



高镜面塑料模具钢 P80 在线固溶工艺实践

李声延, 刘小林, 董富军, 廖桑桑, 孙乐飞
(新余钢铁股份有限公司, 新余 338001)

摘要:采用 Gleeble 3800 热模拟试验机进行了 P80 在线固溶工艺试验研究,发现开冷温度在 870 ~ 930 °C 范围内,温度越低,在线固溶再经过时效后,硬度越高,方差减少,硬度波动降低。在保证获得单相组织,且硬度均匀的前提下,确定了开冷温度与冷却速度等工艺参数:在线固溶工艺为开冷温度 860 ~ 880 °C、冷却速度 10 °C/s,返红温度 < 400 °C。利用上述工艺参数进行生产实践,发现在线固溶后的 P80 钢板经过 520 °C/3 h 时效处理后,组织由贝氏体+马氏体转变为粒状贝氏体+板条贝氏体,硬度为 40.1 HRC,满足技术要求,可以实现对离线固溶工艺的替代。

关键词:P80 钢; 塑料模具钢; 在线固溶; 时效; 硬度

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00170

Process Practice of the On-line Solid Solution of Superior Mirror Surface Plastic Mold Steel P80

Li Shengyan, Liu Xiaolin, Dong Fujun, Liao Sangsang, Sun Lefei
(Xinyu Iron & Steel Co., Ltd., Xinyu 338001)

Abstract: The study of P80 on-line solid solution process was tested by Gleeble 3800 thermal simulation testing machine, and the results showed that the open cooling temperature ranged from 870 °C to 930 °C, the lower the temperature, and the higher the hardness, the higher the variance and the lower the hardness fluctuation after the on-line solid solution and aging. Under the premise of ensuring that obtaining single-phase structure and uniform hardness, the process parameters such as open cooling temperature and cooling speed were determined: the open cooling temperature was 860 - 880 °C, cooling speed was 10 °C/s, and the re-reddening temperature not greater than 400 °C. Applying the above process parameters to P80 production practice, the results showed that the on-line solid solution P80 steel plate after 520 °C / 3 hours of aging treatment, the microstructure was transformed from bainite and martensitic to granular bainite and lath bainite, hardness was 40.1 HRC, which could meet the technical requirements, and could replace the off-line solid solution process.

Key Words: P80 Steel; Plastic Mold Steel; On-line Solid Solution; Aging; Hardness

P80 钢(10Ni3MnCuAl)是一种具有良好镜面抛光效果的模具钢,经过精抛光以后其光亮程度不亚于优质水银镜面,适用于高镜面、高精度的塑料模具制造,如家用电器等透明制品模具,家电外壳、汽车内饰等制品的模具^[1-3]。在 P80 钢生产过程中,将钢板加热到 900 °C 左右,快速冷却形成 Al、Ni、Cu 等元素的过饱和固溶体,再经过 300~600 °C 的人工时效,形成弥散的第二相,达到提高硬度和强度的效果,这是 P80 钢在生产中至关重要的固溶与时效工艺。传统的生产工艺为离线固溶处理,不仅能源消耗量大,且工艺流程长,导致制造成本较高^[4-5]。如果能够利用钢板轧后的余热,使用在线超快速冷却装备,达到在线固溶的工艺,将大幅降低生产成本,提高产品的竞争优势。所以对 P80 钢及其它预硬化模具钢的在线固溶与时效处理工艺进行研究具有

重要的现实意义。

1 试验材料及方法

P80 钢的化学成分见表 1,硬度要求:38~42 HRC。

表 1 P80 钢化学成分(质量分数)

Table 1 P80 steel Chemical composition

项目	C	Si	Mn	S	P	Alt	Ni	Mo	Cu
技术要求	0.06 ~ 0.16	≤ 0.40	1.40 ~ 1.70	≤ 0.010	≤ 0.030	~1.30	2.90 ~ 3.40	0.20 ~ 0.40	0.80 ~ 1.00
试样成分	0.08	0.25	1.61	0.003	0.011	0.91	3.02	0.32	0.90

试验材料 P80 钢经过 200 t 转炉→LF 精炼→VD 炉→连铸→缓冷工序生产而成,试样成分见表 1。从截面为 250 mm × 2 070 mm 铸坯厚度 1/4 处取样,如图 1 所示,加工成 Φ10 mm × 15 mm 动态热压缩试

样,通过 Gleeble 3800 热模拟试验机模拟在线固溶工艺。P80 钢在线固溶技术研究试验方法:试样的加热速率为 1 °C/s,目标温度为 1 200 °C,在 1 200 °C 温度下保温 4 min,然后以 5 °C/s 的冷却速率将试样冷却到 1 000 °C,保温 1 min,变形量为 40%,变形速率为 1 s⁻¹,再以 1 °C/s 的冷却速度分别将试样冷却至 870、900、930 °C,随后分别以 20、10、5、1 °C/s 的冷速冷却至室温,再到箱式热处理炉中进行 520 °C 保温 3 h 的时效处理,然后分别检测各试样心部的维氏硬度和金相组织。具体在线固溶试验方案如图 2。

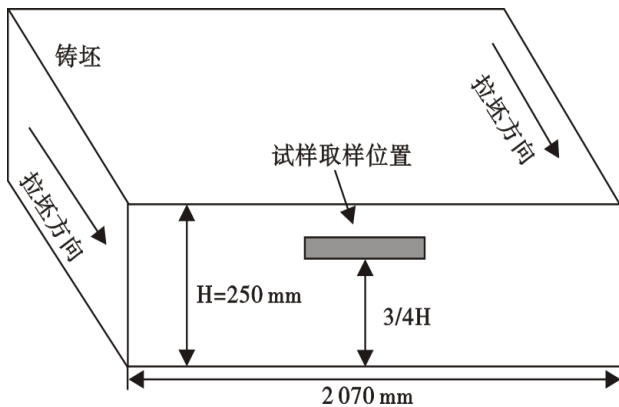


图 1 试样在铸坯上的截取位置

Fig. 1 The cutting position of the sample on the billet

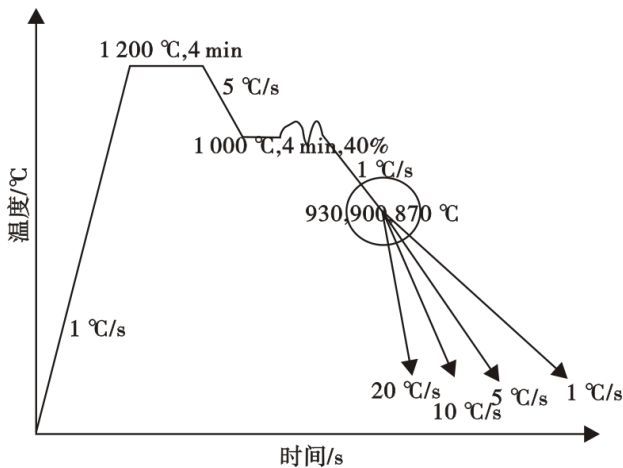


图 2 在线固溶试验方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the on-line solid solution testing plan

2 试验结果与讨论

2.1 固溶工艺对 P80 钢组织的影响

图 3~图 5 为不同开冷温度及冷却速度对 520 °C 时效后 P80 钢组织的变化规律。从图 3~图 5 可以看出,组织为回火贝氏体,主要为板条贝氏体。试验

钢在目标温度(930、900、870 °C)下分别以不同冷却速率(1、5、10、20 °C/s)冷却至室温,经过 520 °C 时效 3 h 后,在相同的冷速下,开冷温度的提高,钢中的板条贝氏体含量逐渐增加,对比图 3(a)、图 4(a)、图 5(a),可以看出在 930 °C 开冷条件下,板条贝氏体的原奥氏体晶界清晰可见,板条束排列有序,除了板条贝氏体外,还有粒状贝氏体,当开冷温度降低至 900 °C 时,由于晶界处富集的碳原子扩散,形成富碳的奥氏体岛分布在贝氏体铁素体基体上,导致板条束密度降低,粒状贝氏体增加,而当开冷温度降低至 870 °C 时,碳原子进一步扩散,原奥氏体晶界已经模糊不可见,板条束密度进一步降低,形成了更多的粒状贝氏体;在相同的开冷温度下,冷却速度的提高,获得的板条贝氏体含量增多,粒状贝氏体含量减少,变形后的冷却过程将发生静态再结晶、软化和奥氏体晶粒长大,但是提高冷却速度,影响了静态再结晶晶粒的长大,不同于图 3(a)、图 4(a)、图 5(a) 的是图 3(d)、图 4(d)、图 5(d) 同样晶界数量较少,却是由于冷速过快,破碎后的晶粒来不及长大形成新的奥氏体晶粒造成的,然而,可以观察到更多细小的贝氏体铁素体。

2.2 固溶工艺对 P80 钢硬度的影响

不同在线固溶工艺条件下 P80 钢经过 520 °C 保温 3 h 时效处理后的维氏硬度值如图 6。

在 930 °C 下冷却时,随着冷却速度的增加,硬度均值先增加后降低再增加,冷却速度 5 °C/s 时,硬度均值最高,达 381 HV。900 °C 下冷却,随着冷却速度的增加,硬度均值先增加后降低,冷却速度 5 °C/s 时,硬度均值最高,达 385 HV。870 °C 下冷却,随着冷却速度的增加,硬度均值降低,趋于稳定,冷却速度 1 °C/s 时,硬度均值最高,达 389 HV。根据图 3 ~ 图 5 显示,开冷温度 870~930 °C 范围内,冷却速度在 1~20 °C/s 冷却的试样经过时效后,可以保证硬度满足 38~42 HRC。不同温度下硬度值的波动情况如表 2,从表 2 可以看出,降低开冷温度,硬度均值增高、波动减小,所以轧后应控制开冷温度,建议开冷温度按 $A_{C3}+(30\sim 50)$ °C 进行控制,根据经验公式 $A_{C3}(°C) = 910 - 203C^{1/2} - 15.2Ni + 44Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W \approx 830$,即开冷温度为 860~880 °C。

3 P80 钢在线固溶生产实践

采用 250 mm × 2 070 mm 断面坯料轧制成 20 mm × 2 100 mm × 7 500 mm (厚度 × 宽度 × 长度) 的钢板,板坯的化学成分见表 1,坯料经过加热

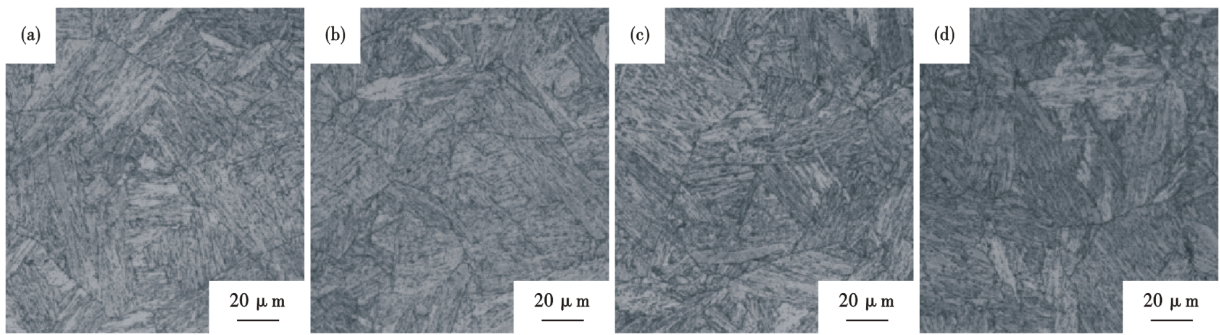


图3 开冷温度 930 °C 下试验钢 520 °C 3 h 时效后的 P80 钢组织:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

Fig. 3 Microstructure of P80 steel after 3 h aging at 520 °C by open cooling temperature at 930 °C:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

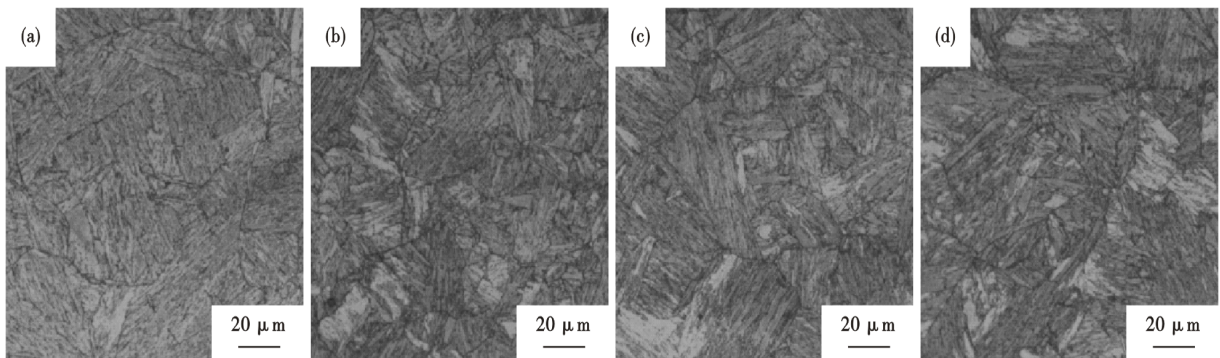


图4 开冷温度 900 °C 下试验钢 520 °C 3 h 时效后的 P80 钢组织:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

Fig. 4 Microstructure of P80 steel after 3 h aging at 520 °C by open cooling temperature at 900 °C:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

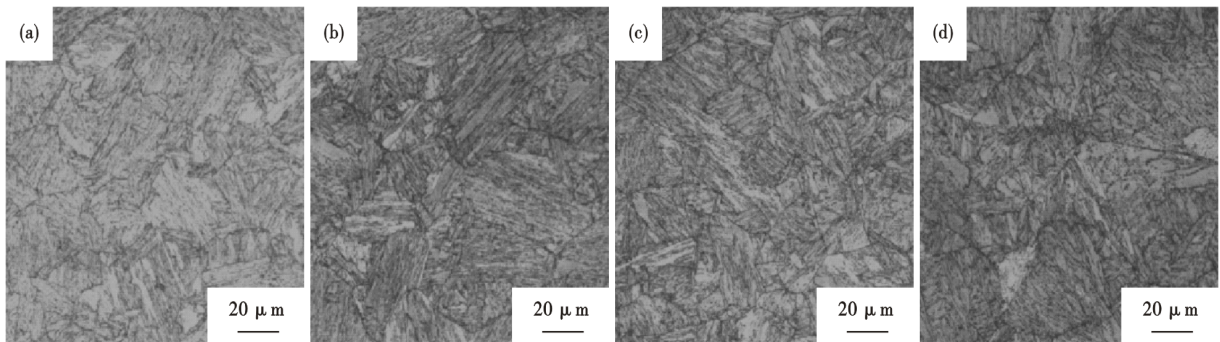


图5 开冷温度 870 °C 下试验钢 520 °C 3 h 时效后的 P80 钢组织:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

Fig. 5 Microstructure of P80 steel after 3 h aging at 520 °C by open cooling temperature at 870 °C:(a)1 °C/s;(b)5 °C/s;(c)10 °C/s;(d)20 °C/s

表 2 520 °C 时效后 P80 钢的硬度值方差、标准差和均值
 Table 2 Variance, standard deviation and mean value of hardness after 520 °C aging of P80 steel

开冷温度/°C	方差	标准差	均值, (HV10)
870	23.84	4.88	383
900	71.33	8.45	377
930	54.81	7.40	374

炉加热,板坯在预热段时间大于 2 h,坯料表面需涂特殊功能的防氧化涂料,避免含镍钢表面麻点,均热段温度 1 200~1 250 °C,板坯出炉后及时进行粗除鳞,开轧温度≥1 000 °C,轧制工艺采用再结晶区轧制,目标终轧温度≥880 °C;采取双道次轧制,轧制末三道调节上下轧辊辊速,慢速抛钢,有效改善钢板尾部翘曲,确保钢板进超快冷 UFC(Ultra Fast Cooling)时板型良好。轧后在 UFC 前面的辊道上静止等

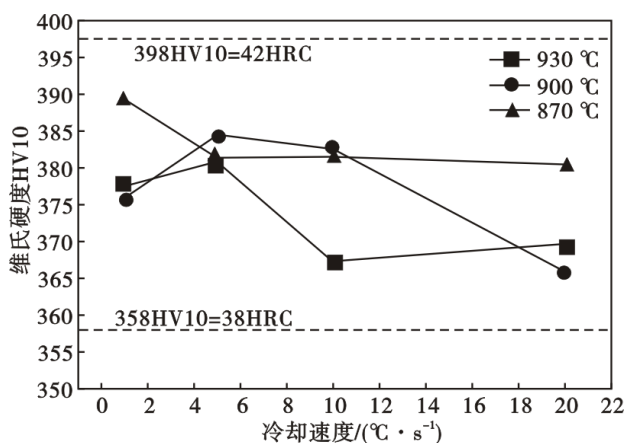


图6 不同开冷温度下冷却速度对P80钢硬度的影响

Fig. 6 Hardness of P80 under difference open cooling temperature and cooling speed

待,以确保开冷温度(870±10) °C再进UFC冷却,冷却速度约为10 °C/s,控制钢板冷却后返红温度≤400 °C。钢板轧后进行时效处理,时效工艺为520 °C,保温时间为3 h。

分别在DQ(Direct Quenching)态与时效后钢板上进行取样,试样尺寸为150 mm × 150 mm,对试样进行金相组织观察和硬度检测,金相样品用4%的硝酸酒精溶液侵蚀,用Image-Alm光学显微镜观察显微组织,利用洛氏硬度计按GB/T230.1-2009标准测量热处理后试样的硬度值,每个试样测量表面3个点与心部点。

3.1 时效工艺对P80钢组织与硬度的影响

DQ态试样和经520 °C保温3 h的时效处理后试样的全厚度金相组织如图7、图8所示。钢板硬度见表3。

表3 P80钢不同状态下的硬度(HRC)

Table 3 Hardness of P80 steel plate under different conditions (HRC)

工艺	表面1	表面2	表面3	表面均值	横截面心部
DQ态	37.6	37.1	36.9	37.2	39.0
时效态	39.6	40.6	40.1	40.1	40.9

从图7、图8及表3可以看出,P80试验板在线淬火后组织为贝氏体+板条马氏体,钢板心部马氏体含量大,经过回火后,组织为回火贝氏体,横截面组织均匀。钢板DQ态表面硬度均值为37.2 HRC,心部硬度为39.0 HRC,在快速冷却后获得大量的板条马氏体,但是在钢板心部由于成分偏析,提高了奥氏体稳定性,存在大量未发生马氏体转变的残余奥氏体,即图7(c)中的白色部分,残余奥氏体与贝氏体、马氏体混合在一起,造成心部硬度高^[6]。在时效过程中,首先马氏体中的碳发生扩散,碳化物在晶界处析出,形成板条状的贝氏体组织,随着碳的继续扩散,界面处的碳浓度降低,碳化物难以在界面处析出,浓缩成富碳的奥氏体岛分布在贝氏体铁素体上,在冷却至室温的过程中形成M/A岛,最终形

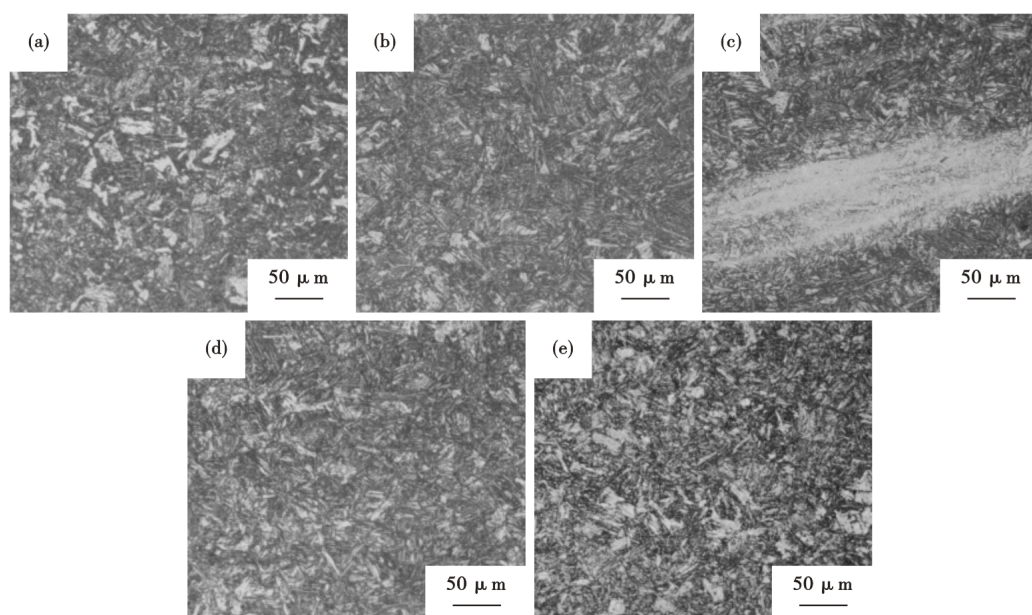


图7 10 °C/s冷速下DQ态P80钢板全厚度组织:(a)上表面、(b)1/4、(c)1/2、(d)3/4、(e)下表面

Fig. 7 Microstructure of DQ condition P80 plate full thickness by cooling speed 10 °C/s: (a) upper surface, (b) 1/4, (c) 1/2, (d) 3/4, (e) lower surface

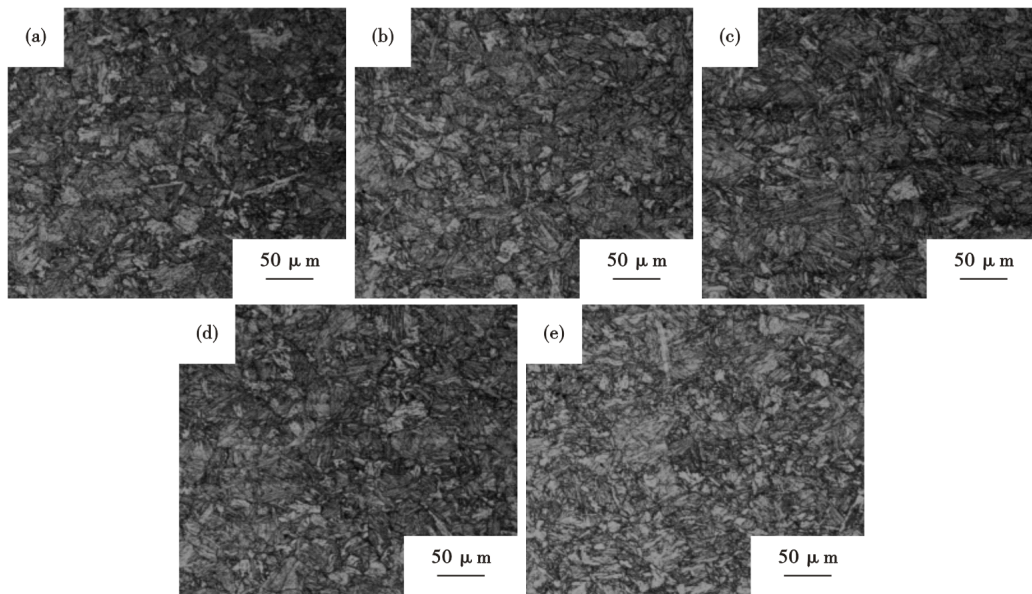


图8 520 °C时效后P80钢板全厚度组织:(a)上表面、(b)1/4、(c)1/2、(d)3/4、(e)下表面

Fig. 8 Microstructure of P80 plate full thickness aging at 520 °C: (a)upper surface、(b)1/4、(c)1/2、(d)3/4、(e)lower surface

成粒状贝氏体,所以经过520 °C/3 h时效,钢板组织以板条贝氏体为主,同时存在部分的粒状贝氏体。从图8(c)可以看到在钢板的心部由于成分偏析造成的残余奥氏体也在时效过程中被降解。

DQ态钢板经过520 °C保温3 h回火后,钢板表面硬度由37.2 HRC提高到40.1 HRC,钢板心部硬度由39.0 HRC提高到40.9 HRC,钢板表面与心部比,硬度增加幅度大,钢板横截面硬度均匀性较好。

3.2 结果讨论

对520 °C/3 h时效处理后的试样在扫描电子显微镜下进行全厚度组织(放大5 000倍)观察,如图9。

从图9看主要是板条贝氏体,对钢中析出物使用扫描电镜自带的EDS能谱仪进行3个点成分分析,结果如图10和表4。

表4 EDS分析P80钢不同位置的成分含量(质量分数)
Table 4 EDS analysis the component content at different positions of the P80 steel

位置	Ni	Al	Cu	Mn	Fe
1点	2.81	1.13	7.20	2.86	82.83
2点	3.03	1.47	7.85	2.62	81.00
3点	2.69	1.37	9.42	2.89	79.56

三个点析出物主要是NiAl和Cu、Mn析出物从基体中析出,聚集长大,不同形状的析出物成分有所不同。文献[7]指出,如果钢中含有较多高密度位错,则合金原子可以通过这些高密度的位错所形成的通道快速扩散并发生形核长大,析出相位于贝氏体铁素体板条、板条间、晶界的位错聚集处形成,这是由于边界处的形状不规则,自由能较高,能够提供析出所需要的动能。文献[8-12]指出,当高温时效时,板条马氏体亚结构内的位错密度降低,亚

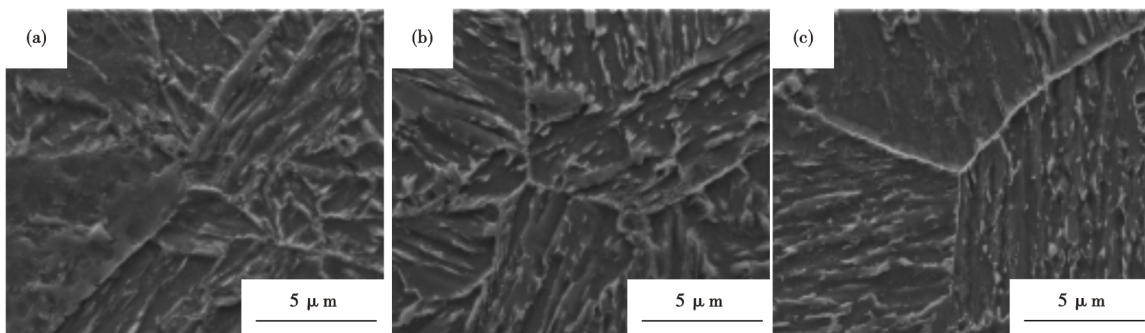


图9 在线固溶P80钢时效后的SEM组织:(a)表面;(b)1/4处;(c)1/2处

Fig. 9 SEM microstructure of P80 steel after on-line solid solution and aging: (a)surface;(b)1/4;(c)1/2

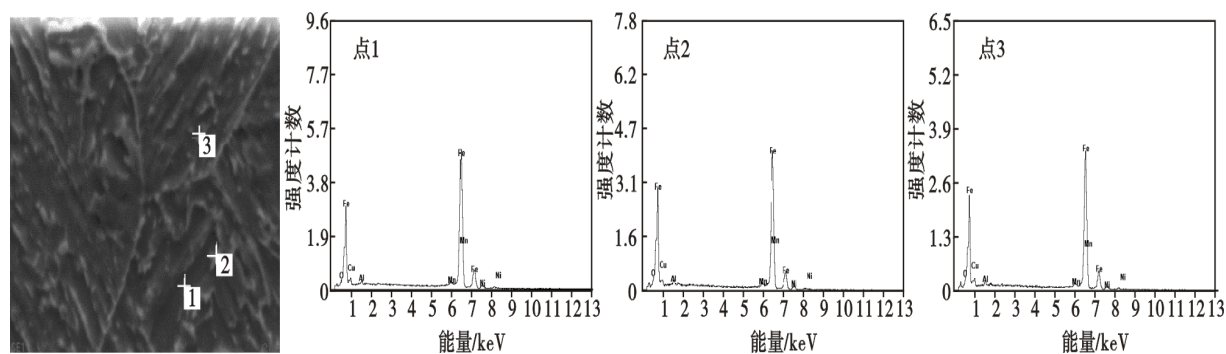


图10 EDS分析P80钢不同位置的析出物

Fig. 10 EDS analysis of the precipitates from different positions of P80 steel

结构发生回复再结晶,基体组织产生回火软化,与此同时,板条马氏体有点状碳化物析出,并在位错线和板条界上形成细小的 Ni_3Al 、 $\epsilon\text{-Cu}$ 析出相,会产生强烈的沉淀强化。

4 结论

(1)在不同的开冷温度下,随着冷却速度的增加,硬度变化趋势不一样。

(2)开冷温度在 $870\sim 930\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度越低,固溶再经过时效后,硬度越高,方差减少,硬度波动降低。为保证硬度均匀性且满足 $38\sim 42\text{ HRC}$,开冷温度应设为 $860\sim 880\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3)在线DQ的P80钢,钢板组织为贝氏体+板条马氏体,经 $520\text{ }^\circ\text{C}$ 和保温 3 h 时效后,钢板组织为板条贝氏体+粒状贝氏体,硬度为 40.1 HRC ,满足技术要求。

参考文献

- [1] 许志刚,叶林凤. 目前国内外主流塑料模具钢浅析[J]. 模具制造,2010(11):86.
- [2] 杨贵根,朱祖昌. 世界模具钢生产的现状和进展[J]. 热处理技术与装备,2006,27(6):5-13.
- [3] 肖文军,徐春晖,周天瑞. 我国塑料模具钢的发展前景及应用现状[J]. 南方金属,2006(149):1-4.
- [4] 张宽,镇凡,曲锦波. 固溶和时效处理对塑料模具钢NAK80组织和硬度的影响[J]. 热加工工艺,2014,43(20):193-196.
- [5] 张洪奎,续维,黄俊春. 析出硬化塑料模具钢NAK80的研制[J]. 钢铁,2002,37(增刊):495-497.
- [6] 李声延,廖桑桑,张超,等. 特厚P20模具钢心部残余奥氏体的控制方法[J]. 江西冶金,2020,40(3):34-37.
- [7] 朱兴元,刘忆. 金属学与热处理[M]. 北京:北京大学出版社,2006:94-100.
- [8] R Schnitzer, M Schober, S Zinner. Effect of Cu on the evolution of precipitation in an Fe-Cr-Ni-Al-Ti maraging steel [J]. Acta Mater, 2010,58(10):3733-3741.
- [9] Yi Luo. Characterization of nanoscale precipitates in 10Ni3Mn-CuAl Steel by three dimensional atom probe tomography [J]. Advanced Materials Research, 2013, 634-638(1):2135-2139.
- [10] 钟金红. 时效硬化钢P80A中Cu的析出强化规律研究[J]. 宽厚板,2008,14(1):24-29.
- [11] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:9-10.
- [12] 吕学飞,焦其慧. 镜面塑料模具钢P80R热轧扁材表面裂纹分析和工艺改进[J]. 特殊钢,2017,38(4):20-22.