

钢的弯曲变形研究及矫直定理的推导与工业应用

王新社, 曾海霞, 卢明霞, 李冰, 王伟, 张丽娜

(江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214429)

摘要 以材料力学和弹塑性理论为基础,研究了工业生产中不同钢种、状态和试验条件下的弯曲载荷-位移曲线。结果得出,在钢的矫直变形范围内,弯曲载荷-位移曲线中第二阶段可简化为线性关系,钢的矫直定理为 $f_t = K \cdot (f - f_m)$,推导出的矫直定理在特钢工业实际应用中,准确地表达了钢弯曲后产生的残余弯曲挠度与总弯曲挠度之间的关系,使得矫直操作变得简单、直观、可控,提高了矫直质量和效率,尤其使压力矫直的效率提高30~80倍。该矫直定理填补了在矫直领域中之前没有直接计算弯曲后残余弯曲变形量公式的空白,丰富了现有矫直理论,对推动矫直技术的发展、矫直设备的设计与机械制造具有重要的科学意义。

关键词 弯曲 载荷-位移曲线 矫直 残余弯曲挠度 矫直定理

Research on Bending Deformation of Steel and Derivation and Engineering Application of Straightening Theorem

WANG Xinshe, ZENG Haixia, LU Mingxia, LI Bing, WANG Wei, ZHANG Lina

(The Research Institute of Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd, Jiangyin 214429)

Abstract Based on the mechanics of materials and the elastic-plastic theory, the various bending load-deflection curves are studied on different steel grade, heat treatments and conditions in industry. The results show that the second stage of the bending load-deflection curves of steels can be simply treated as an linear relationship in the actual straightening deformation range and the straightening theorem of steel $f_t = K \cdot (f - f_m)$ is deduced, which accurately describes the relationship between the residual plastic bending deflection and the total bending deflection after bending. When straightening according to the straightening theorem, the straightening process can be controlled easily and directly, and the straightening quality and efficiency are raised. Particularly, the efficiency of press straightening can be increased by 30~80 times. This straightening theorem fills the gap that there was no direct calculating formula of residual plastic bending deflection after bending before in the straightening field and enriches the current straightening theory and it has important scientific significance to promote the development of straightening technology and the design and manufacture of straightening equipment.

Material Index Bending, Load-Deflection Curve, Straightening, The Residual Bending Deflection, Straightening Theorem

众所周知,矫直是特钢产品生产和使用中不可或缺的一道重要工序,矫直过程实质上就是一个反向塑性弯曲变形的过程。矫直主要的问题就是如何求出合适的反弯量、使得反压并卸载后产生的残余弯曲变形量恰好抵消原有变形量的问题。国内外已有很多这方面的研究与成果^[1-13];但在这些研究与成果中,所有关于残余弯曲变形量的计算都是一系列极其复杂的公式或方程,实用性与可操作性都很低,在实际矫直操作中难以应用;所以,求出一个既简单又能准确地计算出残余弯曲变形量的公式是十分必要的。

钢的矫直过程是一个弯曲弹塑性变形过程,因此,应采用弯曲载荷-位移曲线来分析矫直过程;但由于绝大多数钢铁材料都具有良好的塑性,做弯曲试验时无法得出强度极限和塑性指标,所以少有人去测量钢的弯曲载荷-位移曲线,于是研究人员就常

常采用拉伸载荷-位移曲线(简称拉伸曲线)来分析矫直问题^[12-13],实际上,采用拉伸曲线来分析矫直问题是欠妥的,因为钢在弯曲载荷作用下的力学行为、应力分布与变形规律与在拉伸载荷作用下的是完全不同的。虽然也有研究人员采用了弯曲载荷-位移曲线分析矫直过程,但他们并没有从该曲线中研究出如何计算残余塑性弯曲变形量^[13-14],最终推导出来的公式仍然是一套包含有积分和反三角函数等非常复杂的多个式子,计算起来极其繁琐^[15],而且还存在一定的偏差。

在本文中,采用三点弯曲试验的方法测量并研究了不同钢种、不同状态和不同条件下的弯曲载荷-位移曲线,根据弯曲载荷-位移曲线推导出能直接计算残余弯曲变形量的公式,为高效、高质量的矫直过程提供理论依据和技术支持,并应用于特钢产品大批量生产实践。

1 试验方法

采用微机控制液压弯曲试验机按如图 1 所示进行三点弯曲试验,在 A、B 两个支点上摆放弯曲试样,A、B 两支点的距离为跨距,然后在跨距中间位置对试样施压使之产生弯曲,测量施加的载荷和试样跨距中间位置的垂直位移(弯曲挠度),并绘制成弯曲载荷-位移曲线。为了对比分析,还采用万能试验机测量了拉伸曲线。

设置板材弯曲试验的跨距为 200 mm,为兼顾钢板表面质量检测,弯曲试验参数设定压弯角度为 180°;设置棒材弯曲试验的跨距为 290 mm,压弯时设置总弯曲挠度为 30 mm(相当于 103 mm/m 压下量)。实际生产中,需要矫直的钢材或机械零件的原始弯曲度一般都在 10 mm/m 以内,以上压下弯曲挠度足以用来分析整个矫直过程。

2 试验结果与分析

2.1 Q355ND 钢板弯曲载荷-位移曲线与拉伸曲线

在厚度为 25mm 的 Q355ND 钢板上取拉伸和弯曲试样进行试验,测量拉伸和弯曲载荷-位移曲线见图 2(a)、图 3(a)。从图中看出,拉伸和弯曲载荷-位移曲线都大致分为 3 个阶段。第一阶段为力和位移

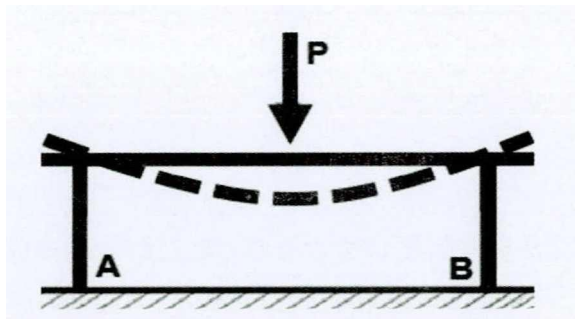


图 1 弯曲试验示意图
Fig. 1 Schematic drawing of bending test

完全呈直线关系的弹性变形阶段,如图 2(a)、图 3(a)中 OA 段;第二阶段为弹塑性变形阶段,如图 2(a)中 ABC 段和图 3(a)中 AC 段;第三阶段为不均匀塑性变形的失效阶段,如图 2(a)、图 3(a)中 CD 段。比较 Q355ND 钢板的拉伸和弯曲载荷-位移曲线,见以下几点。

(1)拉伸和弯曲载荷-位移曲线图中第一阶段都是一条直线。

(2)拉伸曲线中有明显的屈服平台,如图 2(a)中 AB 段,而弯曲载荷-位移曲线则无明显屈服平台。

(3)在矫直的变形范围内,弯曲载荷-位移曲线中第二阶段几乎是一条直线;而拉伸曲线并非如此。

2.2 钢棒材料的弯曲载荷-位移曲线与拉伸曲线

取直径 $\Phi 60$ mm 的齿轮钢 20CrMoH 热轧钢棒,测量拉伸和弯曲载荷-位移曲线如图 2(b)、图 3(b)所示。结果表明,拉伸曲线有明显的屈服平台,它的第二阶段为屈服平台加一段曲线;而在弯曲载荷-位移曲线上却观察不到屈服平台,并且弯曲载荷-位移曲线中第二阶段与直线极为接近。

2.3 不同跨距对弯曲载荷-位移曲线形状的影响

两辊矫直机中的两个辊子一个是凹辊、一个是凸辊,两辊相交呈一定角度上下布置,当钢棒进入到矫直机中的凹凸辊之间被矫直时,就是相当于在里面进行三点弯曲反压矫直,当辊子的角度改变时,相当于钢棒与凹辊接触的两个支点的距离发生改变,亦即相当于三点弯曲的跨距发生变化;所以有必要研究跨距的变化对弯曲载荷-位移曲线形状的影响。试验采用了 150、200、350 mm 的跨距对直径 $\Phi 42$ mm 的 SAE8620 圆钢进行弯曲试验,测量弯曲载荷-位移曲线如图 4 所示;结果显示,跨距改变后,在矫直的变形范围内,弯曲载荷-位移曲线中第二阶段都可简化为一条直线。

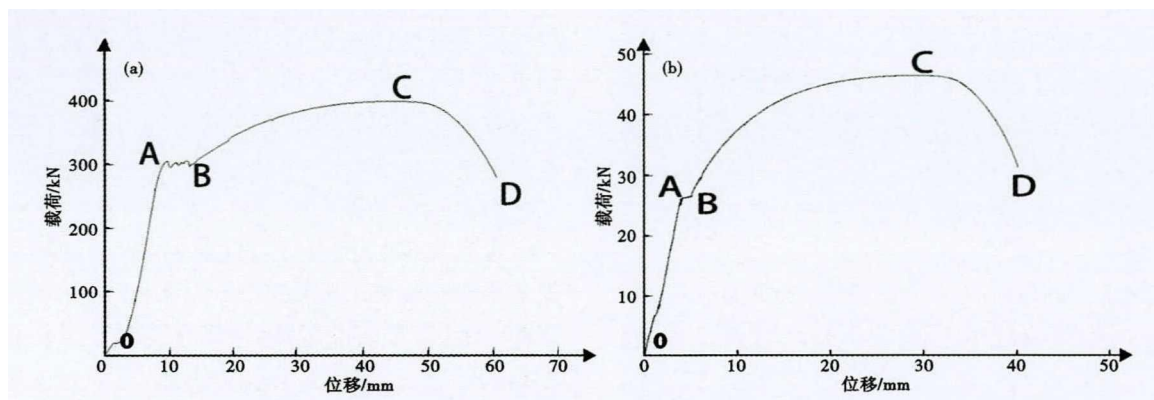


图 2 钢板及钢棒拉伸载荷-位移曲线:(a) Q355ND 钢板;(b) 20CrMoH 钢棒
Fig. 2 The tensile load-deflection curve of steel plate and steel bar; Q355ND steel plate (a) and 20CrMoH steel bar (b)

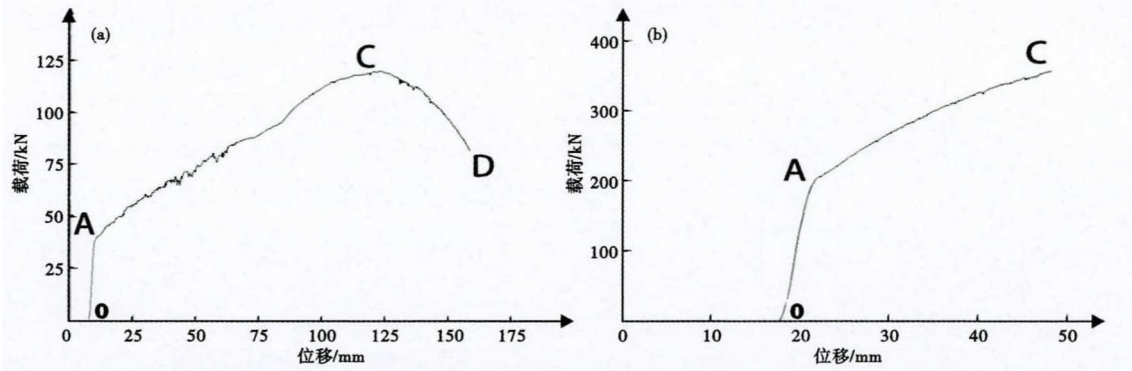


图3 钢板及钢棒弯曲载荷-位移曲线:(a) Q355ND 钢板;(b) 20CrMoH 钢棒

Fig. 3 The bending load-deflection curve of steel plate and steel bar; Q355ND steel plate (a) and 20CrMoH steel bar (b)

2.4 不同热处理状态对弯曲曲线形状的影响

图2、图3弯曲载荷-位移曲线均为各种热轧钢材,金相组织主要为铁素体加珠光体及部分贝氏体等非马氏体组织。那么,对于具有马氏体组织的高强度钢材弯曲载荷-位移曲线的形貌如何呢?取直径 $\Phi 30$ mm的42CrMo圆钢加热到835 $^{\circ}$ C后水冷淬火,然后分别进行200 $^{\circ}$ C和600 $^{\circ}$ C回火分别得到硬度为53.7HRC的回火马氏体和硬度为32HRC的回火索氏体组织,并测量了它们各自的弯曲载荷-位移曲线(图5),结果显示,随着热处理工艺的改变,不管是高强度的马氏体组织还是较低强度的索氏体组织,在矫直的变形范围内弯曲载荷-位移曲线中第二阶段与直线很接近,同样可简化为一条直线。

2.5 统计分析与小结

江阴兴澄特种钢铁有限公司每年特钢产销量超600万吨,每天都要做拉伸和弯曲试验,试验涉及的产品包括碳钢和合金钢钢棒(含线材)、扁钢与钢板,具体钢种大类包括碳素及合金结构钢、轴承钢、弹簧钢、齿轮钢、工模具钢、耐磨钢、锅炉及压力容器用钢、管线钢等。统计并分析公司历来所做的

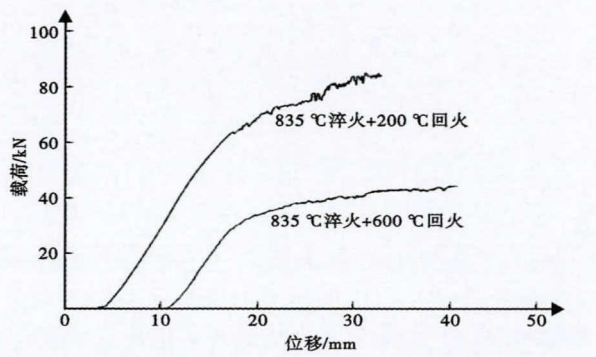


图5 不同热处理后42CrMo钢弯曲载荷-位移曲线

Fig. 5 The bending load-deflection curve of 42CrMo steel bar after various heat treatment

弯曲载荷-位移曲线后发现,所有的弯曲载荷-位移曲线都没有屈服平台,弯曲载荷-位移曲线的第一阶段为一条直线,第二阶段近似一条直线。所以,根据以上试验与统计分析得出,研究钢的矫直问题时,可将弯曲载荷-位移曲线中第二阶段简化为一条直线。

3 分析、推导及证明

钢的弯曲载荷-位移曲线中第二阶段没有出现象拉伸曲线一样的屈服平台,究其原因,是因为钢在弯曲载荷作用下的应力分布、变形规律与在拉伸载荷作用下的是完全不同的。在弯曲过程中,钢的外弧面受拉应力而伸长,内弧面受压应力而缩短,而且在第二阶段弹塑性变形区的矫直变形范围内,弯曲试样的截面只有表层少部分金属发生塑性变形,内部大部分金属还是在弹性变形阶段,中性层金属不发生变形;而在拉伸时整个试样的截面都是受拉应力的,并且整个试样都出现伸长变形;所以,在钢的弯曲载荷-位移曲线中第二阶段没有出现象拉伸曲线一样的屈服平台,而是近似一条直线。因而,在研究钢的矫直问题时,可将弯曲载荷-位移曲线简化为

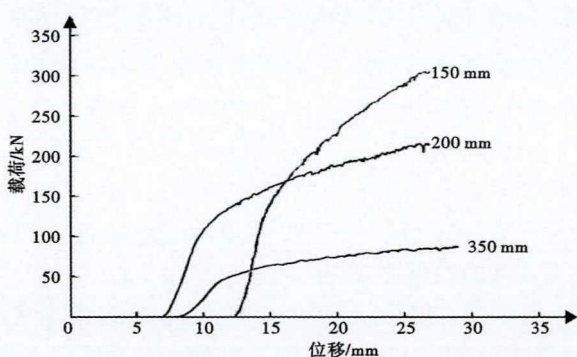


图4 不同跨距测量的SAE8620钢弯曲载荷-位移曲线

Fig. 4 The bending load-deflection curve of SAE8620 steel bar in different spans

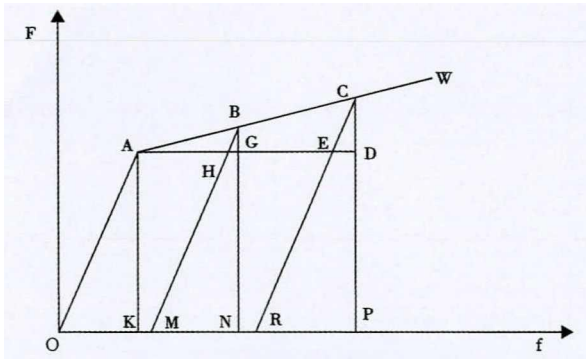


图 6 钢的弯曲载荷-位移曲线分析

Fig. 6 Analysis on the bending load-deflection curve of steel

如图 6 所示的由两条直线 OA 和 AW 组成。

如图 6, 在弹性变形阶段(OA 段)加载时, 在其中任意一点卸载后试样都不会发生塑性变形而回复到原状; 但当加载进入到 AW 塑性变形阶段, 在任意一点卸载后试样都会出现一定大小的残余弯曲变形, 这个残余弯曲变形是多少呢? 以加载到图 6 中的 B 点后卸载为例, 过 B 点作 BN 垂直于横坐标交横坐标于 N 点, 过 B 点作 BM 平行于 OA 直线交横坐标于 M 点, 过 A 点作 AK 垂直于横坐标交横坐标于 K 点, 过 A 点作横坐标的平行线交 BM 于 H、交 BN 于 G 点; 这时设: 最大弹性弯曲挠度为 f_m 、残余弯曲挠度为 f_b 、总压下弯曲挠度为 f_b 。根据经典弹塑性力学理论可得, $f_m = OK, f_b = OM, f_b = ON$;

由于 OAHM 是平行四边形, AGNK 是矩形, 所以: $AH = OM = f_b, AG = KN = ON - OK = f_b - f_m$

从图 6 看出, $AH < AG$, 设一个小于 1 的正数为 K_b , 则 $AH = K_b \cdot AG$; 这样, 在 B 点卸载可推导出:

$$f_b = K_b \cdot (f_b - f_m) \quad (1)$$

设加载到图 6 中任意的另一点 C 后卸载, 设这时的残余弯曲挠度为 f_c , 总压下弯曲挠度为 f_c , 同理可得, $f_c = OR = AE, AD = KP = OP - OK = f_c - f_m$, 设 K_c 为一个小于 1 的正数, 则 $AE = K_c \cdot AD$; 这样, 在 C 点卸载即可推导出:

$$f_c = K_c \cdot (f_c - f_m) \quad (2)$$

由于 $\triangle AHB$ 与 $\triangle AEC$ 相似、 $\triangle BHG$ 和 $\triangle CED$ 相似、 $\triangle ABG$ 和 $\triangle ACD$ 相似, 根据相似三角形的性质可得:

$$AH/AE = BH/CE, BH/CE = BG/CD, BG/CD = AG/AD, \text{由这三个等式可得, } AH/AE = AG/AD$$

$$\text{由上式得: } AH/AG = AE/AD, \text{所以 } K_b = K_c \quad (3)$$

$$\text{即: } f_b/(f_b - f_m) = f_c/(f_c - f_m) = \text{常数} \quad (4)$$

即: 在任意一点卸载后, 残余弯曲挠度与总压下弯曲挠度和最大弹性弯曲挠度之差成正比。

对于某一状态的钢材来说, 最大弹性弯曲挠度 f_m 是一个常数, 设弯曲变形时总压下弯曲挠度为 f , 卸载后残余弯曲挠度为 f_r , 由此可得:

$$f_r/(f - f_m) = K, \text{或 } f_r = K \cdot (f - f_m) \quad (5)$$

其中 K 是一个小于 1 的正常数, 且 $f \geq f_m$

4 矫直过程研究与矫直定理

假设一支弯钢棒的原始弯曲挠度为 J , 那么, 如果要矫直该钢棒的话, 就要按图 1 所示对该钢棒进行反压, 反压后使其产生大小为 J 的残余弯曲挠度才可将其矫直, 即 $f_r = J$ 。

$$\text{根据公式 } f_r = K \cdot (f - f_m), \text{可得: } f = f_m + J/K \quad (6)$$

即, 对于弯曲挠度为 J 的弯钢, 只需要将它的反压总压下弯曲挠度控制为 $f_m + J/K$ 即可矫直。

对于同一批不同弯曲度的弯钢来说, K 和 f_m 值是不变的, 开始时, 通过试压 2~3 支弯钢就可以很容易地求出这批弯钢的 K 和 f_m 值, 然后就可以根据计算出来的 K 和 f_m 值以及公式(6)逐一一对每支不同弯曲度的弯钢进行反压矫直。这个方法科学且简单明了; 但是, 在实际生产中, 不可能逐支测量弯曲度并计算反弯量, 而且即使计算出了准确的压下弯曲挠度之后也很难通过人工精确控制, 因为, 目前的压力矫直机大多都是通过人工手动操控来控制压头行程的。因此, 需要有更简单、更灵活的办法。

如图 7 所示, 将一支原始弯曲挠度为 J_1 的弯钢弯曲凸面朝上摆放在 A、B 支撑块上, 同时, 在弯钢的正下方放置一个高度为 H 的刚性垫块 C, 然后将矫直机的压头对准弯钢凸面高点施压进行反压矫直, 随着压头不断下移, 弯钢先产生弹性变形, 并随着压弯程度的增大, 逐渐产生塑性变形, 当弯钢被压下接触到下方的垫块 C、无法再继续下压时就卸载; 假如经过这次反压矫直后这支弯钢正好被矫直了, 则说明这次矫直后弯钢所产生的残余弯曲挠度 f_r 恰好等于这支弯钢的原始弯曲挠度 J_1 , 即 $f_r = J_1$; 根据公式 $f_r = K \cdot (f - f_m)$, 可算出矫直这支弯钢时的总压下弯曲挠度为: $f_1 = f_m + J_1/K$ 。

在图 7 中设 X 是矫直过程中弯钢凸点过水平线后到垫块 C 的距离, 从图 7 可得: $f_1 = J_1 + X$ 根据上两式得: $J_1 + X = f_m + J_1/K$

$$\text{则 } X = f_m + J_1/K - J_1 \quad (7)$$

诸多辅助设施,矫直一支齿轴至少需要 30 分钟,而且矫直后齿轴还会出现软点,容易造成齿轴服役早期失效。以矫直某型号的渗碳齿轴为例,该齿轴长 705 mm,直径 $\Phi 87$ mm,中间位置的弯曲挠度要求 ≤ 0.15 mm,在热矫直时,除了压力矫直机,还要准备好氧气、乙炔、氧枪、棉纱布、水桶和水,2 人互相配合,矫直耗时至少 30 分钟/支,矫直 15 支齿轴至少要耗时 450 分钟;但是,利用以上矫直定理进行矫直时,只需 1 人即可操作,矫直耗时不超过 45 秒/支,矫直 15 支齿轴总耗时约 11 分钟,而且矫直后 15 支齿轴的弯曲挠度为 0.02 ~ 0.05 mm,不但质量高、稳定,而且耗时极短、用人少,效率提高约 81 倍。

此外,钢厂在对直径为 $\Phi 130$ mm ~ 350 mm 的大钢棒进行压力矫直时,对于同一个钢种和规格、不同弯曲度的钢棒,调整好跨距和压下后卸载的位置后。采用光电感应开关准确地控制压头行程的终止位置,相当于在弯钢的底部摆放了一个高度不变的虚拟垫块,矫直时将不同弯曲度的弯钢都准确地压下到同一位置后,在光电感应开关的准确控制下自动停止下压并卸载,矫直后钢材的弯曲度完全满足技术要求,矫直高效、质量稳定。

5.2 两辊矫直机矫直

应用以上矫直定理,可以清晰的阐述两辊矫直机的矫直过程及原理。

例如,用两辊矫直机矫直一批 $\Phi 50$ mm 20CrMnTi 钢棒时,通过试矫直 3 ~ 5 支,调整并固定好两辊矫直机的上下辊角度和位置后,就可以连续矫直这一批次的剩余弯钢,而不必理会矫直前每支弯钢的原始弯曲度。

分析两辊矫直机的矫直过程,如 2.3 中的描述,当钢进入到矫直机两个辊子之间,就相当于在里面进行三点弯曲的反压矫直过程,因上下辊的位置和角度固定,所以,不管来料的弯钢原始弯曲程度如何,只要在这两个辊子之间,所有的弯钢都会被压下到相同位置,这相当于在反压矫直过程中在弯钢的下面摆放了一个高度不变的虚拟垫块,各种不同原始弯曲度的弯钢在两辊矫直机内被压弯接触到虚拟垫块后再卸载。由于同一批号轧制的弯钢之间弯曲度相差很小,一般不会超过 3 mm/m,根据公式(10)计算, Δ 的绝对值就不会超过 0.33 mm/m,所以矫直效果良好;由于弯钢在两辊矫直机内是旋转前进的,因此,可矫直各个方向的弯曲。

6 结语

(1) 钢的弯曲载荷-位移曲线中观察不到屈服平台,在实际矫直过程中,钢的弯曲载荷-位移曲线中第二阶段可以简化为线性关系。

(2) 在钢的矫直过程中,弯曲压下并卸载后所产生的残余弯曲变形量符合矫直定理 $f_r = K \cdot (f - f_m)$;残余弯曲挠度与总压下弯曲挠度和最大弹性弯曲挠度之差成正比。

(3) 矫直定理简单明了,应用它指导矫直能大幅提高矫直质量和效率,并能为矫直操作的智能化提供理论依据。矫直定理填补了在矫直领域中之前没有直接计算残余弯曲变形量公式的空白,它是矫直研究中的一项重大突破与发现,它的发现、证明与应用丰富了现有矫直理论,对推动矫直技术的发展和矫直设备的设计与制造具有重要的意义。

参考文献

- [1] 崔 甫. 矫直原理与矫直机械[M]. 第二版. 北京:冶金工业出版社,2005.
- [2] 管 奔,臧 勇,曲为壮. 矫直理论的研究发展现状与展望[J]. 机械设计与制造,2012,(8):266-268.
- [3] 孙登月,侯海涛,汝文弟,等. 宽厚板多点柔性压力矫直装置设计与反弯量计算[J]. 钢铁,2020,55(6):113-117.
- [4] 李 骏,邹慧君,熊国良. 压力校直工艺理论研究的现状与展望[J]. 机械设计与研究,2004,20(4):69-71.
- [5] 李 骏,熊国良,邹慧君. 矫直机行程计算经验公式的理论依据分析[J]. 锻压装备与工业炉,2003,(6):22-24.
- [6] 扬瑛娣,刘瑞宁. 高速钢棒材反弯压力矫直压下量计算方法探讨[J]. 河北冶金,2008,(5):19-21.
- [7] 杨道斋,李春风. 轴类零件矫直压下量的实用计算[J]. 机械设计与制造,2003,(3):77-78.
- [8] 臧 勇,王会刚,崔福龙. 型钢辊式矫直压弯挠度的弹塑性解析[J]. 机械工程学报,2005,41(11):47-52.
- [9] 王振国,任 勇,程晓茹,等. Q345B 低温变形抗力模型及在矫直工艺中的应用[J]. 特殊钢,2012,33(2):33-36.
- [10] 郭一彤,孙东明,王 斌. V 形辊式矫直过程分析及压下量设计[J]. 机械科学与技术,2021,40(4):627-632.
- [11] 刘子健,马立东,李俊慧,等. 六辊斜管材矫直过程精度解析[J]. 钢铁研究学报,2020,32(9):809-815.
- [12] 马自勇,马立峰,王荣军,等. 棒材高精度二辊矫直质量控制策略研究[J]. 机械工程学报,2017,53(20):77-88.
- [13] 王荣军,马自勇,马立峰,等. 基于压力弹塑性变形中性层偏移模型的构建与验证[J]. 工程科学学报,2015,37(12):1637-1644.
- [14] 马自勇,马立峰,黄庆学,等. 基于弹塑性压力中性层偏移的棒材二辊矫直回弹模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3020-3030.
- [15] 李 骏,熊国良,邹慧君. 轴类零件压力矫直过程的数学模型与行程计算[J]. 重型机械,2004,6:41-44.

王新社(1964-),男,研究员级高级工程师,1985年北京钢铁学院(本科)毕业,特钢产品研究与开发。

E-mail: wangxinshe@citicsteel.com

收稿日期:2022-03-16