

两种规格4Cr5MoSiV1钢的组织性能对比分析

吴镇宇¹, 周佳菊¹, 何海平², 李承波³, 张玉龙^{4*}

¹广西产研院新型功能材料研究所有限公司, 广西 南宁

²广西科创新材料股份有限公司, 广西 玉林

³湘潭大学机械工程与力学学院, 湖南 湘潭

⁴广西广投天然气管网有限公司, 广西 南宁

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月22日

摘要

通过硬度测试、冲击功测试、高温拉伸性能测试, 结合金相显微镜、扫描电镜等微观组织表征, 对直径为 $\phi 200$ mm和 $\phi 400$ mm的热挤压模具用4Cr5MoSiV1钢的组织 and 性能进行研究。结果表明: $\phi 220$ 模具钢的硬度、抗冲击性能、高温拉伸性能要优于 $\phi 400$ 模具钢。两者均为针状回火马氏体组织, 但 $\phi 220$ 模具钢的整体组织相对细小。 $\phi 220$ 模具钢中存在的粗大相为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 的富(Ti, V)碳化物, 而 $\phi 400$ 模具钢中粗大相为 $14\sim 17\ \mu\text{m}$ 的非金属夹杂物 Al_2O_3 , 这是大规格模具钢综合力学性能下降、更易发生早期开裂失效的核心内因。

关键词

挤压模具钢, 高温性能, 冲击功, 夹杂物, 显微组织

Comparative Analysis on the Microstructure and Properties of Two Different Diameters of 4Cr5MoSiV1 Steel

Zhenyu Wu¹, Jiaju Zhou¹, Haiping He², Chengbo Li³, Yulong Zhang^{4*}

¹Institute of Functional Material Co., Ltd., Guangxi Institute of Industrial Technology, Nanning Guangxi

²Guangxi Kechuang New Materials Co., Ltd., Yulin Guangxi

³School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

⁴Guangxi GIG Natural Gas Pipeline Network Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: September 21, 2026; accepted: October 13, 2026; published: October 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 吴镇宇, 周佳菊, 何海平, 李承波, 张玉龙. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢的组织性能对比分析[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 128-136. DOI: 10.12677/ms.2026.1610197

Abstract

The microstructure and properties of 4Cr5MoSiV1 steel used for hot extrusion molds with diameters of $\phi 200$ mm and $\phi 400$ mm were investigated through hardness testing, impact energy testing, and high-temperature tensile performance testing, combined with microstructural characterization using optical microscopy and scanning electron microscopy. The results indicate that the $\phi 220$ mold steel exhibits superior hardness, impact resistance, and high-temperature tensile performance compared to the $\phi 400$ mold steel. Both steels exhibit a needle-like tempered martensite microstructure, but the overall microstructure of the $\phi 220$ mold steel is relatively finer. The coarse phase in the $\phi 220$ mold steel consists of (Ti, V)-rich carbides measuring 8~10 μm , whereas the coarse phase in the $\phi 400$ mold steel is non-metallic inclusions of Al_2O_3 measuring 14~17 μm . These are the core internal factors responsible for the reduced comprehensive mechanical properties and increased susceptibility to early cracking failure in large-diameter mold steels.

Keywords

Hot-Work Die Steel, High-Temperature Performance, Impact Energy, Inclusions, Microstructure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

挤压模具钢作为合金钢的重要分支之一，在当代工业发展中发挥着重要的作用。该领域中，4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V、5CrNiMo、5CrMnMo 等四个钢种占据主导地位，这四者合计产量占有所有模具钢总产量的 21%、合金模具钢总产量的 42% [1]-[3]。其中，4Cr5MoSiV1 是应用最为广泛的热挤压模具钢，该钢种兼具优异的耐冷热疲劳性、耐磨性和热强性，可满足 600 °C 工况下的服役要求，加之突出的经济性，已成为绝大多数模具制造场景的首选材料[4]-[6]。然而，随着模具复杂程度和使用要求的不断提升，热挤压模具钢的使用性能、服役寿命以及规格选用逐渐成为关注焦点[7]-[10]。

某公司在使用热挤压模具生产铝合金型材时发现，不同规格尺寸的热挤压模具在服役寿命上存在显著差异，即大规格的热挤压模具更容易出现裂纹、开裂等问题(如图 1 所示)。为找到问题原因，作者对该公司正在使用的两种不同直径($\phi 220$ 和 $\phi 400$)的热挤压模具用钢进行了研究分析。



Figure 1. Cracking of large-sized hot extrusion dies

图 1. 大规格热挤压模具开裂图

2. 试样制备与试验方法

2.1. 试样制备

本研究所用热挤压模具的工业化生产流程为：“电弧冶炼 + 电渣重熔”双联冶炼生产出直径分别为 $\phi 700$ mm 和 $\phi 400$ mm 的 4Cr5MoSiV1 钢坯，后经锻造、退火、机加工、固溶淬火、两次回火等工艺最终制成外圆直径分别为 $\phi 400$ mm 和 $\phi 220$ mm 的热挤压模具，加工率分别达到 43%和 45%。两种热挤压模具钢的化学成分如表 1 所示，采用电火花线切割技术，分别在模具钢横截面上的外圆表层处、1/2 半径处以及圆心处(心部)进行取样，制取尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 20 mm 的金相试样与硬度试样；在模具钢横截面的心部进行取样，制取尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm 的无缺口冲击试样以及 $\phi 5$ mm $\times$ 57 mm $\times$ M12 mm 的高温拉伸试样。

Table 1. Chemical composition of test steel (Mass fraction, %)

表 1. 试验钢的化学成分(质量分数, %)

试样	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
$\phi 220$	0.34	0.97	0.35	4.95	1.38	0.91	Bal.
$\phi 400$	0.36	0.98	0.39	5.02	1.37	0.93	Bal.

2.2. 试验方法

采用 HVS-30T 型洛氏硬度计测试硬度，分别对样品进行抛光处理，然后在金相试样表面测 5 个点取平均值。根据 GB/T 229-2020，在 JBN-300B 型冲击试验机上进行室温冲击试验，测 3 个平行试样取平均值。根据 GB/T 228.2-2015，在 WDW-100C 型微机控制电子万能试验机上进行 500℃高温拉伸试验。使用体积分数为 10%的硝酸酒精进行金相腐蚀，采用 Olympus-DSX500 型光学显微镜进行组织观察。利用 TM4000 扫描电子显微镜(SEM)，结合能谱仪(EDS)对断口形貌与第二相形貌尺寸、分布及其组成进行检测分析。利用 Image J 软件对夹杂物的尺寸进行测量。

3. 试验结果与分析

3.1. 硬度

图 2 为两种规格 4Cr5MoSiV1 模具钢不同位置处的硬度测试结果。由图 2 可知，两种规格模具钢从心部到表层的洛氏硬度均呈现出逐渐升高的趋势，其中， $\phi 220$ 模具钢表层的硬度值较心部高出 0.6HRC， $\phi 400$ 模具钢表层的硬度值较心部高 0.5 HRC，这是由于在锻造和热处理过程中模具钢表层的冷却速度较快，越往心部区域冷却速度越慢，从而使得心表组织产生差异，而造成表层硬度高、心部硬度低的现象。此外， $\phi 220$ 模具钢从心部到表层的硬度范围为 51.3~51.9 HRC，而 $\phi 400$ 模具钢同位置范围的硬度为 50.3~50.8 HRC，整体硬度水平较前者低约 1.0~1.1 HRC，说明大规格模具钢的整体淬硬效果弱于小规格模具钢。结合生产工艺可知，在两者成分相近的前提条件下，这种硬度差异一方面源于模具截面尺寸带来的冷却速度差，即 $\phi 400$ 模具钢的截面尺寸更大，心部热量更难散出，冷却速度更低，更容易析出粗大碳化物，降低了基体的固溶强化效果，最终导致整体硬度水平下降；另一方面， $\phi 400$ 模具钢较低的锻造加工率对晶粒的破碎细化作用更弱，晶粒更容易长大，也会在一定程度上降低钢材的整体硬度。这也与工业生产中大规模模具更容易失效的现象相吻合，即硬度更低的模具在服役过程中更易发生塑性变形，进而诱发裂纹萌生与扩展，最终导致模具开裂失效。

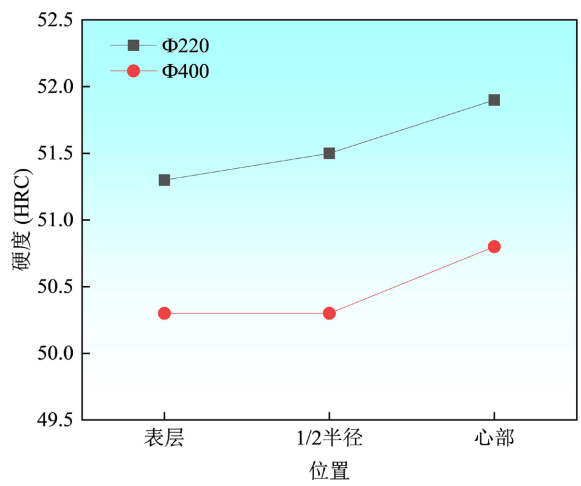


Figure 2. Rockwell hardness at different positions of two specifications of 4Cr5MoSiV1 steel
图 2. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢不同位置的洛氏硬度

3.2. 冲击韧性

图 3、图 4 为两种规格 4Cr5MoSiV1 模具钢心部的冲击性能与冲击断口形貌。由图 3 可知， $\phi 220$ 模具钢心部冲击功显著高于 $\phi 400$ 模具钢，前者的冲击韧性约是后者的 3 倍。 $\phi 220$ 模具钢冲击断口存在大量、均匀分布的韧窝(见图 4(a))，而 $\phi 400$ 模具钢冲击断口呈现小平台、不规则的准解理面，准解理面连接处撕裂棱较多，没有出现韧窝(见图 4(b))。韧窝是微孔聚集型断裂的典型特征，微孔形核、长大与聚集的断裂过程会吸收大量冲击能量，因此断口存在大量韧窝的 $\phi 220$ 模具钢表现出更高的冲击功；而准解理断裂属于脆性断裂范畴，裂纹扩展阻力更小，吸收冲击能量更少，因此 $\phi 400$ 模具钢冲击韧性显著下降。这两者的冲击性能的差异同样可能与截面尺寸差异相关，即相比于 $\phi 220$ 模具钢， $\phi 400$ 模具钢心部的升温速度与冷却速度均更为缓慢，这使得晶粒更易发生长大，晶界结合力减弱，裂纹容易沿着晶界萌生扩展，进而诱发断裂，最终表现为冲击功大幅下降。在冷热循环冲击的服役环境下，模具冲击韧性低无法有效抑制裂纹的萌生与扩展，使模具的使用寿命大幅缩短，这也是大规格模具更易发生早期开裂失效的内在原因之一。

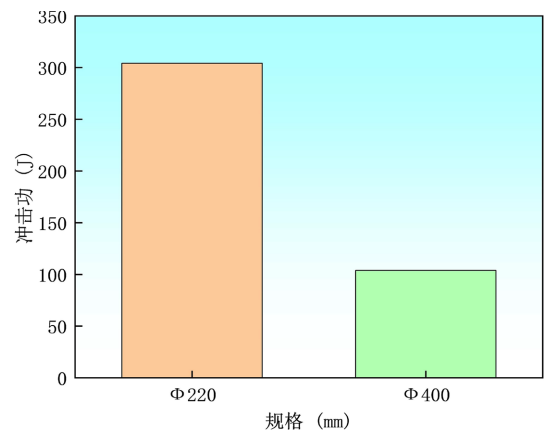


Figure 3. Impact toughness of the core of two specifications of 4Cr5MoSiV1 steel
图 3. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢心部的冲击韧性

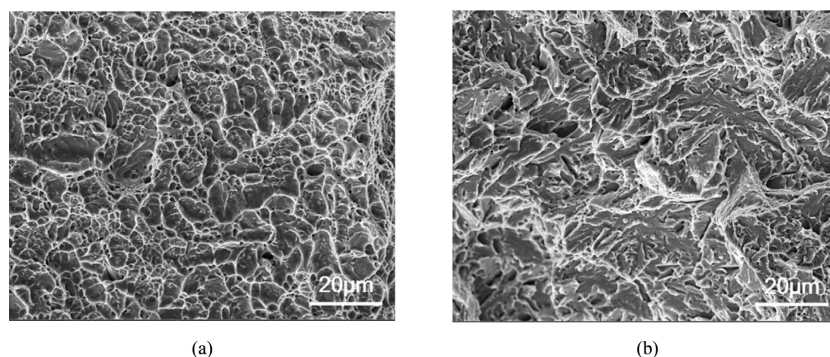


Figure 4. SEM morphology of impact fracture surfaces of two specifications of 4Cr5MoSiV1 steel.

(a) Impact fracture of $\phi 220$ mold steel; (b) Impact fracture of $\phi 400$ mold steel

图 4. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢冲击断口的 SEM 形貌。(a) $\phi 220$ 冲击断口；(b) $\phi 400$ 冲击断口

3.3. 高温拉伸性能

图 5 为两种规格模具钢 500℃ 高温拉伸性能测试结果。由图 5(a) 可见，相较于 $\phi 400$ 模具钢， $\phi 220$ 模具钢的高温抗拉强度、屈服强度和断裂强度分别高出 120 MPa、240 MPa 与 173 MPa，这说明 $\phi 220$ 模具钢在高温服役条件下拥有更优异的抗变形能力，而 $\phi 400$ 模具钢则在更低的应力水平下即可发生变形与断裂。同时， $\phi 220$ 模具钢的高温屈强比为 0.78，高于 $\phi 400$ 模具钢的 0.68，这意味着前者可在接近极限承载能力的状态下维持稳定服役，且可降低冗余塑性变形余量，因此高温强度利用效率更高，该特性差异可能与两种规格模具钢的锻造加工率不同相关。由图 5(b) 可知，与 $\phi 400$ 模具钢相比， $\phi 220$ 模具钢的断面收缩率和断后伸长率高出 2.0% 和 2.5%，这表明 $\phi 220$ 模具钢具有更高的高温塑性。更高的高温塑性不仅可以提升热挤压模具钢在服役过程中对交变热应力的适配能力，而且还能降低热疲劳裂纹萌生的概率，从而延长模具的使用寿命。

图 6 为两种规格模具钢高温拉伸断口形貌。由图可知，两种规格模具钢 500℃ 高温拉伸断口形貌均以韧窝为主，断裂形式均属于微孔聚集型断裂[11]。但两者的微观形貌存在明显差异，其中， $\phi 220$ 模具钢高温拉伸断口的韧窝相对更小且更深，而 $\phi 400$ 模具钢高温拉伸断口的韧窝则显得更为粗大且浅平。断口韧窝的尺寸、深度与钢材的塑性密切相关，即在高温拉伸过程中， $\phi 220$ 模具钢形成了更多的微孔来吸收大量变形能，从而体现出更高的塑性变形能力；而 $\phi 400$ 模具钢中微孔倾向于快速聚合并长大，从而表现为抗变形能力较差、塑性更低。

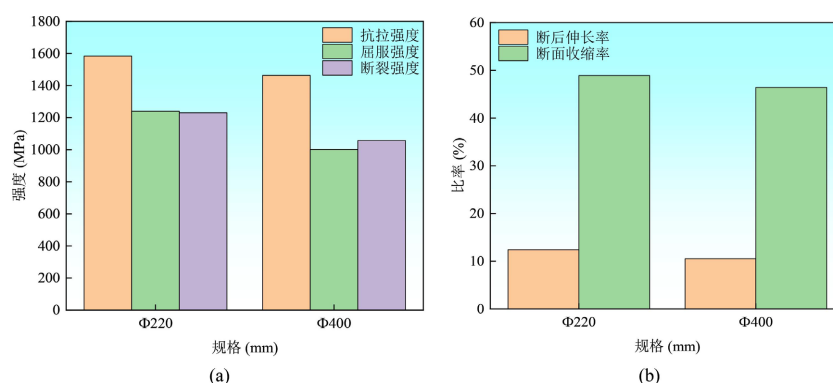


Figure 5. High temperature tensile properties of two specifications of 4Cr5MoSiV1 steel at 500°C.

(a) 500°C high temperature strength; (b) 500°C high temperature plasticity

图 5. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢 500℃ 高温拉伸性能。(a) 500℃ 高温强度；(b) 500℃ 高温塑性

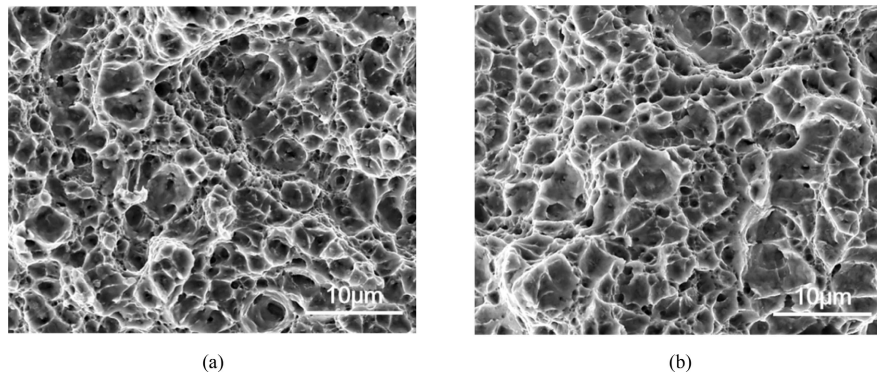


Figure 6. SEM morphology of 500°C high temperature tensile fracture of two specifications of 4Cr5MoSiV1 steel. (a) High temperature tensile fracture of $\phi 220$ mold steel; (b) High temperature tensile fracture of $\phi 400$ mold steel

图 6. 两种规格 4Cr5MoSiV1 钢 500°C 高温拉伸断口的 SEM 形貌。(a) $\phi 220$ 高温拉伸断口；(b) $\phi 400$ 高温拉伸断口

3.4. 金相组织

图 7 为两种规格模具钢不同位置的金相组织。可以看出，两种模具钢的金相组织以针状马氏体组织为主，并且从表层至心部呈现出逐渐粗大的趋势，这与各位置的硬度变化趋势相对应。相较于 $\phi 220$ 模具钢， $\phi 400$ 模具钢各位置的马氏体组织均较为粗大，粗大马氏体的晶界有效面积更小，晶界对位错运动的阻碍作用减弱，导致材料的强度与硬度都会出现下降；并且粗大马氏体晶界的应力集中效应更显著，在冲击载荷与交变热应力的作用下，裂纹更容易在晶界处形核并快速扩展，从而造成材料的冲击韧性 with 高温拉伸性能下降。

此外，从图中还可发现， $\phi 220$ 模具钢中还包含着少量尺寸较小的夹杂物颗粒，而 $\phi 400$ 模具钢中的夹杂物尺寸较大、数量更多。大尺寸夹杂物作为硬质脆性相，会破坏基体组织的连续性，在冷热交变应力和外力载荷作用下，夹杂物与基体的界面更易成为应力集中区，从而诱发微裂纹的萌生，加速裂纹的扩展，最终会对模具钢的综合力学性能产生负面影响。

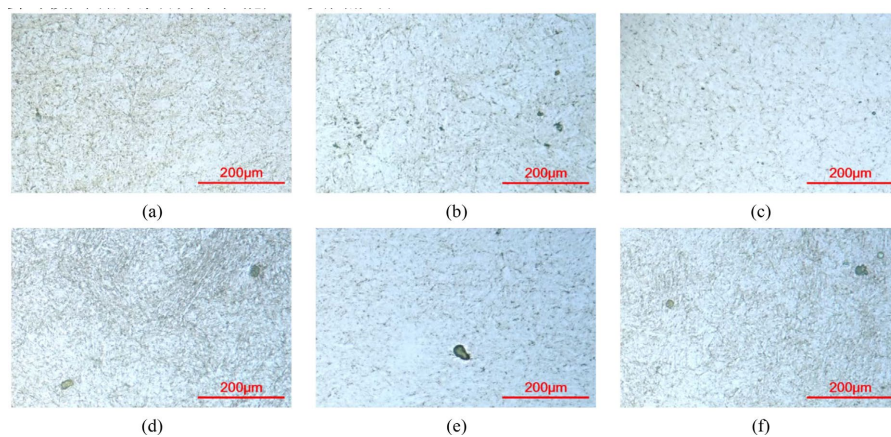


Figure 7. Metallographic structures at different positions of two specifications of mold steel. (a) Surface layer of $\phi 220$ mold steel; (b) 1/2 radius of $\phi 220$ mold steel; (c) The core of $\phi 220$ mold steel; (d) Surface layer of $\phi 400$ mold steel; (e) 1/2 radius of $\phi 400$ mold steel; (f) The core of $\phi 400$ mold steel

图 7. 两种规格模具钢不同位置金相组织。(a) $\phi 220$ 表层；(b) $\phi 220$ 1/2 半径处；(c) $\phi 220$ 心部；(d) $\phi 400$ 表层；(e) $\phi 400$ 1/2 半径处；(f) $\phi 400$ 心部

3.5. 微观组织

图 8 为两种规格模具钢不同位置的微观组织。可以看出，两种模具钢中均存在两种尺寸的第二相，即不规则形状的粗大相与颗粒状的细小弥散相，且从表层至心部粗大相尺寸呈现出逐渐增大的趋势。相比于 $\phi 220$ 模具钢， $\phi 400$ 模具钢各位置处的粗大相尺寸均更大。通过能谱分析可知， $\phi 220$ 模具钢中存在的粗大相为富(Ti, V)碳化物，而 $\phi 400$ 模具钢中粗大相为非金属夹杂物 Al_2O_3 。

经测量可知， $\phi 220$ 模具钢中富(Ti, V)碳化物的最大尺寸不超过 $10\ \mu m$ ，且数量占比较低，对力学性能的负面影响有限；而 $\phi 400$ 模具钢中的 Al_2O_3 夹杂物尺寸多分布在 $14\sim 17\ \mu m$ 区间，这些大尺寸硬质夹杂物本身与基体的结合性较差，会严重割裂基体的连续性，且热膨胀系数与基体差异较大，在受力或冷热循环过程中，很容易在夹杂物与基体的界面处形成应力集中，成为微裂纹的萌生源，进而导致模具开裂，这是大规格模具钢综合力学性能劣化的核心因素之一。

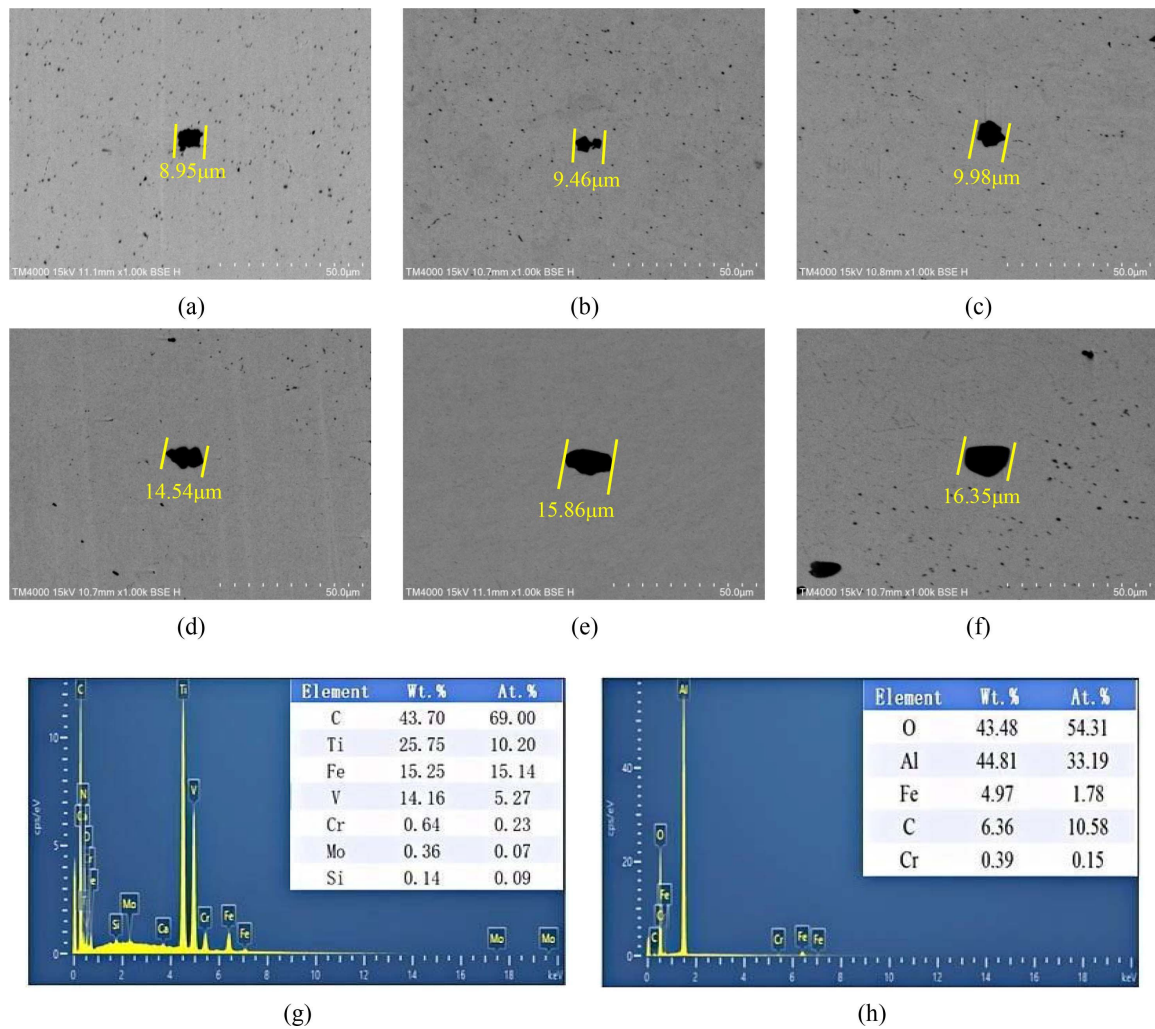


Figure 8. Morphology and composition of coarse phases in different positions of two specifications of mold steel. (a) Surface layer of $\phi 220$ mold steel; (b) 1/2 radius of $\phi 220$ mold steel; (c) The core of $\phi 220$ mold steel; (d) Surface layer of $\phi 400$ mold steel; (e) 1/2 radius of $\phi 400$ mold steel; (f) The core of $\phi 400$ mold steel; (g) EDS analysis of coarse phase in $\phi 220$ mold steel; (h) EDS analysis of coarse phase in $\phi 400$ mold steel

图 8. 两种规格模具钢不同位置粗大相的形貌与成分。(a) $\phi 220$ 表层；(b) $\phi 220$ 1/2 半径处；(c) $\phi 220$ 心部；(d) $\phi 400$ 表层；(e) $\phi 400$ 1/2 半径处；(f) $\phi 400$ 心部；(g) $\phi 220$ 粗大相成分分析；(h) $\phi 400$ 粗大相成分分析

4. 讨论

结合生产工艺分析可知,两种模具钢均采用“电弧冶炼 + 电渣重熔”的双联工艺制备,其中,大规格模具钢所用的原始钢坯直径更大,这意味着在电渣重熔环节,大规格原始钢坯的凝固过程更长、温度梯度更小,冶炼脱氧时残留下来的夹杂物在凝固前沿容易被推移聚集并长大,这使得夹杂物不能充分上浮而被去除,最终残留在钢中[12]。根据位错理论,位错沿滑移面运动时无法绕过夹杂物,会在夹杂物周围形成位错塞积、引起应力集中;由于夹杂物破坏了基体的连续性,当应力集中达到基体的断裂强度阈值后,裂纹会直接从夹杂物与基体的界面处形核,在后续服役过程中持续扩展最终导致模具整体失效[13][14]。

结合试验结果可以明确,除了截面尺寸带来的冷却速度差异、锻造加工率差异会影响大规格模具钢性能外,钢中存在的大尺寸 Al_2O_3 夹杂物是导致其综合力学性能下降、更易发生早期开裂失效的核心内因。因此,当前主流双联冶炼工艺在制备大规格 4Cr5MoSiV1 模具钢坯时,需根据大规格钢坯的凝固特点,进一步优化生产工艺参数,提升大规格模具钢纯净度。具体建议如下:

一、在冶炼环节优化脱氧工艺,通过改进脱氧剂的加入方式与成分搭配,如提高脱氧剂中的 Ca/Al 比、严格控制钢中 Al 含量,减少脱氧产物的残留,从源头降低 Al_2O_3 夹杂物的生成量;

二、优化电渣重熔工艺参数,适当提高重熔功率,增大熔池过热度,改善熔体流动性,延长钢液凝固前夹杂物上浮去除的时间,同时增大凝固过程的温度梯度,削弱凝固前沿对夹杂物的推移聚集作用,减少大尺寸夹杂物的形成;

三、增加电渣重熔过程的搅拌处理,促进夹杂物聚合上浮,进一步提升夹杂物去除效率;

四、在锻造环节,适当提升大规格钢坯的锻造加工率,如 $\phi 400\text{ mm}$ 以上规格热挤压模具钢的推荐最小锻造比应提升至 45%~48%,这有助于强化晶粒破碎细化效果,改善心部组织均匀性,从而缩小大规格模具与小规格模具之间的性能差距,提升大规格模具的服役寿命。

5. 结论

(1) 通过对硬度、冲击韧性、高温拉伸等性能进行对比发现, $\phi 220$ 模具钢的综合力学性能明显优于 $\phi 400$ 模具钢。

(2) 通过对组织的对比研究发现,两种规格的热挤压模具用 4Cr5MoSiV1 钢的组织均为针状回火马氏体,其中, $\phi 220$ 模具钢的整体组织明显细于 $\phi 400$ 模具钢。

(3) 通过对粗大相进行研究发现, $\phi 220$ 模具钢中存在的粗大相为 8~10 μm 的富(Ti, V)碳化物,而 $\phi 400$ 模具钢中粗大相为 14~17 μm 的非金属夹杂物 Al_2O_3 ,这是大规格模具钢综合力学性能下降、更易发生早期开裂失效的核心内因。

基金项目

广西产研计划项目(CYY-HT2023-JSJJ-0032); 广西重点研发计划项目(桂科 AB24010235)。

参考文献

- [1] 丁洁, 姜超, 陈林, 等. 国内外模具钢生产现状及发展[J]. 山西冶金, 2006(2): 7-10.
- [2] 李晓, 祝志超, 张心金, 等. 大型 H13 钢模块锻件制备及组织评价[J]. 模具制造, 2022, 22(10): 70-73.
- [3] 王鹏, 张杰江, 胡亚民, 等. H13 钢的应用现状[J]. 模具制造, 2007, 7(12): 1-7.
- [4] 张靖波, 张旭峰, 王广义, 等. H13 钢在冷挤压成型模中的应用[J]. 模具工业, 2015, 41(4): 74-77.
- [5] 杨明亮, 赵作福, 霍宝阳, 等. H13 模具钢热处理工艺的研究进展[J]. 辽宁工业大学学报, 2018, 38(5): 311-

- 314+324.
- [6] 王玉峰, 刘宗昌, 范文宝, 等. H13 钢的带状组织及其消除方法[J]. 上海金属, 2005, 27(6): 43-45.
 - [7] 陈少华, 蒋家发, 刘哲, 等. 回火工艺对 H13E 钢显微组织及力学性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(6): 1-5.
 - [8] 张金祥, 欧阳希, 周健, 等. Cr 含量降低对 H13 钢组织与力学性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(8): 1323-1327+1343.
 - [9] 谢冬柏, 高飞, 王福会, 等. H13 钢的马氏体/贝氏体组织与性能[J]. 金属热处理, 2002, 27(5): 11-14.
 - [10] 潘晓华, 朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展的研究[J]. 模具制造, 2006, 6(4): 78-85.
 - [11] 李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 76-79.
 - [12] 张国滨, 宁玫, 周欣欣. 钢中非金属夹杂物分析[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(12): 1-7.
 - [13] 李言祥, 陈祥. 非金属夹杂物对等温淬火高硅铸钢力学性能的影响[J]. 铸造, 2000, 49(9): 525-528.
 - [14] Zhitenev, A., Salynova, M., Shamshurin, A., Ryaboshuk, S. and Kolnyshenko, V. (2021) Database Clustering after Automatic Feature Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel. *Metals*, **11**, Article 1650.
<https://doi.org/10.3390/met11101650>