

· 形变与相变 ·



热处理工艺对H13ESR大型模具钢锻圆组织性能的影响

李进^{1,2}, 周许^{1,2}, 苏超^{1,2}, 鄢磊^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘要: 为了满足H13ESR大规格高品质模具钢锻圆金相组织及冲击功等技术要求, 采用三种热处理工艺试制了 $\phi 600$ mm H13ESR锻制圆钢, 并对比了检验结果。采用锻后在线水冷、球化退火锻圆心部获得的金相组织评级为NADCA#229—2016标准AS9, 心部KV2横向冲击功为9.3 J; 采用锻后在线水冷、离线固溶(固溶温度为1 040~1 060 °C、水空交替淬火)、球化退火锻圆心部获得的金相组织为AS4, 心部KV2横向冲击功提高到18.3 J; 采用锻后风冷、相同离线固溶及球化退火锻圆心部获得的金相组织为AS4, 心部KV2横向冲击功提高到17.4 J。试验结果表明, 离线固溶热处理工艺(固溶温度为1 040~1 060 °C、水空交替淬火)、球化退火(温度为850~870 °C, 730~750 °C)锻圆心部获得金相组织为AS4, 心部KV2横向冲击功提高到17.4~18.3 J, 有效提高了H13ESR钢组织性能, 满足高品质H13ESR大型模具钢锻圆技术要求。

关键词: 锻后在线水冷; 离线固溶; 水空交替淬火; 球化退火; 网状碳化物; 金相组织

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00112 中图分类号: TG156

The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of H13ESR Large Mould Steel Forging Round Bar

Li Jin^{1,2}, Zhou Xu^{1,2}, Su Chao^{1,2}, Yan Lei^{1,2}

(1 Deya Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Hubei Provincial Key Laboratory of High-quality Special Steel, Huangshi 435001, China)

Abstract: In order to meet the technical requirements of H13ESR large sizes and high-quality mould steel forged round metallographic structure and impact energy, three heat treatment processes were used to trial-produce forged round bar with diameter of 600 mm H13ESR and the inspection results were compared. The experiments have shown that: online water cooling after forged and spheroidization annealing can obtain metallographic structure NADCA#229—2016 standard AS9 at the center, and the transverse impact energy of KV2 in the center is 9.3 J; The metallographic structure is AS4 at the center by forging online water cooling, then offline solid solution (solid solution temperature 1 040 °C-1 060 °C, water and air cooling alternating quenching) and spheroidization annealing, and the transverse impact energy of KV2 in the center is increased to 18.3 J; The metallographic structure is AS4 at the center by air cooling after forging, then same offline solid solution and spheroidization annealing, and the transverse impact energy of KV2 in the center is increased to 17.4 J. The experiments show that: offline solid solution heat treatment process (solid solution temperature 1 040 °C-1 060 °C, water and air cooling alternating quenching), and then spheroidization annealing (850 °C-870 °C, 730 °C-750 °C) can obtain metallographic structure with AS4 at the center and the transverse impact energy of KV2 in the center is increased to 17.4-18.3 J, effectively improving the microstructure and properties of H13ESR steel, meet the technical requirements of high-quality H13ESR large mold steel forging round bar.

Key Words: Online Water Cooling After Forged; Offline Solid Solution; Water and Air Cooling Alternating Quenching; Spheroidization Annealing; Liquid Precipitated Carbides; Metallographic Structure

H13ESR钢相当于国标GB/T 1299—2014的4Cr5MoSiV1, 是综合力学性能优秀的热作模具钢, 具有较高的热强性、韧性, 耐液态金属冲蚀性好, 不容易产生热疲劳裂纹, 广泛应用于各种热锻模、铝合金热挤压模、铝锌镁等有色金属的压铸模等^[1]。

随着应用市场的发展, H13ESR模具钢技术指标要求越来越高, 金属在模腔内流动产生剧烈摩

擦, 模具要承受较大的单位压力和较高的温度, 要有较高的韧性、高温强度和硬度, 避免热挤压模过早变形或开裂失效^[2-3], 同时模具锻圆直径也逐渐大型化, 随着模具钢锻圆尺寸增大, 增加了淬火开裂的风险, 生产制造难度也逐渐增加。

H13ESR钢对金相组织及冲击功都有较高的要求, 要求圆钢截面心部取1个金相试样, 500倍下检验

退火金相组织,按照《NADCA#229—2016北美压铸模具钢显微组织检验及金相组织评级图谱》标准评定,退火金相组织 AS1~AS9 为合格品,退火金相组织 AS10~AS18 为不合格品,技术协议要求退火金相组织要达到 AS1~AS5。H13ESR 要求圆钢截面心部取 5 个 KV2 横向冲击试样,试样毛坯经 1 040~1 060 °C 奥氏体化,保温 30 min,油淬,至少回火两次,确保最终硬度达到 44~46HRC,进行 10 mm×10 mm×55 mm 的 KV2 横向冲击试验,要求 KV2 横向冲击功≥13.5 J。

常用模具钢规格为 $\phi 150$ mm~ $\phi 400$ mm,常规的热处理工艺为锻后在线水冷,后续不进行离线固溶处理^[4-5],其金相组织能满足 AS1~AS9。当需求规格要求达到 $\phi 600$ mm 时,常规的锻后在线水冷热处理工艺无法满足客户技术协议要求(要求:心部金相组织达到 AS1~AS5,心部 KV2 横向冲击功≥13.5 J)。H13ESR 钢是中合金铬钼系热作模具钢,在热处理过程中容易出现大量沿晶碳化物,影响模具的组织冲击性能和使用寿命。找出 H13ESR 模具钢网状碳化物的有效控制措施,制定合理的 H13ESR 钢热处理工艺十分重要^[6]。其难点在于如何找到合适的热处理工艺方案及冷却方式,保证锻圆充分冷却且不开裂,从而获得优良的金相组织及冲击功。通过工艺试验研究,创新性采用离线固溶处理及水冷交替冷却工艺,对比了不同热处理工艺对 H13ESR 大规格锻圆组织性能的影响,为生产此类大规格高品质模具提供了技术支持。

1 试验材料及方法

试验材料为 H13ESR 锻制圆钢,规格为 $\phi 600$ mm,其化学成分见表 1,生产流程为:电炉(LF+VD)→

母材铸棒→退火→10 t 电渣重熔($\phi 880$ mm,长度 2 100 mm)→电渣锭红送→高温扩散加热→锻造成材 $\phi 600$ mm→三种热处理工艺试验。

对于大规格高品质 $\phi 600$ mm 锻圆,采用 10 t 电渣锭在 60MN 压机上三镦三拔锻造成材,为减少钢锭头尾缺陷在冷却过程中产生应力开裂风险,锻造成材前热切头尾缺陷。

对于 $\phi 150$ mm~ $\phi 400$ mm 小规格锻圆或要求不高的产品,部分生产厂家为了节约成本,锻造成材后利用锻造余热直接入水淬火冷却,然后进行球化退火处理。对于大规格或要求高的锻材,部分厂家则采用锻后退火,探伤锯切切除两端头缺陷后,对圆钢离线固溶处理,然后球化退火。

对于 $\phi 600$ mm 的 H13ESR 锻圆,其难度是尺寸大而冷却效果差,如果激烈水冷则容易开裂,此试验固溶处理时采用水空交替冷却,保证锻圆心部充分冷却又不至于淬火水冷开裂,为了试验不同热处理工艺对其金相组织及冲击功的影响,特设计三种热处理工艺,每种热处理工艺试验 2 支锻造圆钢,热处理工艺方案见表 2。

三种热处理工艺方案主要试验对比锻后冷却、离线固溶处理对 H13ESR 钢组织性能的影响,无论采用哪种热处理工艺方案,为了获得良好的金相组织及冲击功,H13ESR 钢锻圆最后一道工序都要进行球化退火处理,三种热处理工艺方案最后一道工序采用相同的球化退火工艺。H13ESR 钢的相变点约 $A_{c1s}=835$ °C, $A_{c1f}=895$ °C, $M_s=304$ °C。在 A_{c1} 点稍上($A_{c1}+30$ °C)进行球化退火,使碳化物呈细小均匀分布的球状颗粒弥散析出,因而,可快速地获得

表 1 H13ESR 试验钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of H13ESR test steel

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al
标准	0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	≤0.015	≤0.005	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	-
试验钢	0.39	1.00	0.38	≤0.012	≤0.003	5.10	1.35	0.95	0.020

表 2 H13ESR 模具钢 $\phi 600$ mm 锻圆三种热处理工艺

Table 2 Three kinds of heat treatment processes for H13ES mould steel $\phi 600$ mm forging round bar

工艺	热处理工艺路线	锻后冷却及要点	离线固溶工艺及要点	球化退火工艺
1	锻造成材-锻后在线水冷-球化退火-检验	锻后在线水冷,	否	
2	锻造成材-锻后在线水冷-球化退火-探伤切头-离线固溶-球化退火-检验	水冷 35 min+空冷 10 min+水冷 15 min	图 1(b)	图 1(a)
3	锻造成材-锻后风冷-球化退火-探伤切头-离线固溶-球化退火-检验	锻后风冷到 300~350 °C	水冷 35 min+空冷 3 min+水冷 20 min+空冷 3 min+水冷 10 min+空冷 3 min+水冷 5 min	

注:锻后在线水冷总时间比离线固溶水冷总时间缩短了 20 min,否则容易水冷开裂。

均匀化的球化金相组织。所以, H13ESR 钢在 850 °C+740 °C 球化退火处理, 以便获得球化金相组织^[7], 球化退火工艺如图 1(a) 所示。工艺 2 及工艺 3 增加了离线固溶处理如图 1(b) 所示, 离线固溶处理是在锻圆探伤精整后, 锯切切除锻圆缺陷, 最大限度实现激烈水冷让心部也获得马氏体原始组织, 进而在球化退火后获得更好的金相组织。

2 试验结果与讨论

2.1 热处理工艺方案 1

2 支电渣锭锻造成材, 热切锻圆头尾缺陷后执行锻后在线水冷(工艺见表 2), 然后进炉球化退火。在圆钢心部取样, 500 倍下检验退火组织, 按照《NADCA#229—2016 北美压铸模具钢显微组织检验及金相组织评级图谱》标准评定, 金相组织实际检测为 AS9, AS9 系球化退火后存在未封闭的晶界碳化物网, 晶粒略粗。金相组织如图 2(a)、(b) 所示。

圆钢截面心部取 5 个 KV2 横向冲击试样, 试样毛坯经 1 040 ~ 1 060 °C 奥氏体化, 保温 30 min, 油淬, 在 580 ~ 600 °C 回火两次。实测硬度为 44.1 ~ 44.7 HRC, 符合标准要求的 44 ~ 46 HRC。2 支锻圆心部 KV2 横向冲击功分别为 8、10.6 J, 平均值为 9.3 J, 不符合技术要求的 ≥ 13.5 J。检验数据见表 3(工艺 1)。

金相组织为 AS9(不合格), AS9 系球化退火后存在未封闭的晶界碳化物网, 晶粒略粗, KV₂ 横向冲击功不合格。

在相同的球化退火工艺下, 球化前原始组织的不同, 球化处理后的金相组织也不相同^[8]。工艺 1 检验结果不合格主要原因是锻后在线水冷效果不佳, H13ESR 钢温已在锻造成材过程中降低到 700 ~ 800 °C, 锻圆两端缺陷虽然已热切除, 但仍有尖锐毛刺及无法分辨的缺陷, 这种情况下为避免淬火开裂而不能激烈水冷, 故而心部获得了贝氏体组织, 球化退火后产生了网状碳化物, 金相组织不合格, 同

时导致 KV2 横向冲击功不合格。

H13ESR 钢锻后冷却速度低于临界速度后易发生珠光体或贝氏体转变, 并在晶界析出二次碳化物, 呈现出网状组织, 球化退火组织不良。当冷却速度提高到只发生马氏体转变时, 可以避免形成珠光体、贝氏体组织及网状碳化物^[5,9-10]。实施快速冷却可以有效且快速使得锻材避开临界温度区间, 最大限度避免形成网状碳化物, 以改善组织形貌。

H13ESR 钢含有较高含量的碳及合金元素, 钢锭在锻造加工后缓慢冷却过程中, 易在晶界析出网状碳化物, 影响钢材的冲击性能和最终模具的使用性能, 为获得均匀球化组织并提高冲击功, 需对 H13ESR 钢进行离线固溶+球化退火。

2.2 热处理工艺方案 2

热处理工艺 2 与工艺 1 的区别主要在于增加了离线固溶处理。资料表明: H13ESR 钢经 1 000、1 050、1 100 °C 固溶处理后, 显微组织由针状马氏体、少量隐晶马氏体、残留奥氏体及未溶碳化物组成。未溶碳化物主要是以 V 为主的 MC 型碳化物, 随着固溶温度的升高, 未溶碳化物数量逐渐减少, 1 100 °C 固溶处理后, 未溶碳化物基本溶解, 同时晶粒粗化^[11]。由于提高 H13ESR 钢固溶温度至 MC 相完全或基本完全固溶, 奥氏体晶粒失去了细小碳化物对晶界的钉扎作用, 将会发生晶粒粗化, 固溶温度超过 1 060 °C 有晶粒粗化的风险, 因此, H13ESR 钢选择 1 040 ~ 1 060 °C 的固溶温度比较合适^[12-16]。本试验离线固溶温度采用 1 040 ~ 1 060 °C, 既保证了一定的未溶碳化物数量, 又能实现奥氏体组织的均匀化, 进而提高横向冲击功。

H13ESR 模具钢的合金较高, 且产品规格大 ($\phi 600$ mm), 入水淬火冷却过于激烈容易出现淬火开裂, 为了获得良好的淬火组织并保证产品不开裂, 本工艺采用了水空交替冷却, 冷却要点见表 2。

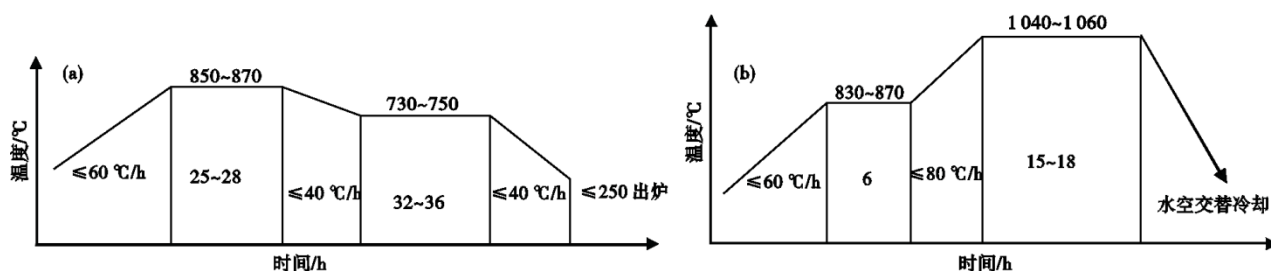


图 1 H13ESR 球化退火和离线固溶处理工艺: (a) 球化退火, (b) 离线固溶处理

Fig. 1 Spheroidization annealing and offline solid solution treatment of H13ESR : (a) spheroidization annealing treatment, (b) of-line solid solution treatment

在圆钢心部取样,金相组织实际检测为 AS4,碳化物分布较均匀,细化后的原始晶界有少量碳化物析出,金相组织合格。金相组织如图 2(c)、(d)所示。

2 支锻圆心部 KV2 横向冲击功分别为 17.6、19 J,平均值为 18.3 J,符合技术要求的 ≥ 13.5 J。检验数据见表 3(工艺 2)。

2.3 热处理工艺方案 3

热处理工艺 3 与工艺 2 的区别主要在于工艺 3 采用了锻后风冷。离线固溶工艺与工艺 2 相同(如图 2),球化退火与工艺 2 相同(如图 1 所示)。

在圆钢心部取样,金相组织实际检测为 AS4,球化退火后碳化物分布较均匀,细化后的原始晶界有少量碳化物析出,金相组织合格。金相组织如图 2

(e)、(f)所示。

2 支锻圆心部 KV2 横向冲击功分别为 17.6、17.2 J,平均值为 17.4 J,符合技术要求的 ≥ 13.5 J。检验数据见表 3(工艺 3)。

2.4 三种工艺试验结果汇总

工艺试验实施后,在每支圆钢心部取样,按照标准评定,三种热处理工艺获得的金相组织如图 2 所示。

每支圆钢截面心部取 5 个 KV2 横向冲击试样,试样毛坯经 1 040 ~ 1 060 °C 奥氏体化,保温 30 min,油淬,至少回火两次,确保最终硬度为 44 ~ 46HRC,进行 10 mm×10 mm×55 mm 的 KV2 横向冲击试验,三种热处理工艺方案检验数据汇总,见表 3。

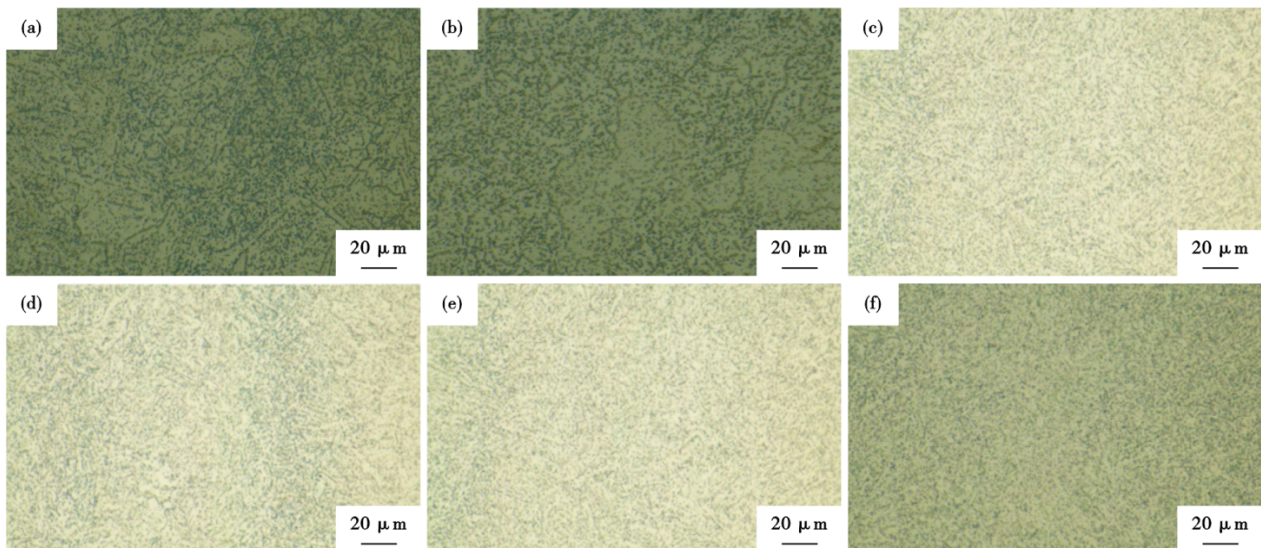


图 2 H13ESR 钢球化退火后的金相组织:(a)(b)是锻后在线水冷的球化退火金相组织 AS9;(c)(d)是锻后在线水冷+离线固溶的球化退火金相组织 AS4;(e)(f)是锻后风冷+离线固溶的球化退火金相组织 AS4

Fig. 2 Metallographic structure of H13ESR steel after spheroidizing annealing: (a)、(b)online water cooling after forging obtain AS9, (c)、(d)online water cooling after forging+offline solid solution obtain AS4, (e)、(f)post forging air cooling+offline solid solution obtain AS4

表 3 H13ESR 钢三种热处理工艺的检验数据

Table 3 Inspection data of three heat treatment processes for H13ESR steel

工艺	产品 编号	KV2 冲击吸收功/J						硬度(HRC)					金相组织	
		1#	2#	3#	4#	5#	平均值	1#	2#	3#	4#	5#		平均值
1	1#锻圆	8	8	8	9	7	8	44.5	44.5	45	45	44.5	44.7	AS9
	2#锻圆	14	14	8	8	9	10.6	44.2	44.3	44.1	44	44	44.1	AS8
	平均值	9.3(不合格)						44.4					AS9	
2	3#锻圆	15	15	20	20	18	17.6	45.0	45.5	45.0	45.0	45.5	45.2	AS4
	4#锻圆	16	19	20	21	19	19	44.5	44.0	44.2	44.3	44.1	44.2	AS4
	平均值	18.3(合格)						44.7					AS4	
3	5#锻圆	19	21	15	15	18	17.6	44.3	44.1	44.2	44.5	44.6	44.4	AS4
	6#锻圆	18	18	17	17	16	17.2	44.6	44.7	44.6	44.5	44.4	44.6	AS4
	平均值	17.4(合格)						44.5					AS4	
标准要求		≥ 13.5						44.0 ~ 46.0					AS1-AS5	

2.5 分析与讨论

从以上三种热处理工艺方案及其检验数据可以看出:对于 $\phi 600$ mm的H13ESR钢锻圆,工艺1(锻后在线水冷)无法满足技术要求;工艺2(锻后在线水冷后离线固溶)可以满足技术要求,金相组织提升到AS4,心部KV2横向冲击功提高到18.3 J;工艺3(锻后风冷后离线固溶)可以满足技术要求,且工艺3与工艺2的检验结果相近。

工艺1检验结果不合格主要原因是H13ESR钢温已在锻造成材过程中缓慢降低到 $700 \sim 800$ °C,影响冷却效果,而在锻后在线水冷时因热切两端后仍有缺陷及毛刺,为避免水冷开裂而不能激烈水冷,当锻后冷却速度低于临界速度,易发生珠光体或贝氏体转变,并在晶界析出二次碳化物,呈现出网状组织,球化退火组织不良。

热处理工艺2与工艺1的区别主要在于工艺2增加了离线固溶处理,离线固溶处理前锯除锻圆缺陷及端面毛刺,减少了激烈水冷开裂风险,水空交替冷却的水冷总时间比工艺1水冷总时间延长了20 min,最大限度实现激烈水冷让心部也获得马氏体原始组织,最大限度避免形成网状碳化物,进而在球化退火后获得更好的金相组织及冲击功。

热处理工艺3与工艺2的区别主要在于工艺3

采用了锻后风冷,虽然锻后水冷的冷却速度比锻后风冷快,获得原始组织优于锻后风冷组织,但在后续相同工艺离线固溶处理时重新奥氏体化,在相同水空交替冷却及球化退火后,其最终的金相组织及冲击功接近。

3 结论

(1) $\phi 600$ mm的H13ESR钢锻圆,锻后钢温较低,两端存在毛刺和缺陷,锻后在线水冷不能太激烈,存在网状碳化物析出,心部金相组织为AS9,心部KV2横向冲击功为9.3 J,不满足高品质技术要求。但对于低质量要求或小规格锻材,可采用此种锻后在线水冷工艺,以节约生产成本。

(2)离线固溶处理时冷却条件好, $\phi 600$ mm的H13ESR锻圆采用水空交替淬火,保证充分冷却且避免了淬火开裂,能激烈冷却获得马氏体组织,球化退火后碳化物分布较均匀,心部金相组织达到AS4,心部KV2横向冲击功达到18.3 J,组织性能有效提高,满足大规格高品质锻圆质量要求。

(3)H13ESR钢采用离线固溶方案时,中间工序的锻后冷却对最终产品质量影响不大,采用锻后在线水冷或锻后风冷,离线固溶球化退火后其金相组织及冲击功检验结果几乎相同。

参考文献

- [1] 谢奕心,程晓农,鞠玉琳,等. H13及H13改进型热作模具钢热处理过程中碳化物析出演化行为研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 173-180.
- [2] 吴晓春,左鹏鹏. 国内外热作模具钢发展现状与趋势[J]. 模具工业, 2013, 39(10): 1-9.
- [3] 王鹏,张杰江,胡亚民. H13钢的应用现状[T]. 模具制造. 2007, 12: 1-7.
- [4] 孙盛宇,付博,赵腾飞,等. 改善H13系列热作模具扁钢退火组织的工艺研究[T]. 模具制造. 2021, 1: 76-79.
- [5] 马野,周健,孙秀华,等. 铝挤压模具钢H13锻造大规格圆钢组织和性能研究. 模具制造, 2020, 10: 79-81.
- [6] 叶喜葱,刘绍友,陈实华,等. H13热作模具钢锻后热处理工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(12): 72-74.
- [7] 李娜,白政民,葛新峰. 锻造及热处理对4Cr5MoSiV1模具钢组织与性能的影响. 热加工工艺. 2022, 51(15): 87-89.
- [8] 周健,马党参,刘宝石,等. H13钢球化退火过程中碳化物颗粒的控制[T]. 机械工程材料. 2011, 35(1): 64-67.
- [9] 麻梦梅,雷大俊. H13钢热处理工艺及研究现状[J]. 热处理技术与装备. 2023(2): 13-16.
- [10] 门志刚. 提高热作模具钢H13退火组织均匀性的措施[T]. 河北冶金. 总第333期. 2023, (9): 63-66.
- [11] 孙立国,周健,马党参. 锻后固溶处理对H13钢退火组织和冲击性能的影响[T]. 金属热处理. 2021, 46(2): 130-135.
- [12] 祝志超,张心金,李晓,等. 超大规格高品质H13模具钢组织均匀性分析[T]. 模具制造. 2022, 10: 80-84.
- [13] Zhou W J, Zhu J, Zhang Z H. Austenite grain growth behaviors of La-microalloyed H13 steel and its effect on mechanical properties [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(9): 4662-4673.
- [14] 张心金,祝志超,李晓,等. 大截面高品质热作模具钢H13关键制备工艺探究[T]. 模具制造. 2022, 3: 79-84.
- [15] 侯少林,于腾,宋彬,等. 固溶-时效处理对GH2696合金的组织及硬度的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 77-79.
- [16] 侯美伶,李晨潇,孔祥伟,等. 热处理工艺对Fe-Mn-Al-C钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 96-100.