

· 产品研发 ·



新能源汽车一体化压铸用模具钢 GY-DCK20 组织及性能

邱英南^{1,2,3}, 付博⁴, 刘亚鹏³, 迟宏宵¹, 周健¹, 谷金波¹, 马党参¹

(1 钢铁研究总院有限公司先进特殊钢全国重点实验室, 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; 3 江苏申源集团有限公司, 泰州 225722; 4 东北特殊钢集团股份有限公司, 大连 116000)

摘要:在新能源汽车一体化压铸成型技术背景下, 开发并生产了一种特大型高均匀、高韧性、高等向压铸模具钢 GY-DCK20, 结合金相分析、SEM 分析、ASPEX 夹杂物分析等表征方法, 开展了不同位置取样组织均匀性及室温力学性能研究, 结果表明, 采用 {电弧炉 (EAF)+氩氧精炼炉 (AOD)}→真空精炼 (RH)→连铸→保护气氛电渣重熔 (PESR) 的高纯净冶炼工艺, 可有效控制有害元素及气体含量, 尺寸为 2~5 μm 的细小夹杂物占比可达到 73.4% 以上, 夹杂物类型主要为氧化物。不同位置取样未见明显带状偏析, 球化组织良好, 碳化物细小且弥散分布。1 030 $^{\circ}\text{C}$ 对比 1 010 $^{\circ}\text{C}$ 淬火后的热处理硬度高出 1HRC 左右, 且具备更好的冲击性能。回火阶段二次硬化峰在 540 $^{\circ}\text{C}$ 附近, 主要因为细小颗粒状合金碳化物析出; 650 $^{\circ}\text{C}$ 回火马氏体开始发生回复和再结晶, 形成等轴状铁素体晶粒; 700 $^{\circ}\text{C}$ 回火马氏体板条结构消失, 碳化物沿晶聚集, 再结晶晶粒严重粗化。GY-DCK20 钢在 44~46HRC 的使用硬度下, 不同位置横、纵 V 型缺口冲击吸收功均在 35 J 以上, 心部等向性可达 0.97, 具备优异的综合力学性能。

关键词:压铸模具钢; 非金属夹杂物; 组织均匀性; 热处理; 室温冲击性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260095 中图分类号: TG156

Microstructure and Properties of Die Steel GY-DCK20 for Integrated Die Casting of New Energy Vehicles

Di Yingnan^{1,2,3}, Fu Bo⁴, Liu Yapeng³, Chi Hongxiao¹, Zhou Jian¹, Gu Jinbo¹, Ma Dangshen¹

(1 State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;
2 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China; 3 Jiangsu Shenyuan Group Co., LTD., Taizhou 225722, China;
4 Dongbei Special Steel Group Co., LTD., Dalian 116000, China)

Abstract : In the context of integrated die-casting forming technology for new energy vehicles, a new type of extra-large, highly uniform, high-toughness, and high-isotropy die-casting mold steel GY-DCK20 was developed and produced. The microstructural uniformity of samples taken from different locations and their room-temperature mechanical properties were investigated by characterization methods such as metallographic analysis, SEM analysis, and ASPEX inclusion analysis. The results indicate that the high-cleanliness smelting process (EAF + AOD) → RH → Continuous Casting → PESR effectively controls the content of harmful and gaseous elements. Fine inclusions measuring 2-5 μm account for over 73.4% of the total, with oxides being the primary type. No significant banding segregation was observed in samples taken from different locations; the spheroidized microstructure was well-developed, and carbides were fine and uniformly distributed. The heat-treated hardness after quenching at 1 030 $^{\circ}\text{C}$ was approximately 1HRC higher than that at 1 010 $^{\circ}\text{C}$, and the steel exhibited better impact performance. During the tempering stage, the secondary hardening peak occurred near 540 $^{\circ}\text{C}$, primarily due to the precipitation of fine, granular alloy carbides; at 650 $^{\circ}\text{C}$, martensite began to undergo recovery and recrystallization, forming equiaxed ferrite grains; at 700 $^{\circ}\text{C}$, the lath structure of the martensite disappeared, carbides aggregated along the grain boundaries, and recrystallized grains coarsened significantly. At a service hardness of 44-46HRC, the test steel exhibits a transverse and longitudinal V-notch impact absorbed energy of over 35 J at various locations, with an isotropy ratio of up to 0.97 in the core, demonstrating excellent comprehensive mechanical properties.

Key Words : Die-casting Die Steel; Non-metallic Inclusions; Microstructural Uniformity; Heat Treatment; Room-temperature Impact Properties

新能源汽车是我国解决交通能源与环境问题的重大战略性新兴产业, 实现“双碳”目标的重要措

施。新能源汽车零部件一体化压铸成型工艺, 推动了车身结构轻量化和制造工艺的革新, 正引领汽车

基金项目: 重点新材料研发及应用国家科技重大专项 (2025ZD0611100)

作者简介: 邱英南 (1996—), 男, 博士, 工程师; E-mail: diyingnan0615@163.com; 收稿日期: 2026-06-23

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

产业新一轮的生产制造革命^[1]。一体化压铸技术的创新性变革给我国压铸模具钢材料提出了新的挑战与机遇,主要技术挑战体现在超大规格、高等向性、长寿命。特大型压铸模具钢是一体化压铸的四大技术壁垒之一,近年来我国已在新型免热处理铝合金材料、特大型压铸机、压铸工艺三方面均取得快速发展,而一体化压铸用特大型模具钢与进口材料仍然存在差距,目前只能高度依赖进口,成为我国一体化成型产业链最薄弱环节^[2]。

厚度超过 500 mm 的特大型压铸模具钢存在严重的尺寸效应,主要体现在:其一,铸锭凝固过程中的宏观偏析显著,心部区域易产生疏松与缩孔缺陷,连铸坯因压缩比不足导致中心偏析与疏松难以消除。其二,大模块锻造阶段存在锻透性不足问题,钢锭心部变形量远小于表面,铸造缺陷难以有效压实,同时变形量不均导致材料各向异性显著,力学性能等向性控制难度极大。其三,特大截面压铸模具钢存在显著的淬透性问题,心部热处理冷却速度过低,容易形成贝氏体等非马氏体组织,严重影响材料冲击韧性。以上技术难点是新能源汽车一体化压铸特大型模具钢生产制造的瓶颈问题。

针对我国快速发展的新能源汽车一体化压铸成型模具对特大型压铸模具钢的迫切需求,本研究提出并生产了一种新型高均匀、高韧性、高等向 680 mm 厚压铸模具钢 GY-DCK20,系统性开展了退火组织均匀性、非金属夹杂物定量表征、热处理过程微观组织演变、室温力学性能研究。研究成果可为国产特大型压铸模具钢的开发提供理论基础和技术支撑。

1 实验材料与方法

GY-DCK20 钢冶炼工艺为(EAF+AOD)→RH→连铸→PESR,经过高温均质化、多向锻造、超细化处理等生产工艺制造成材,成品模块截面尺寸 1 000 mm×680 mm, GY-DCK20 钢化学成分见表 1。分别在试验料边部、1/4 对角线处、心部位置取金相试样,尺寸为 16 mm×14 mm×10 mm;在试验料 1/4 对角线处取用于回火硬度曲线试验的金相试样,尺寸为 12 mm×10 mm×8 mm,以及用于室温冲击韧性曲线试验的横向夏比 V 型缺口冲击试样,尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。取样位置在图 1 中有所标注。热处理试验在箱式马弗炉中进行,奥氏体化温度为 1 010、1 030 ℃,保温 30 min 后油冷至室温,回火工艺为 350、400、450、500、520、540、560、

580、600、610、620、630、650、700 ℃保温 2 h,空冷,回火两次。

表 1 GY-DCK20 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of GY-DCK20 steel %

取样位置	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
心部	0.34	0.61	0.33	5.47	1.39	0.71	Bal.
1/4 对角线	0.35	0.62	0.33	5.50	1.40	0.72	Bal.
边部	0.32	0.62	0.29	5.45	1.37	0.71	Bal.

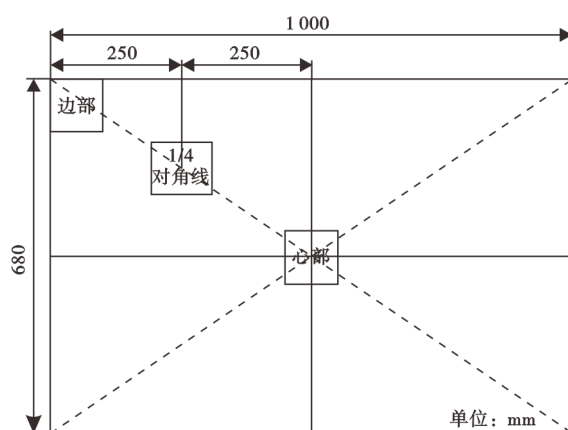


图 1 取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram

采用 FEI ASPEX EXPLORER 型全自动一体化夹杂物分析检测仪对 GY-DCK20 钢中非金属夹杂物进行定量表征;金相试样用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀 10 s,采用配置能谱仪(EDS)的 FEI Quanta 650 型热场发射扫描电镜对试样微观组织以及断口显微形貌进行观察分析,采用 Olympus GX53 光学显微镜采集热处理前后试样的金相组织照片;根据北美压铸协会 NADCA 207#—2022 标准对 GY-DCK20 钢带状偏析及球化组织进行评级;根据 GB/T 10561—2023 标准对 GY-DCK20 钢表面非金属夹杂物进行评级;室温冲击试验在 JBN-300B 型冲击试验机上进行,执行标准为 GB/T 229—2020,测量 3 支平行试样的冲击吸收功取平均值;室温拉伸试验在 WDT-10 型拉伸试验机上进行,执行标准为 GB/T 228.1—2021,记录抗拉强度 R_m ,屈服强度 $R_{p0.2}$,测量 3 支试样结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 洁净度

炼钢过程中钢水易与炉渣、气氛等相互作用形成非金属夹杂物,非金属夹杂物会破坏钢基体的连续性,增加钢组织的不均匀性,进而影响钢铁材料

的塑性、韧性、抗疲劳强度等性能^[3]。GY-DCK20 钢采用(EAF+AOD)→RH→连铸→PESR 冶炼工艺,有效地控制了有害元素硫、磷以及气体元素氢、氧、氮的含量,具体见表 2。表 3 为根据 GB/T 10561—2023 标准对纵向试样非金属夹杂物评级,结合图 2 非金属夹杂物金相图片,心部、1/4 对角线、边部评级结果均为 D 类细系 0.5 级,说明 GY-DCK20 钢中非金属夹杂物主要为 D 类氧化物且细小弥散,钢材的洁净度较高。

表 2 GY-DCK20 钢有害元素含量(质量分数)

Table 2 Contents of harmful elements in GY-DCK20 steel

取样位置	%				
	S	P	H	O	N
心部	0.000 4	0.008 3	0.000 06	0.000 9	0.011
1/4 对角线	0.000 6	0.007 3	0.000 10	0.001 1	0.012
边部	0.000 6	0.007 8	0.000 09	0.001 0	0.012

表 3 GY-DCK20 钢非金属夹杂物评级(GB/T 10561—2023)

Table 3 Ratings of non-metallic inclusions in GY-DCK20 steel (GB/T 10561—2023)

取样位置	A 类		B 类		C 类		D 类		DS 类
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	
心部	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
1/4 对角线	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
边部	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0

2. 2 ASPEX 非金属夹杂物分析

研究表明,压铸模具钢中非金属夹杂物与基体

界面间存在微孔或结合缺陷,极易引发塑性裂纹的萌生进而导致模具早期失效,例如球状 Al_2O_3 夹杂物熔点很高,并且与基体热膨胀系数差异较大,在服役过程中熔融金属液冲刷作用下容易引发应力集中^[3]。此外,棱角分明的杂物(如长条状 MnS)在尖角附近局部塑性变形程度更为明显,加速位错堆积促进微裂纹的形成。采用 ASPEX 自动夹杂物分析仪对 GY-DCK20 钢心部、1/4 对角线、边部位置试样的非金属夹杂物进行测定表征,扫描面积为 50 mm^2 ,结果如图 3 所示。从夹杂物种类统计图可以发现,GY-DCK20 钢不同位置主要存在氧化物夹杂(Al-Oxide 、 Ca-Oxide)、硫化物夹杂(CaS 、 MnS)以及多元素复合型夹杂物,其中铝的氧化物夹杂占比最高,在心部、1/4 对角线、边部占比分别为 35.88%、49.64%、26.62%。对非金属夹杂物尺寸和数量进行定量化统计,结果见表 4。在相同扫描面积(50 mm^2)下,心部、1/4 对角线、边部位置夹杂物总量分别为 346 个、290 个、302 个,尺寸在 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的细小夹杂物占比分别为 86.9%、73.4%、94.4%,可见模块截面各位置夹杂物含量相当,且 $15\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的大尺寸夹杂物数量极少,与 GB/T 10561—2023 非金属夹杂物评级结果对应程度较高。

2. 3 退火组织均匀性

偏析作为钢材中常见的组织缺陷很难通过热处理方法加以消除,在大模块模具钢中主要存在形式为横向网状偏析以及纵向条带状偏析,会使得碳以及合金元素在晶界处富集,导致晶界处硬度提

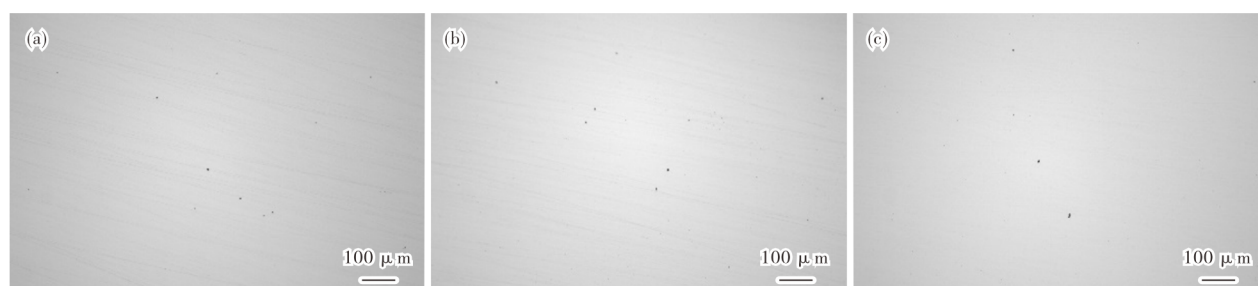


图 2 GY-DCK20 钢非金属夹杂物金相:(a)心部,(b)1/4 对角线,(c)边部

Fig. 2 Optical micrographs of non-metallic inclusions in GY-DCK20 steel: (a) center, (b) 1/4 diagonal, (c) edge

表 4 非金属夹杂物定量化(扫描面积 50 mm^2)统计

Table 4 Quantitative statistics of non-metallic inclusions (scanning area 50 mm^2)

取样位置	$2\text{ }\mu\text{m}\leq x < 5\text{ }\mu\text{m}$		$5\text{ }\mu\text{m}\leq x < 10\text{ }\mu\text{m}$		$10\text{ }\mu\text{m}\leq x < 15\text{ }\mu\text{m}$		$15\text{ }\mu\text{m}\leq x < 20\text{ }\mu\text{m}$		Total
	个数/个	占比/%	个数/个	占比/%	个数/个	占比/%	个数/个	占比/%	个数/个
心部	301	86.9	38	10.9	6	1.7	1	0.3	346
1/4 对角线	213	73.4	65	22.4	9	3.1	3	1.0	290
边部	285	94.4	14	4.6	2	0.7	1	0.3	302

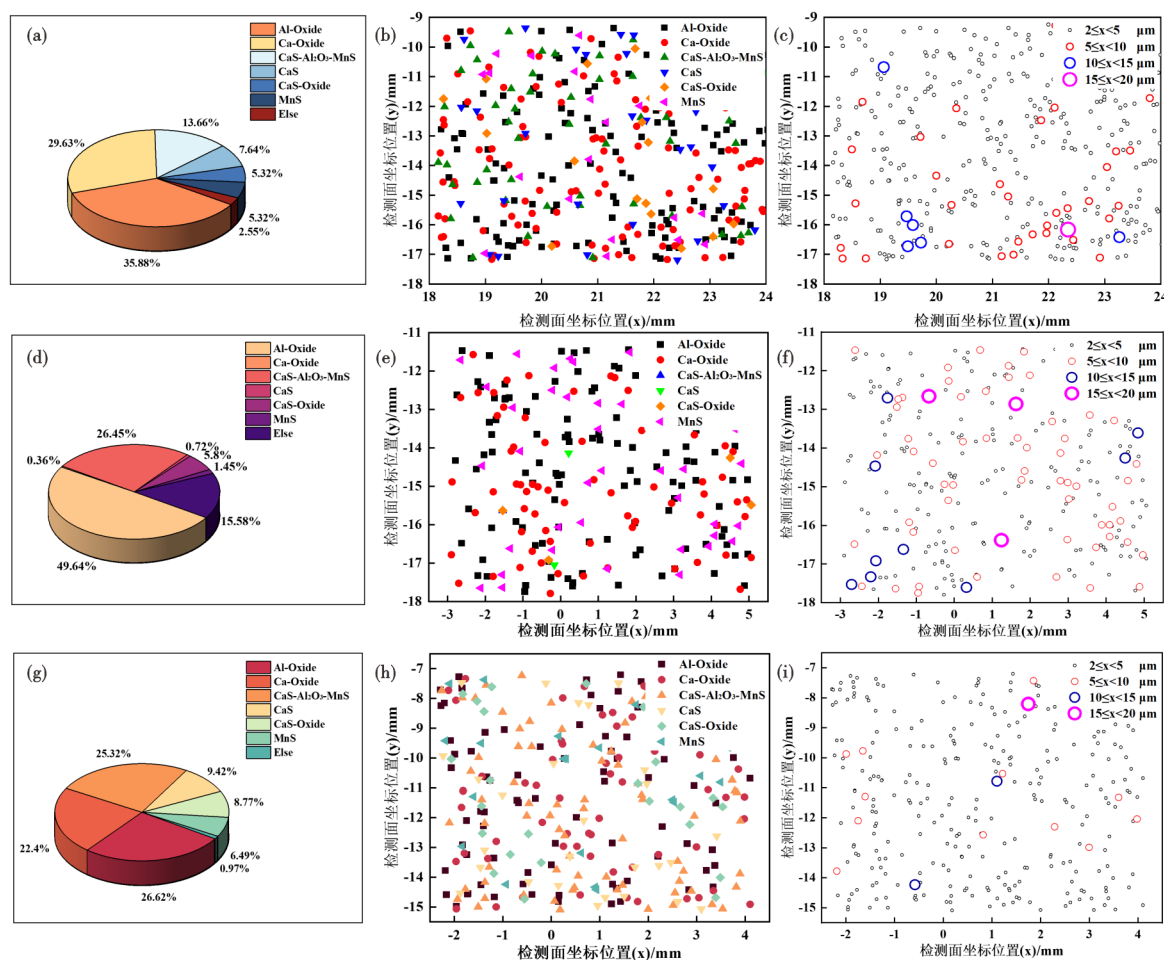


图3 不同位置取样非金属夹杂物特征:夹杂物种类占比:(a)心部,(d)1/4对角线,(g)边部;夹杂物种类分布:(b)心部,(e)1/4对角线,(h)边部;夹杂物尺寸分布:(c)心部,(f)1/4对角线,(i)边部

Fig. 3 Characteristics of non-metallic inclusions sampled at different locations: Inclusion type proportions: (a) center, (d) 1/4 diagonal, (g) edge; Inclusion type distribution: (b) center, (e) 1/4 diagonal, (h) edge; Inclusion size distribution: (c) center, (f) 1/4 diagonal, (i) edge

高,从而降低钢材的强度和韧性,此外晶界处脆性增加容易产生裂纹而严重降低钢材的使用寿命^[4]。图4给出了GY-DCK20钢不同位置取样在光学显微镜50倍下的横纵向金相组织,可以看出GY-DCK20钢网状偏析不明显,横向心部、1/4对角线处可见轻微网状偏析,纵向几乎观察不到偏析存在。同方向组织均匀性呈现为边部>1/4对角线>心部的规律,这是由于大型模块的尺寸效应,在高温均质化处理过程中钢锭心部温度较低,相较于边部元素扩散均匀性较低,容易产生偏析及非金属夹杂物,致使心部组织较差,力学性能较低。图5给出了不同位置在光学显微镜1000倍下的横纵向金相组织,GY-DCK20钢球化组织良好,碳化物细小且分布均匀,无链状碳化物,不同位置横、纵向组织无明显差异。表5根据北美压铸协会NADCA 207#—2022对

带状偏析及退火组织进行评级,结果表明,通过三向锻造的GY-DCK20钢组织均匀性较高。

2.4 回火硬度曲线及室温冲击韧性曲线

图6给出了GY-DCK20钢不同淬火温度下回火硬度及室温冲击韧性曲线,350~540℃回火后硬度稳定在52HRC左右,在540℃附近产生二次硬化,此时回火硬度达到峰值52.7HRC,室温V口冲击吸收功降至最低12.8J,此后随着回火温度升高,GY-DCK20钢的回火硬度陡然下降,室温冲击韧性陡然上升。在相同回火温度下,1030℃淬火后回火硬度相较于1010℃淬火高出1HRC左右,这是因为淬火温度提高,更多的碳化物固溶于奥氏体中,增加了奥氏体的稳定性以及马氏体中的含碳量,因此回火后硬度较高^[5];此外,相同回火温度下,1030℃淬火后室温冲击韧性较1010℃淬火高,在

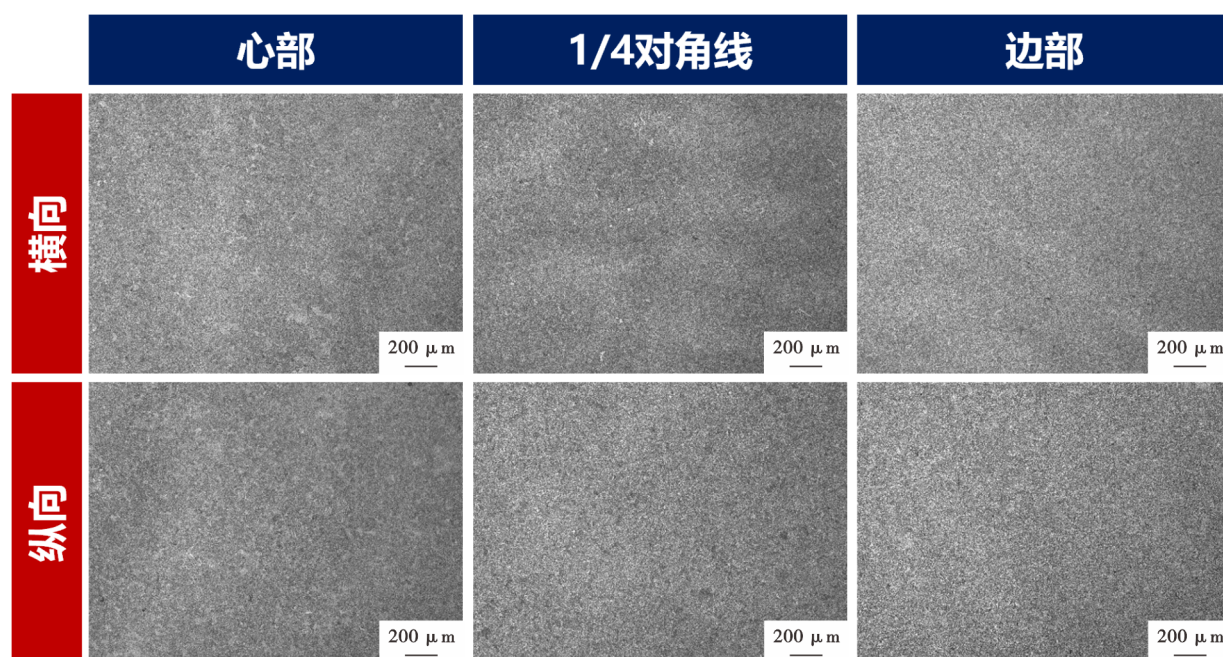


图 4 GY-DCK20 钢不同位置横纵向网带偏析特征

Fig. 4 Characteristics of banded transverse and longitudinal segregation at different positions of GY-DCK20 steel

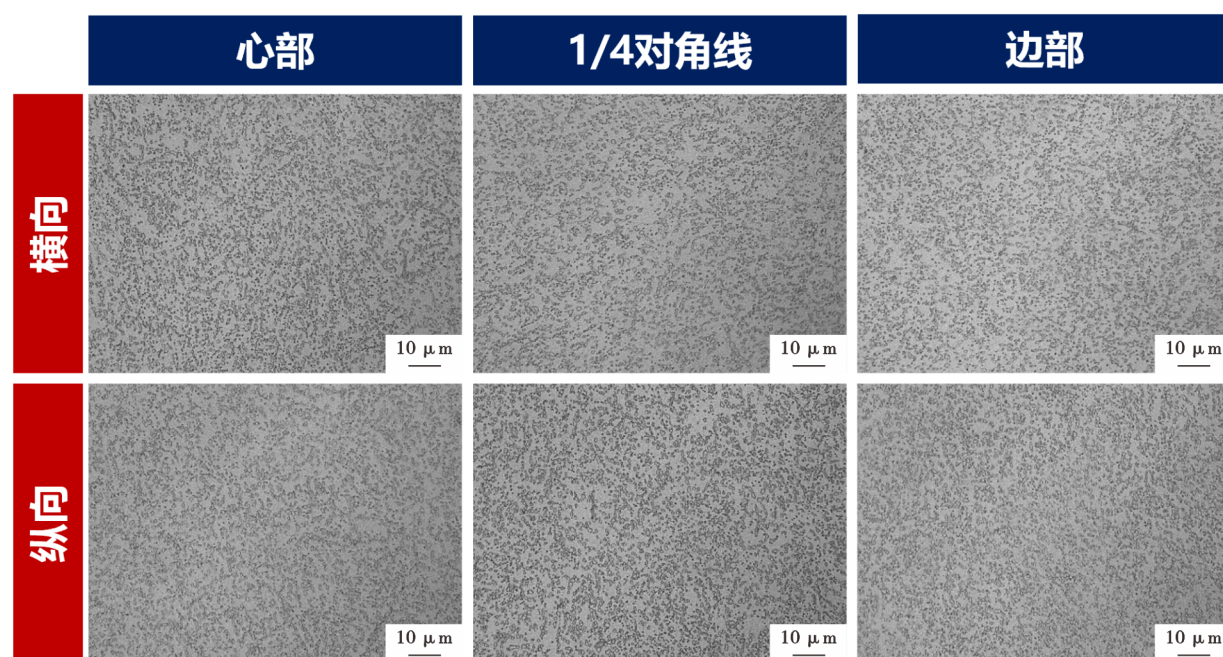


图 5 GY-DCK20 钢不同位置横纵向球化组织特征

Fig. 5 Characteristics of transverse and longitudinal spheroidized microstructures at different positions of GY-DCK20 steel

表 5 GY-DCK20 钢带状偏析及球化组织评级 (NADCA 207#—2022)

Table 5 Ratings of banded segregation and spheroidized structures of GY-DCK20 steel (NADCA 207#—2022)

取样位置	带状偏析级别	退火组织级别
心部	可接受	AS3
1/4 对角线	可接受	AS2
边部	可接受	AS2

610、620、630 °C 回火下 1030 °C 淬火后冲击韧性较 1 010 °C 淬火分别高 32.9%、66.6%、51.9%，其原因为 在 A_{c3} 点下适当的提高淬火温度，热作模具钢中残留奥氏体含量升高，残留奥氏体以薄片形态出现在板条马氏体边界上，能够阻止裂纹扩展作用，有利于改善钢的韧性^[6-7]，此时固溶强化作用较强，且

热作模具钢中残留奥氏体含量较低,因此, GY-DCK20 钢在保持较高的硬度的同时获得良好的韧性;另一种原因可能为较高温度淬火时固溶进更多的碳,回火过程中析出更多的纳米级碳化物,细小的碳化物对晶界产生钉扎作用,阻止裂纹的扩展,因此,韧性得到了提升^[8]。

压铸模具钢在淬火后回火过程中,显微组织将依次经历碳原子扩散、淬火马氏体和残余奥氏体分解、碳化物转变、合金碳化物析出和长大、马氏体回复和再结晶等阶段^[9-10]。图 7 为 GY-DCK20 钢 1 030 °C 淬火不同温度回火后金相及 SEM 组织形貌,可以观察到回火组织为典型的回火马氏体、淬火未溶碳化物以及大量的析出碳化物,450~500 °C

回火后析出碳化物类型主要为 M_3C , 呈现为细密针状或长条状。当回火温度升高至 500~540 °C 时,长条状 M_3C 开始向弥散的颗粒状合金碳化物发生转变,且回火马氏体存在较为明显的表面浮凸,540 °C 回火后碳化物的析出数量达到顶峰,进而引发二次硬化效应,如图 7(f) 所示;当回火温度继续升高至 540~650 °C,先前析出的细小合金碳化物(主要为富 Cr 的 $M_{23}C_6$)逐渐聚集长大,且在此温度范围内,随着回火温度的升高,碳化物沿晶粗化现象逐渐显著,650 °C 回火后马氏体发生回复和再结晶,微观组织为保留的部分马氏体板条形貌以及再结晶形成的等轴状铁素体晶粒,位错密度大幅度降低;当回火温度达到 700 °C 时,析出碳化物粗化程度严重,聚集

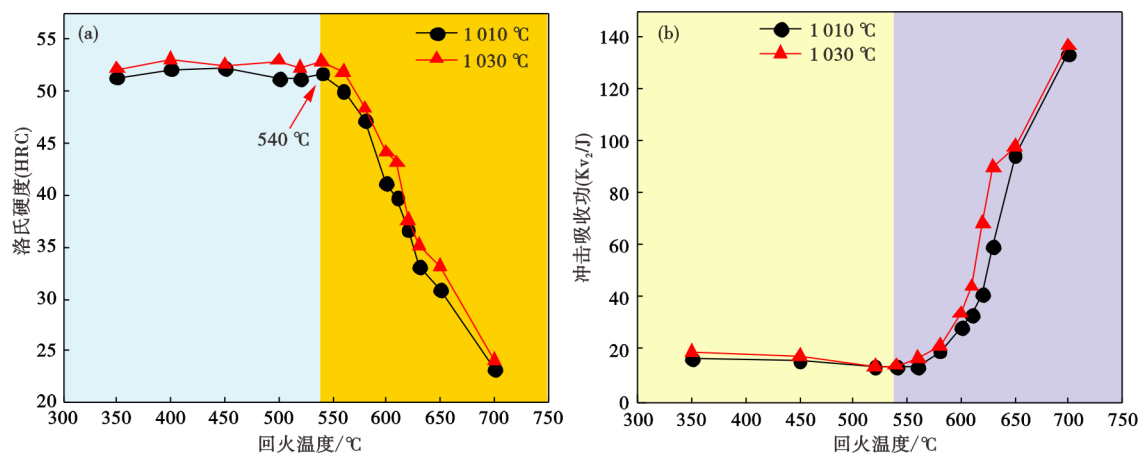


图 6 GY-DCK20 钢回火硬度及室温冲击韧性曲线:(a) 回火硬度曲线,(b) 室温冲击韧性曲线

Fig. 6 Tempering hardness and room temperature impact toughness curves of GY-DCK20 steel: (a) tempering hardness curve, (b) room-temperature impact toughness curve

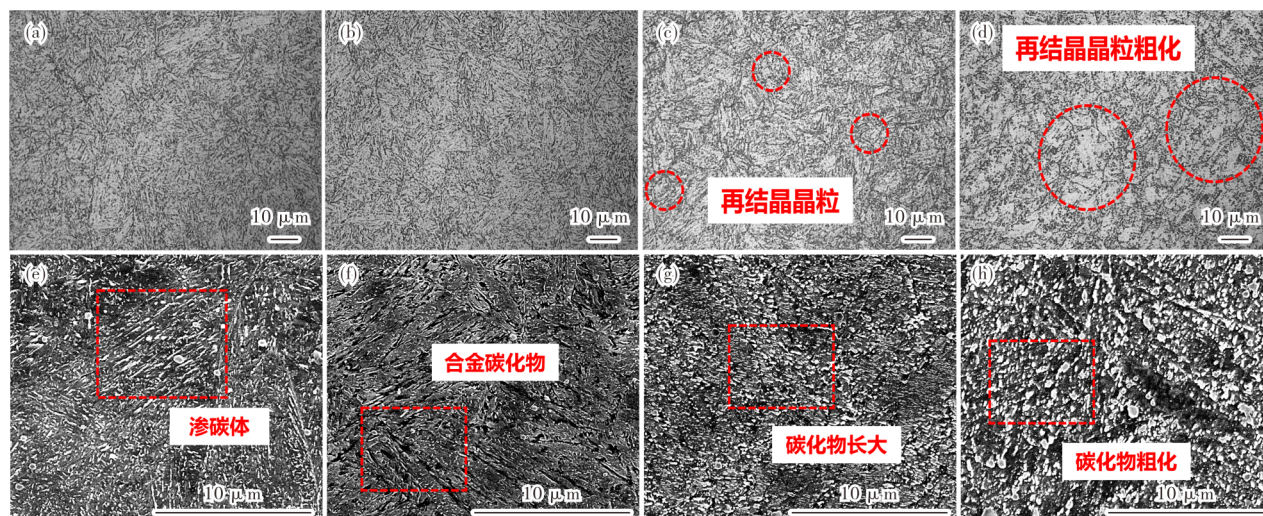


图 7 1 030 °C 淬火不同回火温度显微组织:(a, e) 450 °C, (b, f) 540 °C, (c, g) 650 °C, (d, h) 700 °C

Fig. 7 Microstructures of test steel quenched at 1 030 °C and tempered at different temperatures: (a, e) 450 °C, (b, f) 540 °C, (c, g) 650 °C, (d, h) 700 °C

于晶界附近呈现链条状,马氏体板条结构基本消失,再结晶晶粒显著粗化^[11-12]。

采用 SEM 对 1030 °C 淬火不同温度回火后冲击试样断口形貌进行观察,如图 8 所示。350~600 °C 回火后冲击断口具备典型的准解理断裂形貌特征,存在大量高密度且弯曲的撕裂棱线条、由断面中部向四周放射的河流花样以及尺寸不一的韧窝。准解理断裂是介于解理断裂和韧窝断裂之间的过渡断裂方式,马氏体钢中主要沿着(001)晶面发生扩展^[13-14]。随着回火温度升高冲击吸收能量逐渐增大,微观断口形貌表现为撕裂棱的密度以及韧窝数量逐渐上升。600~650 °C 回火过程呈现由准解理断裂向韧性断裂过渡的趋势,650 °C 回火断口形貌具有韧窝断裂的特点,由大量蜿蜒的撕裂棱和尺寸较大且分布均匀的韧窝组成,部分韧窝底部为第二相质点。

2.5 使用硬度条件下室温力学性能

压铸模具钢的服役要求为回火后具备较好的强韧性匹配,进而获得优异的综合力学性能^[15],采用 1 030 °C 淬火后 600~610 °C 回火可使 GY-DCK20 钢达到使用硬度 44~46HRC(GB/T 34565.1-2017)范围内,并开展室温力学性能测试,试验结果如图 9 所

示。可见不同位置取样室温 V 型缺口冲击吸收功均在 35 J 以上,边部位置横/纵向可达到 37.4/38.3 J,等向性公式如式(1)。

$$\Delta = \frac{H(A_k)}{ZV(A_k)} \quad (1)$$

式中,H 代表横向冲击吸收功,J;Z 代表纵向冲击吸收功,J。

根据公式(1)得到心部、1/4 对角线、边部等向性分别为 0.97、0.93、0.97。GY-DCK20 钢抗拉强度范围在 1 383~1 424 MPa,屈服强度范围在 1 148~1 190 MPa,横向强度略低于纵向,不同位置取样拉伸性能差异不明显。试验结果表明,GY-DCK20 钢在使用硬度下实现高等向及良好的强韧性匹配,展现出优异的综合力学性能。

3 结论

1) GY-DCK20 钢采用(EAF+AOD)→RH→连铸→PESR 的高纯净冶炼工艺,有效地控制了有害元素及气体含量,心部、1/4 对角线处、边部主要存在尺寸为 2~5 μm 的氧化物夹杂。不同位置取样未见明显带状偏析,球化组织良好,碳化物细小且弥散分布。

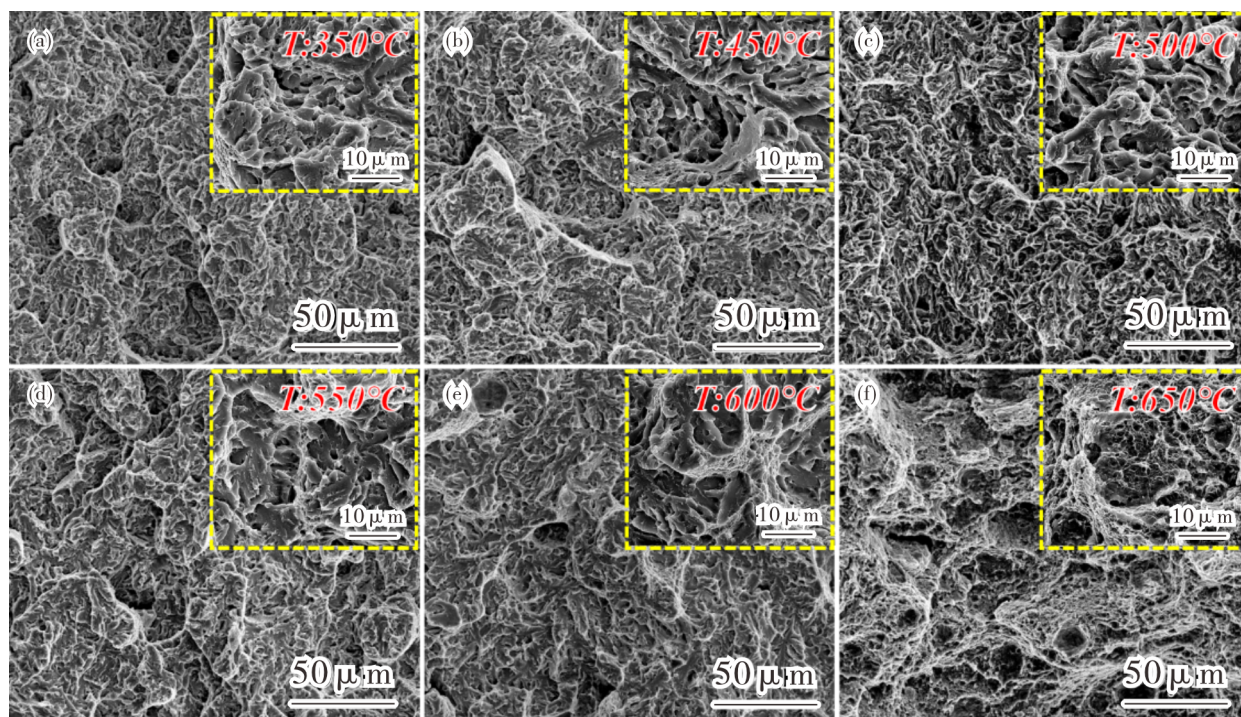


图 8 GY-DCK20 钢 1030 °C 淬火不同温度回火后冲击断口形貌特征:(a)350 °C,(b)450 °C,(c)500 °C,(d)550 °C,(e)600 °C,(f)650 °C

Fig. 8 Impact fracture morphology characteristics of GY-DCK20 steel quenched at 1030 °C and tempered at different temperatures: (a) 350 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C, (d) 550 °C, (e) 600 °C, (f) 650 °C

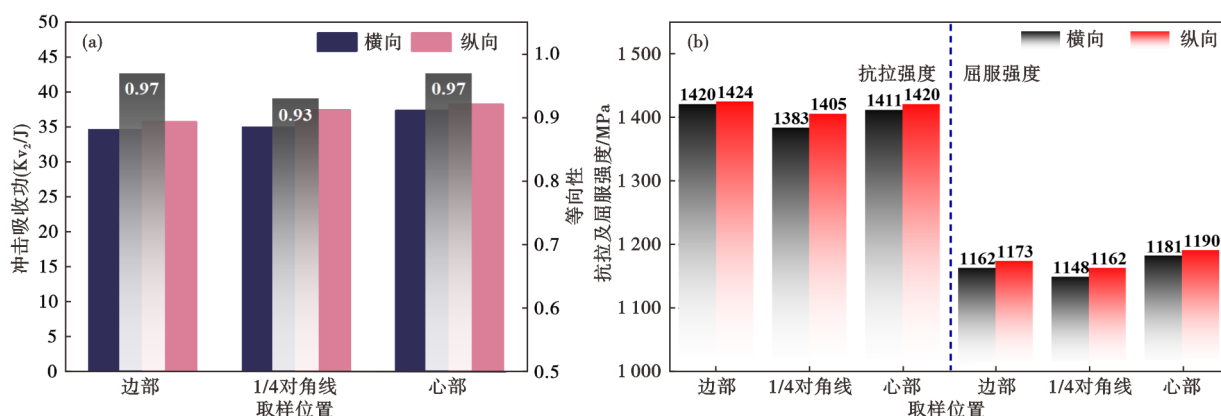


图9 GY-DCK20钢使用硬度(44~46 HRC)条件下不同位置取样力学性能:(a)室温V型缺口冲击韧性及等向性,(b)室温拉伸性能

Fig. 9 Mechanical properties of GY-DCK20 steel sampled at different locations at the service hardness (44~46 HRC): (a) V-notch impact toughness and isotropy at room temperature, (b) tensile properties at room temperature

2)GY-DCK20钢回火过程中二次硬化现象出现在540℃附近;采用1030℃淬火后的回火硬度比1010℃淬火后的回火硬度高出1HRC左右,并具有更优良的室温冲击性能,因此,最适宜的淬火温度为1030℃。

3)GY-DCK20钢在44~46HRC的使用硬度下,不同位置取样室温V型缺口冲击吸收功均在35J以上,抗拉强度约为1400MPa。横、纵向性能基本保持一致,心部等向性可达0.97,展现出优异的综合力学性能。

参考文献

- [1] 赵辉. 新能源汽车车身一体化压铸技术发展分析[C]. 四川省汽车工程学会. 四川省第十六届汽车行业学术年会论文集, 2022:5-11.
- [2] 王明月. 新能源汽车产业市场分析[J]. 合作经济与科技, 2023(11):86-87.
- [3] 梁印, 朱航宇, 罗林根, 等. 基于深度学习钢中非金属夹杂物图像识别[J]. 钢铁, 2023, 58(12): 62-70.
- [4] 楼秉哲, 陈希成. 淬火温度对中碳钢的组织 and 强韧性的影响[J]. 金属学报, 1979(4): 1.
- [5] 宋雯雯, 闵永安, 吴晓春. H13钢中的碳化物分析及其演变规律研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(5):122-126.
- [6] 佟倩, 吴晓春, 闵娜. 高热强性热作模具钢SDH3的研究[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(2):46-50.
- [7] 刘宝石, 牟风, 黄艳玲, 等. 高品质热作模具钢FS438组织及性能研究[J]. 模具制造, 2018, 18(3):84-87.
- [8] 杜思敏, 陈文雄, 胡峰荣, 等. DIEVAR热作模具钢的元素偏析及均匀化热处理[J]. 金属热处理, 2024, 49(7):139-146.
- [9] Ozer A, Ozer M, Atak Ç, et al. The effect of quenching/double quenching and tempering heat treatment cycles on the microstructure, impact energy and hardness of AISI H13 tool steel[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2024, 63(4):1138-1149.
- [10] 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.
- [11] 马鸣蔚, 唐亮, 刘馨忆, 等. H13热作模具钢热处理工艺研究[J]. 有色金属工程, 2024(6): 9-16+25.
- [12] 刘梓峰, 赵旭亮, 罗皓. 淬火温度对4Cr4Mo3W2V1模具钢组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(8):170-173.
- [13] Huang W H, Lei L P, Fang G. Microstructure evolution of hot work tool steel 5CrNiMoV throughout heating, deformation and quenching[J]. Materials Characterization, 2020, 163: 110307.
- [14] 相黎阳, 周健, 迟宏宵, 等. 热处理工艺对TQ1热作模具钢的组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(4): 228-232.
- [15] Hirotsu Y, Nagakura S. Crystal structure and morphology of the carbide precipitated from martensitic high carbon steel during the first stage of tempering[J]. Acta Metallurgica, 1972, 20(4): 645-655.