非均匀温度场中熔体结晶作用与科马提岩结构成因

谭 劲 赵珊茸 莫宣学

(中国地质大学,武汉)

摘 要 具有重要岩石学和构造学意义的科马提岩,最吸引人同时又最令人困惑的特征之一是它的鬣刺结构和分层构造。本文从喷出地表的岩浆冷凝时温度分布、熔体性质与结晶作用的密切联系,把科马提岩浆喷发形成的岩流作为一个冷凝整体。通过与金属铸锭浇注成形和矿石冶炼生产的比较,发现它们在冷凝固结过程中温度场特征、熔体的性质、结晶能力和结晶方式都有十分相似的特点,并以此为出发点详细解析了科马提岩的鬣刺结构和岩石分层构造的形成过程。

关键词 科马提岩 温度分布 冷凝单元 结晶 鬣刺结构 铸锭

科马提岩(komatiite)在产出时代、岩石成分和结构构造等方面均为非常引人注目的一种岩石。它对于认识太古代火山作用、早期地球状态和地球物质发展演化具有十分重要的意义。然而,关于这类岩石的成因和结构等问题尚未完全解决,其自身最具有代表性的两个问题,一是岩石的成因,二是鬣刺结构及分层构造的形成。80年代随着热地幔柱成因模式的提出和完善,第一个问题得到了较好的回答[1],而第二个问题一直是人们十分关注的方面。以下就这个问题,通过与实际工业生产中金属铸锭及冶炼产品对比分析,从它们的熔体性质、温度分布特征和结晶方式的相似性,作一较详细讨论。

1 科马提岩冷凝单元内部结构特征

绝大多数太古代科马提岩都是呈较薄的岩流产出的。对于这些岩流在地表的冷凝固结应该合理地作为一个整体的冷凝单元来进行考虑。岩流冷凝单元内部不同部位在结构、矿物成分和其它方面都是有变化的,并且与该单元的总成分有关[2]。在本文,注意力主要集中于具代表性的 $w_{MgO}>20\%$ 的橄榄质科马提岩冷凝单元上。

科马提岩的冷凝单元,是指一次科马提岩浆喷出地表后岩流冷却凝固形成的具有顶底两个淬冷边以及具有按规律变化内部结构特征的岩流冷凝整体。

1973年,Pyke 等对 Munro 地区具有鬣刺结构的科马提岩流详细地质填图过程中,检查了许多横切冷凝单元的完整剖面,并描述了结构变化的综合模式图(图1)[2]。为了描述方便并根据内部结构特点,我们将冷凝单元进一步细分为:顶部淬冷层、鬣刺结构层、堆晶层和底部淬冷

收稿日期:1994-06-18

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层等4个层。需要注意的是产地不同，冷凝单元的总厚度有不同变化，从0.5～30m，一般以5～15m为主，但是各结构层的厚度比例比较稳定，大致为1∶10∶15∶0.8[2]。

顶部淬冷层 在岩流的顶层，为岩浆淬冷成的玻璃质层，含少量橄榄石斑晶(<5%)，具有细小的显微鬣刺结构。

鬣刺结构层 位于岩流顶层的下部，该层靠上位置是无定向的鬣刺结构部位；靠下位置是平行排列的近于垂直岩流顶层面的橄榄石巨大晶体形成的定向鬣刺结构部位，橄榄石单晶厚为0.1～2mm，长度大于30mm，有的可达0.5m。大橄榄石晶体之间为各种形状的骸晶辉石和玻璃。

堆晶层 主要由中到细粒的橄榄石组成，为等粒状和半自形，颗粒大小为0.3～0.8mm。其次含有细长的叶片状橄榄石。

底部淬冷层 岩流的底层大部分固结成玻璃，其特征与顶部的淬冷层极为相似，但厚度较小。

以上科马提岩冷凝单元内部结构特征与岩石化学特征结合起来，是野外和室内正确判别科马提岩的重要依据，而鬣刺结构又是鉴定科马提岩最关键的标志。

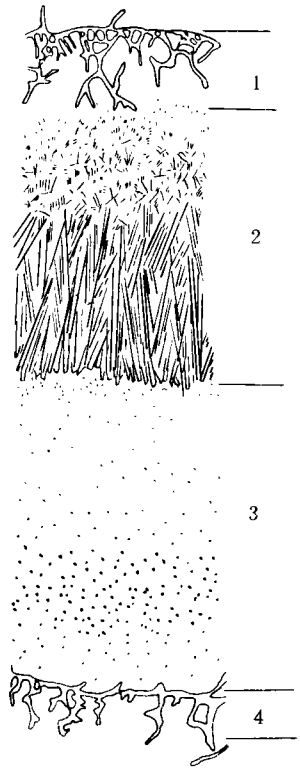


图1 科马提岩冷凝单元中的结构变化[2]

1. 顶部淬冷层；2. 鬣刺结构层；3. 堆晶层；4. 底部淬冷层

2 实际生产中铸锭和冶炼产物与科马提岩内部结构的对比

在实际生产中，低粘度结晶能力强的熔体在成形加工或冶炼过程，常形成不均匀的内部结构，与科马提岩冷凝单元极为相似。从这些熔体的性质和在非均匀温度场中结晶行为的可比拟性来看，它们是自然界科马提岩浆冷凝结晶很好的实验模拟再现。

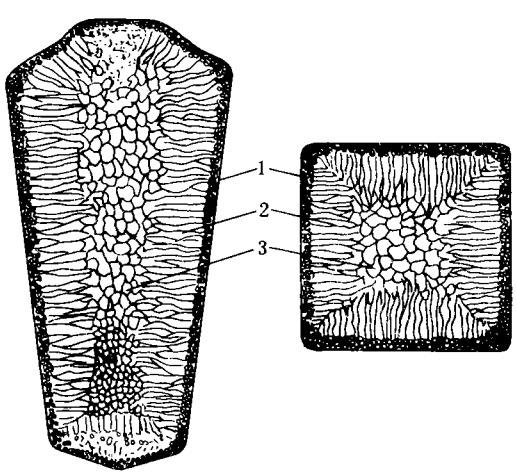


图2 钢铸锭三晶区结构示意图[3]

1. 表面细晶粒层；2. 柱状晶层；3. 心部等粒晶区

2.1 金属铸锭的生产及其内部结构

工业上金属铸件是在一定几何形状和尺寸大小的铸模中，浇注金属熔体冷凝固结而成。铸锭是其中一种形状简单的铸件。根据浇注、传热和冷却速率等条件的变化，物质结晶方式也不同，可以产生形态、粗细和分布不同的铸锭结构。金属铸锭的结构一般是比较粗大的，经适度化学腐蚀，可见表层的细晶区，往内变为柱状晶区，中部为等轴粒状晶区(图2)[3]。其表层细晶区为许多随机分布的细密的晶粒晶核，相当于科马提岩的顶底淬冷层。柱状晶区是由较粗大的垂直于模壁定向排布的柱状晶体组成，各柱状晶的延伸沿一定结晶学方位，该区相当于科马提岩的鬣刺结构层。铸锭中部为等轴粒状晶区，由许多较粗的粒状晶体

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组成，相当于科马提岩的堆晶层。

金属熔体在冷模中浇注，熔体与模子间很容易出现陡斜的温度梯度[4]，从模壁四周向熔体中心定向冷却，而散热方向恰好相反。其特征与科马提岩流由顶底界面向内定向冷却时的温度分布十分相似，并且它们的熔体性质也很相似，因此形成了十分类似的内部结构。不过金属熔体是一种比科马提岩浆粘度更低、结晶能力更强的熔体，很难形成金属玻璃（金属熔体需要在大于 10^6℃/s 的极高冷却速率才可形成玻璃），因此铸锭是全晶质的；而且由于对流作用，在结晶过程中重力分异作用较弱。工业上通过控制温度场分布，可以改变铸锭三种晶区结构的相对厚度、晶形和粒度以获取特殊性能材料。

2.2 冶炼产物及其内部结构

敞口式简易冶炼罐中，冶炼镍矿石的产物往往形成上部的硅酸盐层和下部的金属层[5]。其上部的硅酸盐层的成分与超基性岩的成分很接近，因此提供了一个在大容器中进行硅酸盐熔体冷凝结晶的极好实例。这种情形要比在实验室里进行的坩埚实验更加接近自然界岩浆冷凝结晶。冶炼罐上部的硅酸盐，用肉眼或显微镜皆可看出分为两层，其顶层为淬火鬣刺层，其下层为粒状堆晶层[5]。淬火鬣刺层厚约 8mm，由长柱状和针状橄榄石、辉石晶体组成，晶体长达 1.8～4mm，含量为 70%，其余为玻璃和隐晶质。粒状堆晶层厚约 7mm，以它形、半自形橄榄石、辉石为主，晶粒为 0.3～0.8mm。

3 科马提岩浆性质及其地表冷凝时温度分布

3.1 科马提岩浆性质

实验和计算都表明，超镁铁质熔体具有高温、高密度而粘度低的特点[6]。温度一般为 1400～1700℃，而 MgO 含量为 30%的熔体温度超过 1650℃。在地表条件，科马提岩浆近液相线温度时的密度为 2.7～3.0g/cm^3。实验研究认为科马提岩浆的粘度在 0.01～1Pa·s，一般认为在 1400～1600℃之间温度时，岩浆的粘度为 0.1～0.5Pa·s[6]。

科马提岩浆很低的粘度不仅使得岩浆易于流动和分离结晶，而且使得岩流表面趋于平整，有利于冷凝以近水平推移的方式从顶底向内部冷却，这是岩石结构层状分布的前提。低粘度又为晶体快速生长提供了条件。在理想状态，熔体中晶体生长线速度和成核速率都正相关于：$\exp(c \cdot Q/kT)/\eta$，其中 c 为常数；Q 为扩散活化能；k 为玻尔兹曼常数；T 为温度；η 为粘度[7,8]。那么即使在其它条件相同的情形下，科马提岩浆由于很低的粘度，结晶能力要比其它岩浆强许多。例如比普通玄武岩浆（η 为 5～100Pa·s）的结晶能力高几个数量级。从熔体结构角度来看，镁含量高是科马提岩浆高温低粘度的内在因素。镁是一个强的相容元素，随 SiO_2 增加，MgO 迅速减少。镁离子很容易进入矿物晶格位置，并且很稳定，因此使得岩浆易于结晶[9]。

3.2 科马提岩浆在地表冷凝时的温度分布

当科马提岩浆喷出地表时，岩流的顶底界面上产生了很高的温度梯度，从傅里叶热传导定律可知，必然会导致快速的热传导，故岩浆的冷却速率很大，要比玄武质岩浆冷得快些。迅速地传热冷却，致使岩流表面与内部形成了一个陡的温度分布，使得岩流具有明显定向冷凝结晶的特点。这与工业上铸造铸件时的情形极为相似。

硅酸盐矿物的平均结晶潜热约为 $\Delta H_m = 223.8$kJ/mol，约为铁的四倍；而岩石的平均热导率 $k = 1.7$W/m·K，约为铁的 1/45[9]。随着强烈的冷凝结晶作用，会有大量的硅酸盐矿物结晶潜热释放出来，而岩石的热导率又低，最终导致了岩流顶层和底层附近结晶部位温度回升，这

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

样岩流的温度分布不是单调地改变，出现了较为复杂的温度场(图 3)。这种温度分布特征应该是岩流在地表条件下冷却结晶时的共性，只是科马提岩流尤为突出。夏威夷熔岩湖不同深度温度变化的实测资料就证实了这一点[10]。由于科马提岩流的易流动性和热晶体沉降堆积，使得岩流底层温度保持较高状态，故温度分布曲线不对称。

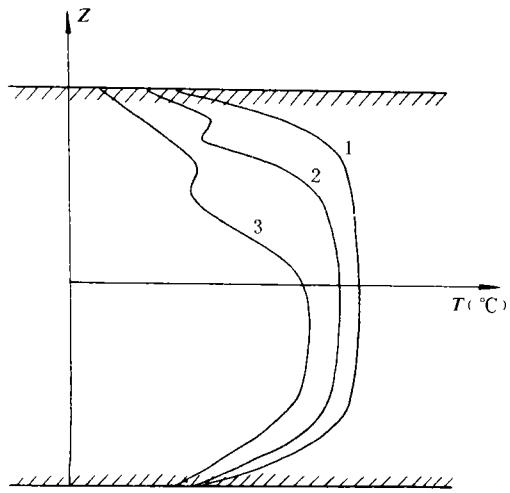


图 3　科马提岩岩流的温度分布及其随时间的变化
(T 为液相线温度，时间 $t_3>t_2>t_1$)

4　冷凝单元内部结构的形成

结晶作用包括两个基本的过程，即形成晶核和晶体长大。一般来说成核速率最大值所对应的过冷度要比晶体生长最大速度值所对应的过冷度要大些，也就是说较大的过冷度有利于成核，而较小的过冷度有利于生长。

科马提岩浆喷出地表初期，岩流的顶底两界面与环境造成了极大的过冷度，超出了结晶作用的有效区间，只有较弱的成核，使岩流边部淬冷成玻璃质和隐晶质结构，形成了冷凝单元中的顶部和底部淬冷层。

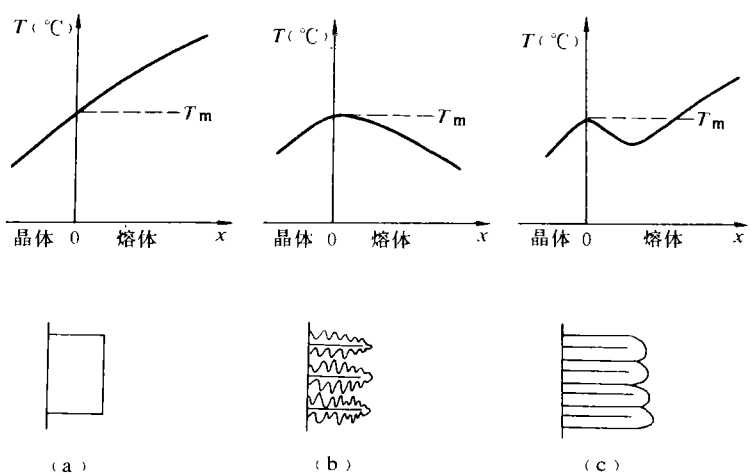


图 4　温度分布与晶体生长方式的关系(T_m 为液相线温度)
(据闵乃本，1982，修改)

温度分布对晶体生长界面的稳定性和生长方式影响很大。从晶体生长与温度分布的关系来分析(图 4)，第一种温度分布形式(图 4-a)，熔体的温度梯度为正，晶体生长是稳定的，并以平界面方式生长；第二种分布形式(图 4-b)，熔体温度梯度为负，晶体生长是不稳定的，并以枝晶方式生长；第三种温度分布(图 4-c)，熔体中温度不是单调地改变，而是有一个凹槽，温度梯度从负又变到正，晶体的生长也是稳定的，但以胞状界面方式生长(cellular interface

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

growth)[4,7]。

科马提岩流随着向熔体内部冷凝固结作用的进行，过冷度也随之降低，逐渐达到结晶能力最强的阶段。成核速率和晶体生长速率都很大，此时形成了鬣刺结构层上部的无定向鬣刺结构部分。岩流中强烈的结晶产生了大量结晶潜热，使得该处温度局部升高，形成了如图 3(t_2,t_3)的温度分布，与图 4-c 的形式类似。局部温度升高也使得该处过冷度降低，成核作用变弱，而晶体生长加速。在凹槽型温度分布和结晶动力学因素控制下，橄榄石沿着〔100〕和〔001〕方向择优生长，使表面能最小，传热最快。由于沿垂直岩流顶层的方向散热最快，所以只有那些主枝与岩流顶层近于垂直的晶体能够向熔体纵深生长，从而形成了粗大的垂直于岩流顶层的密集平行排列的胞板状晶区，即冷凝单元中最为突出醒目的平行板状鬣刺结构层。

科马提岩浆的粘度仅为 0.01～1Pa·s，结晶出来的矿物沉降速度比在其它岩浆中同等粒级的要快得多。从适合非牛顿型流体的 Stokes 公式来考虑[11]：

$$u_c = 2g \cdot \Delta\rho[r - 15\sigma_0/(4g \cdot \Delta\rho)]/9\eta$$

其中：u_c 为颗粒沉降速度；g 为重力加速度；$\Delta\rho$ 为密度差；r 为颗粒半径；σ_0 为熔体屈服强度。科马提岩浆喷出时斑晶含量一般少于 5%[2]，而岩浆屈服强度 σ_0 与晶体体积分数 x 的关系为 $\sigma_0 = kx^3$。对于科马提岩浆，我们可以合理地设取 $x = 4\%$，$k = 3000\text{N/m}^2$，橄榄石密度 $\rho_2 = 3.4\text{g/cm}^2$，岩浆密度 $\rho_1 = 2.9\text{g/cm}^3$。得出不同粒级的橄榄石晶体在一定粘度范围内科马提岩浆中的沉降速度，如表 1 所示。

表 1　不同粒级的橄榄石在一定粘度范围科马提岩浆中的沉降速度(mm/s)

岩浆粘度(Pa·s) / 橄榄石粒度(mm)	0.1	0.5	1
0.3	1.666	0.333	0.166
0.5	3.844	0.769	0.384
1.0	9.288	1.858	0.929

注：橄榄石发生下沉的临界半径为 $r^* = 0.147\text{mm}$

计算结果使人深信，科马提岩流中结晶分异作用效率十分强大。粗大的鬣刺板状橄榄石是被固定在顶部早先冷凝结晶的层上，一般不会脱落下沉，只有在其生长前沿形成的小晶体当长大到下沉临界半径为 0.147mm 时，立即迅速下沉。沉降的橄榄石进入熔体内部较高温度区，晶体则以平界面方式缓慢生长，在下部进一步堆积形成中细粒的等轴粒状半自形橄榄石堆晶层。

橄榄石的快速沉降作用，加上岩浆在中底部的流动，致使岩流底部维持较高温度，晶体在底部不能象顶部一样快速生长而形成鬣刺结构层，结果导致了冷凝单元内部结构不如金属铸锭那样对称。随着岩浆结晶作用的进行，当垂直向下生长的板状晶体前沿与下部的堆晶层相接触时，岩浆结晶作用随之结束，这样最终形成了科马提岩流冷凝单元的完整内部结构。

5　认识

岩浆作用过程是十分复杂而又不能再现的一个过程。通过科马提岩冷凝单元内部结构、冷凝结晶条件与实际生产中的金属铸锭内部结构、成形工艺以及矿石冶炼的详细对比研究，发现它们在熔体性质、结晶能力和冷凝结晶时温度分布条件极为相似。可以认为科马提岩结构的成

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因得到了某种程度的实验证明。

科马提岩浆喷出地表后，它们应该是在一个相互联系的冷凝结晶整体过程中形成了自己独特的结构和分层构造。科马提岩浆的高温低粘度和强结晶能力起着决定作用，在非均匀温度场中受着结晶动力学因素控制，由表及里定向冷凝结晶，形成了淬冷层、鬣刺结构层和堆晶层这样一个冷凝单元的内部结构。

参 考 文 献

1 Campbell I H et al. Melting in an Archean mantle plume: heads it's basalts, tails it's komatiite. *Nature*, 1989, 339(6226): 697－699

2 Arndt N T, Nisbet E G. 科马提岩. 北京：地质出版社，1982，163－186

3 史美堂. 金属材料及热处理. 上海：上海科学技术出版社，1980，11－15

4 李 超. 金属学原理. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1989，38－63，202－206

5 傅德彬. 红旗岭镍矿冶炼炉渣中鬣刺结构的发现及其意义. 吉林地质，1987，(2)：75－78

6 刘继顺，肖禧砥. 科马提岩研究的新进展. 地质科技情报，1991，10：1－6

7 闵乃本. 晶体生长的物理基础. 上海：上海科技出版社，1982，189－233，339－441

8 饶东生. 硅酸盐物理化学. 北京：冶金工业出版社，1980，57－76

9 姚允斌等. 物理化学手册. 上海：上海科学技术出版社，1985，585－588，1030－1036

10 邱家骥. 岩浆岩岩石学. 北京：地质出版社，1985，6－12

11 马昌前. 结晶分异作用的岩浆动力学条件. 地球科学，1989，14(3)：245－251

MELT CRYSTALLIZATION AND THE TEXTURE FORMATION OF KOMATIITE IN HETEROGENEOUS TEMPERATURE FIELD

Tan Jin　Zhao Shanrong　Mo Xuanxue

(*China University of Geosciences, Wuhan*)

Abstract　Komatiite is of great petrological and tectonic significance. Its most interesting and striking characteristic is the spinifex texture and the layer structure in composition. In this paper, the complex cooling process of komatiite magma as a whole of cooling unit after eruption has been analysed. The analysis is based on the temperature profile, magma characteristics and its crystallization. Comparison with metal casting reveals that the formation process of the spinifex texture and the layer structure in komatiite is very similar to that of the cooling units in metal casting.

Key words　komatiite, temperature profile, cooling units, crystallization, spinifex texture, melt casting

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net