

基于热拉伸试验的 DP590 高强钢变形本构关系及热加工图

邱霖¹, 唐建敏¹, 刘洪光²

(1. 重庆科创职业学院 汽车工程学院, 重庆 402160; 2. 重庆电子工程职业学院 汽车工程学院, 重庆 401331)

摘要: 在变形温度为 1123 ~ 1423 K 和应变速率为 0.01 ~ 10 s⁻¹ 条件下, 对 DP590 高强钢进行高温热拉伸试验, 得到其真应力-真应变曲线, 分析了温度和应变速率对 DP590 高强钢热变形时流动应力的影响。结果表明, 当应变量一定时, 流动应力随应变速率的升高和温度的降低而增大。基于热拉伸试验数据, 通过线性回归分别确定了在峰值应力下 DP590 高强钢的高温材料常数: 应变硬化指数 $n = 3.194$, 热变形激活能 $Q = 508.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\alpha = 0.0153$ 和 $A = 2.126 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 。构建了 DP590 高强钢的 Arrhenius 双曲正弦本构关系, 与试验值相比, 模型的最大误差为 7.8%, 最小误差为 0.18%。根据 DMM 动态材料模型建立了 DP590 高强钢在应变为 0.3 条件下的热加工图, 确定了 DP590 高强钢的适宜热成形区为: 应变速率为 0.01 ~ 0.1 s⁻¹, 变形温度为 1250 ~ 1375 K。

关键词: DP590 高强钢; 热成形; 流动应力; 本构关系; 热加工图

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2017.01.025

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3940 (2017) 01-0121-05

Constitutive relationship and hot processing pattern of high-strength steel DP590 based on hot tensile test

Qiu Lin¹, Tang Jianmin¹, Liu Hongguang²

(1. Department of Automobile Engineering, Chongqing Creation Vocational College, Chongqing 402160, China;

2. Department of Automobile Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: The isothermal tensile tests of high-strength steel DP590 were carried out at temperature ranges of 1123 - 1423 K and strain rates of 0.01 - 10 s⁻¹. Then, the true stress-strain curves were plotted to analyze the effects of temperature and strain rate on the flow behavior of thermal deformation for high-strength steel DP590. The results show that the flow stress increases with decreasing of temperature and increasing of strain rate. Based on the isothermal tensile test data, the high temperature material constants are obtained through multiple linear regression analysis with the strain hardening coefficient $n = 3.194$, thermal activation energy $Q = 508.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\alpha = 0.0153$ and $A = 2.126 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$. Therefore, the hyperbolic sine Arrhenius constitutive model for high-strength steel DP590 was established. Compared with the experimental results, the maximum error is 7.8%, and the minimum error is 0.18%. Based on the dynamic material model (DMM), the hot processing map of high-strength steel DP590 under the strain of 0.3 was constructed, and the suitable hot deformation range of high-strength steel DP590 is determined as the strain rates of 0.01 - 0.1 s⁻¹ and the deformation temperature of 1250 - 1375 K.

Key words: high-strength steel DP590; hot deformation; flow stress; constitutive relationship; hot processing map

轻量、节能、防腐和舒适安全是现代汽车发展的四大主题, 汽车轻量化是提高汽车燃油经济性、节约能耗的重要措施之一^[1-2]。目前, 汽车用双相钢是汽车制造领域中应用最为广泛的钢种之一, 多

采用热冲压成形方式加工, 用于车门和保险杠等重要安全组件^[3]。

材料的本构关系可以用来表征材料热变形时流动应力对温度、应变速率和真应变等变形工艺参数的动态响应规律^[4]。为了对 DP590 高强钢的热加工工艺制定和有限元数值模拟提供理论参考, 本文通过等温热拉伸试验构建了 DP590 高强钢在峰值应力下的 Arrhenius 双曲正弦本构关系和应变为 0.3 时的 DMM 模型热加工图, 同时, 对所建立模型的预测精度进行误差分析, 对于确定汽车用 DP590 高强钢的

收稿日期: 2016-05-21; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 重庆市教委 2015 年度科学技术研究项目 (KJ1505301)

作者简介: 邱霖 (1973-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 871284343@qq.com

热成形参数具有一定的指导意义。

1 试验材料与方法

试验用 DP590 高强钢的主要化学成分如表 1 所示。原料经线切割后的几何尺寸如图 1 所示,料厚为 1.8 mm。在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行等温热拉伸试验,变形温度为 1123, 1223, 1323 和 1423 K,应变速率为 0.01, 0.1, 1 和 10 s⁻¹。如图 2 所示,在进行热拉伸试验过程中,采用自制的专用试样夹具对试验试样进行固定夹持。首先以 10 K·s⁻¹ 的速度将试样加热到所需变形温度并保温 5 min, 然后进行等温热拉伸变形,直至试样被拉断。

表 1 DP590 高强钢的主要化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of high-strength steel DP590 (% , mass fraction)

C	Mn	Si	S	P	Al	Cr	P	S
0.065	1.76	0.07	0.013	0.016	0.03	0.02	0.006	0.003

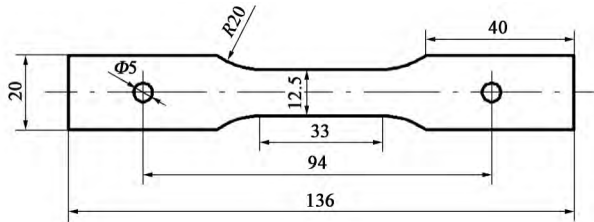


图 1 试样几何尺寸

Fig. 1 Geometric sizes of specimen

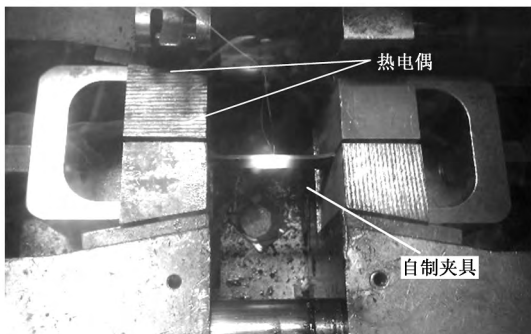


图 2 试样的装夹方式

Fig. 2 Fixturing method of specimen

2 结果与分析

2.1 真应力 - 真应变曲线

DP590 高强钢的真应力 - 真应变曲线如图 3a ~

图 3d 所示。变形初期,流动应力随应变增加而迅速增加。随应变进一步增大(变形温度为 1423 K 时除外), DP590 高强钢的应力 - 应变曲线整体上呈现逐渐下降的趋势,且最终趋于稳定,这是由于受变形温度和应变速率的影响,正负位错相互抵消导致位错密度下降,进而使得流动应力降低。当由动态回复和动态再结晶带来的软化作用和加工硬化作用达到动态平衡时,应力 - 应变曲线趋于稳定(如 1223 和 1323 K)。当温度一定时,应变速率越大, DP590 高强钢的流动应力越大,峰值应力越高,这主要是因为应变速率大,位错急速增殖,产生加工硬化,提高了合金的流动应力。当应变速率一定时,变形温度越高,流动应力越低,这主要是因为温度的升高导致原子的热振动越剧烈,进而产生大量的变形能,较容易发生动态再结晶和动态回复,因此峰值应力越小。

2.2 本构关系的构建

金属或合金的高温流动特性可通过构建流动应力、应变关系(即本构关系)来描述^[5]:

$$\dot{\varepsilon} = AF(\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; A 为结构因子, s⁻¹; Q 为与材料相关的热激活能, (J·mol⁻¹); R 为摩尔气体常数, (J·(mol·K)⁻¹); T 为绝对温度, K; σ 为流动应力, MPa; 当应力在较低水平时 ($\alpha\sigma < 0.81$), $F(\sigma) = \sigma^{n_1}$, 而在高应力水平时 ($\alpha\sigma > 1.2$), $F(\sigma) = \exp(\beta\sigma)$, 在所有的应力状态下, $F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n$; n 和 n_1 为材料在不同状态下的应变硬化指数, $n_1 = \beta/\alpha$; α 和 β 为与温度无关的材料常数。

在不同的应力水平下,将式(1)进行变形可得^[6]:

$$\ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} = \begin{cases} n_1 \ln \sigma + \ln A & \alpha\sigma < 0.8 \\ \beta\sigma + \ln A & \alpha\sigma > 1.2 \\ \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] & \text{所有应力水平} \end{cases} \quad (2)$$

当变形温度不变时,取不同应变下的峰值应力值,作 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 的拟合曲线,如图 4a 和图 4b 所示,利用偏微分和最小二乘法线性回归可分别求得 n_1 和 β 值,进而求得 α 值。将求得的 α 值代入式(2),线性拟合 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线,如图 4c 所示,并取斜率倒数的平均值可得 n 值,同时根据截距求得 A 值。最终得到的材料各参数值为: $n_1 = 3.539$, $\beta = 0.0541$, $\alpha = \beta/n_1 = 0.0153$, $n = 3.194$, $A = 2.126 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 。

当应变速率一定时,假定 Q 值不变,对于所有

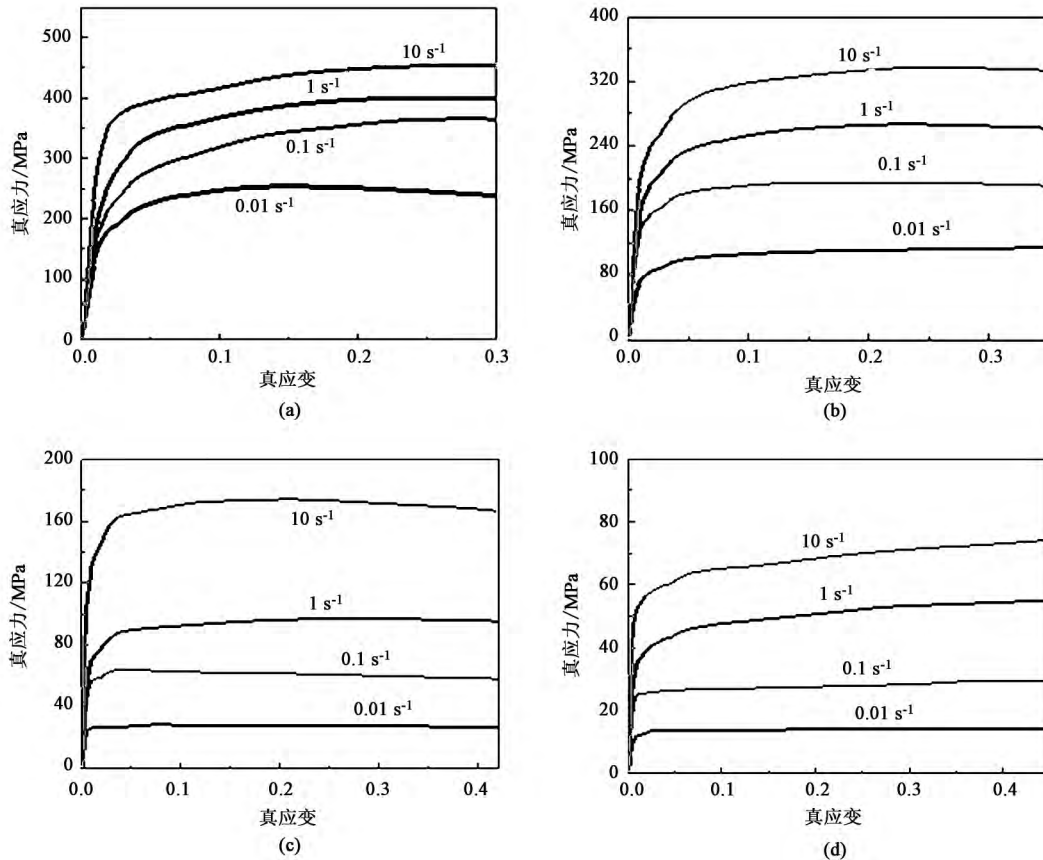


图 3 不同温度和应变速率下 DP590 高强钢热拉伸试验的真应力 - 真应变曲线
(a) 1123 K (b) 1223 K (c) 1323 K (d) 1423 K

Fig. 3 True stress - strain curves of high - strength steel DP590 at different temperatures and strain rates for the isothermal tensile tests

应力水平下, 将式 (2) 取对数变形可得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (\frac{1}{T})} \right\} \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \quad (3)$$

根据式 (3) 可知, $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 的拟合关系斜率即为 $Q/(Rn)$ 值, 进而可求得 $Q = 508.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 如图 4d 所示。

利用 Z 参数来综合衡量变形温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 对合金热变形行为的影响^[7]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

根据式 (4) 可求得对应的 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $\ln Z$ 的线性关系, 如图 5 所示。其相关系数达 0.9926, 表明该合金热拉伸变形时的流动应力与变形温度和应变速率之间的关系可用 Arrhenius 方程来描述。

为验证所建立的峰值应力下 DP590 高强钢本构模型的预测准确度, 将模型计算的峰值应力值与热拉伸试验值进行对比, 如图 6 所示。由图 6 可发现, 所建立的峰值应力下 DP590 高强钢的本构模型预测值与试验值十分接近, 其最大误差为 7.8%, 最小

误差为 0.18%, 故可为 DP590 高强钢热加工工艺的制定和有限元数值模拟提供一定的理论指导。

代入求得的材料参数, 根据式 (1) 和式 (4) 可得含 Z 参数描述的 DP590 高强钢在峰值应力下的 Arrhenius 本构关系为:

$$\sigma = \frac{1}{0.0153} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{2.126 \times 10^{17}} \right)^{\frac{1}{3.194}} + \left[\left(\frac{Z}{2.126 \times 10^{17}} \right)^{\frac{2}{3.194}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5)$$

2.3 DP590 高强钢的热加工图

基于动态材料模型理论 (Dynamic Materials Model, DMM) 的热加工图, 可以判断出金属或合金在热变形时的安全变形区和流动失稳区, 以评估材料的可加工性能^[8], 该方法如今已广泛应用于钛合金、镁铝合金和不锈钢等金属材料高温热变形机理分析和热成形工艺的优化设计^[9]。根据 DMM 理论, 合金在热变形时的耗散能量 P 包含两个部分: 塑性变形引起的功率耗散量 G 和微观组织演变产生的耗散协量 J , 二者之间的比例称为应变速率敏感指数 m 。

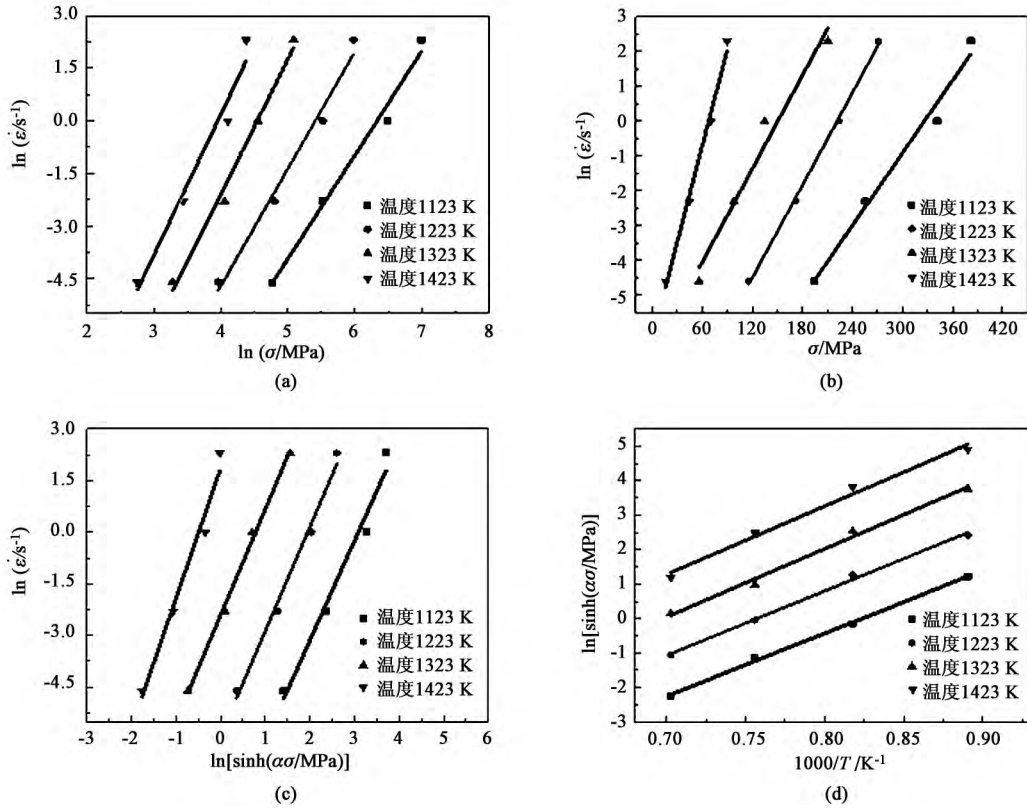


图 4 线性拟合曲线

(a) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (b) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (c) $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ (d) $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$

Fig. 4 Linear fitting curves

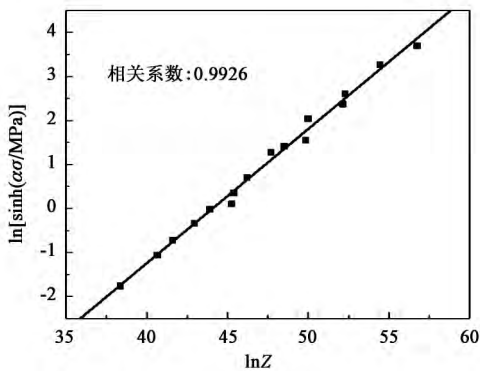


图 5 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 与 Z 参数之间的关系

Fig. 5 Relationship between $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ and Z

$$m = \left(\frac{dJ}{dG} \right)_{\epsilon, T} = \left(\frac{\partial \lg \sigma}{\partial \lg \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} \quad (6)$$

金属或合金的热加工图由相应变形条件下的流动失稳图与功率耗散图叠加而得，而流动失稳图是由功率耗散因子 η 通过插值法绘制而得，可以表示为热变形过程中显微组织变化的能量与理想状态下能量的比值^[10]：

$$\eta = \frac{\Delta J / \Delta P}{(\Delta J / \Delta P)_{\max}} = \frac{2m}{m + 1} \quad (7)$$

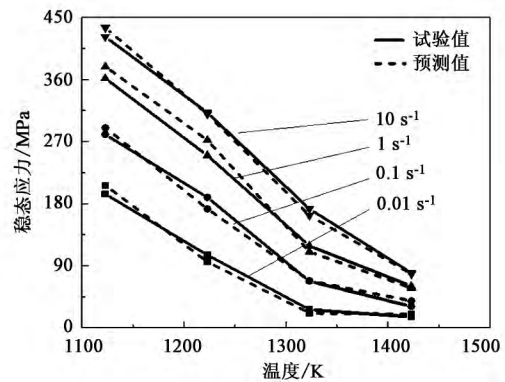


图 6 预测峰值应力与试验值对比

Fig. 6 Comparison between predicted and experiment peak stresses

为了描述金属或合金在大塑性变形时的失稳区域，Prasad Y V R K^[10-11] 提出了无量纲失稳参数 $\xi(\dot{\epsilon})$ ：

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \lg(m / (m + 1))}{\partial \lg \dot{\epsilon}} + m \leq 0 \quad (8)$$

此时，材料为非稳态流动状态，其随温度和应变速率的变化即构成了流动失稳图，根据特定应变率下的热压缩试验数据，将不同变形温度和应变速率的真应力和真应变进行 3 次多项式拟合，得到拟

合关系式 (9), 代入式 (10), 即可求得不同变形条件下的 m 值, 进而可根据式 (7) 和式 (8) 分别求得功率耗散值和流动失稳值。

$$\lg \sigma = a_1 + a_2 \lg \dot{\varepsilon} + a_3 (\lg \dot{\varepsilon})^2 + a_4 (\lg \dot{\varepsilon})^3 \quad (9)$$

$$m = \frac{\dot{\varepsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\varepsilon}} = 3a_4 (\lg \dot{\varepsilon})^2 + 2a_3 \lg \dot{\varepsilon} + a_2 \quad (10)$$

式中: $a_1 \sim a_4$ 为材料常数。

如图 7 所示为 DP590 高强钢的热加工图, 图中等高线上的数字代表功率耗散值, 一般而言, 功率耗散值越高, 材料在热变形时的组织演化越充分, 晶粒越细小。而当 $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$ 时, 即认为材料发生失稳, 深色区域为流动失稳区。可以看出, DP590 高强钢的流动失稳区主要分布在高应变速率内, 这主要是由于在较短的变形时间, 变形所产生的热量难以及时散出, 进而导致材料发生流动失稳^[7]。根据热加工图, 选择能耗值较高的安全变形区即为该合金的适宜热成形工艺参数, 具体为: 应变速率为 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $1250 \sim 1375 \text{ K}$ 。

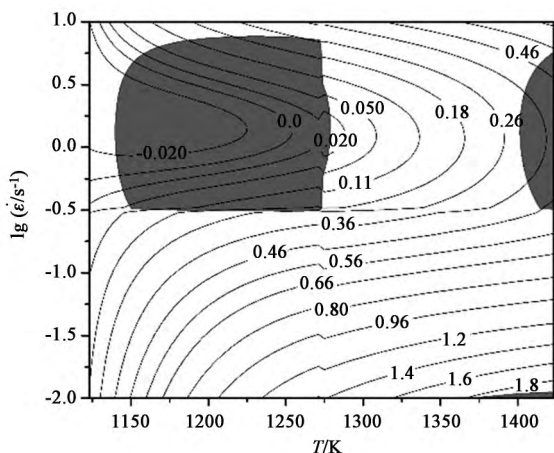


图 7 DP590 高强钢的热加工图

Fig. 7 Hot processing map of high-strength steel DP590

3 结论

(1) 温度和应变速率等变形工艺参数对汽车用 DP590 高强钢的变形行为影响较大, 流动应力随应变速率的增加和变形温度的降低而升高, 为正应变速率敏感材料。

(2) DP590 高强钢的热流动关系可用含 Z 参数描述的双曲正弦 Arrhenius 本构关系描述, 其热激活能 $Q = 508.29 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; 模型预测值与试验值十分接近, 最大误差为 7.8% , 最小误差为

0.18% , 所构建的峰值应力下的本构关系为: $\sigma = \frac{1}{0.0153} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{2.126 \times 10^{17}} \right)^{\frac{1}{3.194}} + \left[\left(\frac{Z}{2.126 \times 10^{17}} \right)^{\frac{2}{3.194}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$ 。

(3) 由 DMM 热加工图发现, DP590 高强钢在高应变速率下容易出现流变失稳缺陷, 较适宜变形的加工参数如下: 应变速率为 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$, 变形温度为 $1250 \sim 1375 \text{ K}$ 。

参考文献:

- [1] 谢磊磊, 唐荻, 江海涛, 等. 汽车用先进高强钢的成形性能 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (1): 84-88.
Xie L L, Tang D, Jiang H T, et al. Study on formability of advanced strength steel for automobiles [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (1): 84-88.
- [2] 李国城, 邓涛, 卢任之. 超高强度钢板热流变行为试验研究及本构模型仿真分析 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (3): 110-115.
Li G C, Deng T, Lu R Z. Experimental research on hot deformation behavior of ultra high strength steel and simulation analysis of the constitutive relationship [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41 (3): 110-115.
- [3] 李扬, 刘汉武, 杜云慧, 等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向 [J]. 材料导报, 2011, 25 (7): 101-104, 109.
Li Y, Liu H W, Du Y H, et al. Applications and developments of AHSS in automobile industry [J]. Materials Review, 2011, 25 (7): 101-104, 109.
- [4] Lin Y C, Chen X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 1733-1759.
- [5] 李立新, 周志峰, 张涛, 等. DB685 钢的热变形行为及热加工图 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (9): 126-129.
Li L X, Zhou Z F, Zhang T, et al. Hot deformation behavior and processing map for DB685 steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41 (9): 126-129.
- [6] 李汉, 周旭东, 高全德, 等. 铸态 27SiMn 钢热成本构方程的建立 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (4): 679-682.
Li H, Zhou X D, Gao Q D, et al. Establishment of constitutive equations of as-cast 27SiMn steel during hot forming [J]. Foundry Technology, 2014, 35 (4): 679-682.
- [7] Zener C, Hollomon H. Effect of strain-rate upon the plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-27.
- [8] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Processing maps for hot working of titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 82-88.
- [9] Quan G Z, Wang Y, Yu C T, et al. Hot workability characteristics of as-cast titanium alloy Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V: A study using processing map [J]. Material Science & Engineering A, 2013, 564: 46-56.
- [10] Prasad Y V R K. Modeling of hot deformation for microstructural control [J]. International Materials Reviews, 1998, 43: 243-258.
- [11] Prasad Y V R K, Rao K P. Processing maps for hot deformation of rolled AZ31 magnesium alloy plate: Anisotropy of hot workability [J]. Material Science & Engineering A, 2008, 487: 316-327.