 M42 高速钢的热处理工艺进行了优化, 并详细研究了淬火保温温度对碳化物大小的影响规律。

1 实验

采用喷射成形高速钢试样为河冶科技股份有限公司制备的 M42 喷射成形高速钢, 并经过了精锻处理。其成分如表 1 所示。

热处理试样尺寸为 4 mm×4 mm×20 mm, 其中 20 mm 为沿锻造伸长方向。本实验选用管式电阻炉加热, 升温速率为 10 °C/min, 加热、保温与降温过程中均使用高纯氩气保护, 气体流量为 50 mL/min。热

收稿日期: 2016-03-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) (2012AA03A509)

作者简介: 刘博文, 男, 1990 年生, 博士生, 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083, 电话: 010-82377286, E-mail: lbw_1211@126.com

表 1 M42 喷射成形高速钢成分

Table 1 Element contents of M42 High Speed Steel ($\omega/\%$)								
C	Si	Mn	Mo	W	V	Co	Cr	Fe
1.10	0.25	0.36	9.50	1.50	1.15	8.00	3.75	Bal.

处理过程采用氧化铝粉末包埋试样，避免受热不均匀引起脱碳。高速钢淬火升温过程中，选择在 850 °C 保温 20 min 避免受热不均造成的开裂；淬火保温温度为 1040~1240 °C，随后油淬冷却。回火实验保温温度为 520~560 °C，回火次数为 2~4 次，每次 1 h。为优化热处理工艺，设计了淬火温度、回火温度及回火次数三因素、三水平正交试验。

采用日本理学 (Rigaku) 公司 Dmax-RB 型 12 kW 旋转阳极 X 射线衍射仪 (Cu K α , $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$) 进行 M42 高速钢的物相分析。浸蚀剂为浓 HF 溶液、浓硝酸与去离子水按照体积比 1:1:8 比例混合。浸蚀后采用英国 S250MK2 型配有 Link-860 能谱仪的扫描电子显微镜观测热处理后 M42 高速钢的显微组织形貌。利用台式 HSRU-45 型硬度计来测定样品的洛氏硬度 HRC。采用电火花线切割机将经过热处理的试样分别切成尺寸为 2 mm \times 3 mm \times 18 mm 抗弯强度测试样。抗弯测试在室温下 INSTRON 万能材料试验机上进行，变形速率为 0.002 s $^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 淬火保温温度对组织影响

图 1 为经过 1040~1240 °C 不同温度淬火后试样的

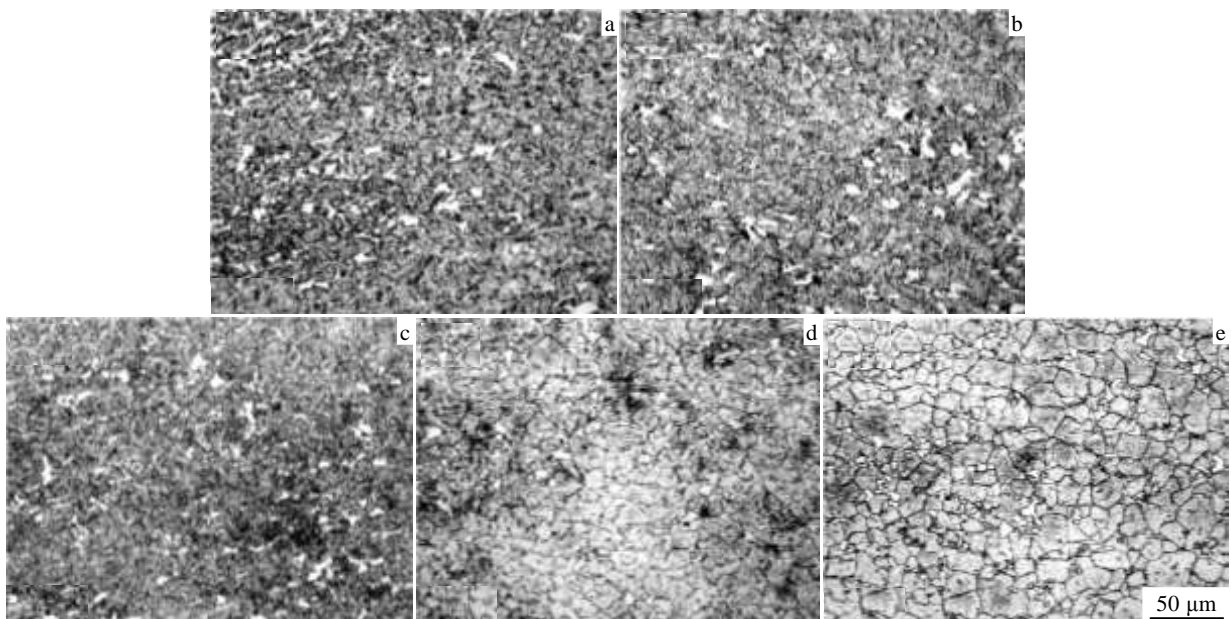


图 1 不同淬火保温温度 M42 高速钢 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of M42 samples with different quenching temperatures

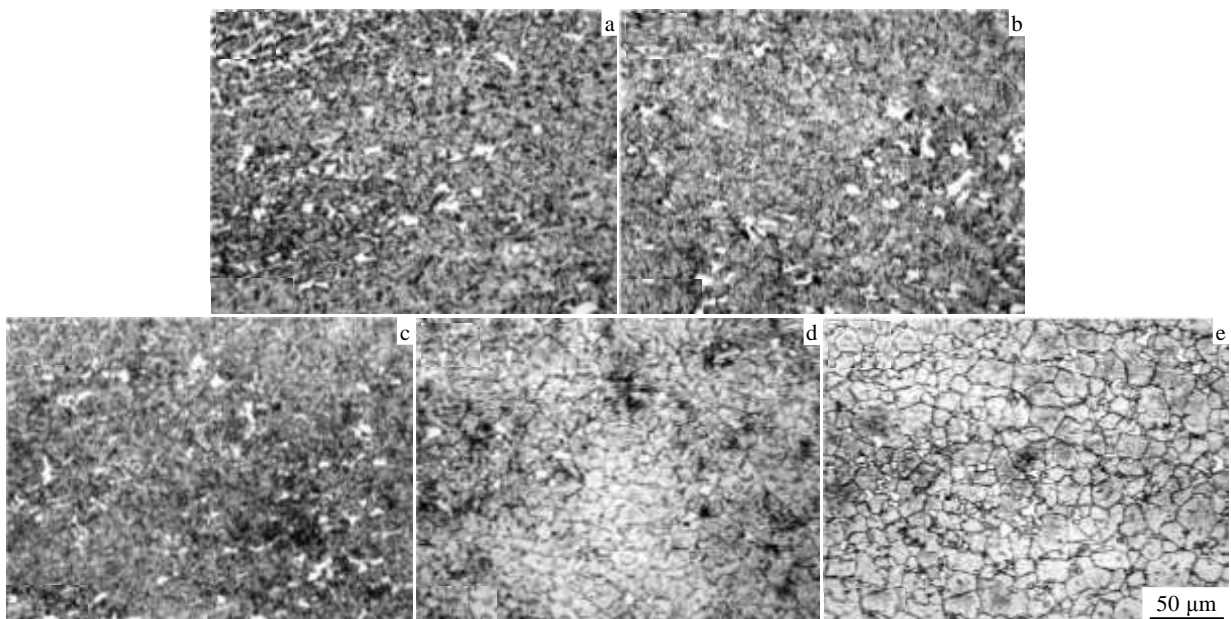


图 2 不同淬火保温温度 M42 高速钢金相照片

Fig.2 OM images of M42 samples with different quenching temperatures: (a) 1040 °C, (b) 1090 °C, (c) 1140 °C, (d) 1190 °C, and (e) 1240 °C

XRD 图谱。从图中可以看出，不同淬火保温温度下，物相均为 Fe 基体与 M_6C 型碳化物 W_3Fe_3C 。相比精锻后试样，热处理后碳化物含量明显增加。1090 °C 以上淬火，碳化物相对峰强随着淬火温度的升高逐渐降低。淬火后，Fe 基体峰值向左偏移。

M42 喷射成形高速钢淬火后金相组织如图 2 所示。可以看出，淬火后试样金相组织主要由灰色的马氏体与白色的铁素体组成。随着温度的升高，白色铁素体逐渐减少，直至在 1190 °C 以上完全转变为马氏体。同时，随着淬火保温温度的升高，晶粒尺寸逐渐增大，1190 °C 作为淬火保温温度时，晶粒尺寸达到 20 μm 左右。1240 °C 作为淬火保温温度时，晶粒明显长大，最大晶粒接近 50 μm 。

当淬火温度低于 1190 °C, 试样未能达到完全奥氏体化温度, 因此基体中出现铁素体; 当淬火温度升高, 铁素体逐渐转变为马氏体, 这与 XRD 测试结果相一致, 对应于 Fe 衍射峰逐渐向左偏移。

2.2 淬火保温温度对碳化物的影响

碳化物的大小与含量的变化是影响高速钢力学性能的主要因素。弥散细小的碳化物有助于强化基体, 而较大体积的碳化物, 会增加高速钢脆性, 降低强度。图 3 为 1145~1220 °C 区间, 每 15 °C 选取 1 个温度点作为淬火保温温度, 540 °C 回火 3 次, 每次 1 h 得到的高速钢组织 SEM 照片。可以看出淬火温度对碳化物形态有较大影响。淬火保温温度在 1145~1175 °C 范围内升高, 碳化物有逐渐长大的趋势; 而当淬火温度升高至 1190 °C 时, 碳化物明显细化, 继续升高淬火温度碳化物尺寸逐渐减小。通过 Image Pro Plus 软件, 统计了 M42 高速钢热处理后的碳化物所占体积比与平均尺寸, 如表 2 所示。不同淬火保温温度下热处理试样碳化物所占体积比相差不大, 约占 25%。这是由于在淬火过程中, 固溶在马氏体基体中的碳化物回火过程中又再次析出。但随着淬火保温温度的升高, 碳化物尺寸有先增大再减小的趋势。

1175 °C 淬火热处理试样碳化物最为粗大, 尺寸约为 9.3 μm, 其原因与高速钢中碳化物在淬火保温过程中溶解和回火过程中析出 2 个过程相关。M42 高速钢主要的碳化物类型有 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 与 MC 等, 由于喷射成型的方法制备得到的 M42 高速钢, 不存在粗大的

共晶碳化物 M_2C 。在淬火保温过程中, 碳化物的溶解为主要过程。由 W、Mo、V 与 Fe、C 构成的 $M_{23}C_6$ 型合金碳化物, 900 °C 以上开始溶解, 选取 1145 °C 以上的淬火保温温度可以使得这部分碳化物充分溶解。由 Cr、W、Mo、V 与 Fe、C 构成的 M_6C 合金碳化物在 1160 °C 以下, 很少溶解, 1160 °C 以上, M_6C 合金碳化物加快溶解。V 构成的 VC 体积很小, 在 1200 °C 以上开始溶解。因此, 所选取的淬火保温区间内, 只有 M_6C 合金碳化物存在溶解量的差别。在回火过程中, 马氏体中所溶解的过饱和碳化物析出, 而未溶解的 M_6C 合金碳化物可以作为形核长大的异质点, 使得较低淬火温度下热处理试样的碳化物较为粗大。

淬火温度为 1145~1175 °C 时, 存在未溶解大块 M_6C 型碳化物, 随着淬火保温温度的升高, 碳化物溶解量增加。回火过程中, 部分碳化物沿剩余的 M_6C 型合金碳化物析出长大。因此, 在 1175 °C 淬火热处理试样的碳化物尺寸最为粗大。当保温温度为 1190 °C 以上时, M_6C 碳化物充分溶解, 基体内不存在大尺寸未溶解碳化物。回火过程中, 碳化物均匀弥散析出, 尺寸明显细化。当温度持续升高, 碳化物溶解量逐渐增加。回火后碳化物尺寸逐渐减小。

利用扫描电镜所带 EDS 能谱分析热处理后碳化物成分随淬火温度升高的变化规律如图 4 所示。随着淬火保温温度的升高, Mo 与 W 元素含量下降, V 含量升高。由 Mo、W 等构成的碳化物硬度为 73.5~77 HRC; V 构成的碳化物硬度最高可达到 85 HRC。因此,

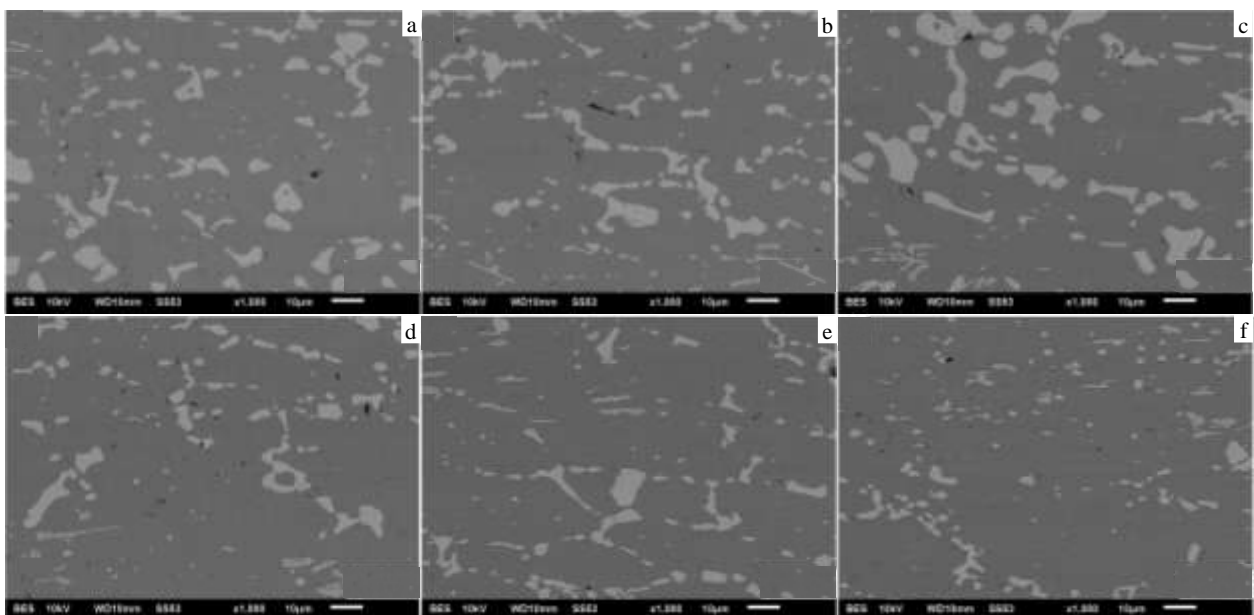


图 3 不同淬火温度下回火后 M42 高速钢组织 SEM 照片

Fig.3 SEM images of M42 samples with different quenching temperatures: (a) 1145 °C, (b) 1160 °C, (c) 1175 °C, (d) 1190 °C, (e) 1205 °C, and (f) 1220 °C

表 2 不同淬火温度下碳化物统计 (540 °C/3 次回火)

Temperature/°C	Carbides, φ/%	Average size/μm
1145	28.54	6.21
1160	27.62	7.31
1175	24.95	7.54
1190	25.49	5.68
1205	24.81	4.92
1220	25.03	2.73

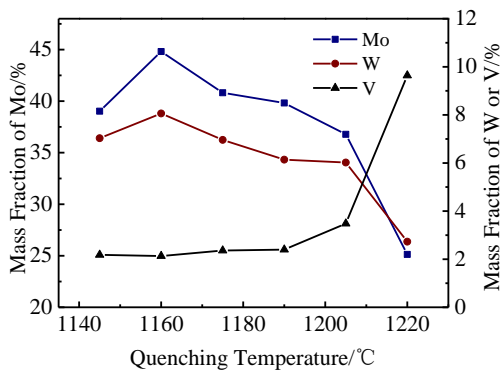


图 4 不同淬火温度下 M42 碳化物含量

Fig.4 Carbide content of M42 samples with different quenching temperatures

随着淬火保温温度的升高,在一定程度上增大了 M42 高速钢的硬度。

2.3 M42 高速钢热处理后洛氏硬度

图 5 为不同淬火温度及回火温度热处理后试样的硬度值, 淬火温度范围为 1145~1220 °C, 回火温度为 520~560 °C, 回火次数为 3 次。原始试样的洛氏硬度经测试为 28.6 HRC, 相比于原始试样, 热处理后的 M42 高速钢硬度值有很大提高, 所有测试点均达到 63 HRC 以上。从图 5 中可以看出, 随着淬火保温温度的升高, 硬度值呈整体升高的趋势, 但在淬火保温温度为 1175 °C 时, 硬度值出现低点。选取 1190~1220 °C 作为淬火温度, 520 °C 或 540 °C 作为回火温度, M42 高速钢热处理试样的硬度值可达到 67 HRC 以上。

M42 高速钢的硬度变化趋势, 与其热处理过程中, 碳化物的变化情况相关。淬火温度为 1145~1175 °C 时, 碳化物粗大, 对应洛氏硬度较低。随淬火温度升高, M₆C 型碳化物全部溶解, 回火析出的二次碳化物明显均匀细小, 此外碳化物中 V 含量升高。因此, 试样硬度有明显升高趋势。回火温度为 560 °C 时, 碳化物在回火过程中长大, 对应洛氏硬度降低。另一方面, 淬火温度过高, 基体晶粒粗大也会导致其韧性下降。为此进一步实验选择 1160~1205 °C 作为淬火保温温度,

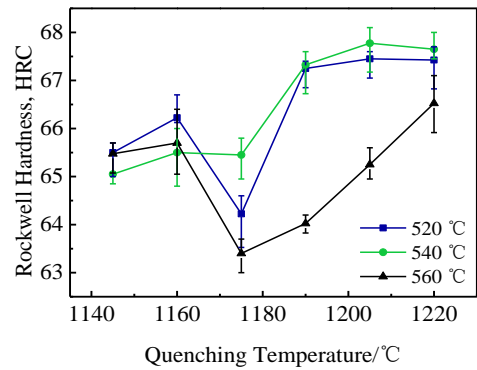


图 5 不同热处理工艺下 M42 高速钢硬度

Fig.5 Rockwell hardness of M42 samples with different heat treatments

测试 M42 高速钢热处理后抗弯强度。

2.4 M42 高速钢热处理后抗弯强度

经过 1145~1205 °C 淬火/520~560 °C 回火获得 M42 高速钢热处理试样的抗弯强度如图 6 所示。可以看出, 当淬火温度为 1190 °C 时, 在不同的回火温度下得到热处理试样的抗弯强度均出现最高值。高于 1190 °C 时, 随着淬火保温温度的升高, 抗弯强度明显下降。经过 1190 °C 淬火/560 °C 回火热处理试样的抗弯强度最高可达到 3000 MPa 左右。综合洛氏硬度与抗弯强度的测试结果, 淬火保温温度在 1175 °C 及以下温度时, 硬度值较低; 而在 1205 °C 及以上温度淬火时, 抗弯强度下降明显。因此, 最佳淬火保温温度应该选取在 1180~1200 °C 之间。为了确定最佳的热处理工艺, 设计了在其温度范围作为淬火保温温度的进一步正交试验。

2.5 正交试验分析

为确定最佳的热处理工艺, 考虑回火次数 (A)、回火温度 (B)、淬火保温温度 (C) 3 个因素对抗弯强度的综合影响, 实验设计了三因素三水平的正交试验。

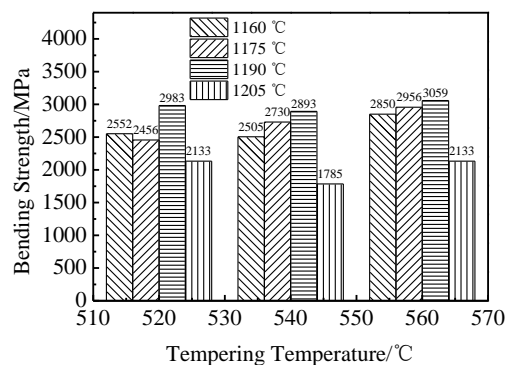


图 6 不同热处理工艺下 M42 抗弯强度

Fig.6 Bending strength of M42 samples with different heat treatments

表3 M42 高速钢热处理正交试验

Table 3 Orthogonal experiment of heat treatment

Samples No.	Times (A)	TT (B)/°C	QT (C)/°C	Bending strength/MPa
1	2	520	1180	2105
2	2	540	1190	2278
3	2	560	1200	1986
4	3	520	1190	2983
5	3	540	1200	2762
6	3	560	1180	3105
7	4	520	1190	1562
8	4	540	1180	1783
9	4	560	1200	1503

Note: TT-tempering temperature, QT-quenching temperature

表4 M42 高速钢热处理正交实验分析结果

Table 4 Orthogonal experiment analysis of M42 samples

Factors	Times (A)	TT (B)/°C	QT (C)/°C
I _j /3	2123	2216.7	2331
II _j /3	2950	2274.3	2274.3
III _j /3	1616	2198	2083.7
R _j	1334	76.3	190.6

Note: TT-tempering temperature, QT-quenching temperature

其结果如表3所示。对表3的正交试验结果采用极差分析的方法得到表4的分析结果。从表3, 表4中可以看出, 最佳的热处理工艺: 淬火保温温度 1180 °C, 回火温度 540 °C; 回火 3 次, 每次 1 h。针对这一工艺的试样检测洛氏硬度为 67.2 HRC, 抗弯强度 3115 MPa。

3 结论

1) M42 喷射成形高速钢最佳的热处理工艺为: 淬火保温温度 1180 °C; 回火温度 540 °C; 回火 3 次, 每次 1 h。该工艺下, 高速钢洛氏硬度达到 67.2 HRC, 抗弯强度达到 3115 MPa。

2) 淬火温度是影响高速钢碳化物形成的重要因素。淬火过程中 M_6C 型碳化物溶解量差异决定热处理组织碳化物最终尺寸, 淬火温度升高可促进 M_6C 型碳化物的溶解, 当淬火温度在 1190 °C 左右, M_6C 型碳化物充分溶解, 随后二次碳化物在回火过程弥散析出, 形成碳化物较为均匀细小, 碳化物尺寸低于 7 μm。淬火温度升高, 碳化物 Mo 和 W 元素含量降低, 而 V 元

素含量增加。

3) 在相同的回火工艺下, 淬火温度在 1175~1190 °C 范围内, 随温度的升高热处理试样的硬度及抗弯强度逐渐提高。当淬火温度高于 1190 °C, 基体晶粒长大导致硬度及强度呈现下降趋势。

参考文献 References

- [1] Liu Yu(刘宇). *Special Steel*(特殊钢)[J], 1993, 14(3): 17
- [2] Dobrzanski L A, Varez A, Levenfeld B *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 157-158(1-2): 324
- [3] Pi Ziqiang(皮自强), Lu Xin(路新), Jia Chengchang(贾成厂) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2013, 31(5): 379
- [4] Sun Shiqing(孙世清). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 591
- [5] Zhu Shili(朱施利), Cao Huazhen(曹华珍), Hu Wenhao(胡文豪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1983
- [6] Singer A R E. *Materials Science & Engineering A*[J], 1991, 135(2): 13
- [7] Grant P S. *Progress in Materials Science*[J], 1995, 39(s4-5): 497
- [8] Hua Youlu(滑有录), Wang Hailong(王海龙). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 39(21): 192
- [9] Yan Fei, Xu Zhou, Shi Haisheng *et al. Materials Characterization*[J], 2008, 59(5): 592
- [10] Meyer O, Fritsching U, Bauchage K. *International Journal of Thermal Science*[J], 1991, 26(19): 5275
- [11] Yu Yipeng(于一鹏), Huang Jinfeng(黄进峰), Cui Hua(崔华) *et al. Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2012, 34(7): 793
- [12] Spangel S, Matthaei-Schulz E, Schulz A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2002, 326(1): 26
- [13] Mchugh K M, Lin Y, Zhou Y *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2008, 477(1): 50
- [14] Yan F, Shi H, Fan J *et al. Materials Characterization*[J], 2008, 59(7): 883
- [15] Wang H, Hou L, Zhang J *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 106: 245
- [16] Zhao Shunli(赵顺利), Fan Junfei(樊俊飞), Zhou Candong(周灿栋) *et al. Baosteel Technology*(宝钢技术)[J], 2013(3): 53
- [17] Ma Chao(马超), Zhao Shunli(赵顺利), Pei Junfei(樊俊飞) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(12): 156

Effect of Quenching Temperature on Transformation Mechanism of Carbides of M42

Liu Bowen¹, Lu Xin¹, Pi Ziqiang¹, Jia Chengchang¹, Zheng Wei², Wu Lizhi², Zhang Yifan¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Heye Special Steel Co., Ltd, Shijiazhuang 500350, China)

Abstract: With the precision forged M42 spray formed high speed steel as the raw material, the orthogonal experiment under different parameters was used to optimize the technique of heat treatment and the microstructure, hardness, flexural strength and the evolution law of carbides were analyzed in different heat treatment systems. Results show that the best preservation temperature for quenching is 1180 °C, and the temperature for temper is 540 °C which should be repeated 3 times and 1 h for each time. In this system, Rockwell hardness of M42 can reach to 67.2 HRC, while flexural strength can be up to 3115 MPa. During the process of heat treatment, M_6C carbide is largely affected by the change of quenching preservation temperature. When the quenching temperature is 1190 °C, M_6C carbide fully melts, and precipitates dispersedly after tempering.

Key words: spray forming; M42; heat treatment; carbide transformation

Corresponding author: Lu Xin, Ph. D., Associate Professor, Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-82377286, E-mail: luxin@ustb.edu.cn