



铌对 65Mn 高碳刀具钢组织与性能的影响

杨 玉^{1,2}, 王天筱³, 宋晓明², 许 成^{1,2}, 王润琦^{1,2}

(1 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢股份有限公司, 鞍山 114009;

3 大连理工大学材料与工程学院, 大连 116000)

摘 要:针对 65Mn 高碳刀具钢韧性差易脆断的问题, 采用拉伸和冲击试验、光学显微镜、扫描电镜等技术方法, 对比分析了加 $w[\text{Nb}]0.03\%$ 对 65Mn 刀具钢热轧及热处理组织和性能的影响。结果表明, 65MnNb 热轧板珠光体团直径较 65Mn 热轧板小 $21\ \mu\text{m}$, 珠光体片层间距小 $0.14\ \mu\text{m}$ 。820 °C 淬火后 250 ~ 500 °C 回火时, 随回火温度升高, 两种成分刀具钢试样的强度和硬度逐渐降低, 伸长率和冲击韧性逐渐提高; 相同热处理工艺条件下, 65MnNb 刀具钢试样的强度和冲击吸收功更高, 硬度和伸长率无明显区别。65MnNb 刀具钢试样的最佳热处理温度是 350 °C 左右, 组织为回火索氏体, 屈服强度 1 753 MPa, 抗拉强度 1 820 MPa, 硬度 52.3HRC, 冲击功 22.1 J, 而 65Mn 钢试样的最佳回火温度为 450 °C 左右, 屈服强度达 1 067 MPa, 抗拉强度达 1 263 MPa, 硬度 46.6HRC, 冲击功 18.7 J, 其回火脆化温度在 400 °C 左右。

关键词: 刀具钢; 冲击韧性; 硬度; 回火马氏体; 强度

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00067 **中图分类号:** TG142

Effect of Niobium on Microstructure and Properties of 65Mn High Carbon Cutting Tool Steel

Yang Yu^{1,2}, Wang Tianxiao³, Song Xiaoming², Xu Cheng^{1,2}, Wang Runqi^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, China;

2 Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114009, China; 3 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology Liaoning, Dalian 116000, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor toughness and brittle fracture of 65Mn high carbon cutting tool steel, tensile and impact tests, optical microscope, scanning electron microscope and other technical means were used to compare and analyze the influence of $w[\text{Nb}]0.03\%$ addition on the microstructure and properties of 65Mn cutting tool steel during hot rolling and heat treatment. The results showed that the diameter of pearlite clusters in 65MnNb hot-rolled plates was $21\ \mu\text{m}$ smaller than that in 65Mn hot-rolled plates, and the interlayer spacing of pearlite was $0.14\ \mu\text{m}$ smaller. When 250 °C-500 °C tempering was carried out after 820 °C quenching, with the increased of tempering temperature, the strength and hardness of two kinds of component tool steel samples gradually decreased, and the elongation and impact toughness gradually increased; Under the same heat treatment process conditions, the strength and impact absorption of 65MnNb cutting tool steels were higher, while there was no obvious difference in hardness and elongation. The optimum heat treatment temperature of 65MnNb cutting tool steel was about 350 °C to 400 °C, and the structure was tempered sorbite. The yield strength was 1 753 MPa, the tensile strength was 1 820 MPa, the hardness was 52.3HRC, and the impact energy was 22.1 J. However the optimum tempering temperature 65Mn steel sample was about 450 °C, the yield strength was 1 067 MPa, the tensile strength was 1 263 MPa, the hardness was 46.6HRC, and the impact energy was 18.7 J. Its tempering and embrittlement temperature was about 400 °C.

Key Words: Cutting Tool Steel; Impact Toughness; Hardness; Tempered Martensite; Strength

随着航空航天、汽车制造及农业机械化等现代工业的快速发展, 人们对切割工具的要求也越来越高, 普通 65Mn 刀具钢已不能满足使用要求, 刀具钢不仅要高硬度高耐磨, 还要有一定的韧塑性, 以抵抗高强度材料或外界环境的冲击, 延长使用寿命。

铌作为常用的微合金化元素在工业生产中应用广泛, 目前, 主要应用在低碳微合金化钢、含铌铁素体不锈钢及航空航天高温合金和低温超导合金三个领域。据了解, 全世界约 75% 的铌应用在结构钢^[1-3]、汽车用钢^[4-7]、管线钢^[8]等低碳微合金化钢中,

基金项目: 含 Nb 锯条用钢研发 C2023B1L13404

作者简介: 杨 玉(1977—), 女, 硕士, 高级工程师; **E-mail:**491764095@qq.com; **收稿日期:**2025-03-12

通信作者: 王天筱(2004—), 女, 本科; **E-mail:**2101758879@qq.com

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

细化铁素体晶粒,提高强韧性。刀具钢以珠光体相变为主,铁素体相变很少,而且,刀具钢要经过调质处理才能使用,热处理对其组织性能有很大影响,受中高碳钢热处理等生产工艺复杂影响,铌在高碳刀具钢中的应用很少,相关研究仍属起步阶段^[9-12],至今没有明确的组织性能控制机理。本研究主要研究了 Nb 对 65Mn 高碳刀具钢热处理组织和性能的影响,明确了加铌 65Mn 刀具钢的最佳热处理工艺,探讨高碳钢中加 Nb 提升强韧性的可行性,引领刀具行业升级换代。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料制备

本试验采用的钢板为 6 mm 厚的刀具钢板,实际生产化学成分参照 GB/T699—2015 中 65Mn 成分控制,其中,一炉钢加 Nb,具体化学成分(质量分数)见表 1。两种成分钢板的生产工艺路径完全相同,具体如下:铁水预处理→250 t 转炉冶炼→LF 炉外精炼→立弯式连铸机连铸→(200 mm×1 200 mm×8 000 mm)板坯加热→6 道次粗轧-7 道次精轧→层流冷却→卷取→检验→入库。生产工艺参数基本相同,65Mn 精轧终轧温度 921 °C,65MnNb 精轧终轧温度 918 °C。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of test steel		%					
钢牌号	试样号	C	Si	Mn	Nb	P	S
65Mn	1 [#]	0.67	0.22	1.05	-	0.015	0.005
65MnNb	2 [#]	0.66	0.23	1.04	0.03	0.018	0.004

1.2 热处理试验及力学性能检测

在 65Mn 和 65MnNb 两种热处理钢板上分别按 GB/T 2975—2018 取纵向拉伸试样 12 个,50 mm×

50 mm×5.5 mm 硬度试样 6 个,10 mm×5 mm×55 mm 冲击试样 18 个,利用箱式电阻炉加热进行淬火及回火试验。全部试样淬火加热温度 820 °C,保温 30 min,油淬。淬火后的两个拉伸试样,一个硬度试样,3 个冲击试样为一组进行回火处理,回火温度分别为 250、300、350、400、450、500 °C,保温时间 3 h。分别按 GB/T 228.1—2021、GB/T 230.1—2018 和 GB/T229—2020 加工和检测拉伸、硬度和冲击功,每个回火制度检测拉伸试样两个、硬度 3 点、冲击试样 3 个,取各项检测结果的平均值评价不同回火制度的各项力学性能。冲击试验采用夏比 V 型缺口,受钢板厚度影响,冲击试样为非标准试样,因此,将每个实测值乘以 2 倍作为冲击功的换算评价价值。

1.3 钢板显微组织及断口观察

在 65Mn 和 65MnNb 两种热轧钢板上及每个热处理后的硬度试样上分别取 10 mm×10 mm×5.5 mm 金相试样各一块,磨制、抛光横断面,用体积百分比为 4% 的硝酸酒精侵蚀,利用 DMI5000M 光学显微镜和 SUPRA55 场发射扫描电镜观察热轧钢板横断面显微组织及热处理后钢板显微组织和冲击断口形貌。

2 试验结果

2.1 热轧板组织形貌

两种钢板热轧态微观组织形貌如图 1 所示。采用截距法估算图 1(a) 中 65Mn 钢的珠光体团直径平均约为 38 μm,珠光体片层间距约为 0.49 μm,图 1(b) 中 65MnNb 钢的珠光体团直径平均约为 17 μm,珠光体片层间距约为 0.35 μm。65MnNb 的珠光体团直径明显更细小,珠光体片层间距更小。

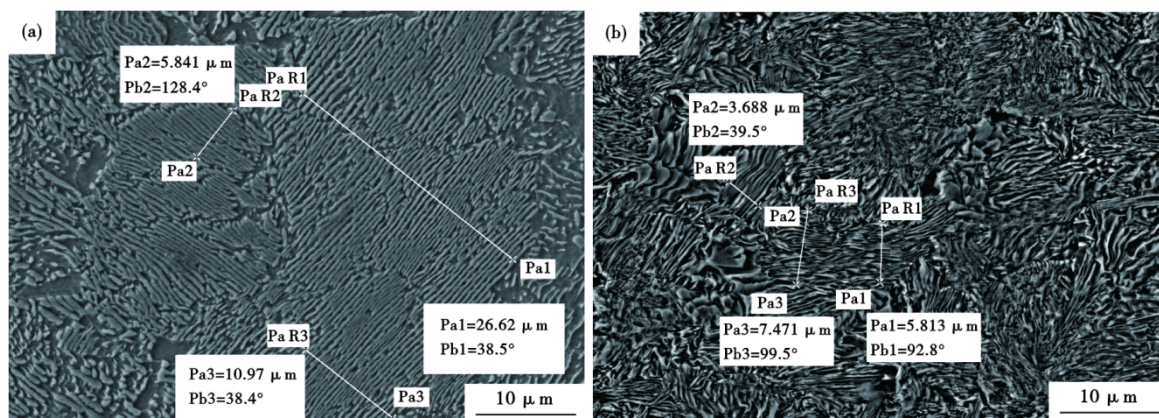


图 1 65MnNb 和 65Mn 的热轧态组织形貌:(a)65Mn,(b)65MnNb

Fig. 1 . Microstructure morphology of 65MnNb and 65Mn in hot rolled condition :(a)65Mn,(b)65MnNb

2.2 热处理性能

按 1.2 章节中不同温度回火后两种钢板的拉伸性能对比结果如图 2(a) 所示。可见, 随回火温度升高, 两种钢板强度均降低; 相同温度回火时, 加铌的 2# 钢板较不加 Nb 的 1# 钢板强度略高, 各回火温度下抗拉强度均高约 100 MPa, 而屈服强度增幅随回火温度升高而增大, 250 °C 回火时高 104 MPa, 500 °C 回火时高 304 MPa。随回火温度升高, 伸长率有所提高, 回火温度相同时两种钢的伸长率无明显差别。

按 1.2 章节中不同温度回火后的钢板硬度和冲击吸收功如图 2(b) 所示。可见, 随回火温度升高, 两种钢板硬度均降低, 不加铌的 1# 钢板 400 °C 回火时硬度降到 50HRC 以下, 而加铌 2# 钢板 450 °C 回火时硬度降到 50HRC 以下; 500 °C 回火时两种钢板硬度均急剧下降到 40HRC 以下; 回火温度相同时两种钢的硬度无明显差别。随回火温度升高, 两种钢板冲击功均提高, 加铌的 2# 钢板冲击功由 11.2 提高到 27.9 J, 不加 Nb 的 1# 钢板冲击功由 9.1 提高到 20.4 J; 加铌的 2# 钢板冲击功值在 350 ~ 400 °C 回火时存在平台区; 不加 Nb 的 1# 钢板在 400 °C 回火时冲击功值存在凹点, 仅为 9.1 J。回火温度相同时, 加铌的 2# 钢板较不加 Nb 的 1# 钢板冲击功高, 250 °C 回火时高 2.1 J, 500 °C 回火时高 7.5 J。

65Mn 刀具钢试样的强韧性匹配最佳回火温度是 450 °C 左右, 抗拉强度 1 263 MPa, 屈服强度 1 067 MPa, 硬度 46.6HRC, 冲击功达 18.7 J; 而 65MnNb 刀具钢试样的强韧性匹配最佳的回火温度是 350 °C 左右, 抗拉强度 1 820 MPa, 屈服强度 1 753 MPa, 硬度 52.3HRC, 冲击功 22.1 J, 力学性能均好于 65Mn 刀具钢试样。

2.3 热处理组织形貌

不同温度回火后两种钢板的显微组织形貌如图 3 所示。250、300 °C 低温回火时两种钢板组织均为回火马氏体, 含 Nb 的 2# 马氏体针片略短, 400、450、500 °C 高温回火组织均为回火索氏体, 350 °C 回火时不含 Nb 的 1# 组织以回火索氏体为主, 可见少量马氏体位向特征, 而含 Nb 的 2# 全部为回火索氏体。500 °C 回火时, 含 Nb 的 2# 碳化物球化更明显, 更细小均匀。

2.4 冲击断口形貌

SUPRA 55 场发射扫描电镜观察所有冲击断口, 由冲击 V 口向内逐渐观察断口形貌, 宏观断口主要由裂纹扩展放射区组成, 裂纹形成纤维区和断裂剪切唇区均不明显, 但 5 mm 厚度方向可见裂纹扩展放射区宽度不同。总体来说, 随着回火温度的升高, 5 mm 厚度中间的裂纹扩展区更窄, 裂纹扩展区面积更小; 回火温度相同时, 加 Nb 2# 钢板的裂纹扩展区面积明显小于不加 Nb 的 1#。放大倍数观察断口各区微观形貌, 所有冲击试样断口裂纹扩展放射区均呈解理断裂特征, 可见解理台阶、解理刻面和撕裂棱, 解理刻面上有少量河流花样, 而四周边部均呈韧窝断裂特征。回火温度越高, 放射区解理断口的解理台阶越明显, 解理面越参差不平。所有冲击断口上均未发现非金属夹杂物和微米级粒子析出物。

400 °C 回火时两种钢板冲击断口形貌如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(c) 分别为不加 Nb 的 1# 冲击断口的宏观形貌、中间裂纹扩展放射区和四周韧性区形貌; 图 4(d)、(e)、(f) 分别为加 Nb 的 2# 冲击断口的宏观形貌、中间裂纹扩展放射区和四周韧性区形貌。

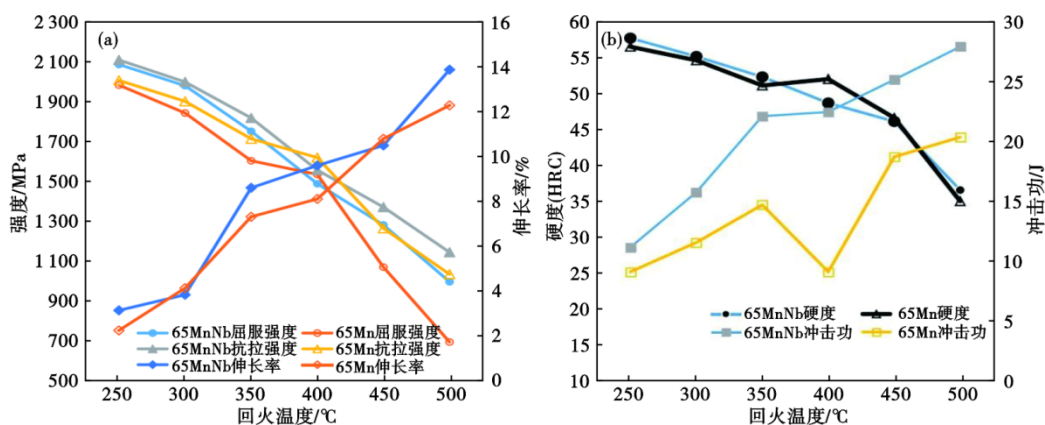


图2 65MnNb和65Mn的热处理性能:(a)拉伸性能,(b)硬度和冲击功

Fig. 2 The heat treatment properties of 65MnNb and 65Mn: (a) tensile property, (b) hardness and impact

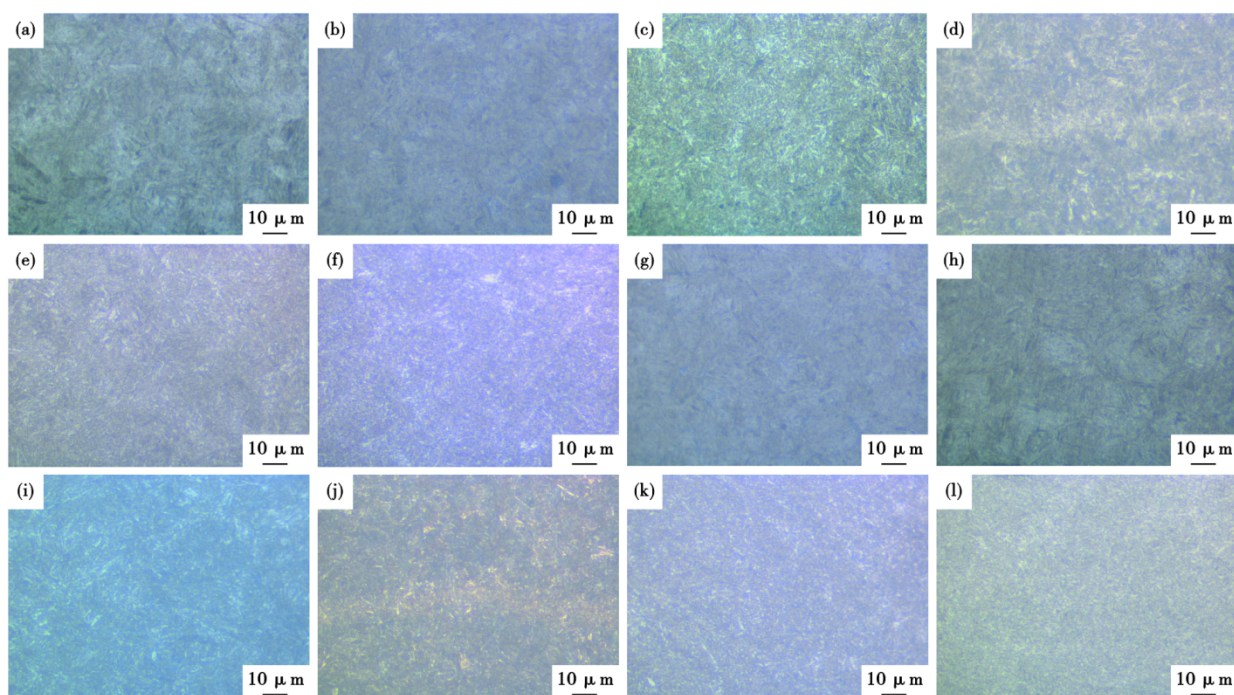


图 3 65MnNb 钢和 65Mn 钢的热处理组织: (a)65Mn, 250 °C; (b)65Mn, 300 °C; (c)65Mn, 350 °C; (d)65Mn, 400 °C; (e)65Mn, 450 °C; (f)65Mn, 500 °C; (g)65MnNb, 250 °C; (h)65MnNb, 300 °C; (i)65MnNb, 350 °C; (j)65MnNb, 400 °C; (k)65MnNb, 450 °C; (l)65MnNb, 500 °C

Fig. 3 Heat treatment microstructure of steel 65MnNb and 65Mn: (a)65Mn tempered at 250 °C, (b) 65Mn tempered at 300 °C, (c) 65Mn tempered at 350 °C, (d) 65Mn tempered at 400 °C, (e) 65Mn tempered at 450 °C, (f) 65Mn tempered at 500 °C, (g) 65MnNb tempered at 250 °C, (h) 65MnNb tempered at 300 °C, (i) 65MnNb tempered at 350 °C, (j) 65MnNb tempered at 400 °C, (k) 65MnNb tempered at 450 °C, (l) 65MnNb tempered at 500 °C

可见, 1#裂纹扩展放射区平均宽度为 3.0 mm, 解理台阶不明显, 二次裂纹全部发生在晶界处, 呈沿晶断裂特征, 而 2#裂纹扩展放射区平均宽度为 1.3 mm, 解理台阶明显, 解理面参差不齐, 二次裂纹存在穿晶发生特征; 2#韧性区韧窝明显多于 1#韧性区, 且晶粒明显细于 1#。

3 分析讨论

3.1 回火温度对刀具钢组织与性能的影响

65Mn 是高碳刀具钢, 淬火组织以高碳针片状马氏体为主, 混合极少量板条状马氏体^[13-14]。高碳针片状马氏体亚结构为高过饱和度高密度的孪晶, 这些孪晶使塑性变形阻力增加, 因此, 淬火后强度 $\geq 2\ 000$ MPa, 硬度 ≥ 60 HRC。同时, 马氏体片形成时孪晶等显微结构会相互撞击, 引起严重晶格畸变产生较大内应力, 而高碳针片状马氏体强硬性高, 相互碰撞时不能发生形变消除应力, 碰撞处产生应力场, 形成微裂纹, 致使塑性和韧性降低, 伸长率和冲击功很低。由 2.2 和 2.3 章节中的试验结果可知, 无论是否加 Nb, 在 250~500 °C 回火时,

随着回火温度升高两种刀具钢中马氏体碳化物形态转变, 马氏体针片特征逐渐模糊, 强度和硬度降低, 冲击韧性和伸长率提高。这是因为, 回火时钢中碳和锰等合金元素不断扩散, 随回火温度升高, 扩散速度加快, 马氏体孪晶碳含量逐渐减少, 因此, 强度和硬度降低, 韧性逐渐改善。350 °C 回火时, 不加 Nb 刀具钢光学显微镜下仍可见针片状高碳马氏体位相特征, 说明仍有孪晶存在, 因此, 屈服强度 $\geq 1\ 600$ MPa, 抗拉强度 $\geq 1\ 700$ MPa, 硬度 ≥ 50 HRC, 而伸长率 $< 9\%$, 冲击功 < 15 J。而 ≥ 450 °C 较高温度回火时, 马氏体分解形成碳含量较低的针状 α 相和更稳定的 θ -碳化物(渗碳体), 孪晶及马氏体位相特征完全消失, 得到回火索氏体组织, 强度和硬度大幅降低, 屈服强度 $\leq 1\ 100$ MPa, 抗拉强度 $\leq 1\ 300$ MPa, 硬度 ≤ 47 HRC, 而韧性显著提高, 伸长率 $\geq 10\%$, 冲击功 ≥ 18 J。

3.2 Nb 对刀具钢组织与性能的影响

由 2.2 章节中试验结果可见, 250~500 °C 回火温度相同时, 加铌 2#刀具钢的抗拉强度和屈服强度均高于不加 Nb 的 1#刀具钢, 各回火温度下抗拉强度

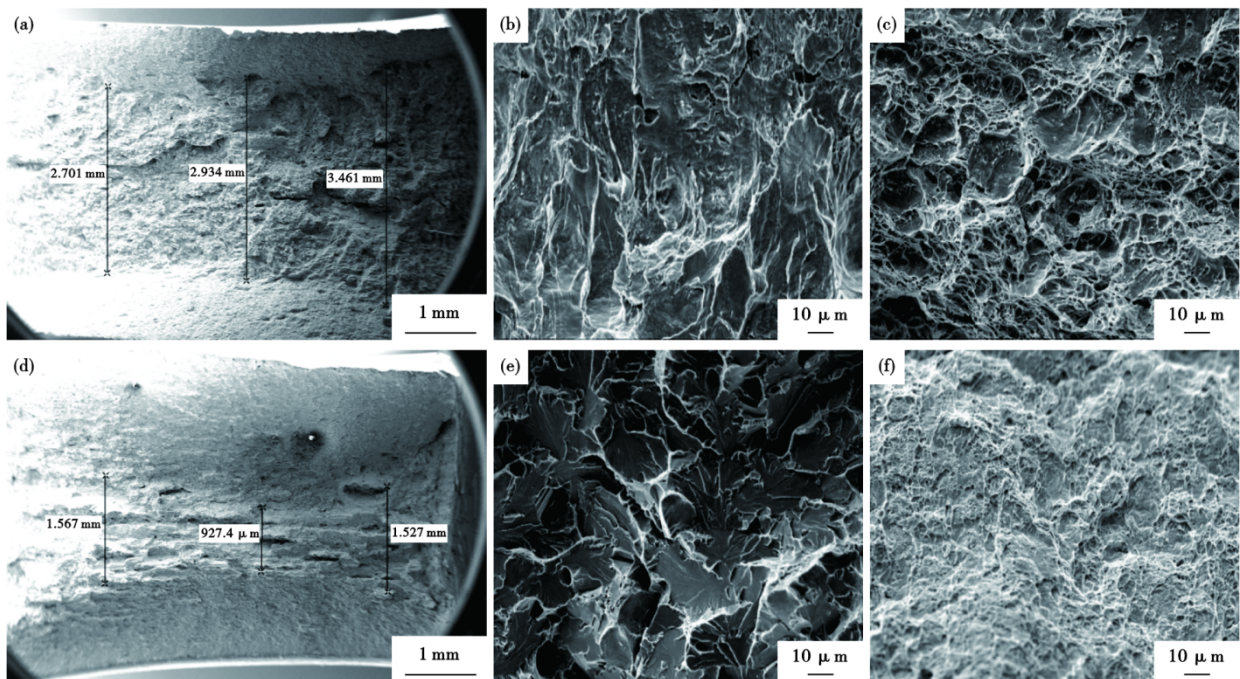


图4 65MnNb钢和65Mn钢的冲击断口形貌:(a)65Mn宏观,(b)65Mn脆性区,(c)65Mn韧性区,(d)65MnNb宏观,(e)65MnNb脆性区,(f)65MnNb韧性区

Fig. 4 Morphology of impact fracture of steel 65MnNb and 65Mn: (a) 65Mn macroscopic, (b) 65Mn brittle zone, (c) 65Mn ductile zone, (d) 65MnNb macroscopic, (e) 65MnNb brittle zone, (f) 65MnNb ductile zone

均高约 100 MPa, 而屈服强度高幅随回火温度升高而增大, 250 °C 回火时高 104 MPa, 500 °C 回火时高 304 MPa。同一温度回火时, 加铌 2# 刀具钢冲击功高于不加 Nb 的 1# 刀具钢, 250 °C 回火时高 2.1 J, 500 °C 回火时高 7.5 J。350 ~ 400 °C 回火时加铌 2# 刀具钢冲击功值存在平台区, 不加 Nb 的 1# 刀具钢在 400 °C 回火时冲击功值存在凹点, 仅为 9.1 J。相同温度回火时, 加铌对硬度和伸长率影响不明显。

铌是常用的微合金化元素, 在低碳低合金钢非调质钢中广泛应用。研究表明, 在低碳低合金钢非调质钢中加入微量铌可以扩大奥氏体相变区, 抑制奥氏体的形变再结晶, 阻止奥氏体晶粒的长大, 细化铁素体晶粒, 提高韧塑性^[15-17]。与低碳钢中作用相同, 在 2# 高碳刀具钢中加微量铌, 扩大了奥氏体相变区, 在变形高温阶段抑制奥氏体的形变再结晶, 细化了奥氏体晶粒, 在冷却过程中珠光体形核点更多, 因此得到的热轧态钢板中珠光体团直径和珠光体片间距更小。淬火时马氏体针片在奥氏体晶内形核生长, 晶界阻碍其长大, 因此, 马氏体针片更细小。250、300 °C 低温回火时, 遗传淬火组织形貌, 两种刀具钢均可见针片状马氏体特征, 但加 Nb 的 2# 马氏体针片更细小, 因此, 其抗拉强度和屈服强度更高。加 Nb 的 2# 在 350 °C 回火时为全索氏体形貌,

500 °C 回火时碳化物球化明显, 而不加 Nb 的 1# 350 °C 回火时仍可见少量马氏体针片特征, 500 °C 回火时碳化物球化不明显, 可见 Nb 能促进碳扩散, 具有强烈碳化物球化作用^[18-21]。值得注意的是, 这些球化碳化物的形成并没有急剧降低含 Nb 刀具钢的强度, 相同温度回火时其强度仍高于不加 Nb 刀具钢, 而且随回火温度升高, 屈服强度差值更大, 250 °C 回火时高 104 MPa, 500 °C 回火时高 304 MPa。分析认为, 随回火温度升高, 虽然马氏体孪晶逐渐减少, 但加 Nb 刀具钢中析出的 NbC、NbCN 等微小粒子有所长大, 使塑性变形阻力增加, 因此, 屈服强度下降幅度小于不加 Nb 刀具钢。

由 2.4 章节中试验结果可见, 两种刀具钢冲击断口均以裂纹扩展解理脆性区为主, 同一温度回火时, 加 Nb 的 2# 裂纹扩展解理脆性区面积更小, 四周韧窝断裂区更大, 因此, 其冲击吸收功更高, 韧性更好^[22-24]。值得注意的是, 不加 Nb 的 1# 钢板在 400 °C 回火时冲击功值存在凹点, 仅为 9.1 J, 发生脆化。根据 2.4 试验结果, 结合断口形貌分析认为 400 °C 左右是 65Mn 钢碳化物析出最快的温度区, 此时合金元素扩散速度和析出驱动力匹配最佳, 碳化物在晶界大量析出聚集, 导致冲击试验时沿晶断裂, 因此断裂韧性明显下降。而 Nb 的促进碳等合金元素

扩散和碳化物球化作用使加Nb刀具钢的碳化物在晶内析出且迅速球化,在冲击试验时很少发生沿晶断裂,因此,冲击韧性未出现明显脆性区,只存在350~400℃冲击功值平台区。

4 结论

1) 相同工艺制度生产的65MnNb热轧态钢板的珠光体团直径较普通65Mn钢板珠光体直径小21 μm,珠光体片层间距小0.14 μm。

2) 在250~500℃回火时,随回火温度升高,65Mn和65MnNb两种刀具钢试样的强度和硬度均逐渐降低,冲击功和伸长率均逐渐提高;回火温度相同时,65MnNb试样的强度和冲击功更高,抗拉强度高约100 MPa,而屈服强度和冲击韧性提高值

随回火温度升高而增大,250℃回火时屈服强度高104 MPa,冲击韧性高2 J,500℃回火时屈服强度高304 MPa,冲击韧性高7.5 J。400℃为65Mn钢试样的回火脆化温度,冲击功仅为9 J,而65MnNb试样在350~400℃回火时冲击功值存在平台区,无明显回火脆化温度。

3) 65Mn刀具钢试样的强韧性匹配最佳回火温度是450℃左右,抗拉强度1 263 MPa,屈服强度1 067 MPa,硬度46.6HRC,冲击功达18.7 J;而65MnNb刀具钢试样的强韧性匹配最佳的回火温度是350℃左右,抗拉强度1 820 MPa,屈服强度1 753 MPa,硬度52.3HRC,冲击功22.1 J,力学性能均好于65Mn刀具钢试样。

参考文献

- [1] 陈腾升,张莉芹,刘中柱,等. Nb对V、N微合金化压力容器钢珠光体形态及低温韧性影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(1): 72-80.
- [2] 王月香,周平,马光亭,等. 低成本高性能新型风电用钢的研究与开发[J]. 轧钢, 2015, 32(3): 16-19.
- [3] 汪杰,吴保桥,张建,等. Nb-V、Nb-Ti对重型热轧H型钢强韧性的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(11): 47-52.
- [4] 刘金岳,成卓,黄禹赫,等. 铌微合金化1 800 MPa级热成形钢的高温热塑性[J]. 钢铁, 2023, 58(8): 169-177.
- [5] 王宁,李毅,杜林秀,等. 高强度汽车车轮钢的研制及结构减重分析[J]. 轧钢, 2006, 23(5): 1-4.
- [6] 周景一,朱立光,孙立根,等. Nb微合金化汽车用TWIP钢的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(3): 9-16.
- [7] 王睿,董思月,付培茂,等. 铌微合金对1GPa级热轧双相钢组织及性能影响[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(4): 520-528.
- [8] 李红英,魏冬冬,林武,等. X80管线钢冲击韧性研究[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 73-78.
- [9] 张朝磊,邵洙浩,李骞,等. 铌微合金化技术在中高碳钢中的应用现状与发展[J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5102-5106.
- [10] 孙曼丽,江波,陈刚,等. Nb微合金化对高碳钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(4): 71-74.
- [11] 苏雪,王厚昕,朱敏,等. 原位观察铌对高碳钢珠光体转变的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(4): 88-96.
- [12] 侯清宇,丁敬,廖振成,等. 铌对65SiCrV6弹簧钢氧化增重的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(11): 144-156.
- [13] 李金展,马军涛,郑喜平. 热处理工艺对65Mn犁铧力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 215-217.
- [14] 王冬晨,李晓源,韦丽金,等. 回火温度对高碳钢断裂韧性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(6): 494-499.
- [15] 刘强,谢建新. 铌对20MnSi钢奥氏体化和静态再结晶的影响[J]. 轧钢, 2002, 19(6): 17-19.
- [16] 刘旭辉,曾斌,梁亮,等. 回火工艺对900 MPa级热轧卷板组织与性能的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(10): 74-78.
- [17] 刘庆冬,刘文庆,彭剑超. 回火时间对铌钒微合金钢中析出物的影响[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(4): 118-122.
- [18] 杨莉莉. 回火温度对高钒含铌模具钢组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(18): 197-199.
- [19] 何立新,陈连生. 回火温度和保温时间对冶金锯片用65Mn钢性能的影响[J]. 河北冶金, 2013, 215(11): 16-19.
- [20] 吉光,高秀华,龙金花. 微合金元素Nb对高碳合金钢动态再结晶行为的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 26-30.
- [21] 张琪,王厚昕,朱敏,等. Nb微合金化高碳钢奥氏体晶粒长大原位观察[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(8): 840-847.
- [22] 王立民,彭梦都,刘正东,等. 热处理工艺对45CrMoV钢组织和冲击韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(2): 166-170.
- [23] 王立民,彭梦都,雷玖芳. 45CrMoV钢冲击断口形貌[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(1): 133-136.
- [24] 袁鹏举,刘杰,付常伟,等. 硼含量对H型钢低温冲击韧性的影响[J]. 轧钢, 2015, 32(3): 82-84.