

H型钢开坯轧制腹板增厚机理及规程优化

汤磊¹, 张文满², 沈晓辉¹

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 马鞍山钢铁有限公司 长材事业部, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: H型钢轧制不均匀变形主要集中在异形孔开坯轧制阶段, 异形孔轧制尺寸精度控制对后续的万能轧制有重要影响。为此, 采用有限元分析软件 MARC/SuperForm 对尺寸为 900 mm×510 mm×130 mm 异形坯的开坯轧制过程进行模拟仿真, 分析腹板厚度变化的关键影响因素及其影响机制。根据模拟结果, 优化 H型钢开坯轧制规程, 即调整压下量分配, 降低最后一道次腹板的压下量, 减小腹板和翼缘的延伸率差异, 从而降低腹板增厚程度。结果表明: 腹板厚度在变形区出口附近显著增加, 开坯结束时腹板厚度相比设定厚度增加了 8.4 mm, 这主要是腹板与翼缘的延伸率差异所致。变形区腹板金属承受三向压力, 轧件离开变形区时, 轧辊的压力和横向阻力逐渐消失, 但翼缘对腹板施加的轧向压力并不会立即消失, 腹板继续受到轧向压应力作用, 导致腹板厚度继续增厚; 腹板的延伸率通常大于翼缘, 特别是在压下量较大的情况下, 延伸率差异显著, 导致轧件出变形区后的增厚量较大。采用优化的 H型钢开坯规程, 开坯轧制结束腹板厚度增厚量由原先的 8.4 mm 减至 3.7 mm, 可有效提高腹板部位的尺寸精度。

关键词: H型钢; 开坯轧制; 万能轧制; 异形孔; 腹板; 辊缝; 规程优化; 有限元模拟

中图分类号: TG 335.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24089



Mechanism of Web Thickening in Roughing Rolling of H-Beam and Its Pass Schedule Optimization

TANG Lei¹, ZHANG Wenman², SHEN Xiaohui¹

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Long Products Business Department, Maanshan Iron & Steel Co., Ltd, Maanshan 243000, China)

Abstract: The uneven deformation during the rolling of H-beam is primarily concentrated in the roughing stage of shaped pass rolling. The dimensional precision control in shaped pass rolling has a significant impact on the subsequent universal rolling process. To this end, the finite element analysis software MARC/SuperForm was utilized to simulate the opening rolling process of a shaped billet with dimensions of 900 mm × 510 mm × 130 mm. The key factors and influencing mechanisms of web thickness variation were analyzed. Based on the simulation results, the roughing rolling schedule for H-beam was optimized by adjusting the reduction distribution, specifically reducing the reduction in the web during the final pass, and minimizing the elongation difference between the web

收稿日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金钢铁联合基金项目(U1860105)

作者简介: 汤磊(1996—), 男, 安徽肥东人, 硕士生, 主要研究方向为材料成形仿真。

通信作者: 沈晓辉(1974—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料加工工程。

引文格式: 汤磊, 张文满, 沈晓辉. H型钢开坯轧制腹板增厚机理及规程优化[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(2):136-142.

and flange, thereby reducing the degree of web thickening. The results indicate that the web thickness significantly increases near the exit of the deformation zone, with the web thickness at the end of roughing being 8.4 mm greater than the set thickness. This is primarily due to the difference in elongation between the web and flange. In the deformation zone, the web metal is subjected to triaxial compressive stress. When the workpiece exits the deformation zone, the pressure and transverse resistance from the rolls gradually disappear, but the rolling-direction pressure exerted by the flange on the web does not disappear immediately. The web continues to experience compressive stress in the rolling direction, leading to further thickening of the web. The elongation of the web is typically greater than that of the flange, especially under conditions of large reductions, resulting in significant elongation differences and substantial thickening of the web after exiting the deformation zone. By adopting the optimized roughing schedule for H-beam, the thickening of the web at the end of roughing rolling is reduced from the original 8.4 mm to 3.7 mm, effectively improving the dimensional accuracy of the web section.

Keywords: H-beam steel; roughing rolling; universal rolling; irregular-shaped hole; web; roll gap; schedule optimization; finite element simulation

H 型钢具有强度高、设计灵活、轻量化、施工效率高、抗震性与耐久性好等优点,被广泛用于建筑、桥梁、机械制造等领域^[1-3]。随着建筑行业 and 工业的迅速发展,市场对 H 型钢的应用要求不断提高,对其形状尺寸精度的控制要求也越来越严格。H 型钢断面形状复杂,不均匀变形主要发生在开坯轧制阶段^[4-6]。其产品的最终尺寸精度与开坯轧制过程中的尺寸控制密切相关^[7]。开坯轧制是将初始坯料通过二辊轧机轧制成适合于万能精轧所需的形状和尺寸^[8-9]。开坯轧制采用异形孔轧制,初始坯料通常为连铸异型坯,金属在轧制过程中变形不均匀,导致产品的尺寸精度控制难度大^[10-12]。因此,开展开坯轧制尺寸精度的控制研究,对于确保 H 型钢产品的质量和性能,进而提升我国型钢生产领域的技术水平和国际竞争力具有深远的意义。

在 H 型钢的生产过程中,不同类型金属材料在轧制过程中都面临变形和尺寸精度控制的挑战,但由于材料特性不同,这些挑战的具体表现和应对措施并不相同。张春光等^[13]基于有限元软件模拟分析 $\Phi 24$ mm 高速线材双机架减径轧制过程,通过调整轧辊转速来改变张力,发现张力对尺寸精度的影响显著;尹元德等^[14]借助有限元模拟软件分析 X10CrNiTi18 不锈钢管的自动轧制过程,发现采用三段式圆弧孔型可显著改善钢管的横向壁厚精度;田敬刚^[15]为了提高冷轧带尺寸的控制精度,通过实验研究工作辊交叉 (work roll cross, WRC) 和工作辊移位 (work roll shift, WRS) 对带钢形状的影响,发现综合考虑 WRC、WRS、压下量、带材宽度和轧制速度,有利于提高带材的尺寸精度和质量;Gontarz 等^[16]

通过研究径向轧制环形锻件工艺参数对其尺寸精度控制的影响,发现提高主轧辊进给速度会增加锻件横截面的高度变化,而预成型温度的升高有利于减小锻件的最终高度和变形;Safronov 等^[17]通过分析厚度为 1.0~8.0 mm、宽度为 1 000~1 500 mm 的冷轧和热轧金属板 V 形弯曲过程中的线性尺寸精度,发现开发由热轧板材制成的产品时,板材的公称厚度与平均厚度接近有利于提高产品线性尺寸的对称精度;Takashima 等^[18]通过模拟分析腹板和翼缘在通过轧辊间隙后的厚度变化,研究腹板与翼缘之间的横向流动行为,发现轧制条件对横向流动比有一定的影响。综上可看出,关于轧制产品尺寸精度控制的研究主要集中在高速线材、不锈钢管、冷轧带、环形锻件和板材等类型金属材料,对于 H 型钢产品的尺寸精度控制研究主要集中于万能轧制过程中腹板厚度变化方面,对于异形孔开坯轧制腹板厚度变化的关注较少。鉴于此,以 900 mm \times 510 mm \times 130 mm 规格的异形坯为研究对象,采用有限元软件 MARC/SuperForm 对 H 型钢的开坯轧制过程进行模拟,分析腹板厚度的变化规律及其影响因素,以期开坯轧制规程优化与坯料尺寸精度控制提供理论参考。

1 有限元模型的建立

选取某钢厂生产厚重 H 型钢采用的坯料为研究对象,坯料尺寸为 900 mm \times 510 mm \times 130 mm,如图 1。对于开坯轧制,主要采用 1 对上下水平辊,并采用箱型孔与异形孔(对应标注 A 孔、B 孔)相结合的孔型系统,孔型尺寸如图 2,开坯规程见表 1。H 型钢生产线采用 1-1-3 轧机布置形式^[19]。

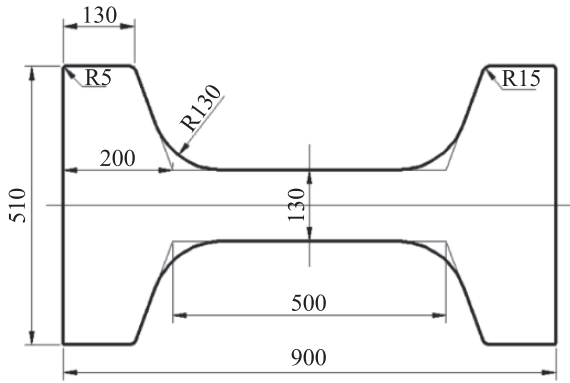
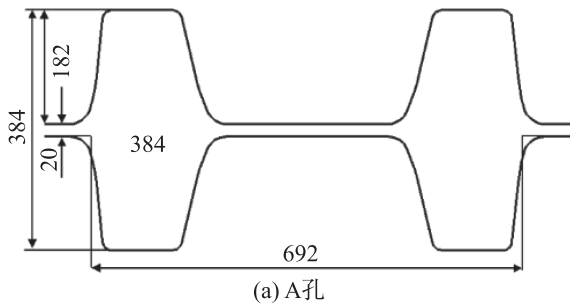
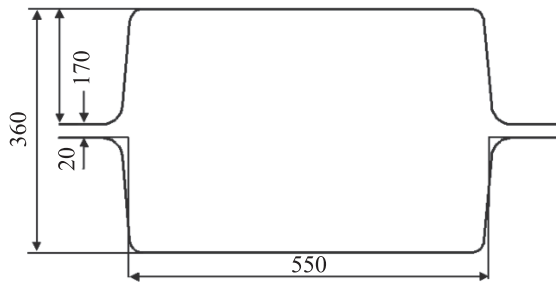


图1 坯料尺寸 单位: mm

Fig. 1 Blank dimension Unit: mm



(a) A孔



(b) B孔

图2 开坯轧制孔型尺寸 单位: mm

Fig. 2 Pass size for roughing rolling Unit: mm

表 1 开坯轧制规程

Tab. 1 Roughing rolling schedule

道次	孔型	辊缝/mm	孔型		轧制速度/ (m/s)
			高度/mm	宽度/mm	
0	—	—	510	900	—
1	B	500	840	510	3
2	B	440	780	510	3
3	B	370	710	510	3
4	B	340	680	510	3
5	A	110	474	694	4
6	A	95	459	694	4
7	B	335	675	554	3
8	A	86	450	694	4
9	A	80	444	694	4

由于轧件是对称的,为简化计算,取轧件的 1/2 进行模拟。材料模型取自材料库中的 C22 碳素结构

钢,设置坯料长度为 2 000 mm,坯料网格划分数为 19 600 个,1/2 轧件的有限元模型如图 3。

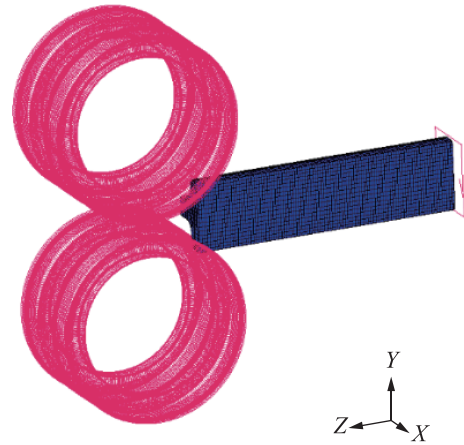


图3 1/2 轧件的有限元模型

Fig. 3 Finite element model for half of the workpiece

根据实际生产情况设置模型参数,将轧辊视为恒温刚性体,设置轧辊温度为 300 ℃、环境温度为 30 ℃、坯料初始温度为 1 200 ℃、轧辊接触传热系数为 15 kW·m⁻²·K⁻¹。两轧辊的旋转速度相同,轧制方向为+Z 方向。采用库仑摩擦模型,摩擦系数为 0.4。为尽可能地模拟真实情况,考虑到道次间的空冷,设定空冷时间为上道次实际轧制时间减去模型轧制时间,再加上翻钢空冷时长 5 s(不翻钢为 3 s)。空冷阶段的换热由辐射换热和对流换热两部分组成,根据文献 [20],采用式 (1) 计算空冷换热系数。

$$h = 2.25(T_w - T_c)^{0.25} + 4.6 \times 10^{-8}(T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c) \quad (1)$$

式中: T_w 为 H 型钢温度; T_c 为环境温度。根据式 (1) 计算得到 H 型钢在空气中的换热系数,结果如表 2。

表 2 不同温度下的换热系数

Tab. 2 Heat transfer coefficient at different temperatures

温度/℃	换热系数/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)
1 200	155.51
1 100	131.71
1 000	110.91
900	92.90
800	77.49
700	64.47

2 模拟结果与分析

2.1 异形孔轧制变形区出口处腹板增厚分析

通过对某钢厂现有开坯轧制规程进行模拟仿真,发现轧后腹板厚度不同程度地大于辊缝设定的厚度,且发生在变形区的出口附近。

2.1.1 腹板厚度的变化特征

图 4 为规程所有道次异形孔轧制过程中腹板中

间位置的厚度变化情况。从图 4 可知: 坯料进入变形区前, 腹板增厚较小或者保持不变; 进入变形区, 在轧辊作用下厚度逐渐减小, 在变形区出口位置厚度达最小。但是, 在变形区的很短时间内, 腹板会出现不同程度的增厚: 开坯轧制最后一道次(第 9 道次)腹板厚度的增厚量达到 8.4 mm, 即开坯轧制后供万能精轧的中间坯腹板厚度较设计厚度偏大 8.4 mm。

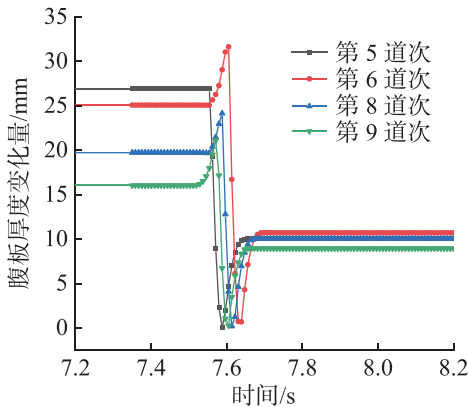


图 4 异形孔轧制过程中腹板的厚度变化

Fig. 4 The variation of web thickness during the rolling process of profiled holes

异形孔变形区出口处腹板增厚与轧件在变形区前后的受力变化有关, 变形区出口处腹板的受力情况如图 5。图中, σ_x 轴为宽度方向, σ_y 轴为厚度方向, σ_z 轴为轧制方向。由图 5 可看出: 在变形区, 腹板金属在厚度方向承受轧辊压力, 由于宽展受阻, 在宽度方向会承受横向压力; 同时由于腹板的延伸量大于翼缘, 腹板在轧制方向会受到额外的压力, 故变形区中的腹板金属三向受压。轧件离开变形区时, 如图 5(b), 轧辊的压力和横向阻力会逐渐消失, 然而翼缘对腹板施加的轧向压力并不会立即消失, 腹板仍然受到轧向压应力的作用, 导致腹板厚度继续增厚。由此可看出: 异形孔轧制变形区出口处腹板增厚是由于轧件在变形区前后的受力变化引起的, 增厚程度依赖于翼缘对腹板施加的轧向压应力、腹板原始厚度及其变形抗力。

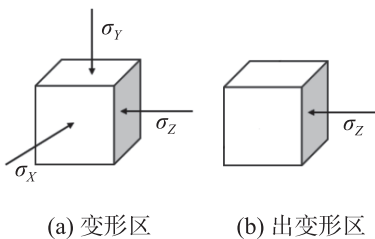
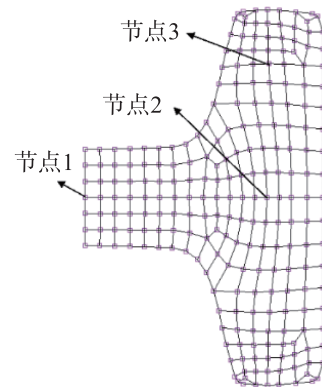


图 5 腹板的受力情况

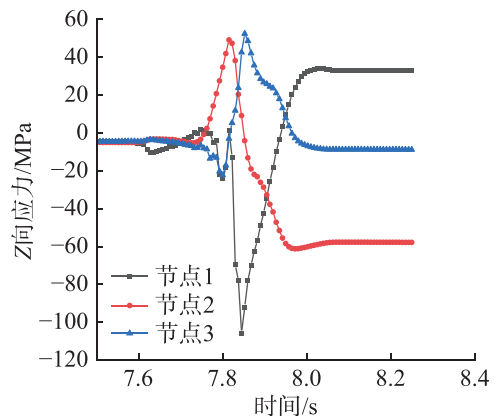
Fig. 5 Stress condition of the web

上述分析表明, 异形孔轧制过程中腹板和翼缘的延伸不一致是轧后腹板增厚的根本原因。轧制过

程中, 由于腹板和翼缘的延伸率不同, 产生了 Z 向轧制方向的应力变化。图 6 为腹板中心节点 1、翼缘中心节点 2 以及翼缘端部中心节点在 Z 向应力变化的模拟结果。由图 6 可看出: 轧制过程中, 腹板的延伸率大于翼缘, 这是由于 H 型钢是 1 个整体, 腹板的伸长受到翼缘的限制, 从而在腹板内部形成压缩应力, Z 向应力最大达 105.7 MPa; 同时, 翼缘也受到腹板的拉伸作用, 在翼缘内部形成了拉伸应力, Z 向应力最大达到 52.4 MPa。轧件离开变形区后, 轧辊不再作用于腹板和翼缘, 但翼缘对腹板的压缩应力、腹板对翼缘的拉伸应力不会立即消失。腹板上的压应力使腹板增厚, 且随腹板厚度的增加, 腹板 Z 向压应力和翼缘 Z 向拉应力逐渐减小, 最终导致腹板 Z 向承受 33.0 MPa 的拉应力, 翼缘 Z 向承受 57.7 MPa 的压应力, 2 个内力最终自相平衡地存在于轧件内的残余应力。



(a) 节点的选择



(b) 节点 Z 向应力变化

图 6 选取的节点及节点 Z 向应力变化

Fig. 6 The selected nodes and the variation of their Z-directional stress

表 3 为异形孔各道次轧制后腹板厚度的变化以及腹板和翼缘的理论延伸系数。从表 3 可看出: 开坯轧制过程中, 由于异形孔轧制的特点, 腹板的延伸率通常大于翼缘, 变形区出口处腹板厚度的增厚量

与腹板和翼缘的延伸率差异显著相关,差异越大,腹板在变形区后的增厚量越大。腹板和翼缘延伸率的差异主要受压下量和腹板厚度的影响。

表 3 异形孔道次变形参数

Tab. 3 Pass deformation parameters for shaped grooves

道次	孔型	腹板厚度/mm		延伸率		腹板增厚/mm
		设定	模拟	腹板	翼缘	
5	A	110	119.8	1.268	1.100	9.8
6	A	95	105.6	1.242	1.020	10.6
8	A	86	95.7	1.215	1.018	9.7
9	A	80	88.4	1.180	1.009	8.4

图 7 为理论延伸系数的计算示意图。图中 S_{A1} 和 S_{A2} 分别为轧制前腹板和翼缘的断面面积。根据规程调整异形孔辊缝间隙,计算此辊缝间隙下腹板和翼缘的断面面积。假设腹板和翼缘的断面面积分别为 S_{B1} 和 S_{B2} ,则腹板的理论延伸系数为 S_{A1}/S_{B1} ,翼缘的理论延伸系数为 S_{A2}/S_{B2} 。

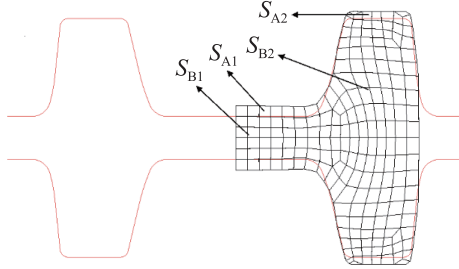


图 7 延伸系数计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of elongation coefficient calculation

2.1.2 延伸率的差异特征

通过调整异形孔轧辊间隙可调整轧辊对腹板的压下量,从而改变轧件腹板和翼缘延伸率的差异,但此过程中腹板厚度是变化的。结合上述规程发现,第 5 道次为异形孔轧制的第 1 道次,腹板初始厚度较大,以第 5 道次尺寸 676.1 mm×524.4 mm×136.5 mm 的异形坯为研究对象,通过改变异形孔孔型高度从而改变腹板和翼缘延伸率差异,模拟分析辊缝间隙不变的情况下,腹板和翼缘延伸率差异对腹板增厚的影响。将异形孔孔型高度由 364 mm 调整为 349, 379 mm,辊缝间隙为 110 mm,其余按照表 1 规程进行轧制。表 4 为第 5 道次轧制,不同孔型高度下腹板和翼缘延伸率差异对腹板增厚的影响。图 8 为第 5 道次不同孔型高度下,轧制过程中腹板中间位置厚度的变化情况。结合表 4 和图 8 可知:孔缝间隙不变即腹板厚度不变情况下,通过改变异形孔型高度即改变翼缘压下量,可改变腹板和翼缘延伸率的差异,差异越大,腹板增厚程度越大。

表 4 第 5 道次不同孔型高度下的变形参数

Tab. 4 Deformation parameters under different groove heights in the 5th pass

孔型高度/mm	孔缝间隙/mm	腹板模拟厚度/mm	延伸系数		延伸率差异	腹板增厚/mm
			腹板	翼缘		
349	110	117.6	1.268	1.121	0.147	7.6
364	110	119.8	1.268	1.100	0.168	9.8
379	110	122.4	1.355	1.062	0.206	12.4

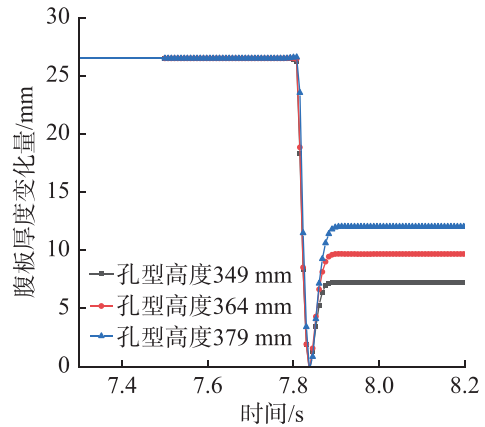


图 8 腹板厚度变化情况

Fig. 8 Change in web thickness

2.2 开坯轧制规程优化

由上述分析发现,腹板增厚受到压下量的影响,压下量越大,腹板和翼缘延伸率的差异越大。原规程经最后一道次异形孔轧制后腹板的厚度相较于设定的厚度偏大 8.4 mm,为降低腹板出变形区厚度的增加量,改变原规程压下量的分配,使开坯轧制最后 1 道次异形坯腹板压下量降低,从而减小腹板和翼缘延伸率的差异。表 5 为优化的开坯轧制规程。

表 5 优化的开坯轧制规程

Tab. 5 Optimized roughing rolling schedule

道次	孔型	辊缝/mm	孔型		轧制速度/(m/s)
			高度/mm	宽度/mm	
0	—	—	510	900	—
1	B	500	840	510	3
2	B	440	780	510	3
3	B	370	710	510	3
4	B	340	680	510	3
5	A	96	460	694	4
6	A	86	450	694	4
7	B	335	675	454	3
8	A	82	446	694	4
9	A	80	444	694	4

由表 5 可看出:原轧制规程中压下量分配主要发生在异形孔轧制,且第 5, 6 道次辊缝间隙较小,分

别为 96, 86 mm; 相较于原规程第 8 道次的辊缝间隙 (86 mm), 优化后的轧制规程中第 8 道次辊缝间隙 (82 mm) 有所减小, 且压下量有所降低; 开坯轧制最后一道次 (第 9 道次) 的腹板压下量相较于原规程

更低, 腹板和翼缘延伸率的差异更小。

经优化的开坯轧制规程中, 最大轧制压力接近 750 000 kg, 完全在粗轧机承载能力范围内, 满足轧制需求。优化轧制规程的 9 道次变形参数如表 6。

表 6 优化规程的 9 道次变形参数

Tab. 6 Deformation parameters of the optimized 9-pass schedule

道次	孔型	高度/mm		宽度/mm		腹板厚度/mm	
		规程	模拟	规程	模拟	设定	模拟
0	—	900	—	510	—	130	—
1	B	840	836.9	510	524.7	130	131.6
2	B	780	777.2	510	529.8	130	133.2
3	B	710	705.8	510	531.8	130	136.2
4	B	680	679.1	510	532.3	130	136.5
5	A	680	690.7	460	456.4	96	109.3
6	A	680	695.4	450	450.0	86	96.0
7	B	670	673.0	450	451.6	86	96.4
8	A	680	680.4	446	445.8	82	88.7
9	A	680	681.2	444	444.0	80	83.7

综合分析表 3, 6 可知: 原开坯轧制规程最后一道次轧前腹板厚度为 95.7 mm, 实际压下量为 15.7 mm, 腹板增厚量为 8.4 mm; 规程优化后, 最后一道次轧前腹板厚度为 88.7 mm, 实际压下量为 8.7 mm, 轧制结束腹板增厚量为 3.7 mm, 增厚量减小了 4.7 mm。由此表明, 通过优化规程可显著改善腹板厚度的控制, 开坯轧制的尺寸精度得到有效提高。

3 结论

利用有限元分析软件 MARC/SuperForm 对 H 型钢开坯轧制规程进行模拟, 分析轧制过程中腹板增厚行为及其影响因素, 在此基础上优化开坯轧制规程, 得出以下主要结论:

1) 开坯轧制后腹板的厚度在变形区出口附近显著增加, 根本原因在于异形孔轧制中腹板与翼缘的延伸不一致。开坯轧制结束腹板厚度增加量达 8.4 mm, 尺寸精度控制不佳。

2) 异形孔轧制过程中腹板的延伸率大于翼缘, 压下量越大, 腹板和翼缘的延伸率差异越大, 轧件出变形区后, 腹板的增厚程度增大。

3) 通过调整异形孔压下量分配优化开坯轧制规程, 降低开坯轧制最后一道次的腹板厚度压下量, 从而减小腹板和翼缘的延伸率差异, 最终可使腹板在变形区出口的增厚量减小至 3.7 mm, 显著提高了腹板部位的尺寸精度。

参考文献:

- [1] 程鼎, 吴保桥, 夏勳, 等. 中国重型热轧 H 型钢的开发和应用现状 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(7):21-23.
CHENG D, WU B Q, XIA M, et al. Development and application status of heavy type hot-rolled H-beam in China[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(7):21-23.
- [2] LIU Y C, HUANG F, CAO Y H, et al. Development and performance evaluation of a novel anti-friction agent for H-beam extraction in soil mixing walls[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89:109298.
- [3] WU C, XIAO Q M, ZHU D P. Piezoelectric ceramic sensor-based structural health monitoring of diagonally braced H-shaped steel structures[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 14964.
- [4] WANG J Y, LI G J, WEI L Y, et al. Investigation on thermal characteristics of walking reheating furnace for beam blank[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 128:105646.
- [5] 奚铁, 钱奕峰, 章静. H 型钢开坯轧制变形分析 [J]. 轧钢, 2004, 21(6):47-49.
XI T, QIAN Y F, ZHANG J. Deformation analysis of breakdown rolling of H-beam[J]. Steel Rolling, 2004, 21(6): 47-49.
- [6] 晶晶. H 型钢开坯轧制工艺研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
JING J. Research on the Blooming Rolling Process of H-beam Steel[D]. Beijing: University of Science and

- Technology Beijing, 2024.
- [7] 张桂营. 坯料尺寸对热轧 H 型钢生产的影响 [J]. 轧钢, 2023, 40(1):130-134.
ZHANG G Y. Effect of billet size on hot rolled H-beam production[J]. Steel Rolling, 2023, 40(1):130-134.
- [8] 袁鹏举, 张勤河, 袁伟祎. H 型钢变形量与奥氏体组织演变研究 [J]. 钢铁研究, 2017, 45(1):43-46,54.
YUAN P J, ZHANG Q H, YUAN W Y. Research on deformation and austenitic structure evolution for H-beam steel[J]. Research on Iron and Steel, 2017, 45(1):43-46,54.
- [9] WANG P Q, ZHANG Q H, DONG B T, et al. Finite element simulation of large H-beam in X-H rolling process[J]. Advanced Materials Research, 2012, 569: 251-255.
- [10] 陈沅, 郭利宏, 席红岩, 等. 包钢采用万能孔型法轧制槽型轨工艺研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(2): 117-120.
CHEN Y, GUO L H, XI H Y, et al. Research on grooved rail technology by universal rolling method in Baotou Steel[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021, 40(2):117-120.
- [11] 杨宝, 李亚博, 李洪俊, 等. 大跨径拼装 H 型钢叠合梁桥孔群制作精度控制技术 [J]. 建筑技术, 2024, 55(1):35-37.
YANG B, LI Y B, LI H J, et al. Precision control technique for holes of large-span assembled H-beam composite bridge[J]. Architecture Technology, 2024, 55(1):35-37.
- [12] 石雷, 张丽娜, 肖克勇, 等. 热轧 H 型钢翼缘斜度控制方法及措施 [J]. 中国冶金, 2021, 31(4):74-76.
SHI L, ZHANG L N, XIAO K Y, et al. Control method and measure of flange inclination of hot-rolled H-beam steel[J]. China Metallurgy, 2021, 31(4):74-76.
- [13] 张春光, 杨霄, 陈林, 等. 大规格高速线材双机架减定径轧制变形分析及张力对尺寸精度的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28(8):127-132.
ZHANG C G, YANG X, CHEN L, et al. Deformation analysis and effect of tension on dimensional accuracy of large-size high-speed wire rod during two-stand reducing and sizing rolling[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(8):127-132.
- [14] 尹元德, 汪婷, 王纯凯, 等. 自动轧管横向壁厚精度研究 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(9):981-990.
YIN Y D, WANG T, WANG C K, et al. Study on transverse wall thickness accuracy of tube rolled by automatic plug mill[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(9): 981-990.
- [15] 田敬刚. 冷轧带材尺寸精度的影响因素研究 [J]. 冶金设备, 2021(3):21-24.
TIAN J G. Study on influencing factors of dimensional precision of cold-rolled strip[J]. Metallurgical Equipment, 2021(3):21-24.
- [16] GONTARZ A, SURDACKI P, MICHALCZYK J. Research the dimensional accuracy of C45 steel ring forgings produced by radial rolling[J]. Materials, 2023, 17(1):3.
- [17] SAFRONOV E, NOSKO A. Analysis of linear dimension accuracy of sheet metal bending[J]. MATEC Web of Conferences, 2021, 346:01007.
- [18] TAKASHIMA Y, YANAGIMOTO J. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling[J]. Steel Research International, 2011, 82(10): 1240-1247.
- [19] 张文满, 谢石峰, 王李生, 等. 马钢新建重型 H 型钢生产工艺特点研究 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2023, 33(1):1-3.
ZHANG W M, XIE S F, WANG L S, et al. Characteristics of the production process of ma steel's new heavy-duty H-beam[J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2023, 33(1):1-3.
- [20] RAIĆ K T, POPOVIC Z V. Modification of the finite difference method applied to transfer phenomena in heat treating[J]. Journal of Heat Treating, 1990, 8(1):71-73.

责任编辑:何莉