

# 预应变和烘烤对QP980冷轧板材组织与力学性能的影响

周湛淞 方刚 张钧萍 阎换丽 李晓瑜

(中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

**摘要:** 使用万能拉伸试验机、摆锤冲击试验机、扫描电镜和X射线衍射仪等设备, 研究预应变+烘烤对QP980冷轧板材组织和力学性能的影响。结果表明: 随着预应变量的增加, QP980冷轧板材的极限弯曲性能和冲击性能下降; 经过170℃、20 min的烘烤处理后, 材料的冲击性能提高, 烘烤硬化(BH)性能随预应变的增加而升高; X射线衍射表征分析结果表明, 烘烤未造成相变的发生, 残余奥氏体中的碳含量有所降低; 通过扫描分析发现烘烤处理后, 冲击断口中韧性断裂区域显著增加。

**关键词:** QP980 烘烤 组织 力学性能

中图分类号: TG142

文献标志码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240114

## Effects of Pre-strain and Baking on Microstructure and Mechanical Properties of QP980 Cold Rolled Sheet

Zhou Zhansong, Fang Gang, Zhang Junping, Yan Huanli, Li Xiaoyu

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122)

**Abstract:** The effects of pre-strain and baking on the microstructure and mechanical properties of QP980 cold rolled sheet were studied by means of universal tensile testing machine, pendulum impact testing machine, Scanning Electron Microscope (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD). The results show that with the increase of pre-strain, the ultimate bending properties and impact properties of QP980 cold rolled sheet decrease. After baking at 170 °C for 20 min, the impact properties of the material increase, and the Bake Hardening (BH) properties increase with the increase of pre-strain; X-ray diffraction analysis shows that baking does not cause phase transformation, and the carbon content in residual austenite decreases; Scanning analysis shows that the ductile fracture area in the impact fracture increases significantly after baking treatment.

**Key words:** QP980, Baking, Microstructure, Mechanical properties

### 1 前言

随着碳中和目标与路径的逐步清晰, 汽车轻量化的发展趋势加快<sup>[1]</sup>。汽车轻量化在保证汽车强度和安全性性能的前提下, 减轻汽车的整体质量, 从而获得提高机动性能和节能减排的双重优势。尽管铝合金、镁合金、碳纤维等材料具有更好的轻量

化效果, 但是高强度钢在抵抗车身变形、能量吸收、安全性能等方面的优势仍然无可替代。目前, 国内外的各大汽车生产企业均提升了先进高强钢的使用比例<sup>[2-3]</sup>。

淬火配分(Quenching and Partition, Q&P)钢是典型的第三代先进高强钢, 在少量合金元素添加的前提下, 通过特殊的热处理工艺获得了优良的

作者简介: 周湛淞(1994—), 男, 助理工程师, 硕士学位, 研究方向为先进高强钢。

参考文献引用格式:

周湛淞, 方刚, 张钧萍, 等. 预应变和烘烤对QP980冷轧板材组织与力学性能的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2024(6): 24-30.

ZHOU Z S, FANG G, ZHANG J P, et al. Effects of Pre-strain and Baking on Microstructure and Mechanical Properties of QP980 Cold Rolled Sheet [J]. Automobile Technology & Material, 2024(6): 24-30.

力学性能,具有广阔的应用前景。淬火配分工艺使C原子从马氏体等基体组织中充分扩散进入奥氏体中,从而获得室温下也能稳定存在的残余奥氏体<sup>[4-5]</sup>。为了保证车身的表面质量以及美观度,烘烤工艺必不可少。烘烤过程会造成残余奥氏体中的C原子发生扩散,与淬火配分工艺的设计原理冲突,导致QP钢组织和力学性能的变化,需要更加深入的组织力学性能研究。研究预应变和烘烤对QP980冷轧板材力学性能的影响,并通过微观组织分析影响机理。

## 2 试验材料和试验方法

### 2.1 试验材料

试验材料为国内某钢企生产的QP980轧制板材,板材厚度为1.4 mm,其化学成分如表1所示。主要的添加元素为Si、Mn,其中Mn是一种主要的奥氏体稳定性元素,能扩大奥氏体相区,形成无限固溶体,降低马氏体形成温度( $M_s$ )<sup>[6]</sup>。Si是非碳化物形成元素,在QP钢的配分过程中,能有效降低渗碳体的析出,促进C元素在奥氏体中的富集<sup>[7]</sup>。

表1 QP980化学成分(质量分数) %					
C	Si	Mn	P	Al	Fe
0.23	1.67	2.09	0.009 4	0.043 8	余量

图1所示为QP980原始板材的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM)照片。较高的Mn元素含量,导致马氏体边部亮度较高,马氏体、铁素体区别明显,形貌较为圆润光滑的为马奥岛组织,如放大图所示。QP980原始板材的组织为马氏体、残余奥氏体和铁素体。

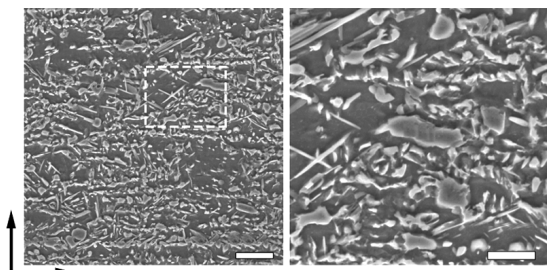


图1 QP980轧制板材原始组织

### 2.2 试验方法与测试技术

使用烘箱进行烘烤,烘烤参数设置为170℃、

20 min,以模拟白车身的涂装工艺。预应变分别取2%、4%以模拟烘烤前的冲压过程,并与原始板材进行对比。

拉伸试验依据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,采用50 mm的标距测试QP980的力学性能,试样长度方向垂直于轧向,使用日本岛津公司生产的AG-50 kN型万能拉伸机测试烘烤前后的拉伸力学性能。

弯曲试验按照VAD 238-100-2017《Plate Bending Test for MetaMic Materials》执行。为尽量减少三轴应力对边缘区域的影响,平面试样尺寸设计为60 mm×60 mm,下压冲头半径为0.6 mm,支撑辊半径为15 mm,辊间距设置为板材厚度的2倍,受力方向垂直于轧制方向。

为了符合GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》中对冲击试样的要求,通过钻孔铆接的形式,将7片1.4 mm厚的板材铆接为55 mm×10 mm×10 mm规格的试样,设计为V型缺口,用ZBC 2302-4金属摆锤冲击试验机测试室温冲击性能,试样长度方向垂直于轧制方向。

微观组织试验样品经砂纸打磨后使用体积分数为4%的硝酸酒精腐蚀,采用TESCAN MIRA 3场发射扫描电子显微镜进行显微观察。样品表面磨平后,使用体积分数为6%的高氯酸酒精溶液进行电解抛光消除表面应力,使用DMAX 2500PCX射线衍射仪进行测试。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 烘烤对微观组织的影响

图2所示为不同预应变量的QP980板材在170℃、20 min的烘烤前和烘烤后的SEM形貌对比结果,基体组织中未发现明显的碳化物颗粒析出,与王博等人的试验结果一致<sup>[8]</sup>。通常,烘烤会造成C原子的扩散,扩散的C原子在晶体的缺陷处偏聚,当达到一定条件时会以碳化物的形式析出。试验结果,显示170℃、20 min的烘烤工艺不足以使得C以碳化物的形式析出,在此温度条件下,主要涉及C原子的扩散,碳化物的析出现象不显著。

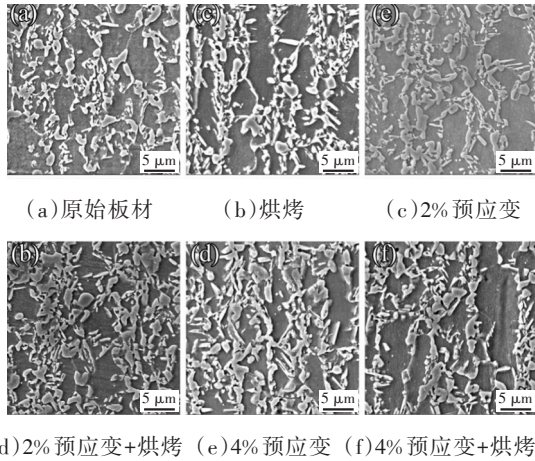
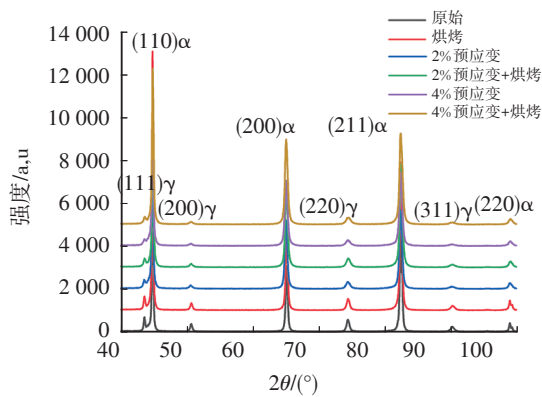
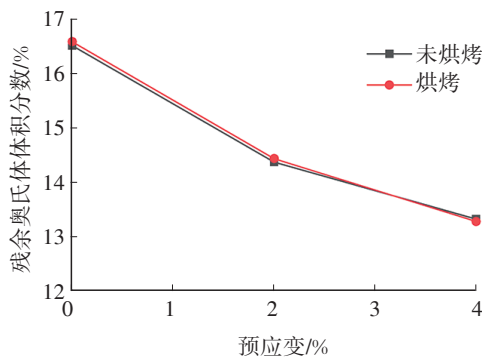


图2 不同状态下QP980板材的扫描组织

对预应变和烘烤后的QP980板材进行X射线表征,并与原始板材进行对比,图3分别为不同状态下材料的衍射图谱以及对应的残余奥氏体体积分数。结果显示,预应变造成了相变诱导塑性(Transformation Induced Plasticity, TRIP)效应的发生,残余奥氏体发生了相变,残余奥氏体的体积分数随着预应变量的增加而降低。烘烤后,残余奥氏体的体积分数没有变化,即170℃、20min的烘烤未造成残余奥氏体的相变。



(a) XRD 衍射图谱



(b) 烘烤前、后残余奥氏体体积分数对比

图3 烘烤处理后残余奥氏体体积分数变化

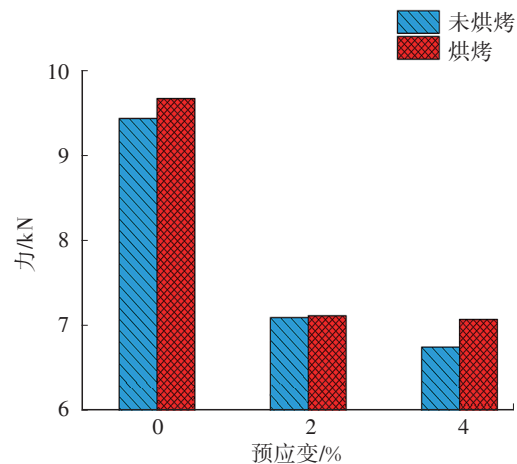
### 3.2 烘烤对极限弯曲性能的影响

汽车车身要求足够的强度及韧性以保护乘车人员的安全。车辆在碰撞后,车身主要发生凹陷应变,而凹陷最深、凹陷角度最大的部位是裂纹最容易产生的部位,极限弯曲性能对于车身性能极为重要。

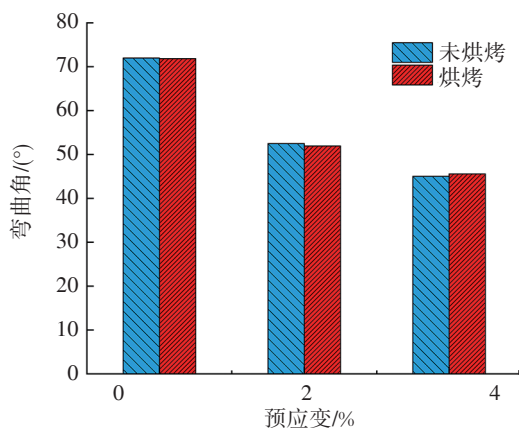
通过位移载荷曲线整理数据分别如表2和图4所示,随着预应变量的增加,材料的最大弯曲力和弯曲角度都呈下降趋势。0%~2%的预应变区间内,板材的最大弯曲力下降幅度明显;2%~4%的预应变区间内最大弯曲力下降幅度相对较小。经过170℃、20min的烘烤过程后,QP980板材的最大弯曲力略有上升,弯曲角度和烘烤前与基本保持一致。

表2 QP980 极限弯曲性能

样品状态	厚度/mm	位移/mm	最大力/kN	弯曲角/(°)
0% 预应变	1.40	8.23	9.44	71.97
0% 预应变+烘烤	1.39	8.16	9.67	71.86
2% 预应变	1.34	6.3	7.11	52.48
2% 预应变+烘烤	1.34	6.2	7.13	51.93
4% 预应变	1.31	5.52	6.76	45.02
4% 预应变+烘烤	1.30	5.68	7.08	45.55



(a) 最大弯曲力

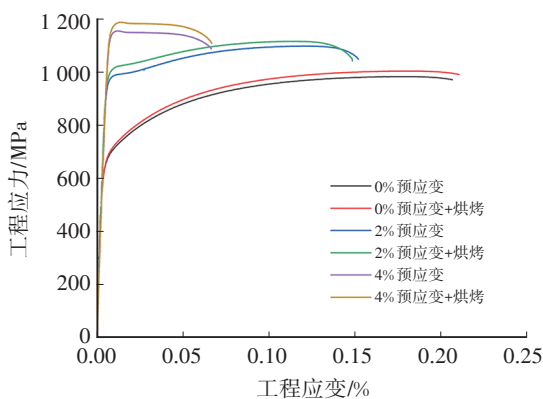


(b) 弯曲角

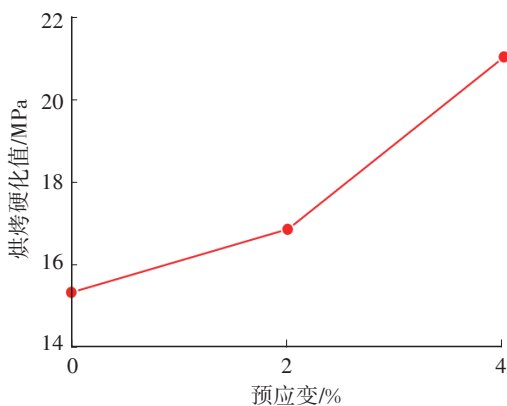
图4 弯曲性能

### 3.3 烘烤对拉伸性能的影响与分析

图5为不同预应变量和烘烤状态下QP980的工程应力-应变曲线和烘烤硬化值(烘烤前和烘烤后屈服强度之差)变化趋势。结果表明经过170℃+20min的烘烤处理后,在0~4%的预应变范围内,烘烤硬化值随预应变增加而升高,且变形量越大,增加趋势越明显。



(a) 应力应变曲线



(b) 烘烤硬化值

图5 烘烤对QP980拉伸力学性能的影响  
塑性变形过程会导致材料中的位错密度大幅

升高<sup>[9]</sup>,如:

$$\rho = \beta^2 / (4.35b^2) \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为位错密度, $\beta$ 为(211)<sub>α</sub>衍射峰的半高宽, $b$ 为柏氏矢量( $2.48 \times 10^{-10}$ ).

通过公式计算,原始板材、经过2%的预应变及经过4%的预应变的位错密度分别达到 $1.17 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 、 $2.93 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 、 $3.39 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 。通常,材料的烘烤硬化性能与材料基体中的可动位错密度和固溶C原子数量有关。烘烤处理过程中,固溶C原子在高温的作用下进行扩散并钉扎位错,形成Cottrell气团,使得位错移动需要更大的应力<sup>[10-11]</sup>。综上所述,在0~4%的预应变范围内,预应变程度越高,可动位错密度越高,烘烤硬化性能越好。

### 3.4 烘烤对冲击性能的影响与分析

测试不同状态下的QP980板材的冲击力学性能,每种状态下的试样测试3次,记录冲击吸收功并取平均值。图6为原始板材、2%预应变、4%预应变的QP980板材经过170℃、20min烘烤前、后的室温冲击性能趋势。由图6可知,原始板材的冲击吸收功最高达14.36J,经2%预应变后,冲击吸收功降低为7.75J,4%预应变的板材最低为5.72J。烘烤后,显著提升了QP980板材的冲击力学性能,原始板材、2%预应变、4%预应变的冲击性能分别提升了8.48J、4.75J、1.54J,变形量越小,提升效果越好。

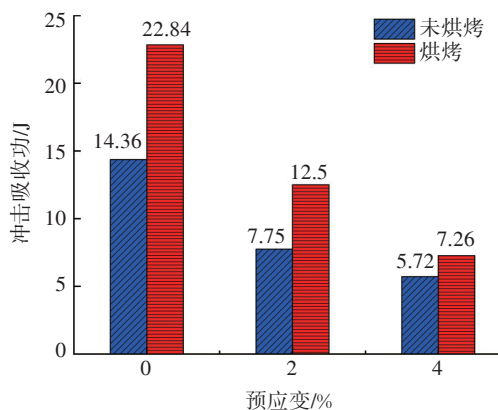


图6 预应变及烘烤对材料冲击吸收功的影响

如图7所示为原始板材、2%预应变以及4%预应变经过170℃、20min烘烤处理前、后的宏观扫描断口形貌。

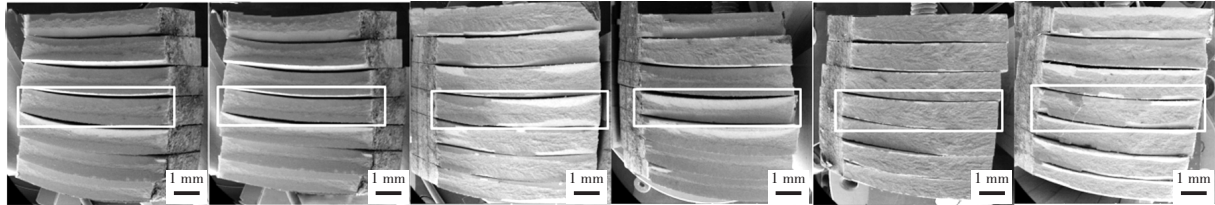
选择中心叠片板材的断口进行分析,从图可以明显分辨,边部和心部的宏观形貌有着显著的

差别,边部呈亮白色,心部呈浅灰色。随着应变量的增加,亮白色组织的比例降低,浅灰色组织的比例增加。尤其是在4%的应变下,边缘只有宽度不足1 mm的断续的亮白色组织。而经过烘烤后,亮白色区域的面积大幅度增加。

将冲击断口心部的组织进行放大观察。图9所示为中心呈浅灰色区域的微观断口形貌,中心断口形貌呈现冰糖状的光滑镜面,是典型的解理断裂形式,解理面之间出现微观裂纹。原始板材的中心微观断裂面上,出现了少量分布较为均匀的韧窝以及撕裂脊,因此原始板材的冲击断裂形式为韧脆结合的混合断裂,以此也可以反映出原始板材的冲击吸性能较好的原因。随着预应变量的增加,韧窝的分布明显减少,预应变量为4%

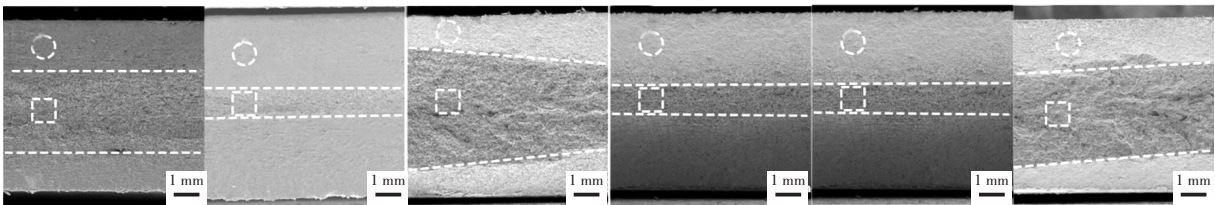
时,几乎看不到韧窝和撕裂脊的存在,并且微观裂纹分布数量和深度也随着变形量的增加而增加。

图10所示为边部亮白色区域的微观断口形貌图,边部断口微观形貌呈现典型的韧窝状,韧窝大小较为均匀。经过2%的预应变后,韧窝略有减小,并且韧窝深度逐渐变浅,甚至出现了光滑的解理面。4%的预应变后,韧窝的变化更为显著,韧性断裂区域显著减小,韧窝小而浅,区域内出现较大面积的解理面。170 ℃、20 min的烘烤处理后,韧窝有略微增大,深度增加,出现了有利于韧性的撕裂脊。变化最为显著的是4%的预应变条件下,烘烤后出现较大面积的韧窝,只有少量解理面存在。



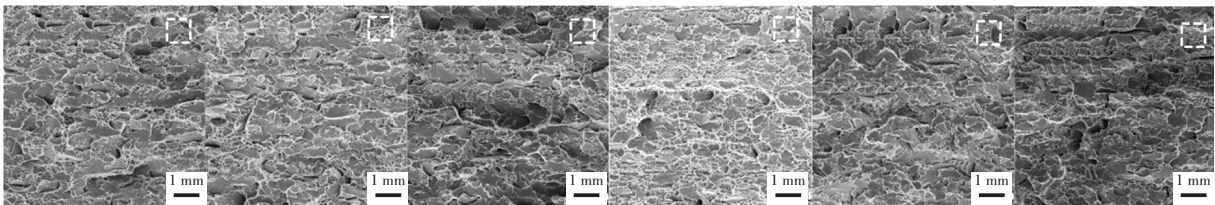
(a)原始板材 (b)原始板材+烘烤 (c)2%预应变 (d)2%预应变+烘烤 (e)4%预应变 (f)4%预应变+烘烤

图7 烘烤及预应变后材料的冲击断口



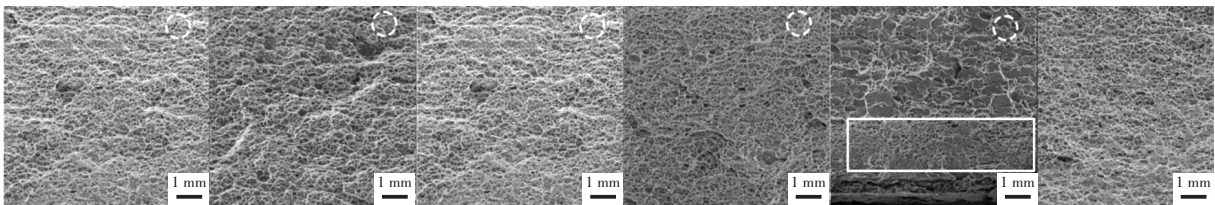
(a)原始板材 (b)原始板材+烘烤 (c)2%预应变 (d)2%预应变+烘烤 (e)4%预应变 (f)4%预应变+烘烤

图8 烘烤及预应变后材料的冲击断口



(a)原始板材 (b)原始板材+烘烤 (c)2%预应变 (d)2%预应变+烘烤 (e)4%预应变 (f)4%预应变+烘烤

图9 烘烤及预应变后材料的冲击断口



(a)原始板材 (b)原始板材+烘烤 (c)2%预应变 (d)2%预应变+烘烤 (e)4%预应变 (f)4%预应变+烘烤

图10 烘烤及预应变后材料的冲击断口

综上所述,预应变对断裂形式有极大影响,大幅增大放射形结晶状区,4%的预应变条件下,几乎整个横截面都为脆性解理面。烘烤后,边部纤维状区域的韧窝大小或者深度均有效改善,中心脆性断裂区域出现有利于韧性的韧窝。

C元素是最廉价的奥氏体稳定性元素,能显著降低奥氏体的马氏体形成温度,使得奥氏体在较低温度下也能稳定存在。残余奥氏体中的碳含量可以通过(220)<sub>γ</sub>衍射峰计算<sup>[12]</sup>:

$$a_g = l(h^2 + k^2 + l^2) / 2 \sin \theta \quad (2)$$

$$\alpha_\gamma = 0.3556 + 0.00453X(C) + 0.00009X(Mn) + 0.00056X(Al) \quad (3)$$

式中: $\alpha_\gamma$ 为晶格常数, $h$ 、 $k$ 、 $l$ 代表晶面指数, $\theta$ 为衍射角, $X(C)$ 、 $X(Mn)$ 、 $X(Al)$ 分别为C、Mn、Al的质量分数。

计算可得残余奥氏体中的碳含量如图11所示。由图11可知,经过170℃、20min的烘烤后,残余奥氏体中的C元素发生扩散有所流失<sup>[13]</sup>。QP工艺通过碳的配分获得了大量常温下也能稳定存在的残余奥氏体,在烘烤处理下,残余奥氏体的含量没有发生变化,但是C元素含量有所降低。碳元素作为最重要的奥氏体稳定性元素,对其机械稳定性极为重要,C元素的扩散造成残余奥氏体不稳定,稳定性较强的残余奥氏体也容易发生转变,更强的TRIP效应吸收了冲击作用下的能量,阻碍裂纹的扩展,因此材料的冲击性能提升<sup>[14-15]</sup>。

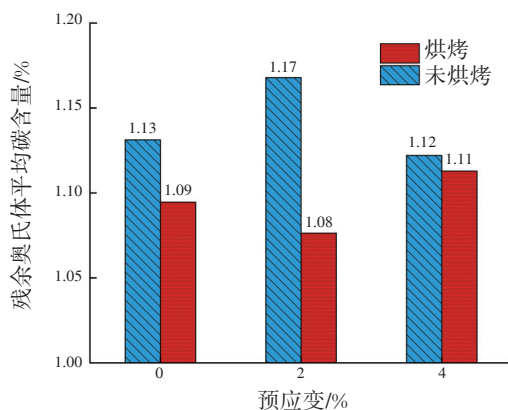


图11 烘烤对亚稳奥氏体的碳含量影响

## 4 结论

a. 烘烤未造成碳化物的析出,烘烤前、后的SEM图没有显著差别。烘烤未造成残余奥氏体相

变的发生,烘烤前、后的残余奥氏体含量基本相同。

b. 经过0%、2%、4%预应变后,QP980板材的弯曲性能下降,最大弯曲力和弯曲角度都减小。烘烤能略微提升材料的最大弯曲力,弯曲角度改变不明显。

c. 2%、4%预应变下,应变越大,位错密度越高,经过170℃、20min的烘烤后烘烤硬化效果更好。

d. 经过0%、2%、4%预应变后,QP980板材的吸收功下降,应变越大,下降越明显,烘烤使得残余奥氏体中C原子流失,降低了稳定性,有效提高了冲击吸收功。通过观察冲击断面形貌发现,预应变扩大了中心放射性结晶状区,烘烤后扩大了边部的纤维状区域,使得边部韧窝改善,中心也出现大量韧窝以及撕裂脊。

### 参考文献:

- [1] 赫尔伯特·迪斯. 积极推动中国汽车行业的碳中和进程[J]. 高科技与产业化, 2021, 27(1): 30-31.
- [2] 李光瀛, 马鸣图. 我国汽车板生产现状及展望[J]. 轧钢, 2014, 31(4): 22-32.
- [3] 中国汽车工程学会, 本田汽车公司. 中国汽车技术发展报告2017[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 6-15.
- [4] 刘和平. 高性能热应变Q&P钢的组织与性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 3-8.
- [5] 李光瀛, 王利, 马鸣图, 等. 第3代先进高强度钢AHSS汽车板的开发[J]. 轧钢, 2019, 36(5): 1-13.
- [6] CHEN L S, ZHANG J Y, TIAN Y Q, et al. Effect of Mn Pre-partitioning on C Partitioning and Retained Austenite of Q&P Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(5): 527-536.
- [7] 袁大勇, 尹垒, 马善坤. Si含量及配分处理对Q&P钢残留奥氏体量及性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(3): 96-99.
- [8] 王博, 张冬梅, 岳明明. 含铌低硅TRIP钢板烘烤硬化行为分析[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(5): 331-336.
- [9] LI Z C, CAI Z H, MISRA R D K. The Critical Factors Governing Mechanical Properties in Hot Rolled Fe-0.2C-11Mn-(0-6)Al TRIP Steels and Fracture Behavior[J]. Ma-

- terials Science and Engineering: A, 2016, 683:46-55.
- [10] BUI A H, NGUYEN M H, NGUYEN C S. Bake Hardening Effect of the Low Strength Interstitial Free Steel[J]. Metallurgical and Materials Engineering, 2020, 26(3): 293-301.
- [11] KUANG C F, LI J, ZHANG S G, et al. Effects of Quenching and Tempering on the Microstructure and Bake Hardening Behavior of Ferrite and Dual Phase Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 613: 178-183
- [12] ZHANG B G, ZHANG X M, WANG G D, et al. Age-hardening Medium Mn Steel with High Strength and Large Ductility[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 756 (22): 35-40.
- [13] LIU T, HOU H F, ZHANG X L, et al. Effects of Pre-strain and Grain Boundary Segregation of Impurity Atoms on Bake Hardening Behaviors of Ti+V Bearing Ultra-Low Carbon Bake Hardening Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 726: 160-168
- [14] 景财年. 相变诱发塑性钢的组织性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 31-45.
- [15] LIU S G, DONG S S, YANG F. Application of Quenching-Partitioning-Tempering Process and Modification to A Newly Designed Ultrahigh Carbon Steel[J]. Materials and Design, 2014, 56: 37-43.