

首钢高表面质量高强度汽车大梁钢的开发

阳代军, 方 圆, 杜 倩, 赵运堂

(首钢技术研究院, 北京 100043)

摘 要:根据汽车大梁钢的要求,采用低碳的成分设计和高温加热、高温轧制及低温卷取的工艺思想,控制钢板表面的氧化铁皮结构,开发出了高表面质量的高强大梁钢,关键氧化物 Fe_3O_4 含量达到 75%以上。该大梁钢的性能稳定、表面质量好。

关键词:汽车大梁钢;表面质量;氧化铁皮

中图分类号: TG335.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2013)02-0046-04

Development of Shougang High Surface Quality and High Strength Automobile Beam Steel

YANG Daijun, FANG Yuan, DU Qian, ZHAO Yuntang

(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: Shougang high surface quality and high strength automobile beam steel was developed by low carbon composition design, and control technology of iron oxide scale, including high heating temperature, high rolling temperature and low coiling temperature. The microstructure of iron oxide scale was controlled. The Fe_3O_4 oxides content of automobile beam steel can reach above 75%. Because of stable performance and high surface quality, the high strength automobile beam steel was widely recognized.

Key words: automobile beam steel; surface quality; iron oxide scale

汽车大梁钢高强度是汽车工业的发展趋势,采用高强汽车大梁可以降低汽车自重,在不增加汽车自重的条件下增加汽车的有效载荷,这有利于节约资源和保护环境。研究表明,钢板厚度分别减少 0.05、0.10、0.15 mm,车身就能减重 6%、12%、18%,而车辆每减轻其总质量的 10%,燃油消耗量可降低 6%~8%。因此在保证汽车整体强度和使用可靠性的前提下,车辆车身的轻量化,能降低车辆的油耗,提高车辆的续航能力;对载货车来说,减轻自重还可提高有效载质量,从而提高运输效率,降低运输成本。

汽车大梁钢主要用于制造各类汽车车架的横梁和纵梁等结构件,厚度一般为 4.0~8.0 mm,是汽车结构钢板中需求量大、性能指标要求较高的钢种。目前我国中、重型汽车的大梁主要采用双梁结构,钢板以 510 MPa 钢板为主,也有部分载货车采用 8 mm 的 590 MPa 钢板制造主梁,5 mm 的 510 MPa 钢板制造衬梁。随着重型车的发展,现有强度级别钢板已

不能满足汽车用钢板的需要。

随着汽车工业的发展,采用高强度汽车大梁,降低汽车自重和节约资源,同时汽车厂要求大梁钢具有优良的表面质量,满足减酸洗或免酸洗的要求,减少汽车大梁生产过程对环境的影响,因此为了适应汽车工业的需要,首钢在汽车大梁钢的开发和推广应用方面进行了大量细致的工作,提出了在低碳高锰的基础上添加 Nb、V、Ti 微合金进行强韧化处理的成分设计思想,开展汽车大梁钢在轧制过程中氧化铁皮产生规律的研究,通过控制轧制和控制冷却工艺参数,提出了一种环保型高表面质量高强度汽车大梁钢的生产方法,达到节能减排、保护环境和发展低碳经济的目的。

1 高强汽车大梁钢的成分设计

1.1 汽车大梁钢基本要求

汽车大梁钢作为汽车用热轧钢板的代表,用于载重汽车车架的纵梁和横梁,应满足如下要求:

(1) 由于汽车承载能力要求,汽车大梁用钢要求有足够抗拉强度、屈服强度,为适应批量的生产方式,要求钢卷头、中、尾性能差异小。

收稿日期:2012-06-18

作者简介:阳代军(1968-),男,湖北公安人,教授级高级工程师,主要研究方向为先进薄板产品开发和轧制工艺技术的研究;
电话:13522599051; E-mail: ydj@shougang.com.cn

(2) 载重汽车的横梁和纵梁都是冲压或滚压成形,部分纵梁和横梁在加工过程中变形比较复杂,因此对汽车梁用钢的延伸和冷弯性能的要求较严格。

(3) 载重汽车在行驶过程中,由于道路颠簸的原因,要求大梁钢具有高的疲劳强度和长的疲劳寿命,因此要求大梁钢钢质纯净,夹杂和有害元素含量要低。

(4) 为满足汽车零件尺寸精度的要求,汽车大梁钢板尺寸公差一般要求较严,对板形和钢板残余应力也有特殊要求。

(5) 大梁钢表面粗糙度对油漆质量有较大影响,为保证油漆后表面光洁,要求钢板表面氧化铁皮薄而且尽量均匀、避免钢板表面的划伤、凹坑和折纹等缺陷。

(6) 一些挂车和改装车的梁板需要焊接组装,要求汽车梁板的可焊性要好,焊缝和热影响区强度和韧性不能有明显降低。

1.2 S610L 汽车大梁钢的成分设计

目前,汽车制造厂正在推广使用的高强汽车大梁钢主要为 S610L,因此为了满足汽车大梁的使用性能,汽车大梁钢的成分和工艺设计的主要思想是:

- (1) 将碳含量控制在 0.09%左右,以减少钢中珠光体量、增加铁素体量,提高钢板的冷成形性,采用 Nb、V、Ti 复合微合金化,对钢板实行严格地控轧控冷,获得综合性能高的高强度大梁钢。
- (2) 为了提高汽车大梁钢的表面质量,控制钢板表面的氧化铁皮结构,对钢中的 Si 含量进行了控制。
- (3) 控制钢水的 S、P 等有害元素,提高钢水的纯净度,通过 Ca 处理改变硫化物的形态,以改善钢板的横向冷弯性能。

(4) 实行不同的控轧控冷工艺和合理的成分设计,获得高的表面质量和板形要求的大梁钢。

因此 S610L 高强度汽车大梁钢的成分设计如表 1 所示。

表 1 汽车大梁钢 S610L 的成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of S610L automobile frame steel (wt%)

牌号	C≤	Si≤	Si≤	P≤	S≤	Alt≥	Nb+V+Ti≤	N≤
S610L	0.11	0.10	1.70	0.015	0.005	0.020	0.13	0.005

2 汽车大梁钢的表面氧化铁皮控制技术

节能减排、保护环境和发展低碳经济的是世界

经济发展的重要课题,随着汽车工业的发展,采用高强度汽车大梁,降低汽车自重和节约资源,同时汽车厂要求大梁钢具有优良的表面质量,满足减酸洗或免酸洗的要求,减少汽车大梁生产过程对环境的影响。因此要开展汽车大梁钢表面氧化铁皮控制技术的研究。

2.1 红色氧化铁皮产生的机理分析

图 1 为高 Si 钢红色氧化铁皮形成原因分析图。可看出,在 Si 含量较高的钢中,由于 Si 的扩散能力较强,在加热炉中长时间加热过程中会在氧化铁皮层和基体之间形成铁橄榄石 (Fe_2SiO_4), Fe_2SiO_4 在低于 1170℃ 以上时以液态形式出现,加速基体的氧化,温度低于 1170℃ 时会与基体紧密结合在一起。 Fe_2SiO_4 在轧制过程中不发生变形,围绕 Fe_2SiO_4 的塑性良好的 FeO 发生较大程度的变形。

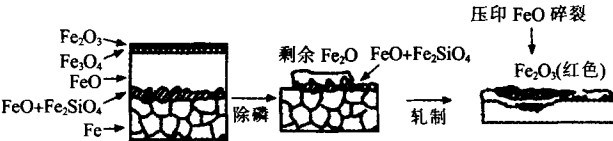


图 1 高 Si 钢红色氧化铁皮形成原因分析图
Fig.1 Mechanism of red scale formation of high Si steel

图 2 所示,在 1178℃ 时,热平衡状态为 $\text{FeO} + \text{液态 } \text{Fe}_2\text{SiO}_4$, 液态 Fe_2SiO_4 将 FeO 晶粒包围住,形成 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 的共析产物。凝固后,形成类似锚状形貌,将 FeO 层定扎住,使 FeO 很难在除鳞中完全被除掉。热轧过程中, FeO 层发生破碎,使其暴露在空气中的面积大大增加;由于 Fe 离子供应不足,外层 O 的供应量过剩,加速 FeO 转变为 Fe_2SiO_4 后,再转变为 Fe_2O_3 。

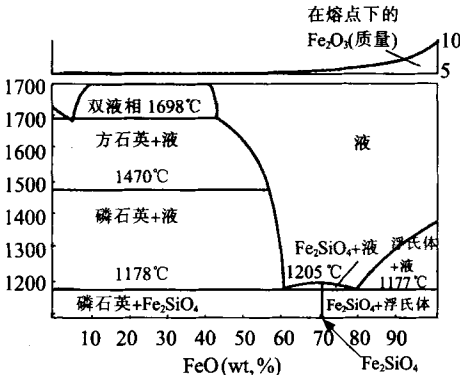


图 2 $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ 相图
Fig.2 $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ phase diagram

在高温下,低 Si 钢板氧化铁皮结构为 $1\text{Fe}_2\text{O}_3:4\text{Fe}_3\text{O}_4:95\text{FeO}$,在热轧过程中, FeO 层发生破碎,使

其暴露在空气中的面积大大增加。由于 Fe 离子供应不足,外层 O 的供应量过剩,加速 FeO 转变为 Fe_3O_4 后再转变为 Fe_2O_3 ,如图 3 所示。

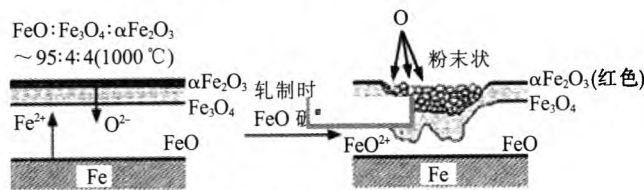


图 3 低 Si 钢红色氧化铁皮形成原因
Fig.3 Mechanism of red scale formation in low Si steel

FeO 层可分为密实层和疏松层, Si 偏析于 FeO 的密实层和疏松层界面之间。在高温氧化时, 钢中的 Si 为选择性氧化, 在 FeO(方铁石)与铁质的界面上形成 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (铁橄榄石), 因为铁橄榄石熔点低 (1170°C), 形成熔融状态后便会以楔形侵入鳞与铁质中, 这样鳞与铁质界面就形成了错综复杂的特殊结构的鳞层。FeO 与基体之间形成 Fe_2SiO_4 -FeO 共析产物, FeO 与共析产物之间存在较大的空洞。可能是一次除鳞不净造成的或者除鳞温度偏低, 导致 Fe_2SiO_4 压入基体, 钉扎部分氧化亚铁在室温转变为红色氧化铁皮。有资料显示, 含 Si 量大于 0.2% 的钢进行热轧时, 完全防止麻点的产生是极度困难的。

因此, 要完全去除红色氧化铁皮, 必须保证在除鳞过程中去除残留的 FeO 层, 则必然要求完全去除 Fe_2SiO_4 , 因此一般出炉后除鳞点温度要在 1173°C 之上 $10\sim 20^\circ\text{C}$; 另一方面, 精轧前 FeO 残留和精轧过程中 FeO 破碎是产生红色氧化铁皮的直接原因, 应加大精轧前高压水除鳞压力, 降低精轧入口温度, 适当提高终轧温度, 适当降低卷取温度。

2.2 卷取过程中的共析反应

利用热重分析仪, 根据氧化铁皮结构的变化规律得出了 S610L 大梁钢 FeO 的等温转变曲线, 如图 4 所示。热轧板表面氧化铁皮的结构在 $570\sim 1370^\circ\text{C}$ 时

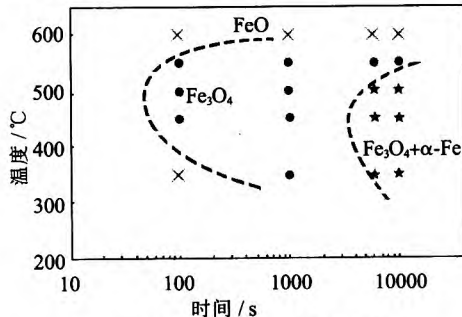


图 4 FeO 的等温转变曲线
Fig.4 The isothermal transformation diagram of FeO

是稳定的。随着温度的下降, 当冷却到 570°C 以下时, 氧化铁皮中的 FeO 层发生共析反应, 生成片层状的 Fe_3O_4 和 Fe 的混合物, 即 $4\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ 。当氧化的时间足够长, 共析反应转变完全后, 氧化铁皮的结构就转变成最外层仍旧是 Fe_2O_3 层, 中间层是 Fe_3O_4 层, 最内层已经完全转变成片层状的 Fe_3O_4 和 Fe 的混合物。

在 $450\sim 550^\circ\text{C}$ 进行等温保持时, 处于 FeO 向 Fe_3O_4 转变的“鼻尖”温度范围, 对于生产氧化铁皮中 Fe_3O_4 含量较高的“免酸洗”钢是有利的。

2.3 氧化铁皮的控制技术要点

根据热轧时氧化铁皮的演变特点, 氧化铁皮的控制技术要点是: 在热轧过程中, 优化除鳞工艺以彻底去除炉生和二次氧化铁皮、优化热轧温度制度以避免 FeO 的破碎、优化轧制节奏以降低氧化铁皮厚度。在卷取过程中, 根据实际需要设定卷取温度, 以控制 FeO 的共析反应 ($4\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$), 即: 需要减酸洗钢板 (FeO 含量较高) 时, 卷取过程中应制定抑制共析反应的卷取工艺; 需要免酸洗钢板 (Fe_3O_4 含量较高) 时, 卷取过程中应制定促进共析反应的相应工艺, 如图 5 所示。

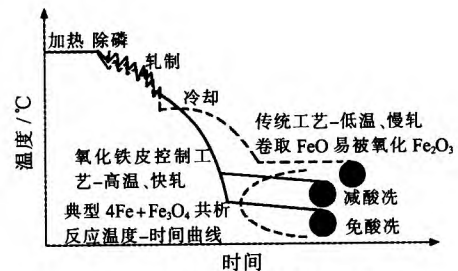


图 5 氧化铁皮的控制技术要点
Fig.5 The key control points of iron oxide scales

采用氧化铁皮控制技术, 在不增加成本的前提下可降低铁皮厚度至 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 。冷轧原料钢板氧化铁皮结构改变、厚度减薄之后, 冷轧酸洗机组酸洗速度可提高 20%。

3 氧化铁皮结构的分析

首钢 S610L 高强度汽车大梁钢由于性能稳定、表面质量好, 得到了国内用户的认可。

图 6 为 S610L 汽车大梁钢在国内某重型卡车上的应用情况。

汽车大梁钢典型的氧化铁皮结构如图 7 所示, 由化学式的理想化学配比可知, Fe_2O_3 中的氧占

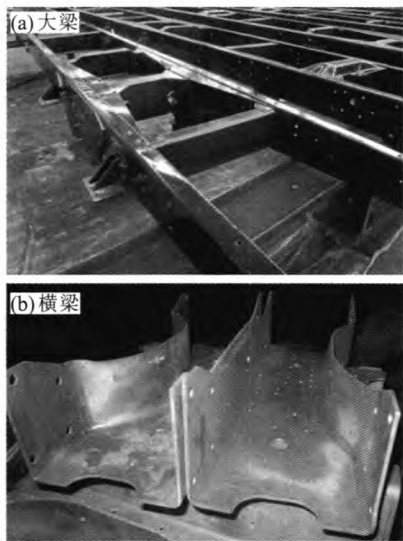


图 6 汽车大梁钢 S610L 在国内某重型卡车上的应用情况
Fig.6 Applications of S610L automobile beam steel in the heavy-duty lorry

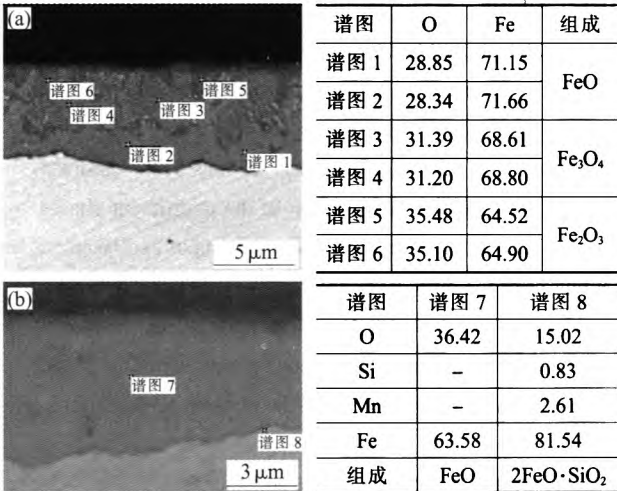


图 7 典型氧化铁皮结构的分析(质量分数,%)
Fig.7 Analysis of typical structure of iron oxide scales (wt%)

30%、铁占 70%,Fe₃O₄ 中的氧占 27.6%、铁占 72.4%, FeO 中的氧占 22.2%、铁占 77.8%。因此由图 7 可知氧化铁皮中包括 Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeO 和 Fe 四种相,其中 Fe₃O₄ 主要位于氧化铁皮的中间层,比较致密,含量最多,达 60%~80%;Fe₂O₃ 主要位于氧化铁皮的外层,含量为 7%~17%之间;FeO 是靠近金属的最内层,具有最低的含氧量,主要是共析反应不完全的残留相,且一般较为疏松;Fe 主要来源于 FeO 的共析反应,形态在 SEM 照片中呈现亮白色片状或颗粒状。

由图 7(b)可知,靠近基体的氧化铁皮中含有 Si,这是因为高温氧化时,钢中的 Si 为选择性氧化,在 FeO 与铁质的界面上形成 2FeO·SiO₂(铁橄榄石)。因为铁橄榄石熔点低(1170℃),形成熔融状态后便会

以楔形侵入鳞与铁质中,这样,鳞与铁质界面就形成了错综复杂的特殊结构的鳞层,使氧化铁皮附着力强,难以去除。如果去除不尽,严重时将导致剩余红锈及铁皮坑的形成。

4 工艺参数对表面氧化铁皮的影响

汽车大梁钢表面的氧化铁皮的结构和厚度直接影响到汽车大梁钢的酸洗质量和效果,因此分析了工艺参数对氧化铁皮的影响。

4.1 卷取温度对表面氧化铁皮的影响

表 2 为卷取温度由 600℃降为 550℃时,氧化铁皮厚度的变化。由表知,上下表面氧化铁皮的厚度均下降。因而降低卷取温度有利于减薄氧化铁皮厚度,并且卷取温度降低,氧化铁皮中的 Fe₃O₄ 含量持续增加,Fe₂O₃ 含量降低,FeO 含量基本保持稳定。

表 2 卷取温度对氧化铁皮的影响
Tab.2 The influence of coiling temperature on iron oxide scales

卷取温度 /℃	部位	氧化铁皮结构 (wt%)				氧化铁皮厚度 /μm
		Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe	
600	上表面	70.3	11.1	7.0	11.6	8.97
	下表面	73.8	11.1	8.5	6.6	10.8
550	上表面	77.9	9.8	6.2	6.1	6.45
	下表面	76.0	8.5	8.3	7.2	8.56

4.2 终轧温度对表面氧化铁皮的影响

表 3 为终轧温度由 880℃降为 840℃时,氧化铁皮厚度的变化。由表可知,上下表面氧化铁皮的厚度均有不同程度下降,且氧化铁皮中 Fe 含量有增加的迹象,说明降低终轧温度有加速 FeO 的共析反应的趋势。

表 3 终轧温度对氧化铁皮的影响
Tab.3 The influence of finishing temperature on iron oxide scales

终轧温度 /℃	部位	氧化铁皮结构 (wt%)				氧化铁皮厚度 /μm
		Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe	
880	上表面	77.9	9.8	6.2	6.1	6.45
	下表面	76.0	8.5	8.3	7.2	8.56
840	上表面	66.4	11.5	6.5	15.6	5.71
	下表面	70.9	10.3	3.9	14.9	7.58

4.3 冷却模式对表面氧化铁皮的影响

表 4 为冷却模式对表面氧化铁皮的影响。可知,两段冷却的氧化铁皮更厚,这是因为采用两段冷之间的空冷阶段使钢带暴露在高温区 (下转第 53 页)

和 Nb 的含量较低,可推测“2”处由 Nbss 转变而来,而“3”处由 Cr_2Nb 转变而来,证实了在氧化过程中 Nbss 和 Cr_2Nb 中各元素发生了互扩散。

3 结论

(1) Nb-Ti-Si-Cr 基超高温合金在 1250 ℃ 氧化不同时间所形成的氧化膜具有明显分层的现象:致密的外层和较为疏松的内层。外层主要氧化产物为 $\text{Ti}_{0.4}\text{Cr}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{O}_2$, 中间层主要氧化产物为 Nb_2O_5 、(Ti, Cr)NbO₄ 和 $\text{Ti}_2\text{Nb}_{10}\text{O}_{29}$ 。

(2) 富集 Ti 和 Cr 的氧化产物主要存在于氧化膜外层,而 Nb_2O_5 主要富集在氧化膜中间层,其原因为 Ti 和 Cr,更易向外扩散并优先氧化。

(3) 氧化后,内氧化区中 Nbss 和 Cr_2Nb 发生互扩散,两者成分分布发生变化,界面处出现过渡区。

参考文献:

- [1] Bewlay B P, Jackson M R, Lipsitt H A. The balance of mechanical and environmental properties of a niobium-niobium silicide-based in situ composite [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, A27(12):3801-3807.
- [2] Bewlay B P, Jackson M R, Zhao J C, et al. A review of

very-high-temperature Nb-silicide-based in situ composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2003, A34(10):2043-2052.

- [3] 金文中,张庆丰,李廷举,等. 旋转电磁搅拌对 K417 高温合金母合金锭质量的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(3):22-25.
- [4] Bewlay B P, Yang Y, Casye R L, et al. Experimental study of the liquid-solid phase equilibria at the metal-rich region of the Nb-Cr-Si system[J]. Intermetallics, 2009, 17(3):120-127.
- [5] Yang Y, Bewlay B P, Chen S L, et al. Application of phase diagram calculations to development of new ultra-high temperature structural materials[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(6):1396-1404.
- [6] Tang L, Ma C L, Zhao X P. Effect of Cr on microstructure and fracture toughness of Nb-20Ti-16Si-xCr alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(suppl.3):8-11.
- [7] Grammenos I, Tsakirooulos P. Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf based alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(2):242-253.
- [8] Murakami T, Sasaki S, Ichikawa K, et al. Oxidation resistance of powder compacts of the Nb-Si-Cr system and $\text{Nb}_3\text{Si}_2\text{Al}_2$ matrix compacts prepared by spark plasma sintering [J]. Intermetallics, 2001, 9(7):629-635.
- [9] 沙江波. 铌硅基超高温合金研究进展 [J]. 航空制造技术, 2010, 14:58-61.
- [10] 郭金明,郭喜平,宋曙光. Nb-Ti-Si 基多元合金在 1250 ℃ 下的氧化行为[J]. 金属学报, 2008, 44(5):574-578. 

(上接第 49 页)的时间延长所致。且从氧化铁皮的结构上来看,两段冷却中 Fe_3O_4 含量基本一致。

表 4 冷却模式对氧化铁皮的影响

Tab.4 The influence of cooling mode on iron oxide scales

冷却模式	部位	氧化铁皮结构 (wt%)				氧化铁皮厚度 / μm
		Fe_3O_4	Fe_2O_3	FeO	Fe	
前段快冷	上表面	77.9	9.8	6.2	6.1	6.45
	下表面	76.0	8.5	8.3	7.2	8.56
两段冷却	上表面	74.9	6.3	6.3	12.5	8.73
	下表面	79.1	8.9	4.6	7.4	10.09

5 小结

(1) 根据首钢热连轧的特点,采用低碳、低硅的成分设计和高温加热、高温轧制、低温卷取的工艺思想,控制钢板表面的氧化铁皮结构,成功地开发出了高表面质量高强度汽车大梁钢,其关键氧化物 Fe_3O_4 的含量达 75%以上。

(2) 首钢生产的汽车大梁钢表面氧化铁皮厚度为 6~11 μm , 表面氧化铁皮中均包括 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、

FeO 和 Fe 四种相,一般上表面比下表面的氧化铁皮略厚, Fe_2O_3 主要分布在氧化铁皮的表面, FeO 主要分布在氧化铁皮的内层, Fe_3O_4 比较致密, 主要位于氧化铁皮的中间层, 含量最多。

(3) 提高终轧温度, 降低卷取温度以及采用前段集中快速冷却可有效增加 Fe_3O_4 的含量和获得合理的氧化铁皮厚度。

参考文献:

- [1] 阳代军,朱立新,王自亭,等. 环保型高表面质量免酸洗汽车大梁钢的生产方法[P]. 中国专利:201010235928X, 2010-07-22.
- [2] 张继魁,辛莹,张曼曼,等. 汽车大梁用低合金高强度钢板的性能与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2004, (6):42-50.
- [3] 王松涛,李敏,朱立新,等. Si 含量对热轧板卷表面红色氧化铁皮的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16):50-52.
- [4] 姚泽雄. 微合金低碳高强度钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.
- [5] Tomoki F, Hikaru O, Yasuhiro M. Mechanism of steel sheets red scale defect formation in Si-added hot-rolled [J]. ISIJ International, 1994, 34(11):906-911. 